Справочник

Н.Ф.ТИЩЕНКО

Охрана атмосферного воздуха.

Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе

МОСКВА
«ХИМИЯ»
1991

ББК 6П7.1
Т479
УДК 697.941

Рецензент канд. техн. наук *Яковлев В. С.*

Тищенко Н. Ф.

Т479 Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе. Справ. изд. — М.: Химия, 1991. — 368 с., ил.
ISBN 5—7245—0425—1

Приведены расчетные методы определения вредных веществ, поступающих в окружающую среду через неплотности в оборудовании, при отборе проб, открытом хранении сырья а также от воздушек аппаратов; рассмотрены методы расчета распределения выделяющихся вредных веществ в системах местной и общеобменной вентиляции, а также методы расчета эффективности работы местных отсосов при загрязнении воздушных потоков пылевыми и газообразными вредными веществами. Особое внимание уделено определению концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе на рабочем месте

Предназначена для инженерно-технических работников предприятий, проектных и научно-исследовательских институтов, занимающихся вопросами инвентаризации пылевых и газовых выбросов, проектированием систем вентиляции, установлением предельно допустимых выбросов (ПДВ), разработкой новых технологических процессов и оборудования, а также вопросами охраны труда и защиты атмосферного воздуха; может быть полезна преподавателям вузов и студентам соответствующих специальностей

$\text{Т}\ \frac{2801000000-173}{050(01)-91}\ 98-90$ ББК 6П7.1

ISBN 5-7245-0425-1

© Н. Ф. Тищенко, 1991

Оглавление

Предисловие 7

Введение 8

Глава 1. Параметры состояния воздушной среды 11

1.1. Нормируемые параметры наружной среды 11
1.2. Определение основных свойств наружной и внутренней среды 13
1.3. Примеры расчета основных параметров среды 16

Глава 2. Расчет количества вредных веществ, поступающих в воздух из газового и жидкостного объема трубопроводов и оборудования 28

2.1. Физико-химические основы и методы определения количества вредных веществ, поступающих в наружную среду . . . 28
2.2. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух из газового объема трубопроводов и оборудования 29
2.2.1. Расчет количества вредных веществ, поступающих из газового объема трубопроводов и оборудования, находящихся под давлением 29
2.2.2. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при «большом дыхании» аппарата . . 39
2.2.3. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при «малом дыхании» аппарата . . . 41
2.2.4. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через щелевой зазор из аппаратов, находящихся под разрежением 44
2.3. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух из жидкостного объема трубопроводов и оборудования 46
2.3.1. Расчет количества вредных веществ, поступающих из трубопроводов и оборудования, находящихся под давлением 46
2.3.2. Расчет количества вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости 49
2.4. Расчет количества вредных веществ, выделяющихся с поверхностей, на которых образуется пленка 59

Глава 3. Расчет количества вредных веществ по удельным показателям 68

3.1. Расчет количества вредных веществ, поступающих от некоторых видов производств 68
3.1.1. Вредные вещества, поступающие в атмосферный воздух от гальванических производств 68
3.1.2. Вредные вещества, выделяющиеся при сварочных работах 75
3.1.3. Вредные вещества, поступающие в атмосферный воздух от участков механической обработки материалов 75
3.1.4 Вредные вещества, поступающие в атмосферный воздух при деревообработке 91
3.2 Расчет количества вредных веществ, выделяющихся при горении топлива различных видов 102
3.2.1 Расчет выбросов твердых частиц 102
3.2.2. Расчет выбросов оксидов серы 102
3.2.3. Расчет выбросов оксида углерода 111
3.2.4. Расчет выбросов диоксида азота 115

3.2.5. Расчет выбросов оксидов ванадия 121
3.3. Расчет выбросов вредных веществ от автотранспорта . . 122

Глава 4. Основные характеристики воздушного потока в производственном помещении 125

4.1. Характеристика турбулентности воздушных потоков производственных помещений 125
4.2. Распределение скоростей воздушных потоков вблизи всасывающих отверстий местных отсосов при механической вентиляции 132
4.2.1. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия прямоугольного сечения (отсос с фланцем или в стене) 132
4.2.2. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия прямоугольного сечения (отсос без фланца) 134
4.2.3. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия круглого сечения (отсос с фланцем) 135
4.2.4. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия круглого сечения (отсос без фланца) 136
4.2.5. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия кольцевого сечения 137
4.2.6. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия зонта 138
4.3. Распределение скоростей воздушных потоков вблизи тепловых источников при естественной вентиляции 141

Глава 5. Распределение вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений 148

5.1. Классификация методов расчета распределения вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений 150
5.2. Расчет эффективности работы местных отсосов при принудительном движении холодного загрязненного воздушного потока 152
5.3. Расчет эффективности работы местных отсосов при естественном движении холодного загрязненного воздушного потока 177
5.4 Расчет эффективности работы местных отсосов при принудительном движении нагретого загрязненного воздушного потока 181
5.5. Расчет эффективности работы местных отсосов при естественном движении нагретого загрязненного воздушного потока 185
5.6. Расчет эффективности работы местных отсосов вблизи тепловых источников при принудительном движении воздушного потока 191
5.7. Расчет эффективности работы местного отсоса над тепловым источником при естественном движении воздушного потока (по удельной теплонапряженности тепловой струи) 204
5.8 Расчет эффективности работы местных отсосов при запыленном газовом потоке 216

Глава 6. Рекомендации по устройству местных отсосов от технологического оборудования 219

6.1. Рекомендации по локализации конвективного тепла от источника, снабженного местным отсосом с естественным побуждением 219
6.2. Рекомендации по конструктивному оформлению местных отсосов 231
6.2.1. Общие рекомендации 231

6.2.2. Вытяжные зонты 234
6.2.3. Вытяжные шкафы 242
6.2.4. Боковые отсосы 244
6.2.5. Бортовые отсосы 246
6.2.6. Отсасывающие панели 256
6.2.7. Нижние отсосы 259

Глава 7. Мероприятия по уменьшению загрязнения атмосферного воздуха 260

7.1. Технологические мероприятия 260
7.2. Архитектурно-планировочные мероприятия 261
7.3. Организация санитарно-защитной зоны 262
7.4. Очистка вредных выбросов в атмосферный воздух . . . 267
7.4.1. Сухая очистка вредных газовых выбросов и ее аппаратурное оформление 268
7.4.2. Абсорбционная очистка газовых выбросов и ее аппаратурное оформление 278
7.4.3. Термическое обезвреживание газовых выбросов и его аппаратурное оформление 290
7.4.4. Адсорбционная очистка газовых выбросов 301
7.4.5. Неприятно пахнущие вредные вещества и методы их обезвреживания 306
7.5. Рассеивание вредных веществ в атмосферном воздухе . . 310
7.5.1. Нормативные документы по расчетам рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе 310
7.5.2. Суммация действия вредных веществ в расчетах рассеивания 314
7.5.3. Фоновая концентрация вредных веществ в расчетах рассеивания 315
7.5.4. Применение ЭВМ при расчетах рассеивания . . . 316
7.6. Предельно допустимый выброс вредных веществ в атмосферу 316

ПРИЛОЖЕНИЯ 319

Приложение I. Физико-химические свойства некоторых веществ 320

Приложение II. Значение степени e^m 336

Приложение III. Зависимости парциальных давлений HCl и H_2O над растворами от концентрации HCl в воде и от температуры 339

Приложение IV. Зависимость парциального давления SO_2 над водными растворами от концентрации и температуры 340

Приложение V. Зависимость концентрации SO_2 от его парциального давления над раствором 341

Приложение VI. Зависимость парциальных давлений HF и H_2O над водными растворами от концентрации и температуры 342

Приложение VII. Зависимости парциальных давлений NH_3 и H_2O над растворами от концентрации NH_3 в воде и от температуры 343

Приложение VIII. Зависимость парциального давления HNO_3 над ее водными растворами от температуры 344

Приложение IX. Зависимость парциального давления водяного пара над 89—98%-ной H_2SO_4 от температуры . . . 345

Приложение X. Зависимость парциального давления водяного пара над 10—95%-ной H_2SO_4 от температуры . . . 346

Приложение XI. Зависимость давлений насыщенного пара для химически чистых веществ от температуры (по В. А. Кирееву) 347

Приложение XII. Зависимость концентрации газового компонента от его молекулярной массы и парциального давления 349

Приложение XIII. Зависимость динамической вязкости некоторых газов от температуры 350

Приложение XIV. Зависимость кинематической вязкости некоторых газов от температуры 351

Приложение XV. Графики для определения поправочных коэффициентов на метеорологические условия (*а*), толщину слоя материала, нанесенного на поверхность оборудования (*б*), и величины $1-e^{-k\tau}$ (*в*) . . . 352

Приложение XVI. Диаграмма концентраций $RO_2(CO_2+SO_2)$ в дымовых газах (*по химическому газоанализатору Орса*) в зависимости от концентраций O_2 и CO для различных видов топлива при их неполном сгорании . . . 353

Приложение XVII. Диаграмма концентраций $RO_2(CO_2+SO_2)$ в дымовых газах (по химическому газоанализатору Орса) в зависимости от коэффициента избытка воздуха α и концентрации O_2 для различных видов топлива при их полном сгорании 354

Приложение XVIII. Зависимость плотности газа от давления и температуры 355

Приложение XIX. Зависимость плотности воздуха от влажности, температуры и давления 356

Приложение XX. Номограмма для определения критерия Рейнольдса 357

Приложение XXI. Номограмма для определения скорости витания пылевых частиц размером до 50—60 мкм 358

Приложение XXII. Номограмма для определения скорости витания пылевых частиц размером от 1 до 500 мкм . 359

Библиографический список 360

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная научно-техническая революция характеризуется бурным развитием промышленности, производства электроэнергии и расширением сферы использования транспорта всех видов. Эти процессы, а также сопровождающая их урбанизация обусловливают возрастающее загрязнение внешней среды, которое достигло такого уровня, что превратилось в одну из важнейших проблем. Решение ее преследует цель — не только сохранить природные ресурсы для дальнейшего экономического и социального развития страны, но прежде всего обеспечить благоприятные санитарные условия жизни населения и предупредить возможное вредное влияние загрязнений внешней среды на здоровье людей.

В мероприятиях, связанных с охраной окружающей среды, особое место занимает защита атмосферного воздуха от загрязнений.

В СССР осуществляется комплекс научно-технических, экономических и социальных мероприятий, направленных на предупреждение и устранение загрязнения атмосферного воздуха.

Огромное внимание партийных и правительственных органов к проблемам, связанным с оздоровлением воздушного бассейна, отражено в Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дополнительных мерах по усилению охраны природы и улучшению использования природных ресурсов» от 1 декабря 1978 г. и Законе СССР «Об охране атмосферного воздуха» от 25 июня 1980 г.; 1 января 1980 г. введен в действие ГОСТ 17.2.3.02-78 «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями».

Целям улучшения работ по охране окружающей среды служит и Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 32 от 7 января 1988 г. «О коренной перестройке дела охраны природы в стране».

Одной из центральных задач является введение действенных экономических рычагов и стимулов для предприятий и организаций, для того чтобы обеспечить комплексное и рациональное использование предоставляемых им природных ресурсов и снизить загрязнение природной среды. На основе научных и проектных проработок регламентирован допустимый выброс загрязняющих веществ для каждого предприятия. За превышение допустимых выбросов загрязняющих веществ в природную среду и аварийное загрязнение с объединений, предприятий и организаций предусмотрено взимание повышенной (в кратном размере по отношению к экономическому нормативу) платы, источником которой является хозрасчетный доход коллектива.

Установление обоснованных нормативов платы за природные ресурсы, а также нормативов платы за выбросы загрязняющих веществ в природную среду требует и обоснованного подхода к определению и распределению количеств выделяющихся вредных веществ от технологического оборудования, трубопроводов и транспорта.

В книге рассмотрены методы определения вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух. Для наиболее характерных случаев приведены примеры расчетов (как по формулам, так и по номограммам). Рассмотрены также мероприятия по локализации и снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду. При анализе распределения вредных веществ между системами местной и общеобменной вентиляции уделено внимание как эффективности работы местного отсоса, так и определению концентрации вредных веществ на рабочем месте.

Приведены рекомендации по устройству местных отсосов и очистке газовых и пылевых выбросов, удаляемых от трубопроводов и технологического оборудования, по снижению загрязнений окружающей среды.

ВВЕДЕНИЕ

В атмосферном воздухе под действием внешних и внутренних факторов постоянно протекают гидродинамические, тепловые, электромагнитные, химические и фотохимические процессы, от которых зависят температура, давление, скорость перемещения и химический состав воздуха.

Необходимость изучения химического состава атмосферного воздуха вызвана тем, что, зная природный состав его, легко установить присутствие посторонних примесей и рассматривать их как ингредиенты, загрязняющие атмосферу.

Природный химический состав атмосферного воздуха (в пересчете на сухой воздух) приведен ниже, % (об.):

Азот	78,084	Криптон	$114 \cdot 10^{-6}$
Кислород	20,9476	Водород	$50 \cdot 10^{-6}$
Пары воды	3—4	Ксенон	$8{,}7 \cdot 10^{-6}$
Аргон	0,934	Озон и др.:	
Диоксид углерода	$3{,}14 \cdot 10^{-2}$	летом	$7{,}0 \cdot 10^{-6}$
Неон	$1{,}818 \cdot 10^{-3}$	зимой	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$
Гелий	$524 \cdot 10^{-6}$		

Атмосферный воздух никогда не бывает абсолютно чистым. Общее количество загрязнений, находящихся постоянно в атмосферном воздухе над планетой, составляет примерно 10 млн. т, что обусловлено как производственной деятельностью человека, так и естественными процессами, протекающими в природе.

Единой классификации источников загрязнения ни в отечественной, ни в зарубежной литературе нет. Имеются предложения классифицировать по отраслевому признаку и по группам предприятий. Но наиболее перспективна классификация, приведенная на рис. 1.1.

Естественное загрязнение атмосферы происходит в результате пыльных бурь, вулканической деятельности, лесных пожаров и т. д.

Источником загрязнения воздуха служит и мировой океан. Мельчайшие брызги воды, поднимаясь над поверхностью моря или океана, довольно быстро испаряются, а растворенные в них соли кальция, магния, натрия, калия и других веществ попадают в атмосферу.

При извержении вулканов в атмосферу вместе с газообразными продуктами выбрасывается большое количество пепла. В состав вулканических газов входят HCl, HF, NH_3, Cl, CO, CO_2, H_2S и др. В атмосферный воздух попадает также космическая пыль из межпланетного пространства.

Искусственное загрязнение атмосферы происходит в результате практической деятельности человека.

До 70% всех загрязнений приходится на долю автомобильного транспорта. Автомобильные выхлопные газы представляют собой смесь примерно 200 веществ. В них содержатся углеводороды, оксид углерода, оксиды азота, альдегиды, обладающие резким запахом и раздражающим действием, и др. Вследствие неполного сгорания в двигателе автомашины часть углеводородов превращается в сажу и в смолистые вещества. Особенно много сажи и смол образуется при технической неисправности мотора и в моменты, когда водитель, форсируя работу двигателя, уменьшает соотношение воздуха и горючего, стремясь получить так называемую «богатую смесь».

Практически во всех отраслях промышленности имеются выбросы вредных веществ в атмосферный воздух. В атмосферу попадают аэрозольные частицы, газообразные вещества и пары (оксиды углерода, серы, азота, сероводород, сероуглерод, углеводороды, кислоты, щелочи, нитриты, нитраты, соединения свинца, железа, фтора, неприятно пахнущие вещества, радиоактивные вещества и др.).

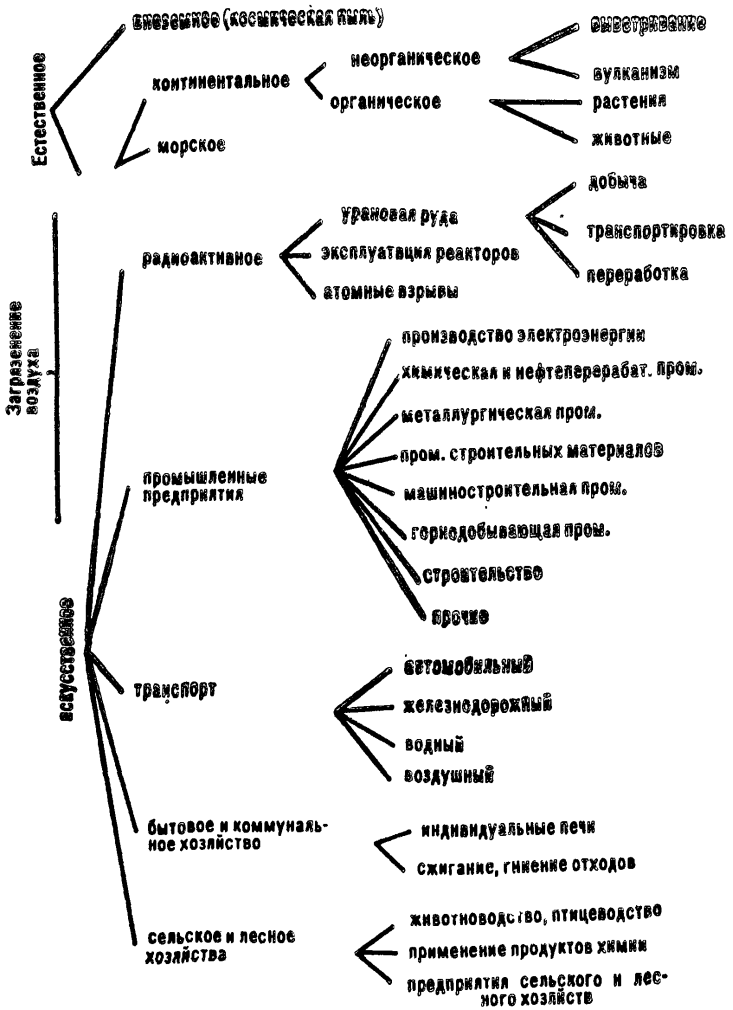


Рис. 1.1. Классификация источников загрязнения воздуха

Атмосферные загрязнения не имеют никаких границ. Испытание ядерного оружия в одной стране вызывает увеличение радиоактивного заражения воздуха в ряде других стран, расположенных от нее на значительном расстоянии и даже на другом континенте. Известно, что пыль может переноситься на расстояние более 6000 км, дальность распространения выбросов промышленных предприятий достигает сотен километров. От загрязнения страдают не только страны — «производители» загрязнения, но и страны-соседи. Например, загрязненный воздух с территории США нередко оказывается над территорией Мексики, загрязнения из ФРГ распространяются на территории Норвегии, Швеции, Дании.

Наиболее существенными источниками поступления вредных веществ в атмосферу в сельском хозяйстве являются предприятия по производству

всех видов удобрений и ядохимикатов. Кроме того, в сельских районах источниками загрязнения воздуха являются животноводческие и птицеводческие фермы, промышленные комплексы по производству и переработке мяса, предприятия по эксплуатации сельхозтехники, энергетические и теплосиловые установки. В местах значительного содержания скота и птицы в атмосферу могут поступать и распространяться на значительные расстояния такие вещества, как аммиак, сероводород и другие вредные газы. К источникам загрязнения атмосферного воздуха относятся также поля, на которые вносятся высокотоксичные пестициды, и склады, в которых они хранятся и происходит протравливание ими семян.

Искусственное загрязнение воздушного бассейна существенно изменяет природный состав атмосферного воздуха.

В результате загрязнения атмосферы изменяются климатические и микроклиматические условия. В загрязненной атмосфере снижается солнечная радиация, видимая ее составляющая до 50%, прямая радиация – до 15% по сравнению с радиацией при незагрязненной атмосфере. Ультрафиолетовая радиация уменьшается на 30%, а, как известно, она характеризуется антибактерицидным действием. Микроклиматические изменения, происходящие в городах и индустриальных центрах, характеризуются увеличением средней температуры воздуха на 2—9 °С, уменьшением видимости, увеличением осадков и облачности, изменением циркуляции воздуха.

Глава 1

ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

1.1. НОРМИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАРУЖНОЙ СРЕДЫ

Температура, влажность и подвижность воздуха. При нормировании параметров воздушной среды в помещениях исходят из так называемого диапазона допустимых параметров. Диапазон допустимых температур определяется нижним допустимым температурным уровнем, служащим для расчета систем отопления, и верхним, обеспечиваемым средствами вентиляции.

Скорость движения, относительная влажность и загрязненность воздуха вредными примесями обычно определяются верхним допустимым уровнем. Параметры воздуха, соответствующие оптимальным и допустимым, зависят от периода года (теплый, холодный и переходный), от тепловой напряженности (по явному теплу) помещения и от тяжести выполняемой в помещении работы.

По тепловой напряженности различают две категории помещений: помещения с незначительными избытками явного тепла (не превышающими или равными 23 Вт/м³ внутреннего объема помещения) и помещения или участки цехов со значительными избытками явного тепла (превышающими 23 Вт/м³). В производственных помещениях высотой более 6 м, оборудованных системами с искусственным побуждением или системами кондиционирования воздуха, удельные избытки явного тепла определяются по отношению к условному объему помещения высотой 6 м.

По тяжести выполняемые работы в соответствии с общими энергозатратами организма разграничены на следующие категории:

I — легкие с энергозатратами до 172 Вт;

II — средней тяжести — IIа — с энергозатратами 172—232 Вт и IIб — с энергозатратами 232—293 Вт;

III — тяжелые с энергозатратами более 293 Вт.

Допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных зданий следует принимать: в теплый период года — по табл. 1.1 и 1.2, для холодного и переходного периодов — по табл. 1.3 (ГОСТ 12.1.005—76). Температура воздуха на постоянных рабочих местах и вне их не должна превышать расчетную температуру наружного воздуха в теплый период года: более чем на 3 °С (в помещениях с избытками явного тепла до 23 Вт/м³) и не более чем на 5 °С (с избытками явного тепла более 23 Вт/м³).

При $t > 25$ °С температура воздуха в рабочей зоне помещения на постоянных рабочих местах при выполнении работ легкой и средней тяжести не должна превышать t более чем на 3 °С; при тяжелой работе — на 1 °С; вне рабочих мест — на 5 °С.

При воздействии на работающих лучистого тепла от приборов отопления или нагретых поверхностей оборудования при интенсивности облучения более 350 Вт/м³ в холодный и переходный периоды года следует принимать более низкую температуру воздуха $t_р$, °С (вместо нормируемой $t_в$), определяемую по формуле

$$t_р = t_в - ka, \qquad (1.1)$$

где k — коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха в помещении $v_в$ следующим образом:

$v_в$, м/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0
k	1,25	1,05	0,9	0,8	0,7	0,6

a — величина, равная 4 °С.

Таблица 1.1. Допустимые нормы температуры t, относительной влажности φ и скорости движения воздуха v для районов с расчетной наружной температурой 25 °С и ниже

Категория работ	t, °С	φ, %	v, м/с, в помещениях с избытками явного тепла, Вт/м³	
			⩽23	>23
I	⩽28	⩽55 при 28 °С	0,2—0,5	0,2—0,5
IIа	⩽28	„	0,2—0,5	0,3—0,7
IIб	⩽28	„	0,3—0,7	0,5—1,0
III	⩽26	⩽65 при 26 °С	0,3—0,7	0,5—1,0

Таблица 1.2. Допустимые нормы температуры t, относительной влажности φ и скорости движения воздуха v для районов с расчетной наружной температурой выше 25 °С

Категория работ	t, °С, в помещениях с избытками явного тепла, Вт/м³		φ, %	v, м/с
	⩽23	>23		
I	⩽31	⩽33	⩽50 при 29—33 °С	0,2—0,5
IIа	⩽31	⩽33	⩽50 при 29—33 °С	0,5 при 28 °С
IIб	⩽30	⩽32	⩽50 при 29—33 °С	0,9 при 28 °С;
III	⩽29	⩽31	⩽50 при 29—33 °С	1,3 при 28 °С

Таблица 1.3. Допустимые нормы температуры t, относительной влажности φ и скорости движения воздуха v в холодный и переходный периоды года

Категория работ	t, °С	φ, %, не более	v, м/с, не более	Температура воздуха вне постоянных рабочих мест
I	19—25	75	0,2	15—26
IIа	17—23	75	0,3	13—24
IIб	15—21	75	0,4	13—24
III	13—19	75	0,5	12—19

Таблица 1.4. Оптимальные нормы температуры t, относительной влажности φ и скорости движения воздуха v в рабочей зоне производственных помещений

Категория работ	t, °С	φ, %	v, м/с	Категория работ	t, °С	φ, %	v, м/с
	Теплый период года				*Холодный и переходный периоды года*		
I	22—25	60—40	0,2	I	20—23	60—40	0,2
IIа	21—23	60—40	0,3	IIа	18—20	60—40	0,2
IIб	20—22	60—40	0,4	IIб	17—19	60—40	0,3
III	18—21	60—40	0,5	III	16—18	60—40	0,3

Оптимальные нормы параметров воздуха внутри помещений устанавливают в соответствии с требованиями к условиям пребывания в помещениях (табл. 1.4).

В производственных помещениях в теплый период года в районах с $t_в > 25$ °С для работ средней тяжести и тяжелых при температуре воздуха ниже или выше 28 °С (но не более указанных) скорость движения воздуха, приведенную в табл. 1.4, следует соответственно понижать или повышать из расчета 0,2 м/с на 1 °С, но не менее 0,3 м/с. При температурах в помещении ниже указанных в таблице допускается повышать относительную влажность воздуха из расчета 5% на 1 °С, но не более чем до 75%.

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны ($ПДК_{р.з}$). Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны — это концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в продолжении 8 ч или при другой длительности, но не превышающей 41 ч в неделю, в течение всего рабочего стажа не могут вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего или последующих поколений.

Предельно допустимую концентрацию вредного вещества в воздухе рабочей зоны на постоянных рабочих местах производственных помещений, а также в цехах опытно-экспериментальных производств принимают по ГОСТ 12.1.005—76.

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе населенных мест ($ПДК_{н.м}$). $ПДК_{н.м}$ вредных веществ в атмосферном воздухе населенных мест — максимальные концентрации, отнесенные к определенному периоду осреднения (30 мин, 24 ч, 1 мес., 1 год) и не оказывающие при регламентированной вероятности их появления ни прямого, ни косвенного вредного воздействия на организм человека, включая отдаленные последствия для настоящего и последующих поколений, не снижающие работоспособности человека и не ухудшающие его самочувствия.

Максимальная кратковременная (разовая) концентрация — наиболее высокая из числа 30-минутных концентраций, зарегистрированных в данной точке за определенный период наблюдения.

Среднесуточная концентрация — средняя из числа концентраций, выявленных в течение суток или отбираемая непрерывно в течение 24 ч.

ПДК вредных веществ в атмосфере населенных мест принимают согласно перечню «Предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест», утвержденному Главным Государственным санитарным врачом СССР.

1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ НАРУЖНОЙ И ВНУТРЕННЕЙ СРЕДЫ

Для расчетов количеств выделяющихся вредных веществ из технологического оборудования в атмосферный воздух необходимо знать основные свойства химических соединений и их смесей.

В Приложении 1 приведены характеристические константы нескольких сотен чистых веществ, которые используются затем для расчета свойств химических соединений и их смесей.

При температуре, отличающейся от 20 °С, плотность жидкости рассчитывается по формуле:

$$\rho_{ж} = \rho_{ож} \frac{1}{1 + \beta_t (T - T_0)}, \qquad (1.2)$$

где β_t — коэффициент температурного расширения, выражающий относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на 1 °С

Коэффициент температурного расширения капельных жидкостей незначителен. Так, для воды при температуре 10—20 °С и давлении 100 кПа

$$\beta_t = 0{,}00015 \ 1/°C. \qquad (1.3)$$

Для практических расчетов количеств вредных веществ, выделяющихся из оборудования и трубопроводов, можно принять (для жидкостей):

$$\rho_{t\,ж} = \rho_{0ж} \qquad (1.4)$$

Плотность газообразных веществ и паров определяют по следующим формулам.

Плотность газа или пара (кг/м³) при $t=0$ °С и $p_0=100$ кПа:

$$\rho_{0г} = M/22{,}4. \qquad (1.5)$$

где M — относительная молекулярная масса вещества, кг/(кг·моль); 22,4 — объем 1 моль газа или пара

Для определения плотности газа или пара при температуре $t\neq0$ °С и давлении $p\neq100$ кПа используют уравнения Клапейрона:

$$\rho_{tг} = \rho_{0г}\frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22{,}4}\cdot\frac{273p}{p_0 T}. \qquad (1.6)$$

Динамическую вязкость газов и паров при $t\neq0$ рассчитывают по формуле:

$$\mu_{tг} = \mu_{0г}\frac{273+\mathrm{Sat}}{T+\mathrm{Sat}}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{1{,}5}, \qquad (1.7)$$

где Sat — константа Сатерленда, которая также приведена в Приложении 1

Для расчета динамической вязкости жидкости $\mu_{t\,ж}$ при $t\neq0$ °С имеются различные зависимости В практических расчетах для определения количества вредных веществ, выделяющихся через неплотности соединений трубопроводов и оборудования, можно использовать формулу Пуазейля:

$$\mu_{t\,ж} = \mu_{0ж}/(1 + 0{,}0368t + 0{,}000212t^2) \qquad (1.8)$$

Изменение динамической вязкости с изменением температуры является существенным Так, с увеличением температуры от 0 до 100 °С вязкость воды уменьшается в 7 раз

Кинематическая вязкость ν (м²/с) связана с динамической вязкостью μ соотношением.

$$\nu = \mu/\rho, \qquad (1.9)$$

где μ — динамическая вязкость, Па·с; ρ — плотность, кг/м³.

Коэффициент диффузии, который необходим для расчетов количеств выделяющихся вредных веществ из оборудования, можно рассчитать по следующей зависимости (м²/ч):

$$D_0 = \frac{0{,}8}{\sqrt{M}}\cdot0{,}36, \qquad (1.10)$$

где D_0 — коэффициент диффузии при $t=0$ и $p=100$ кПа.

Коэффициент диффузии при $t\neq0$ и $p\neq100$ кПа определяют по формуле:

$$D_t = D_0\frac{p_0}{p}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2, \qquad (1.11)$$

где $p_0=100$ кПа; $T_0=273$ К; p и T — давление и температура в оборудовании или трубопроводе.

Чтобы найти коэффициент диффузии при любой температуре, используют формулу:

$$D_t = D_{20}[1 + 0{,}02(t - 20)]. \quad (1.12)$$

Часто на практике встречаются не чистые вещества, а их смеси Состав среды в оборудовании или трубопроводе задается в массовых или объемных (в случае газовой или паровой смеси — в мольных) долях Массовые доли компонентов пересчитывают в объемные по формуле.

$$n_i = \frac{a_i/M_i}{\sum (a_i/M_i)}, \quad (1.13)$$

где n_i — объемные или мольные доли компонентов; a_i — массовые доли компонентов; M_i — относительные молекулярные массы компонентов.

Когда в трубопроводе или оборудовании находится смесь жидкостей, плотность этой смеси определяют из выражения

$$\rho_{см.\,ж} = \frac{1}{\sum (a_i/\rho_{i\,ж})}, \quad (1.14)$$

где $\rho_{i\,ж}$ — соответствующая плотность компонентов.

Динамическая вязкость смеси нормальных жидкостей определяется из выражения (Па·с)

$$\lg \mu_{см\,ж} = \Sigma n_i \lg \mu_{i\,ж}, \quad (1.15)$$

где n_i — мольные доли компонентов в смеси; $\mu_{i\,ж}$ — соответствующий коэффициент динамической вязкости

Если в трубопроводе или оборудовании находится смесь газов или парогазовоздушная смесь, то вязкость газовых (паровых) смесей можно вычислить по приближенной формуле:

$$\mu_{см.\,г} = \frac{M_{см.\,г}}{\sum (iM_i/\mu_{i\,г})}, \quad (1.16)$$

где $M_{см\,г}$, M_i — относительные массы смеси газов и отдельных компонентов; $\mu_{см\,г}$, $\mu_{i\,г}$ — коэффициенты динамической вязкости смеси газов и отдельных компонентов, i — объемные доли компонентов в смеси

$$M_{см\,г} = \Sigma i M_i \quad (1.17)$$

Кинематическая вязкость газовой смеси (м²/с):

$$\nu_{см} = \frac{1}{\sum (i_i/\nu_i)}, \quad (1.18)$$

или

$$\nu_{см} = \mu_{см\,г}/\rho_{см\,г}, \quad (1.19)$$

где ν_i — кинематическая вязкость компонентов газовой смеси.

Плотность смеси газов определяется по формуле (кг/м³).

$$\rho_{см\,г} = \Sigma i \rho_{i\,г}, \quad (1.20)$$

где i_i — объемные доли компонентов газовой смеси; $\rho_{i\,г}$ — соответствующие плотности компонентов

При расчете количеств вредных веществ, выделяющихся со свободной поверхности жидкости, необходимо помнить, что они состоят из смеси веществ, состав которых зависит от температуры, давления, а также от объемной (мольной) доли каждого вещества в растворе

Давление газовой смеси над раствором равно (кг/м³):

$$p_{см} = \Sigma p_i, \tag{1.21}$$

где p_i — парциальные давления отдельных компонентов, входящих в состав смеси.

Согласно закону Рауля парциальное давление компонента, входящего в состав смеси, определяется по формуле:

$$p_i = n_i p_i^н, \tag{1.22}$$

где n_i — объемная доля компонента в растворе; $p_i^н$ — давление насыщенного пара вещества над чистым компонентом при заданной температуре.

Зависимость давления насыщенного пара чистого вещества от температуры описывается уравнениями:

$$\lg p_i^н = A - B/(C + t) \tag{1.23}$$

или

$$\lg p_i^н = A - B/T, \tag{1.24}$$

значения эмпирических коэффициентов A, B, C для чистых веществ приведены в Приложении I.

Парциальное давление насыщенных водяных паров в наружной среде определяется по формуле:

$$\lg p_{H_2O}^н = 0{,}622 + 7{,}5t/(238 + t), \tag{1.25}$$

где t — температура наружной среды, °С.

Парциальное давление водяных паров при заданной влажности наружной среды определяется по формуле (мм рт. ст):

$$p_{H_2O} = p^н_{H_2O}\varphi, \tag{1.26}$$

где φ — влажность наружной среды, %.

Имея объемный или массовый состав смеси в оборудовании и данные о давлении насыщенных паров веществ, составляющих смесь, можно определить количественный состав газовой смеси над поверхностью жидкости. Для этого концентрацию насыщенных паров, выраженную в единицах давления, можно пересчитать в объемную концентрацию (C, мг/м³) по следующей формуле:

$$C_i = \frac{16 p_i^н M_i \cdot 1000}{(273 + t)\,133{,}3}, \tag{1.27}$$

где $p_i^н$ — давление насыщенных паров вещества над чистым компонентом при заданной температуре t, Па; M_i — относительная молекулярная масса данного вещества.

При температуре 20 °С формула принимает следующий вид:

$$C_{i20} = 0{,}4096 p_i^н M_i \tag{1.28}$$

Ниже приведены примеры расчета (1.1—1.4) параметров среды в производственном помещении, в трубопроводах и оборудовании.

1.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

Пример 1.1. Определить параметры среды в производственном помещении.

Исходные данные: влажность в помещении $\varphi = 60\%$; концентрация дихлорэтана в воздухе $C_д = 5$ мг/м³; температура $t = 16$ °С; давление среды $B = 101{,}3$ кПа.

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих среды: $M_в = 28{,}96$; $M_{H_2O} = 18{,}015$; $M_д = 98{,}97$.

Давление насыщенных водяных паров в воздухе производственного помещения:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0{,}622 + \frac{7{,}5 \cdot t}{238 + t};$$

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0{,}622 + \frac{7{,}5 \cdot 16}{238 + 16} = 1{,}0944;$$

$$p^{н}_{H_2O} = 12{,}4 \text{ мм рт. ст., или } 1653 \text{ Па}.$$

Давление водяных паров при заданной влажности в помещении:

$$p_{H_2O} = p^{н}_{H_2O}\varphi;$$

$$p_{H_2O} = 1653 \cdot \frac{60}{100} = 992 \text{ Па}.$$

Парциальное давление примеси (дихлорэтана):

$$p_i = \frac{C_i (237 + t)\, 133{,}3}{M_i \cdot 16 \cdot 1000};$$

$$p_д = \frac{(273 + 16)\, 5 \cdot 133{,}3}{98{,}97 \cdot 16 \cdot 1000} = 0{,}12 \text{ Па}.$$

Парциальное давление основного компонента наружной среды — воздуха:

$$p_в = B - \Sigma p_i; \quad p_в = 101\,325 - (992 + 0{,}12) \approx 100\,333 \text{ Па}.$$

Объемные доли составляющих наружную среду:

$$i_i = p_i/B; \quad i_в = 100\,333/101\,325 = 0{,}9902;$$

$$i_{H_2O} = 993/101\,325 = 0{,}00979; \quad i_д = 0{,}12/101\,325 = 0{,}000\,01.$$

Концентрация составляющих наружной среды, мг/м³:

$$C_i = \frac{16 p_i M_i \cdot 1000}{(273 + t)\, 133{,}3};$$

$$C_в = \frac{16 \cdot 100333 \cdot 28{,}96 \cdot 1000}{(273 + 16)\, 133{,}3} = 1\,206\,800;$$

$$C_{H_2O} = \frac{16 \cdot 992 \cdot 18{,}015 \cdot 1000}{(273 + 16)\, 133{,}3} = 7422;$$

$$C_д = \frac{16 \cdot 0{,}12 \cdot 98{,}97 \cdot 1000}{(273 + 16)\, 133{,}3} = 5{,}0.$$

Произведение $i_i\rho_i$ для газовых составляющих наружной среды, мг/м³ (кг/м³):

$$i_в\rho_в = 1\,206\,800 \ (1{,}207);$$

$$i_{H_2O}\rho_{H_2O} = 7422 \ (0{,}0074);$$

$$i_д\rho_д = 5 \ (0{,}000005).$$

Плотность наружной среды:

$$\rho_{сж} = \Sigma i_i \rho_i;$$

$$\rho_{сж} = 1{,}207 + 0{,}0074 + 0{,}000005 \approx 1{,}214 \text{ кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость газовых составляющих при $t=0$ °С (см. Приложение I), Па·с:

$$\mu_{0в} = 171 \cdot 10^{-7}; \quad \mu_{0H_2O} = 82 \cdot 10^{-7}; \quad \mu_{0д} = 61 \cdot 10^{-7}.$$

Константы Сатерленда (см. Приложение I):

$$Sat_в = 107; \quad Sat_{H_2O} = 673; \quad Sat_д = 524.$$

Динамическая вязкость газовых составляющих при $t=16$ °С, Па·с:

$$\mu_t = \mu_0 \frac{273 + Sat}{T + Sat} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,5};$$

$$\mu_в = 171 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 107}{(273 + 16) + 107} \left(\frac{289}{273}\right)^{1,5} = 177{,}38 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{H_2O} = 82 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 673}{289 + 673} \left(\frac{289}{273}\right)^{1,5} = 87{,}35 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_д = 61 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 524}{289 + 524} \left(\frac{289}{273}\right)^{1,5} = 64{,}6 \cdot 10^{-7}.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов наружной среды:

$$M_{см} = \Sigma l_i M_i;$$

$$M_{см} = 28{,}96 \cdot 0{,}9902 + 0{,}00979 \cdot 18{,}015 + 0{,}000001 \cdot 98{,}97 = 28{,}85.$$

Динамическая вязкость смеси газов наружной среды:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum \frac{l_i M_i}{\mu_i}};$$

$$\mu_{см} = \frac{28{,}85}{\frac{0{,}9902 \cdot 28{,}96}{177{,}38 \cdot 10^{-7}} + \frac{0{,}00979 \cdot 18{,}015}{87{,}35 \cdot 10^{-7}} + \frac{0{,}000001 \cdot 98{,}97}{64{,}6 \cdot 10^{-7}}} = 176{,}25 \cdot 10^{-7} \text{ Па·с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов наружной среды:

$$\nu_{см} = \mu_{см}/\rho_{см};$$

$$\nu_{см} = \frac{176{,}25 \cdot 10^{-7}}{1{,}214} = 145{,}18 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициенты диффузии компонентов наружной среды при $t=0$ °С и $p=101\,308$ Па, м²/ч:

$$D_0 = \frac{0{,}8}{\sqrt{M}} \cdot 0{,}36; \quad D_{0в} = \frac{0{,}8}{\sqrt{28{,}96}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0535;$$

$$D_{0H_2O} = \frac{0{,}8}{\sqrt{18{,}015}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0679;$$

$$D_{0д} = \frac{0{,}8}{\sqrt{98{,}97}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0289 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Коэффициенты диффузии компонентов наружной среды при $t=16$ °С и $p=B=101\,325$ Па, м²/ч:

$$D_t = D_0 \left(\frac{T}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{p};$$

$$D_в = 0{,}0535 \left(\frac{273+16}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0599;$$

$$D_{H_2O} = 0{,}0679 \left(\frac{273+16}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0761;$$

$$D_д = 0{,}0289 \left(\frac{273+16}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0324.$$

Пример 12. Определить параметры внутренней среды (жидкость+газ) в оборудовании

Исходные данные. Давление наружной среды $B = 101\,325$ Па Состав жидкости в оборудовании [% (масс)]. вода 40, $a_в = 0{,}4$; бензол 30, $a_б = 0{,}3$; дихлорэтан 30, $a_д = 0{,}3$ Температура жидкости и газовой среды в оборудовании $t = 40$ °С. Газовая среда в оборудовании — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi = 50\%$ Концентрация аммиака в воздухе $C_{NH_3} = 10$ мг/м³. Избыточное давление в оборудовании $p_{изб} = 101\,325$ Па.

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих газовой среды:

$M_{H_2O} = 18{,}015$; $M_б = 78{,}10$; $M_д = 98{,}97$; $M_в = 28{,}96$; $M_{NH_3} = 17{,}31$.

Мольные доли составляющих жидкости

$$n_i = \frac{a_i/M_i}{\sum (a_i/M_i)};$$

$$n_{H_2O} = \frac{0{,}4/18{,}025}{0{,}4/18{,}015 + 0{,}3/78{,}1 + 0{,}3/98{,}97} = 0{,}7637;$$

$$n_б = \frac{0{,}3/78{,}1}{0{,}4/18{,}015 + 0{,}3/78{,}1 + 0{,}3/98{,}97} = 0{,}1321;$$

$$n_д = \frac{0{,}3/98{,}97}{0{,}4/18{,}015 + 0{,}3/78{,}1 + 0{,}3/98{,}97} = 0{,}1042.$$

Из Приложения I находим эмпирические коэффициенты A, B, C для каждого компонента смеси жидкости:

вода —	$A = 7{,}9608$;	$B = 1678$;	$C = 230$;
бензол —	$A = 6{,}912$;	$B = 1214{,}6$;	$C = 221{,}2$;
дихлорэтан —	$A = 7{,}184$;	$B = 1358{,}5$;	$C = 232$.

Парциальное давление насыщенных паров компонентов над чистыми жидкими веществами (мм рт. ст.):

$$\lg p^н = A - B/(C + t);$$

$\lg p^н_{H_2O} = 7{,}9608 - 1678/(230 + 40) - 1{,}7460$, $p^н_{H_2O} = 56{,}7$ или $7541{,}1$ Па;

$\lg p_б^н = 6{,}912 - 1214{,}6/(221{,}2 + 40) = 2{,}262$, $p_б^н = 182{,}5$ или $24272{,}5$ Па;

$\lg p_д^н = 7{,}184 - 1358{,}5/(233 + 40) = 2{,}190$, $p_д^н = 155$ или 20615 Па.

Парциальное давление паров компонентов над смесью жидкости, Па:

$$p_i = n_i p_i^н;$$

$p_{ж.\,H_2O} = 7541{,}1 \cdot 0{,}7637 = 5759{,}14$; $p_{ж.\,б} = 24272{,}5 \cdot 0{,}1321 = 3206{,}4$;

$p_{ж.д} = 20615 \cdot 0{,}1042 = 2148{,}0$.

Давление насыщенных водяных паров в газовой среде:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0,622 + 7,5t/(238 + t);$$

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0,622 + 7,5 \cdot 40/(238 + 40) = 1,7011;$$

$$p^{н}_{H_2O} = 50,2 \text{ мм рт. ст., или } 6676,6 \text{ Па.}$$

Давление водяных паров в газовой среде при заданной влажности:

$$p_{H_2O} = p^{н}_{H_2O}\varphi;$$

$$p_{H_2O} = 50,2 \cdot 0,5 = 25,1 \text{ мм рт. ст., или } 3338 \text{ Па.}$$

Полное давление среды в оборудовании:

$$p_{абс} = p_{изб} + B = 101\,325 + 101\,325 = 202\,650 \text{ Па.}$$

Парциальное давление примеси (аммиака) в газовой фазе:

$$p_i = \frac{C_i (237 + t)\ 133,3}{16M \cdot 1000};$$

$$p_{NH_3} = \frac{10\ (237 + 40)\ 133,3}{16 \cdot 1000\ \ 17,31} = 1,503 \text{ Па.}$$

Возможные парциальные давления компонентов газовой смеси над жидкостью приведены в табл. 1.5.

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха:

$$p_в = 202\,650 - (5759 + 3206 + 2148 + 1,503) = 191535,5 \text{ Па.}$$

Объемные доли газовых составляющих:

$$i_i = p_i/p_{абс}; \quad i_{H_2O} = 5759/202\,650 = 0,028;$$

$$i_б = 3206/202\,650 = 0,0158; \quad i_д = 2148/202\,650 = 0,0106;$$

$$i_{NH_3} = 1,503/202\,650 = 0,000007; \quad i_в = 191\,535/202\,650 = 0,9451.$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i = \frac{16 p_i M_i \cdot 1000}{(237 + t)\ 133,3};$$

$$C_{H_2O} = \frac{16 \cdot 5759 \cdot 18,015\ \ 1000}{(237 + 40)\ 133,3} = 39\,876;$$

$$C_б = \frac{16 \cdot 3206,4 \cdot 78,10 \cdot 1000}{(273 + 40)\ 133,3} = 96\,258;$$

$$C_д = \frac{16\ \ 2148\ \ 98,97\ \ 1000}{(237 + 40)\ 133,3} = 81\,710;$$

$$C_{NH_3} = 10; \quad C_в = \frac{16 \cdot 191535,5\ \ 28,96 \cdot 1000}{(237 + 40)\ 133,3} = 2\,131\,918.$$

Произведение $i_i\rho_i$ для составляющих газовой смеси, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2O}\rho_{H_2O} = 39\,876\ (0,0398); \qquad i_б\rho_б = 96\,258\ (0,0963);$$

$$i_д\rho_д = 81\,710\ (0,0817); \qquad i_{NH_3}\rho_{NH_3} = 10\ (0,00001);$$

$$i_в\rho_в = 2\,131\,918\ (2,1319).$$

Плотность газовой среды в оборудовании:

$$\rho_{см} = \Sigma i_i\rho_i,$$

$$\rho_{см} = 0,0398 + 0,0963 + 0,0817 + 0,00001 + 2,1319 \approx 2,35 \text{ кг/м}^3.$$

Таблица 1.5. Возможные парциальные давления компонентов над жидкостью

Наименование	Парциальные давления компонентов		Возможное парциальное давление
	поступивших из жидкости	в первоначальной газовой среде	
Вода	$p_{ж\,H_2O} = 5759$	$p_{H_2O} = 3338$	$p_{H_2O} = 5759$
Бензол	$p_{ж\,б} = 3206{,}4$	$p_{б} = 0$	$p_{б} = 3206{,}4$
Дихлорэтан	$p_{ж\,д} = 2148$	$p_{д} = 0$	$p_{д} = 2148$
Аммиак	$p_{ж\,NH_3} = 0$	$p_{NH_3} = 1{,}503$	$p_{NH_3} = 1{,}503$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси при $t=0$ (см. Приложение I), Па·с:

$$\mu_{0H_2O} = 82\cdot10^{-7};\quad \mu_{0б} = 70\cdot10^{-7};\quad \mu_{0д} = 61\cdot10^{-7};$$
$$\mu_{0в} = 171\ 10^{-7};\quad \mu_{0NH_3} = 93\ 10^{-7}.$$

Константы Сатерленда (см. Приложение I):

$$Sat_{H_2O} = 673;\quad Sat_{б} = 380;\quad Sat_{д} = 524;\quad Sat_{NH_3} = 503;\quad Sat_{в} = 107.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси при $t=40$ °С, Па·с:

$$\mu_t = \frac{273 + Sat}{T + Sat}\left(\frac{T}{273}\right)^{1,5}\mu_0;$$

$$\mu_{H_2O} = 82\cdot10^{-7}\,\frac{273+673}{273+40+673}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 96{,}58\cdot10^{-7}$$

$$\mu_{б} = 70\cdot10^{-7}\,\frac{273+380}{273+40+380}\left(\frac{272+40}{273}\right)^{1,5} = 80{,}97\cdot10^{-7};$$

$$\mu_{NH_3} = 93\cdot10^{-7}\,\frac{273+503}{273+40+503}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 109{,}1\cdot10^{-7};$$

$$\mu_{д} = 61\cdot10^{-7}\,\frac{273+524}{273+40+524}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 71{,}3\ 10^{-7};$$

$$\mu_{в} = 171\cdot10^{-7}\,\frac{273+107}{273+40+107}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 189{,}9\cdot10^{-7}.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов в оборудовании:

$$M_{см} = \Sigma i_i\cdot M_i;$$
$$M_{см} = 0{,}028\cdot18{,}015 + 0{,}0158\cdot78{,}1 + 0{,}0106\cdot98{,}97 +$$
$$+ 0{,}9451\cdot28{,}96 + 0{,}000007\cdot17{,}31 = 30{,}17.$$

Динамическая вязкость смеси газов в оборудовании:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum i_i M_i/\mu_i};$$

$$\mu_{см} = \frac{30{,}17}{\frac{0{,}028\cdot18{,}015}{96{,}58\ 10^{-7}} + \frac{0{,}0158\cdot78{,}1}{80\ 97\cdot10^{-7}} + \frac{0{,}0106\cdot98{,}97}{71{,}3\ 10^{-7}} +}$$

$$+\frac{30{,}17}{\frac{0{,}9451\cdot28{,}96}{189{,}9\cdot10^{-7}} + \frac{0{,}000007\cdot17{,}31}{109{,}1\cdot10^{-7}}} = 168{,}26\ 10^{-7}\ \text{Па}\cdot\text{с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов в оборудовании:

$$\nu_{см} = \mu_{см}/\rho_{см}$$

$$\nu_{см} = 168{,}26 \cdot 10^{-7}/2{,}35 = 71{,}6 \cdot 10^{-7}\ м^2/с.$$

Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси в оборудовании при $t=0$ °С и $p=101\,308$ Па, м²/ч:

$$D_0 = \frac{0{,}8}{\sqrt{M}} \cdot 0{,}36;$$

$$D_{0H_2O} = \frac{0{,}8}{\sqrt{18{,}015}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0679;$$

$$D_{0б} = \frac{0{,}8}{\sqrt{78{,}10}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0326;$$

$$D_{0д} = \frac{0{,}8}{\sqrt{98{,}97}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0289;$$

$$D_{0NH_3} = \frac{0{,}8}{\sqrt{17{,}31}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0692;$$

$$D_{0в} = \frac{0{,}8}{\sqrt{28{,}96}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0535.$$

Коэффициент диффузии компонентов газовой смеси в оборудовании при $t=40$ °С и $p=202\,650$ Па, м²/ч:

$$D_t = D_0 \left(\frac{T}{273}\right)^2 \frac{101308}{p};$$

$$D_{H_2O} = 0{,}0679 \left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}0446;$$

$$D_б = 0{,}0326 \left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}0214;$$

$$D_д = 0{,}0289 \left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}0190;$$

$$D_{NH_3} = 0{,}0692 \left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}0455;$$

$$D_в = 0{,}0535 \left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}0351.$$

Пример 1.3. Определить параметры внутренней среды в трубопроводе, транспортирующем газовую смесь.

Исходные данные. Давление наружной среды $B=101\,325$ Па; состав смеси, % (масс.): водород 58,9, $a_{H_2}=0{,}589$; оксид углерода 7,1, $a_{CO}=0{,}071$; метан 34, $a_{CH_4}=0{,}34$. Температура газовой смеси $t=50$ °С. Избыточное давление в трубопроводе $p_{изб}=101\,325$ Па.

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих газовой смеси: $M_{H_2}=2{,}0$; $M_{CO}=28{,}0$; $M_{CH_4}=16{,}0$.

Объемные доли составляющих газовой смеси:

$$n_i = \frac{a_i/M_i}{\sum (a_i/M_i)};$$

$$n_{H_2} = \frac{0{,}589/2}{0{,}589/2 + 0{,}071/28 + 0{,}34/16} = 0{,}925;$$

$$n_{CH_4} = \frac{0{,}34/16}{0{,}319} = 0{,}066;$$

$$n_{CO} = \frac{0{,}071/28}{0{,}319} = 0{,}009.$$

Абсолютное давление газовой смеси в трубопроводе:

$$p_{абс} = B + p_{изб}; \qquad p_{абс} = 101\,325 + 101\,325 = 202\,650 \text{ Па}.$$

Парциальное давление составляющих газовой смеси, Па:

$$p_i = n_i p_{абс}; \qquad p_{H_2} = 202\,650 \cdot 0{,}925 = 187\,451;$$

$$p_{CO} = 202\,650 \cdot 0{,}009 = 1824; \qquad p_{CH_4} = 202\,650 \cdot 0{,}066 = 13\,745$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i = \frac{16 p M_i \cdot 1000}{(273 + t)\ 133{,}3};$$

$$C_{H_2} = \frac{16 \cdot 187\,451 \cdot 2 \cdot 1000}{(273 + 50)\ 133{,}3} = 139\,317;$$

$$C_{CO} = \frac{16 \cdot 1824 \cdot 28 \cdot 1000}{(273 + 50)\ 133{,}3} = 18\,979;$$

$$C_{CH_4} = \frac{16 \cdot 13\,745 \cdot 16\ 1000}{(273 + 50)\ 133{,}3} = 81\,724.$$

Произведение $i_i \rho_i$ для составляющих газовой смеси, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2}\rho_{H_2}O = 139\,317\ (0{,}1393); \qquad i_{CO}\rho_{CO} = 18\,979\ (0{,}0189);$$

$$i_{CH_4}\rho_{CH_4} = 81\,724\ (0{,}0817).$$

Плотность газовой смеси в трубопроводе

$$\rho_{см} = \sum i_i \rho_i;$$

$$\rho_{см} = 0{,}1393 + 0{,}0189 + 0{,}0817 = 0{,}24 \text{ кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси при $t = 0$ °С и $p = 101\,308$ Па, Па·с:

$$\mu_{0H_2} = 4{,}9 \cdot 10^{-6}; \qquad \mu_{0CO} = 17{,}15 \cdot 10^{-6}; \qquad \mu_{0CH_4} = 10{,}29 \cdot 10^{-6}.$$

Константы Сатерленда:

$$Sat_{H_2} = -528; \qquad Sat_{CO} = 116; \qquad Sat_{CH_4} = 118.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси при $t = 50$ °С, Па·с:

$$\mu_i = \mu_0 \frac{273 + Sat}{T + Sat} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.5};$$

$$\mu_{H_2} = 4{,}9\cdot10^{-6}\cdot\frac{273+(-528)}{273+50+(-528)}\left(\frac{273+50}{273}\right)^{1{,}5} = 7{,}84\cdot10^{-6};$$

$$\mu_{CO} = 17{,}15\cdot10^{-6}\,\frac{273+116}{273+50+116}\left(\frac{273+50}{273}\right)^{1{,}5} = 20\cdot10^{-6};$$

$$\mu_{CH_4} = 10{,}29\cdot10^{-6}\,\frac{273+118}{273+50+118}\left(\frac{273+50}{273}\right)^{1{,}5} = 12\ 10^{-6}.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов в трубопроводе:

$$M_{см} = \Sigma i_i M_i;$$

$$M_{см} = 0{,}925\cdot2 + 0{,}009\cdot28 + 0{,}066\cdot16 = 3{,}2.$$

Динамическая вязкость смеси газов в трубопроводе

$$\mu_{см} = M_{см} \Big/ \sum\frac{i_i M_i}{\mu_i};$$

$$\mu_{см} = \frac{3{,}2}{0{,}925\cdot2/(7{,}84\cdot10^{-6}) + 0{,}009\cdot28/(20\cdot10^{-6}) + 0{,}006\cdot16/(10^{-6}\cdot12)} =$$

$$= 9{,}51\cdot10^{-6}\ \text{Па}\cdot\text{с}.$$

Кинематическая вязкость смесн газов в трубопроводе

$$\nu_{см} = \mu_{см}/\rho_{см}$$

$$\nu_{см} = \frac{9{,}51\cdot10^{-6}}{0{,}24} = 39{,}61\cdot10^{-6}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

Коэффициенты диффузии составляющих газовой смеси при $t=0$ °С и $p=$ $=101\,308$ Па, м^2/ч:

$$D_0 = \frac{0{,}8}{\sqrt{M}}\cdot0{,}36; \qquad D_{0H_2} = \frac{0{,}8}{\sqrt{2}}\cdot0{,}36 = 0{,}204;$$

$$D_{0CO} = \frac{0{,}8}{\sqrt{28}}\cdot0{,}36 = 0{,}054;$$

$$D_{0CH_4} = \frac{0{,}8}{16}\cdot0{,}36 = 0{,}072.$$

Коэффициенты диффузии составляющих газовой смеси при $t=50$ °С и $p=$ $=202\,650$ Па, м^2/ч:

$$D_i = D_0\left(\frac{T}{273}\right)^2\frac{101\,308}{p};$$

$$D_{H_2} = 0{,}204\left(\frac{273+50}{273}\right)^2\frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}143;$$

$$D_{CO} = 0{,}054\left(\frac{273+50}{273}\right)^2\frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}038;$$

$$D_{CH_4} = 0{,}072\left(\frac{273+50}{273}\right)^2\frac{101\,308}{202\,650} = 0{,}050.$$

Пример 1.4. Определить параметры среды над открытой поверхностью жидкости в наружной среде.

Исходные данные. Давление наружной среды $B=101\,325$ Па. Состав жидкости, % (масс): вода 40, $a_{H_2O}=0{,}4$; бензол 30, $a_б=0{,}3$; дихлорэтан 30, $a_д=0{,}3$. Температура жидкости $t=40$ °С. Наружная среда — воздух с примесью дихлорэтана. Влажность воздуха $\varphi=60\%$. Концентрация дихлорэтана $C=5$ мг/м³. Температура воздуха $t=16$ °С.

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих среды: $M_{H_2O}=18{,}02$; $M_б=78{,}1$; $M_д=98{,}97$; $M_в=28{,}96$.

Мольные доли составляющих компонентов жидкости:

$$n_i=\frac{a_i/M_i}{\sum(a_i/M_i)};$$

$$n_{H_2O}=\frac{0{,}4/18{,}02}{0{,}4/18\ 02+0{,}3/78{,}1+0{,}3/98{,}97}=0{,}7637;$$

$$n_б=\frac{0{,}3/78{,}1}{0{,}4/18{,}02+0{,}3/78{,}1+0{,}3/98{,}97}=0{,}1321;$$

$$n_д=\frac{0{,}3/98{,}97}{0{,}4/18{,}02+0{,}3/78{,}1+0{,}3/98{,}17}=0{,}1042.$$

Из Приложения I находим эмпирические коэффициенты A, B, C для каждого компонента смеси:

вода	$A=7{,}9608$;	$B=1678$;	$C=230$;
бензол	$A=6{,}912$;	$B=1214{,}6$;	$C=221{,}2$;
дихлорэтан	$A=7{,}184$;	$B=1358{,}5$;	$C=232$.

Парциальное давление насыщенных паров компонентов над чистыми жидкими веществами:

$$\lg p^н=A-B/(C+t);$$

$\lg p^н_{H_2O}=7{,}9608-1678/(230+40)=1{,}746$; $p^н_{H_2O}=56{,}7$ мм рт. ст., или 7541,1 Па;

$$\lg p_б^н=6{,}912-1214{,}6/(921{,}2+40)=2{,}262;$$

$p_б^н=182{,}5$ мм рт. ст., или 24272,5 Па;

$$\lg p_д^н=7{,}184-1358{,}5/(932+40)=2{,}190;$$

$p_д^н=155$ мм рт. ст., или 20 615 Па.

Парциальное давление паров компонентов над смесью жидкостей:

$$p_i=n_i p^н_i;\quad p_{H_2O}=7541{,}1\cdot0{,}7637=5759{,}14\text{ Па};$$

$p_б=24272{,}5\cdot0{,}1321=3206{,}4$ Па; $p_д=20\,615\cdot0{,}1042=21\,480$ Па.

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха:

$$p_в=101\,325-(5759{,}14+3206{,}4+2148{,}0)=90\,210\text{ Па}.$$

Объемные доли газовых составляющих над жидкостью:

$$i_i=p_i/p_{абс};$$

$i_{H_2O}=5759{,}14/101\,325=0{,}0568$; $i_б=3206{,}4/101\,325=0{,}0316$;

$i_д=2148{,}04/101\,325=0{,}0212$; $i_в=90\,210/101\,325=0{,}8903$.

Концентрации составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³:

$$C_i = \frac{16 p_i M_i \cdot 1000}{(273 + t)\, 133{,}3};$$

$$C_{H_2O} = \frac{16 \cdot 5759{,}14 \cdot 18{,}015 \cdot 1000}{(273 + 40)\, 133{,}3} = 39\,876;$$

$$C_б = \frac{16 \cdot 3206{,}4 \cdot 78{,}10 \cdot 1000}{(273 + 40)\, 133{,}3} = 96\,258;$$

$$C_д = \frac{16 \cdot 2148{,}04 \cdot 98{,}97 \cdot 1000}{(273 + 40)\, 133{,}3} = 81\,710;$$

$$C_в = \frac{16 \cdot 90210 \cdot 28{,}96 \cdot 1000}{(273 + 40)\, 133{,}3} = 997\,000.$$

Произведение $i_i\rho_i$ для составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2O}\rho_{H_2O} = 39\,876\ (0{,}0398); \qquad i_б\rho_б = 96\,258\ (0{,}0963);$$

$$i_д\rho_д = 81\,710\ (0{,}0817); \qquad i_в\rho_в = 997\,000\ (0{,}997).$$

Плотность газовой смеси над жидкостью:

$$\rho_{см} = \Sigma i_i \rho_i;$$

$$\rho_{см} = (0{,}0398 + 0{,}0963 + 0{,}0817 + 0{,}997)\, 10^{-6} = 1{,}215 \text{ кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t = 0$ °С (см. Приложение I), Па·с:

$$\mu_{0H_2O} = 82 \cdot 10^{-7}; \qquad \mu_{0б} = 70 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{0д} = 61 \cdot 10^{-7}; \qquad \mu_{0в} = 171 \cdot 10^{-7}$$

Константы Сатерленда (см. Приложение I):

$$Sat_{H_2O} = 673; \qquad Sat_б = 380; \qquad Sat_д = 524; \qquad Sat_в = 107.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t = 40$ °С, Па·с:

$$\mu_t = \mu_0 \frac{273 + Sat}{(273 + t) + Sat} \left(\frac{273 + t}{273}\right)^{1{,}5};$$

$$\mu_{H_2O} = 82 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273 + 673}{313 + 673} \left(\frac{313}{273}\right)^{1{,}5} = 96{,}58 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_б = 70 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273 + 380}{313 + 380} \left(\frac{313}{273}\right)^{1{,}5} = 80{,}97 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_д = 61 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273 + 524}{313 + 524} \left(\frac{313}{273}\right)^{1{,}5} = 71{,}30 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_в = 171 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 107}{313 + 107} \left(\frac{313}{273}\right)^{1{,}5} = 189{,}93 \cdot 10^{-7}.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов над жидкостью:

$$M_{см} = \Sigma i_i M_i;$$

$$M_{см} = 0{,}0568 \cdot 18{,}015 + 0{,}0316 \cdot 78{,}1 + 0{,}0212 \cdot 98{,}97 + 0{,}8903 \cdot 28{,}96 = 31{,}37.$$

Динамическая вязкость смеси газов над жидкостью (в Па·с):

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum (i_i M_i/\mu_i)};$$

$$\mu_{см} = \frac{31{,}37}{0{,}0568 \cdot 18{,}015/(96{,}58 \cdot 10^{-7}) + 0{,}0316 \cdot 78{,}1/(80{,}97 \cdot 10^{-7}) + \frac{31{,}37}{+ 0{,}0212\ 98{,}97/(71{,}30 \cdot 10^{-7}) + 0{,}8903 \cdot 28{,}96/(189{,}93 \cdot 10^{-7})}} = 160 \cdot 10^{-7}\ \text{Па·с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов над жидкостью.

$$\nu_{см} = \mu_{см}/\rho_{см};$$

$$\nu_{см} = 160 \cdot 10^{-7}/1{,}215 = 131{,}7 \cdot 10^{-7}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси над жидкостью при $t=0$ °С и $p=101\,308$ Па, м²/ч:

$$D_{0H_2O} = \frac{0{,}8}{\sqrt{M}}\ 0{,}36;$$

$$D_{0H_2O} = \frac{0{,}8}{\sqrt{18{,}015}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0679;$$

$$D_{0б} = \frac{0{,}8}{\sqrt{78{,}10}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0326;$$

$$D_{0д} = \frac{0{,}8}{\sqrt{98{,}97}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0289;$$

$$D_{0в} = \frac{0{,}8}{\sqrt{28{,}96}} \cdot 0{,}36 = 0{,}0535.$$

Коэффициент диффузии компонентов газовой смеси над жидкостью при $t=40$ °С и $p=101\,324$ Па, м²/ч:

$$D_t = D_0\left(\frac{T}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{p};$$

$$D_{H_2O} = 0{,}0679\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0897;$$

$$D_б = 0{,}0326\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0430;$$

$$D_д = 0{,}0289\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0383;$$

$$D_в = 0{,}0535\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 \frac{101\,308}{101\,325} = 0{,}0705.$$

Глава 2

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ В ВОЗДУХ ИЗ ГАЗОВОГО И ЖИДКОСТНОГО ОБЪЕМА ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ В НАРУЖНУЮ СРЕДУ

Поступление вредных веществ в наружную среду (в воздух) может быть вызвано следующими физико-химическими процессами· истечением вследствие разности давлений в оборудовании и наружной среды, турбулентным и молекулярным переносом в результате разности парциальных давлений, при неполном сжигании различных видов топлива, при механической обработке, при химических реакциях и др

Количество выделяющихся веществ в зависимости от поставленной задачи и требуемой степени точности можно определять, исходя из удельных показателей и газовоздушных балансов, а также расчетом.

Метод определения количества выделяющихся вредных веществ, исходя из удельных показателей (на единицу продукции расходуемого материала или сырья и др), имеет ограниченное применение, что обусловлено:

отсутствием достаточно достоверных статистических данных о количественном и качественном составе газовых выбросов и загрязнений промышленной площадки и примыкающих к ней населенных мест; отсутствие таких данных объясняется прежде всего трудоемкостью проведения и обработки результатов замера;

малым сроком действия удельных показателей, поскольку изменяются количество и состав газовых выбросов при замене номенклатуры выпускаемой продукции или технологии ее производства, а также вследствие несоизмеримости времени выпуска некоторых видов продукции и определения удельных показателей выбросов;

невозможностью определения количества выделяющихся вредных веществ за единицу времени (в г/с), что необходимо для расчетов предельно допустимых или временно согласованных выбросов ПДВ или ВСВ (ГОСТ 17 2 3 02—78. «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями») на основании удельных показателей. Кроме того, метод не отражает динамику поступления вредных веществ в течение года, суток, смены, часа, а также не дает возможности оценить выбросы от единичного технологического оборудования Этот метод целесообразен при ориентировочном (на год) прогнозировании выбросов вредных веществ в атмосферный воздух или при долгосрочном планировании мероприятий по охране окружающей среды (на 5—15 и более лет).

Метод определения количества выбросов вредных веществ, исходя из газовоздушных балансов помещения, является основным при проведении инвентаризации источников выбросов вредных веществ в атмосферный воздух во многих отраслях промышленности Применение метода возможно при наличии достаточного колнчества статистических данных об объемах вытяжного, приточного и рециркуляционного воздуха, а также о составе и концентрации в нем вредных веществ, поступающих от какого либо оборудования или отдельного аппарата Однако данный метод не дает представлений о динамике выделения вредных веществ в атмосферный воздух при изменяющемся от времени технологическом процессе.

Несомненно, что с развитием приборостроения и совершенствованием методик определения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе этот метод будет наиболее надежным. Следует, однако, заметить, что и первый и второй методы применимы только для оценки газовых выбросов от оборудования существующих технологических процессов и не могут быть использованы для проектирования новых производств. Эти методы не позволяют оценить количество выбросов в период неблагоприятных метеорологических условий, а также при аварийных ситуациях, возникающих на ряде производств. Область применения этих методов значительно сужается вследствие отсутствия методик и приборов контроля большей части вредных веществ, содержащихся в наружной среде, а также невозможности применения полученных данных (по количеству вредных веществ) для расчета воздухообмена в производственном помещении, количества загрязнений промышленной площадки и населенных мест, так как рассеивание вредных веществ в атмосферном воздухе рассчитывается по максимальным их количествам в 13 ч самого жаркого дня месяца.

Третий метод — расчетный. Сущность метода состоит в теоретическом определении количеств выделений вредных веществ в атмосферный воздух по всем элементам оборудования: через неплотности фланцевых соединений, через сальники, люк, лабиринтное уплотнение, воздушку, а также при испарении с открытых поверхностей, при горении и др. Этим методом с определенной степенью точности можно определить характер и количество выделяющихся в атмосферный воздух вредных веществ как от отдельного аппарата, так и от нескольких в любой заданный период технологического процесса.

Количество и состав вредных веществ, поступающих от всех видов источников, определяются технологами, составляющими сводную таблицу выделений. По данным этой таблицы рассчитывают максимально возможные концентрации в приземном слое атмосферы на заводской площадке и на окружающих ее территориях. Если эти концентрации (согласно расчету рассеивания вредных веществ) не превышают предельно допустимых для заводской площадки и для населенных пунктов (с учетом существующего загрязнения — фона и суммации веществ *однонаправленного действия*), то полученные расчетные количества вредных веществ рассматриваются как предельно допустимый выброс (ПДВ) для данного технологического процесса

2.2. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ИЗ ГАЗОВОГО ОБЪЕМА ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

2.2.1. Расчет количества вредных веществ, поступающих из газового объема трубопроводов и оборудования, находящихся под давлением

Определение количества вредных веществ, поступающих через неплотности фланцевых соединений при $p_{изб} \geqslant 2 \cdot 10^5$ **Па.** Количество газовой смеси, выделяющейся через неплотности фланцевых соединений, определяется по формуле, кг/ч:

$$G = 3{,}57 \cdot 10^{-5} \eta p_{изб} m V \sqrt{M/T},$$

где 3,57 — коэффициент, $°C^{1/2} \cdot см^2/(м^3 \cdot ч)$; η — коэффициент запаса, принимаемый равным 2; $p_{изб}$ — избыточное давление, Па; m — коэффициент негерметичности, характеризующий падение давления в аппарате, $ч^{-1}$, V — объем аппарата, занимаемый газовой (паровой) фазой, $м^3$, T — абсолютная температура газа или пара в аппарате, К, M — молярная масса газа или пара

Таблица 2.1. Нормативные размеры прокладок и давлений их затяжки

Материал прокладки	Толщина прокладки $h_п$, мм	Ширина прокладки $B_п$, мм	Рабочее давление p, МПа (не более)	Температура t, °С
Резина	1—3	$B_п \geqslant 4h_п$	10	От —30 до 60
Паронит	1—3	12—20	15	До 400
Фторопласт	0,8—0,9	10	20	От —73 до 250
Фибра	1—3	8—12	15	До 100
Алюминий	—	—	50	>250
Медь	—	—	70	>350
Мягкая сталь	1—2	8—16	70	>400
Сталь типа 12Х18Н9Т	—	—	100	>600

Таблица 2.2. Нормативное давление затяжки прокладок

Материал прокладки	Давление среды p^*, МПа	Среда	Давление затяжки q_0, МПа
Резина	До 3	—	$15 + 1{,}7\,p$
	3—10	—	$45 + 0{,}7\,p$
Паронит	—	Нормальной проникающей способности;	$100 + p$
		повышенной проникающей способности (водород, гелий и др.)	350
Фторопласт-4	До 10	Жидкая	$10 + p$
	10—15	„	$40 + p$
	До 15	Газообразная	$40 + p$
Фибра			400
Свинец			70

* Минимальное давление относится к листу, максимальное — к листу с тканевой прослойкой

Следует иметь в виду, что приведенные в СНиП значения коэффициентов негерметичности соответствуют нормативным величинам толщин прокладок (табл. 2.1) и нормативным величинам давлений затяжки контактных поверхностей прокладок (табл. 2.2).

Допустимые значения коэффициентов негерметичности приведены в табл. 2.3 (СНиП. «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования», «Указания о порядке проведения пневматических испытаний на плотность»).

При условном диаметре $D_{усл} \geqslant 250$ мм коэффициент m умножают на поправочный множитель $k = 250/D_{усл}$. Для уменьшения выделения вредных веществ в атмосферный воздух из аппаратов рекомендуется предусматривать торцовые уплотнения, а также применять бессальниковое оборудование с экранными электродвигателями.

В этом случае коэффициент m допускается не более 0,001.

Учитывая, что в настоящее время на заводах устанавливают более совершенное технологическое оборудование с повышенной надежностью герметизирующих устройств, рекомендуется при повторных испытаниях на герметичность после ремонта предъявлять такие же требования к герметизации оборудования, как и к вновь установленному, т. е. считать $m = 0{,}001$—$0{,}002$.

Для аппаратов большого объема с малым числом фланцев, сальников и других устройств, через которые возможны утечки, коэффициент негерметичности можно принимать более низким, чем это указано в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Допустимые значения коэффициентов негерметичности

Емкость	Среда	Длительность испытания на герметичность при рабочем давлении, ч	Коэффициент негерметичности m, $ч^{-1}$
Сосуды, газовые компрессоры, технологическое оборудование с трубопроводами и другое оборудование, работающее под давлением:			
вновь установленные	Токсичная	24	0,001
	Пожаро- и взрывоопасная	24	0,002
подвергаемые повторному испытанию	То же	4	0,005
Трубопроводы для горючих, токсичных и сжиженных газов и паров:			
цеховые	Токсичная и горючая	24	0,0005
	Горючая	24	0,001
межцеховые	Токсичная и горючая	24	0,001
	Горючая	24	0,002

Таблица 2.4. Возможные парциальные давления компонентов в газовой смеси над жидкостью

Компонент	Парциальное давление компонентов, Па		Возможное парциальное давление, Па
	поступивших из жидкости	в первоначальной газовой среде	
Вода	$p_{ж\,H_2O} = 5759$	$p_{г\,H_2O} = 3328$	$p_{H_2O} = 5759$
Бензол	$p_{ж\,б} = 3206{,}4$	$p_{г\,б} = 0$	$p_б = 3206{,}4$
Дихлорэтан	$p_{ж\,д} = 2148$	$p_{г\,д} = 0$	$p_д = 2148$
Аммиак	$p_{ж\,NH_3} = 0$	$p_{г\,NH_3} = 1{,}503$	$p_{NH_3} = 1{,}503$

Определение количества вредных веществ, поступающих через неплотности фланцевых соединений, при $0{,}02 \cdot 10^5 \leqslant p_{изб} < 2 \cdot 10^5$ Па. Количество газовой смеси, выделяющейся через неплотности фланцевых соединений, можно определить приближенно по формуле для $p_{изб} > 2 \cdot 10^5$ Па, но с коэффициентом запаса $\eta = 1{,}5$ кг/ч:

$$G = 3{,}57 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}5 p_{изб} m V \sqrt{M/T}.$$

Пример 2.1. Определить количество вредных веществ, выделяющихся через неплотности фланцевых соединений вновь смонтированного цехового трубопровода ($d = 108$ мм, толщина стенки 4 мм, длина 150 м).

Исходные данные. Состав среды в трубопроводе, % (масс.): водород 58,9, $a_{H_2} = 0{,}589$; оксид углерода 7,1, $a_{CO} = 0{,}071$; метан 34, $a_{CH_4} = 0{,}34$. Температура газовой смеси в трубопроводе $t = 50$ °С. Избыточное давление в трубопроводе $p_{изб} = 209\,060$ Па. Давление наружной среды $B = 101\,325$ Па.

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих газовой смеси: $M_{H_2}=2{,}0$; $M_{CO}=28{,}0$; $M_{CH_4}=16{,}0$. Объемные доли составляющих газовой смеси:

$$n_{H_2}=\frac{0{,}589/2}{0{,}589/2+0{,}071/28+0{,}34/16}=0{,}925;$$

$$n_{CO}=\frac{0{,}071/28}{0{,}589/2+0{,}071/28+0{,}34/16}=0{,}009;$$

$$n_{CH_4}=\frac{0{,}34/16}{0{,}0589/2+0{,}071/28+0{,}34/16}=0{,}066.$$

Абсолютное давление газовой смеси в трубопроводе:

$$p_{абс}=p_{изб}+B; \qquad p_{абс}=209\,060+101\,325=310\,385 \text{ Па}.$$

Парциальное давление составляющих газовой смеси, Па:

$$p_i=n_i p_{абс};$$

$$p_{H_2}=310\,385\cdot 0{,}925=287\,106; \qquad p_{CO}=310\,385\cdot 0{,}009=2794;$$

$$p_{CH_4}=310\,385\cdot 0{,}066=20\,485 \text{ Па}.$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i=\frac{16p_i\cdot 1000}{(273+t)\,133{,}3};$$

$$C_{H_2}=\frac{16\cdot 287\,106\cdot 2\cdot 1000}{(273+50)\,133{,}3}=213\,383;$$

$$C_{CO}=\frac{16\cdot 2794\ \ 28\cdot 1000}{(273+50)133{,}3}=29\,072;$$

$$C_{CH_4}=\frac{16\cdot 20485\ \ 16\cdot 1000}{(273+50)\,133{,}3}=121\,799.$$

Произведение $i_i\rho_i$ для составляющих газовой смеси, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2}\rho_{H_2}=213\,383\ (0{,}213); \qquad i_{CO}\rho_{CO}=29\,072\ (0{,}029);$$

$$i_{CH_4}\rho_{CH_4}=121\,799\ (0{,}122).$$

Плотность газовой смеси в трубопроводе:

$$\rho_{см}=\Sigma i_i\rho_i;$$

$$\rho_{см}=0{,}213+0{,}029+0{,}122=0{,}364 \text{ мг/м}^3.$$

Молекулярная масса газовой смеси в трубопроводе:

$$M_{см}=\Sigma i_i M_i; \qquad M_{см}=0{,}925\cdot 2+0{,}009\cdot 28+0{,}006\cdot 16=3{,}2.$$

Коэффициент негерметичности фланцевых соединений цехового трубопровода (см. табл. 2.3): $m=0{,}001$. Объем газов в трубопроводе: $V=0{,}785\ d^2l$; $V=0{,}785\cdot 0{,}1\cdot 150=1{,}1775$ м³.

Количество газовой смеси, выделяющейся через неплотности фланцевых соединений трубопровода:

$$G=3{,}57\cdot 10^{-2}p_{изб}\eta Vm\sqrt{M/T};$$

$$G=3{,}57\cdot 10^{-2}\cdot 2\cdot 209060\cdot 0{,}001\cdot 1{,}1775\sqrt{3{,}2/(273+50)}=1{,}76 \text{ г/ч}.$$

Объем газовой смеси, выделяющейся через неплотности фланцевых соединений трубопроводов

$$V_{см} = G_{см}/\rho_{см}; \quad V_{см} = \frac{1,76}{0,364} \cdot 10^{-3} = 0,00483 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество составляющих газовой смеси, выделяющейся через неплотности фланцевых соединений трубопровода, г/ч

$$G_i = V_{см} C_i;$$

$$G_{H_2O} = 0,00483 \cdot 213383 \cdot 10^{-3} = 1,03;$$

$$G_{CO} = 0,00483 \cdot 29\,072 \cdot 10^{-3} = 0,1407;$$

$$G_{CH_4} = 0,00483 \cdot 121799 \cdot 10^{-3} = 0,59.$$

Пример 2.2. Определить количество вредных веществ, выделяющихся через неплотности фланцевых соединений из аппарата диаметром 1,4 м и высотой 2,5 м Степень заполнения жидкостью $k_з = 0,7$.

Исходные данные. Состав жидкости в аппарате, % (масс.): вода 40, бензол 30, дихлорэтан 30 Газовая среда в аппарате — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi = 50\%$. Концентрация аммиака в воздухе $C_{NH_3} = 10$ мг/м³. Температура жидкости и газовой среды в аппарате $t = 40$ °С. Давление наружной среды $B = 101\,325$ Па. Избыточное давление среды в аппарате $p_{изб} = 101\,325$ Па

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих газовой среды: $M_{H_2O} = 18,015$; $M_б = 78,10$; $M_д = 98,97$; $M_в = 28,96$; $M_{NH_3} = 17,81$.

Мольные доли составляющих жидкости.

$$n_i = \frac{a_i/M_i}{\sum (a_i/M_i)};$$

$$n_{H_2O} = \frac{0,4/18,015}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,7637;$$

$$n_б = \frac{0,3/78,10}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,1321;$$

$$n_д = \frac{0,3/98,97}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,1042.$$

Из Приложения I находим эмпирические коэффициенты A, B, C для каждого компонента смеси жидкости:

вода	$A = 7,9608$,	$B = 1678$,	$C = 230$;
бензол	$A = 6,912$,	$B = 1214,6$,	$C = 221,2$;
дихлорэтан	$A = 7,184$,	$B = 1358,5$,	$C = 232$.

Парциальное давление насыщенных паров компонентов над чистыми жидкими веществами

$$\lg p^н = A - B/(C + t);$$

$$\lg p^н_{H_2O} = 7,9608 - 1678/(230 + 40) = 1,7460;$$

$$p^н_{H_2O} = 56,7 \text{ мм рт. ст.}; \text{ или } 7541,1 \text{ Па};$$

$$\lg p_б^н = 6,912 - 1214,6/(221,2 + 40) = 2,262;$$

$$p_б^н = 182,5 \text{ мм рт. ст.}; \text{ или } 24273,5 \text{ Па};$$

$$\lg p_д^н = 7,184 - 1358,5/(232 + 40) = 2,190;$$

$$p_д^н = 155 \text{ мм рт. ст., или } 20615 \text{ Па}.$$

Парциальное давление паров компонентов над смесью жидкости, Па:

$$p_i = n_i p_i^н;$$

$$p_{ж H_2O} = 7541{,}1 \cdot 0{,}7637 = 5759{,}14;$$

$$p_{жб} = 24272{,}5 \cdot 0{,}1321 = 3206{,}4;$$

$$p_{жд} = 20615 \cdot 0{,}1042 = 2148\ 0.$$

Парциальное давление насыщенных водяных паров в газовой среде

$$\lg p^н_{H_2O} = 0{,}622 + 7\ 5/t/(238 + t);$$

$$\lg p^н_{H_2O} = 0{,}622 + 7{,}5 \cdot 40/(238 + 40) = 1{,}7011;$$

$$p_{H_2O} = 50{,}2 \text{ мм рт. ст.; или } 6676 \text{ Па.}$$

Давление водяных паров в газовой среде при заданной влажности

$p_{H_2O} = p^н_{H_2O}\varphi$; $p_{г.H_2O} = 50{,}2 \cdot 0{,}5 = 25{,}1$ мм рт. ст., или 3338 Па.

Полное давление среды в аппарате:

$$p_{абс} = p_{изб} + B; \qquad p_{абс} = 101\,325 + 101\,325 = 202\,650 \text{ Па.}$$

Парциальное давление примеси (аммиака) в газовой фазе:

$$p = \frac{C\,(273 + t)\ 133{,}3}{16M \cdot 1000};$$

$$p_{г.NH_3} = \frac{10\,(273 + 40)\ 133{,}3}{16 \cdot 17{,}31 \cdot 1000} = 1{,}503 \text{ Па.}$$

В табл. 2.4 приведены возможные парциальные давления компонентов в газовой смеси над жидкостью.

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха:

$$p_в = 202\,650 - (5759 + 3206{,}4 + 2148 + 1{,}503) = 191\,535{,}5 \text{ Па.}$$

Объемные доли газовых составляющих:

$$i_i = p_i/p_{абс}; \quad i_{H_2O} = 5759/202\,650 = 0{,}028;$$

$$i_б = 3206/202\,650 = 0{,}0158; \qquad i_д = 2148/202\,650 = 0{,}0106;$$

$$i_{NH_3} = 1{,}503/202\,650 = 0{,}000007; \quad i_в = 191535{,}5/202\,650 = 0{,}9451.$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000/[(273 + t)\,133{,}3];$$

$$C_{H_2O} = 16 \cdot 5759 \cdot 18{,}015 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 39\,876;$$

$$C_б = 16 \cdot 3206{,}4 \cdot 78{,}10 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 96\,258;$$

$$C_д = 16 \cdot 2148 \cdot 98{,}97 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 81\,710.$$

$$C_{NH_3} = 10;$$

$$C_в = 16 \cdot 191\,535{,}5 \cdot 28{,}96 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 2\,131\,918.$$

Произведения $i_i\rho_i$ для составляющих газовой смеси, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2O}\rho_{H_2O} = 39876\ (0{,}0398);$$

$$i_б\rho_б = 96\,258\ (0{,}0963);$$

$$i_д\rho_д = 81\,710 (0{,}0817);$$

$$i_{NH_3}\rho_{NH_3} = 10\ (0{,}00001);$$

$$i_в\rho_в = 2\,131\,918 (2{,}1319).$$

Плотность газовой смеси в аппарате

$$\rho_{см} = \Sigma i_i \rho_i; \qquad \rho_{см} = 0{,}0398 + 0{,}0963 + 0{,}0817 + 0{,}00001 + 2{,}1319 = 2{,}35 \text{ кг/м}^3.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов в аппарате:

$$M_{см} = \Sigma i_i M_i;$$

$$M_{см} = 0{,}028 \cdot 18{,}015 \cdot 78{,}10 + 0{,}0106 \cdot 98{,}97 + 0{,}9451 \cdot 28{,}96 + 0{,}000007 \cdot 17{,}31 = 30{,}17.$$

Объем занимаемый газовой фазой в аппарате:

$$V = 0{,}785 \cdot 1{,}4^2 \cdot 2{,}5(1 - 0{,}7) = 1{,}154 \text{ м}^3.$$

Коэффициент негерметичности аппаратов, подвергающихся повторному испытанию (существующий): $m = 0{,}005$.

Количество газовой смеси, выделяющейся из аппарата:

$$G_{см} = 3{,}57 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}5 m p_{изб} V \sqrt{M_{см}/T};$$

$$G_{см} = 3{,}57 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}005 \cdot 101325 \cdot 1{,}154 \sqrt{30{,}166/(273 + 40)} = 9{,}72 \text{ г/ч}.$$

Объем газовой смеси, выделяющейся из аппарата:

$$V_{см} = G_{см}/\rho_{см}; \qquad V_{см} = \frac{9{,}72}{2{,}35} \cdot 10^{-3} = 0{,}004135 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество составляющих газовой смеси, выделяющихся через неплотности фланцевых соединений аппарата, г/ч:

$$G_i = V_{см} C_i;$$

$$G_{H_2O} = 0{,}004135 \cdot 39\,876 \cdot 10^{-2} = 0{,}165;$$

$$G_б = 0{,}004135 \cdot 96\,258 \cdot 10^{-4} = 0{,}398;$$

$$G_д = 0{,}004135 \cdot 81\,710 \cdot 10^{-3} = 0{,}338;$$

$$G_{NH_3} = 0{,}004135 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0{,}00004;$$

$$G_в = 0{,}004135 \cdot 2\,131\,918 \cdot 10^{-5} = 8{,}815.$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через неплотности фланцевых соединений при $p_{изб} < 0{,}02 \cdot 10^5$ Па. Ввиду незначительной величины количество вредных веществ при $p_{изб} < 0{,}02 \times 10^5$ Па можно принимать равным 0: $G = 0$.

Определение количества вредных веществ, выделяющихся через щелевой зазор. При разности давлений в аппарате и окружающей среде $\Delta p < 0{,}02 \times 10^5$ Па и малых размерах неплотностей в виде сквозных пор количество выделяющегося в атмосферу газа или пара определяют по формуле, г/ч:

$$G = \frac{1406 F^2 p_{изб}}{\nu_{см} l g} 10^{-3}, \qquad (2.3)$$

где F — площадь щелевого зазора, м^2; $p_{изб}$ — разность давлений в аппарате и окружающей среде, Па; $\nu_{см}$ — кинематическая вязкость газовой смеси в аппарате, м^2/с; l — средняя длина щелевого зазора, м; g — ускорение свободного падения, м/с^2.

Пример 2.3. Определить количество вредных веществ, выделяющихся через щелевой зазор аппарата диаметром 1,4 м. Толщина щелевого зазора $\delta = 0{,}0005$ м, длина щелевого зазора $l = 0{,}05$ м.

Исходные данные. Разность давлений в аппарате и окружающей среде $p_{изб} = 0{,}01 \cdot 10^5$ Па. Состав жидкости и газовой среды, а также температуру взять из примера 2.2. Давление наружной среды $B = 101\,325$ Па.

Решение. Парциальное давление газовой среды в аппарате (см. решение примера 2.2), Па: $p_{H_2O}=5759$; $p_б=3206{,}4$; $p_д=2148$; $p_{NH_3}=1{,}503$.

Полное давление среды в аппарате:

$$p_{абс}=p_{изб}+B; \qquad p_{абс}=0{,}01\cdot10^5+101\,325=102\,325 \text{ Па}.$$

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха:

$$p_в=102\,325-(5759+3206{,}4+2148+1{,}503)=91\,210{,}1 \text{ Па}.$$

Объемные доли газовых составляющих:

$$i_i=p_i/p_{абс};$$

$$i_{H_2O}=5759/102\,325=0{,}0563; \qquad i_б=3206{,}4/102\,325=0{,}0314;$$

$$i_д=2148/102\,325=0{,}0212; \qquad i_{NH_3}=1{,}503/102\,325=0{,}000015;$$

$$i_в=91210{,}1/102325=0{,}892.$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i=16p_iM_i\cdot1000/[(273+t)133{,}3];$$

$$C_{H_2O}=16\cdot5759\cdot18{,}015\cdot1000/[(273+40)133{,}3]=39\,876;$$

$$C_б=16\cdot3206{,}4\cdot78{,}10\cdot1000/[(273+40)133{,}3]=96\,258;$$

$$C_д=16\cdot2148\cdot98{,}97\cdot1000/[(273+40)133{,}3]=81\,710;$$

$$C_в=16\cdot91210{,}1\cdot28{,}96\cdot1000/[(273+40)133{,}3]=1\,012\,946.$$

Произведение $i_i\rho_i$ для составляющих газовой смеси, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2O}\rho_{H_2O}=39\,876\ (0{,}0398); \qquad i_б\rho_б=96\,258\ (0{,}0963);$$

$$i_д\rho_д=81\,710\ (0{,}0817); \qquad i_{NH_3}\rho_{NH_3}=10\ (0{,}00001);$$

$$i_в\rho_в=1\,012\,946\ (1{,}013).$$

Плотность газовой смеси в аппарате:

$$\rho_{см}=\Sigma i_i\rho_i;$$

$$\rho_{см}=0{,}0398+0{,}0963+0{,}0817+0{,}00001+1{,}013=1{,}231 \text{ кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t=0$ °С (см. Приложение I), Па·с:

$$\mu_{0H_2O}=82\cdot10^{-7}; \quad \mu_{0б}=70\cdot10^{-7}; \quad \mu_{0д}=61\cdot10^{-7};$$

$$\mu_{0NH_3}=93\cdot10^{-7}; \quad \mu_{0в}=171\cdot10^{-7}.$$

Константы Сатерленда (см. Приложение I):

$$Sat_{H_2O}=673; \quad Sat_б=380; \quad Sat_д=524; \quad Sat_{NH_3}=503; \quad Sat_в=107.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t=40$ °С, Па·с:

$$\mu_t=\mu_0\frac{273+Sat}{(273+t)+Sat}\left(\frac{273+t}{273}\right)^{1,5};$$

$$\mu_{tH_2O}=82\cdot10^{-7}\frac{273+673}{313+673}\left(\frac{313}{273}\right)^{1,5}=96{,}58\cdot10^{-7};$$

$$\mu_{tб}=70\cdot10^{-7}\frac{273+380}{313+380}\left(\frac{313}{273}\right)^{1,5}=80{,}97\cdot10^{-7};$$

$$\mu_{tд} = 61 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 524}{313 + 524} \left(\frac{313}{273}\right)^{1,5} = 71,30 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{tNH_3} = 93 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 503}{313 + 503} \left(\frac{313}{273}\right)^{1,5} = 109,1 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{tв} = 171 \cdot 10^{-7} \frac{273 + 107}{313 + 107} \left(\frac{313}{273}\right)^{1,5} = 189,93 \cdot 10^{-7}.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов над жидкостью:

$$M_{см} = \Sigma l_i M_i;$$

$$M_{см} = 0,0563 \cdot 18,015 + 0,0314 \cdot 78,10 + 0,021 \cdot 98,97 + \\ + 0,000015 \cdot 17,31 + 0,892 \cdot 28,96 = 31,34.$$

Динамическая вязкость смеси газов над жидкостью:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum l_i M_i / \mu_i};$$

$$\mu_{см} = \frac{31,34}{\frac{0,0563 \cdot 18,015}{96,58 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,0314 \cdot 78,10}{80,97 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,0212 \cdot 98,97}{71,30 \cdot 10^{-7}} + \\ + \frac{0,000015 \cdot 17,31}{109,1 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,892 \cdot 28,96}{189,93 \cdot 10^{-7}}} = 152,1 \cdot 10^{-7} \text{ Па·с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов в аппарате, м²/с:

$$\nu_{см} = \frac{\mu_{см}}{\rho_{см}};$$

$$\nu_{см} = \frac{152,1 \cdot 10^{-7}}{1,231} = 123,5 \cdot 10^{-7}.$$

Площадь щелевого зазора:

$$F = \pi d \delta; \qquad F = 3,14 \cdot 1,4 \cdot 0,0005 = 0,0022 \text{ м}^2.$$

Количество газовой смеси, выделяющейся через щелевой зазор:

$$G_{см} = \frac{1406 F^2 p_{изб}}{\nu_{см} l g} \cdot 10^{-3};$$

$$G_{см} = \frac{1406 \cdot 0,0022^2 \cdot 0,01 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{123,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,05 \cdot 9,8} = 1124,52 \text{ г/ч}.$$

Объем газовой смеси, выделяющейся из аппарата:

$$V_{см} = G_{см}/\rho_{см}; \qquad V_{см} = (1124,52/1,231)\,10^{-3} = 0,915 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество составляющих газовой смеси, выделяющихся из аппарата, г/ч:

$$G_i = V_{см} C_i;$$

$$G_{H_2O} = 0,915\ 39876 \cdot 10^{-3} - 36,5; \quad G_б = 0,915\ 96258 \cdot 10^{-3} = 89,2;$$

$$G_д = 0,915 \cdot 81710 \cdot 10^{-3} = 74,8; \quad G_{NH_3} = 0,915 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,009;$$

$$G_в = 0,915 \cdot 1\,012\,946 \cdot 10^{-3} = 924.$$

Определение количества вредных веществ, выделяющихся через лабиринтное уплотнение аппарата. При лабиринтном уплотнении происходит многократное чередование последовательно расположенных зазоров и расширительных камер, что препятствует проникновению газовой смеси из оборудования в окружающую среду. Зазоры в лабиринтном уплотнении составляют примерно 0,2—0,5 мм. Количество пара или газа, выделяющихся через лабиринтное уплотнение, можно определять по формуле, г/ч:

$$G_{см} = 3{,}6 \cdot 10^6 F \sqrt{\frac{[(p_1/10^5) - (p_2/10^5)^2]\, g}{n p_1/10^5}\, \rho_{г.\,см}}, \qquad (2.4)$$

где F — площадь, зазора, м²;
p_1 и p_2 — давление перед лабиринтом и после него, Па;
n — число камер лабиринта;
$\rho_{г.см}$ — плотность газовой смеси газа или пара в аппарате, кг/м³;

Пример 2.4. Определить количество вредных веществ, выделяющихся через лабиринтное уплотнение крышки аппарата.

Исходные данные. Диаметр крышки 1,4 м. Величина зазора $\delta = 0{,}2$ мм. Число камер лабиринта $n = 2$. Давление в аппарате $p_1 = 101\,425$ Па. Давление наружной среды $p_2 = 101\,325$ Па. Состав жидкости и газовой среды, а также температура внутри аппарата взять из примера 2.2.

Решение. Площадь зазора лабиринтного уплотнения:

$$F = 3{,}14 \cdot 1{,}4 \cdot 0{,}0002 = 0{,}00088 \text{ м}^2.$$

Плотность газовой смеси в аппарате (см. пример 2.3): $\rho_{г.см} = 1{,}231$ кг/м³.

Количество газовой смеси, выделяющейся через лабиринтное уплотнение:

$$G_{см} = 3{,}6 \cdot 0{,}00088 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{[(101425/10^5)^2 - (101325/10^5)^2]\, 9{,}81}{2 \cdot 101325/10^5}\, 1{,}231} =$$

$$= 34803 \text{ г/ч}.$$

Объем газовой смеси, выделяющейся из аппарата:

$$V_{см} = G_{см}/\rho_{см}; \qquad V_{см} = (34\,803/1{,}231)\,10^{-3} = 28{,}27 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество составляющих газовой смеси, выделяющейся через лабиринтное уплотнение, г/ч:

$$G_i = V_{см} C_i;$$

$$G_{H_2O} = 39876 \cdot 28{,}27 \cdot 10^{-3} = 1127{,}29; \quad G_б = 96258 \cdot 28{,}27 \cdot 10^{-3} = 2721{,}21;$$

$$G_д = 81710 \cdot 28{,}27 \cdot 10^{-3} = 2309{,}94; \quad G_{NH_3} = 10 \cdot 28{,}27 \cdot 10^{-3} = 0{,}283;$$

$$G_в = 1\,012\,946 \cdot 28{,}27 \cdot 10^{-3} = 28\,635.$$

Определение количества вредных веществ, выделяющихся через уплотнения валов и штоков компрессоров, мешалок и реакторов. Для оценки количества выделившихся газов и паров через уплотнения валов и штоков компрессоров, мешалок и реакторов рекомендуется следующая формула, г/ч:

$$G_{см} = 2617 \cdot 3{,}6 \frac{S^3 d_{ср}\, \rho_{изб}}{l \nu_{г.\,см}}\, 10^{-6}, \qquad (2.5)$$

где S — ширина кольцевой щели (радиальный зазор), см; принимается, исходя из допусков и посадок вращающихся валов химических аппаратов в зависимости от диаметра вала $d_в$:

$d_в$, м	⩽0,1	0,1—0,3	0,3—0,12	>0,12
S, см	0	0,001	0,002	0,005

$d_{ср}$ — средний диаметр кольцевой щели, см:

$$d_{ср} = 100d_в + S; \qquad (2.6)$$

$d_в$ — диаметр вала, м; $p_{изб}$ — избыточное давление газовой смеси в оборудовании, Па; l — длина направляющей втулки уплотнения, см; $\nu_{г\,см}$ — кинетическая вязкость газовой смеси в оборудовании, м²/с.

Пример 2.5. Определить количество вредных веществ, выделяющихся через уплотнение вала мешалки аппарата.

Исходные данные: Состав жидкостн и газовой среды, а также температуру взять из примера 2.2. Давление наружной среды 101 325 Па. Избыточное давление среды в аппарате $p_{изб}$=1000 Па. Диаметр вала мешалки $d_в$= =80 мм. Длина направляющей втулки уплотнения l=160 мм.

Решение. При диаметре вала мешалки $d_в$=0,08 м ширина кольцевой щели S составляет 0,002 см.

Кинематическая вязкость газовой смеси в аппарате (см. пример 2.3):

$$\nu_{г\,см} = 123{,}5 \cdot 10^{-7}\ м^2/с.$$

Средний диаметр кольцевой щели:

$$d_{ср} = 100d_в + S; \qquad d_{ср} = 100 \cdot 0{,}08 + 0{,}002 = 8{,}002\ см.$$

Количество выделяющейся газовой смеси через уплотнение вала мешалки:

$$G_{см} = 2617 \cdot 3{,}6 \frac{S^3 d_{ср} p_{изб}}{l\nu_{г.\,см}} \cdot 10^{-4}; \qquad (2.7)$$

$$G_{см} = 2617 \cdot 3{,}6 \frac{0{,}002^3 \cdot 8{,}002 \cdot 1000 \cdot 10^{-4}}{16\ 123{,}5\ 10^{-7}} = 0{,}305\ г/ч.$$

Плотность газовой смеси, выделяющейся из аппарата (см. пример 2.2):

$$\rho_{г\,см} = 1{,}231\ кг/м^3.$$

Объем газовой смеси, выделяющейся из аппарата:

$$V_{см} = G_{см}/\rho_{см}; \qquad (2.8)$$

$$V_{см} = \frac{0{,}305}{1{,}231} 10^{-3} = 0{,}000248\ м^3/ч.$$

Количество составляющих газовой смеси, выделяющихся через уплотнение вала мешалки, г/ч:

$$G_i = V_{см} C_i; \qquad (2.9)$$

$$G_{H_2O} = 0{,}000248 \cdot 39876 \cdot 10^{-3} = 0{,}009;$$

$$G_{O_2} = 0{,}000248 \cdot 96\ 258 \cdot 10^{-3} = 0{,}024;$$

$$G_{CO_2} = 0{,}000248 \cdot 81\ 710 \cdot 10^{-3} = 0{,}020;$$

$$G_{NH_3} = 0{,}000248 \cdot 10\ 10^{-3} = 0{,}000002;$$

$$G_{N_2} = 0{,}000248 \cdot 1\ 012\ 946 \cdot 10^{-3} = 0{,}252.$$

2.2.2. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при «большом дыхании» аппарата

«Большим дыханием» называют вытеснение паров наружу или подсос воздуха внутрь аппаратов при изменении в них уровня жидкости. Наполнение почти всегда происходит при постоянных температуре и давлении в емкости $p_{изб}$. Объем вытесняемых газов (или паров при наполнении аппарата) будет, м³:

$$V_1 = V_г - V, \qquad (2.10)$$

где V_1 и V_2 — объем газов или паров в аппарате перед его наполнением и после наполнения.

Масса теряемых при дыхании газов или паров за цикл, кг/цикл:

$$G_{см}V_г\rho_{г\,см} = (V_1 - V_2)\,\rho_{г\,см}, \qquad (2.11)$$

где $\rho_{г.см}$ — плотность газов или паров, кг/м³.

Пример 2.6. Определить количество вредных веществ, выделяющихся через воздушку при большом дыхании аппарата.

Исходные данные. Состав жидкости в аппарате, % (масс.): вода 40; бензол 30 и дихлорэтан 30. Газовая среда в аппарате — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi = 50\%$. Концентрация аммиака в воздухе $C_{NH_3} = 10$ мг/м³. Температура жидкости и газовой среды в аппарате $t = 40$ °С. Давление наружной среды $B = 101\,325$ Па. Диаметр аппарата 1,4 м. Высота аппарата 2,5 м. Высота уровня жидкости перед заполнением 0,2 м. Время заполнения аппарата 40 мин при степени заполнения $k_з = 0{,}7$.

Решение. По аналогии с решением примера 2.2 находим возможные парциальные давления компонентов в газовой смеси над жидкостью Па: $p_{H_2O} = 5759$; $p_б = 3206$; $p_д = 2148$; $p_{NH_3} = 1{,}503$.

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха: $p_в = 101\,325 - (5759 + 3206{,}4 + 2148 + 1{,}503) = 90210{,}5$ Па.

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i = 16p_iM_i \cdot 1000/[(273 + t)\,133{,}3];$$

$$C_{H_2O} = 16\ 5759 \cdot 18{,}015 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 39\,876;$$

$$C_б = 16 \cdot 3206{,}4 \cdot 78{,}10 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 96\,258;$$

$$C_д = 16 \cdot 2148 \cdot 98{,}87 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 81\,710;$$

$$C_{NH_3} = 10;$$

$$C_в = 16 \cdot 90210{,}5 \cdot 28{,}96 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133{,}3] = 999\,800.$$

Объем газовой смеси перед заполнением аппарата:

$$V_1 = \pi D(H_{ап} - 0{,}2);$$

$$V_1 = 3{,}14 \cdot 1{,}4(2{,}5 - 0{,}2) = 10{,}1\ м^3.$$

Объем газовой смеси после заполнения аппарата:

$$V_2 = \pi DH_{ап}(1 - k_з);$$

$$V_2 = 3{,}14 \cdot 1{,}4(1 - 0{,}7)2{,}5 = 3{,}3\ м^3.$$

Объем вытесненной газовой смеси из аппарата за 40 мин:

$$V_г = V_1 - V_2;$$

$$V_г = 10{,}1 - 3{,}3 = 6{,}8\ м^3.$$

Количество составляющих газовой смеси, вытесненных из аппарата за 40 мин, г:

$$G_i = V_rC_i;$$

$$G_{H_2O} = 6{,}8 \cdot 39876 \cdot 10^{-3} = 271;$$

$$G_б = 6{,}8 \cdot 96\,258 \cdot 10^{-3} = 655;$$

$$G_д = 6{,}8 \cdot 81\,710 \cdot 10^{-3} = 556;$$

$$G_{NH_3} = 6{,}8 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0{,}068;$$

$$G_в = 6{,}8 \cdot 999\,800 \cdot 10^{-3} = 6800.$$

2.2.3. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при «малом дыхании» аппарата

«Малым дыханием» называют вытеснение газов или паров наружу или подсос воздуха внутрь аппарата, вызываемые изменением температуры газов или паров под влиянием внешней среды. При «малом дыхании» уровень жидкости изменяется очень незначительно, следовательно, объем газового или парового пространства аппарата остается постоянным. Давление в аппарате газовой смеси $p_{раб}$ также остается неизменным, так как ее избыток удаляется через дыхательную систему.

Если за весь период малого дыхания температура равномерно изменяется от t_1 до t_2, то равномерно изменяется и концентрация насыщенных паров от C_1 до C_2. Если температура при малом дыхании изменяется неравномерно, то весь период делят на небольшие отрезки времени и находят изменение температуры и соответствующие потери газовой смеси за каждый промежуток времени, а затем определяют общие потери. Малое дыхание характерно главным образом для аппаратов, расположенных вне помещений. Объем вытесняемых газов или паров при малом дыхании можно найти из следующего выражения (в м³):

$$V_г = V\beta(t_2 - t_1) = V\frac{\Delta t}{273}, \qquad (2.12)$$

где $V_г$ — увеличение объема газов или паров, м³; V — объем газа или пара в аппарате над жидкостью, м³; β — коэффициент объемного расширения, равный 1/273; Δt — изменение температуры газа или пара над жидкостью.

Масса теряемого при дыхании вещества определяется из выражения, кг/цикл·

$$G_i = V_г C_{iср}, \qquad (2.13)$$

где $C_{iср}$ — средняя концентрация насыщенных паров определяемого вещества за период дыхания, г/м³

$$C_{iср} = (C_{i1} + C_{i2})/2; \qquad (2.14)$$

C_{i1} и C_{i2} — концентрации насыщенных паров при t_1 и t_2.

Пример 2.7. Определить количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через воздушку аппарата при изменении в течение 1 ч температуры жидкости и газовой среды в аппарате с 40 до 42 °С.

Исходные данные. Состав жидкости в аппарате, % (масс.): вода 40; бензол 30 и дихлорэтан 30. Газовая среда в аппарате — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi = 50\%$. Концентрация аммиака в воздухе $C_{NH_3} = 10$ мг/м³. Давление наружной среды $B = 101\,325$ Па. Диаметр аппарата 1,4 м, высота аппарата 2,5 м. Степень заполнения аппарата жидкостью $k_з = 0{,}7$.

Решение. Относительные молекулярные массы составляющих газовой среды: $M_{H_2O} = 18{,}015$; $M_б = 78{,}10$; $M_д = 98{,}97$; $M_в = 28{,}96$; $M_{NH_3} = 17{,}31$.

Мольные доли составляющих жидкости:

$$n_i = \frac{a_i/M_i}{\sum a_i/M_i};$$

$$n_{H_2O} = \frac{0{,}4/18{,}015}{0{,}4/18{,}015 + 0{,}3/78{,}10 + 0{,}3/98{,}97} = 0{,}7637;$$

$$n_б = \frac{0{,}3/78{,}10}{0{,}4/18{,}015 + 0{,}3/78{,}10 + 0{,}3/98{,}97} = 0{,}1321;$$

$$n_д = \frac{0{,}3/98{,}97}{0{,}4/18{,}015 + 0{,}3/78{,}10 + 0{,}3/98{,}97} = 0{,}1042.$$

Из Приложения I находим эмпирические коэффициенты для каждого понента смеси жидкости:

вода	$A = 7{,}9608;$	$B = 1678;$	$C = 230;$
бензол	$A = 6{,}912;$	$B = 1214{,}6;$	$C = 221{,}2;$
дихлорэтан	$A = 7{,}184;$	$B = 1358{,}5;$	$C = 232.$

Парциальное давление насыщенных паров компонентов над чистыми кими веществами:

$$\lg p^{н} = A - B/(C + t);$$

при $t = 40$ °С:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 7{,}9608 - 1678/(230 + 40) = 1{,}7460;$$

$p^{н}_{H_2O} = 56{,}7$ мм. рт. ст., или 7541,1 Па;

$$\lg p_{б}^{н} = 6{,}912 - 1214{,}6/(221{,}2 + 40) = 2{,}262;$$

$p_{б}^{н} = 182{,}5$ мм рт. ст., или 24272,5 Па;

$$\lg p_{д}^{н} = 7{,}184 - 1358{,}5/(232 + 40) = 2{,}190;$$

$p_{д}^{н} = 155$ мм. рт ст, или 20 615 Па;

при $t = 42$ °С:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 7{,}9608 - 1678/(230 + 42) = 1{,}7917;$$

$p^{н}_{H_2O} = 61{,}8$ мм рт. ст., или 8239 Па;

$$\lg p_{б}^{н} = 6{,}912 - 1214{,}6/(221{,}2 + 42) = 2{,}2973;$$

$p_{б}^{н} = 198$ мм. рт. ст, или 26 397 Па;

$$\lg p_{д}^{н} = 7{,}184 - 1358{,}5/(232 + 42) = 2{,}2619;$$

$p_{д}^{н} = 182{,}5$ мм. рт. ст., или 24 331 Па.

Парциальное давление паров компонентов над смесью жидкостей, Па

$$p_i = n_i p_i^{н};$$

при $t = 40$ °С:

$$p_{H_2O} = 7541{,}1 \cdot 0{,}7637 = 5759; \quad p_{б} = 24272{,}5 \cdot 0{,}1321 = 3206{,}4;$$

$$p_{д} = 20\,615 \cdot 0{,}1042 = 2148{,}0;$$

при $t = 42$ °С:

$$p_{H_2O} = 8239 \cdot 0{,}7637 = 6292; \quad p_{б} = 26\,397 \cdot 0{,}1321 = 3487;$$

$$p_{д} = 24\,331 \cdot 0{,}1042 = 2535.$$

Парциальное давление насыщенных водных паров в газовой среде:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0{,}622 + 7{,}5t/(238 + 40);$$

при $t = 40$ °С:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0\ 622 + 7{,}5 \cdot 40/(238 + 40) = 1{,}7011;$$

$p^{н}_{H_2O} = 50{,}2$ мм. рт. ст., или 6676,6 Па;

при $t = 42$ °С:

$$\lg p^{н}_{H_2O} = 0{,}622 + 7{,}5 \cdot 42/(238 + 42) = 1\ 747;$$

$p^{н}_{H_2O} = 55{,}8$ мм. рт. ст., или 7439 Па.

Таблица 2.5 Возможные парциальные давления компонентов азовой смеси над жидкостью

Компонент	Парциальное давление компонентов, Па		Возможное парциальное давление, Па
	поступающих из жидкости	в первоначальной газовой среде	
	При $t = 40$°C		
Вода	5759	3328	5759
Бензол	3206,4	0	3206,4
Дихлорэтан	2148	0	2148
Аммиак	0	1,503	1,503
	При $t = 42$°C		
Вода	6292	3719,5	6292
Бензол	3487	0	3487
Дихлорэтан	2535	0	2535
Аммиак	0	1,52	1,52

Парциальное давление водяных паров при заданной влажности:

$$p_{H_2O} \approx p^{н}_{H_2O}\varphi;$$

при $t = 40$ **°C:**

$$p_{H_2O} \approx 6676{,}6 \cdot 0{,}5 \approx 3338 \text{ Па};$$

при $t = 42$ **°C:**

$$p_{H_2O} \approx 7439 \cdot 0{,}5 \approx 3719{,}5 \text{ Па}.$$

Парциальное давление примеси (аммиака) в газовой среде:

$$p_i \approx \frac{C_i\,(273 + t)\,133{,}3}{16 M_i \cdot 1000};$$

при $t = 40$ **°C:**

$$p_{NH_3} \approx \frac{10\,(273 + 40)\,133{,}3}{16 \cdot 17{,}31 \cdot 1000} \approx 1{,}503 \text{ Па};$$

при $t = 42$ **°C:**

$$p_{NH_3} \approx \frac{10\,(273 + 42)\,133{,}3}{16 \cdot 17{,}31 \cdot 1000} \approx 1{,}52 \text{ Па}.$$

Возможные парциальные давления компонентов газовой смеси над жидкостью приведены в табл. 2.5.

Парциальное давление основного газового компонента воздуха:

при $t = 40$ **°C:**

$$p_в = 101\,325 - (5759{,}14 + 3206{,}4 + 2148 + 1{,}503) = 90\,210 \text{ Па};$$

при $t = 42$ **°C:**

$$p_в = 101\,325 - (6292 + 3487 + 2535 + 1{,}52) = 89\,010 \text{ Па}.$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000/[(273 + t) 133{,}3];$$

при $t = 40$ °С:

$$C_{H_2O} = 16 \cdot 5759 \cdot 18{,}015 \cdot 1000/[(273 + 40)\, 133{,}3] = 39\,876;$$

$$C_б = 16 \cdot 3206{,}4 \cdot 78{,}10 \cdot 1000/[(273 + 40) 133{,}3] = 96{,}258;$$

$$C_д = 16 \cdot 2148 \cdot 98{,}97 \cdot 1000/[(273 + 40) 133{,}3] = 81\,710;$$

$$C_{NH_3} = 10; \quad C_в = 16 \cdot 90\,210 \cdot 28{,}96 \cdot 1000/[(273 + 40)\, 133{,}3] = 1\,001\,690;$$

при $t = 42$ °С:

$$C_{H_2O} = 16 \cdot 6292 \cdot 18{,}015 \cdot 1000/[(273 + 42)\, 133{,}32] = 43\,186;$$

$$C_б = 16 \cdot 3487 \cdot 78{,}108 \cdot 1000/[(273 + 42) 133{,}32] = 103\,770;$$

$$C_д = 16 \cdot 2535 \cdot 98{,}97 \cdot 1000/[(273 + 42) 133{,}32] = 95\,588;$$

$$C_{NH_3} = 10; \quad C_в = 16 \cdot 89\,010 \cdot 28{,}96\ 1000/[(273 + 42)\, 133{,}32] = 982\,115.$$

Средняя концентрация компонентов газовой смеси, мг/м³:

$$C_{ср.\ H_2O} = (39\,876 + 43\,186)/2 = 41\,531;$$

$$C_{ср\,б} = (96\,258 + 103\,770)/2 = 100\,014;$$

$$C_{ср.д} = (81\,710 + 95\,588)/2 = 88\,634;$$

$$C_{ср.\ NH_3} = 10; \quad C_{ср.\ в} = (1\,001\,690 + 982\,115)/2 = 991\,902.$$

Объем газовой смеси в аппарате:

$$V = \pi D H (1 - k_з); \qquad V = 3{,}14 \cdot 1{,}4 \cdot 2{,}5 (1 - 07) = 3{,}3 \text{ м}^3.$$

Изменение температуры газовой смеси в аппарате:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 42 - 40 = 2\ °С.$$

Увеличение объема газовой смеси при изменении температуры:

$$V_г = V \frac{\Delta t}{273} = 3{,}3 \frac{2}{273} = 0{,}024 \text{ м}^3.$$

Количество составляющих газовой смеси, выделяющихся из аппарата при малом дыхании, г/ч:

$$G_i = V_г C_{ср\,i},$$

$$G_{H_2O} = 0{,}024\ 41531 \cdot 10^{-3} = 0{,}984; \quad G_б = 0{,}024 \cdot 100\,014 \cdot 10^{-3} = 2{,}400;$$

$$G_д = 0{,}024 \cdot 88\,634 \cdot 10^{-3} = 2{,}127; \quad G_{NH_3} = 0{,}024 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0{,}00024;$$

$$G_в = 0{,}024 \cdot 991\,902 \cdot 10^{-3} = 23{,}806.$$

2.2.4. Расчет количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через щелевой зазор из аппаратов, находящихся под разрежением

Аппарат, в котором токсичная среда находится под малым разрежением (p до $0{,}01 \cdot 10^5$ Па, или p до 0,01 кгс/см²), также является источником загрязнения воздушной среды, что обусловлено диффузией вредных веществ через неплотности (сквозные поры) аппарата Этот процесс особенно опасен, когда концентрация токсичных веществ в аппарате примерно в 10^5 раз превышает предельно допустимые в рабочей зоне производственных помещений.

Количество вредных веществ, выделяющихся при разрежении, определяется по формуле, г/ч:

$$G_i = 1{,}8\frac{FC_i v}{\mathrm{Pe}^2_i}, \qquad (2.15)$$

где F — суммарная площадь щелей, м²; C_i — концентрация вредного газа в аппарате, г/м³; v — скорость воздуха в щелях, м/с; Pe — критерий Пекле в задачах диффузионного переноса вещества:

$$\mathrm{Pe}_i = vl/D_i, \qquad (2.16)$$

l — средняя длина щелей, м; D_i — коэффициент диффузии газа в воздухе, м²/с.

Формулу (2.15) можно представить в виде:

$$G_i = 1{,}8\frac{FC_i D^2_i}{vl^2}. \qquad (2.17)$$

Коэффициенты диффузии D_{0i} некоторых вредных веществ приведены в Приложении I.

Санитарными нормами рекомендуется применять преимущественно те аппараты, которые имеют паспорт и при работе которых обеспечиваются требуемые санитарно-гигиенические условия на рабочих местах.

В паспорте должны быть указаны: рабочее давление, при котором аппарат испытывался на герметичность в заводских условиях ($0{,}025\cdot10^5$ Па, или 250 кгс/м²), величина падения давления за 1 ч (не более $0{,}002\cdot10^5$ Па, или 20 кгс/м²) и количество выделяющихся вредных веществ при этом давлении G_0.

Количество вредного вещества, которое может выделяться из аппарата в процессе эксплуатации при давлении $p_э$, отличном от $p_{исп}$, определяется по формуле:

$$G_i = G_{0i}\eta\frac{C_i D^2_i}{p_э}0{,}981\cdot10^5, \qquad (2.18)$$

где η — коэффициент запаса, принимаемый в пределах 1,5—2,0; $p_э$ — разрежение в процессе эксплуатации, Па.

При разрежении более $0{,}01\cdot10^5$ Па, или 100 кг/м², аппарат рассматривают как вакуумный и к его герметичности предъявляют повышенные требования. Вредные вещества, выделяющиеся через неплотности вакуумного аппарата, не учитывают, поскольку их количество невелико.

Пример 2.8. Определить количество хлористого водорода, выделяющегося из аппарата, при разрежении в последнем $p=0{,}006\cdot10^5$ Па.

Исходные данные. Количество воздуха, отсасываемого из аппарата, составляет 20 м³/ч. Давление атмосферного воздуха $p=9{,}93\cdot10^4$ Па. Ширина щели δ в аппарате 1 мм. Концентрация хлористого водорода в аппарате 10 г/м³. Длина щели 20 мм. Диаметр аппарата 1200 мм. Температура в аппарате $t=20$ °С.

Решение. Площадь щели:

$$F = \pi D\delta = 3{,}14\cdot1{,}2\cdot0{,}001 = 0{,}00377 \text{ м}^2.$$

Скорость воздуха в щели:

$$v = V/F = 20/0{,}00377\cdot3600 = 1{,}47 \text{ м/с}.$$

Коэффициент диффузии хлористого водорода при $t=0$ °С и $p_0=101\,308$ Па (см. Приложение I):

$$D_{0\,HCl} = 13\cdot10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

Коэффициент диффузии хлористого водорода при $t=20$ °С и $P=99\,300$ Па:

$$D_l = D_0 \frac{p_0}{p}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2;$$

$$D_{HCl} = 13\ 10^{-6}\frac{101\,308}{99300}\left(\frac{273+20}{273}\right)^2 = 14{,}74\cdot 10^{-6}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

Количество хлористого водорода, выделившегося через щель при разрежении

$$G_{HCl} = 1{,}8\frac{FCD^2}{vl^2} = 1{,}8\frac{0{,}00377\cdot 10\ 14{,}74\cdot 10^{-6}}{1{,}47\cdot 0{,}02^2} = 25{,}1\cdot 10^{-9}\ \text{г/ч}.$$

2.3. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ИЗ ЖИДКОСТНОГО ОБЪЕМА ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

2.3.1. Расчет количества вредных веществ, поступающих из трубопроводов и оборудования, находящихся под давлением

Определение количества вредных веществ, поступающих через неплотности фланцевых соединений. Исходя из анализа зависимостей величин утечек от давления среды, удельного давления на прокладку, толщины прокладки, времени эксплуатации, вязкости среды, целесообразно определять величину утечки по следующей формуле, г/(м·ч):

$$G = km\sqrt{p/10^5}, \qquad (2.19)$$

где p — избыточное давление внутренней среды, Па; k — коэффициент, учитывающий материал прокладки; для паронита $k=1$, для резины $k=5$ и для фторопласта-4 $k=0{,}5$; m — коэффициент негерметичности, принимаемый, исходя из определяемой продолжительности работы фланцевого соединения.

Для вычисления величин выбросов вредных веществ в неустановившийся период эксплуатации из фланцевого соединения целесообразно пользоваться коэффициентом негерметичности для трубопроводов и оборудования, подвергаемого повторному испытанию. Для начального периода эксплуатации, а также для трубопроводов и оборудования, подвергаемых повторному испытанию, $m=0{,}005$; для вновь установленных трубопроводов и оборудования в период установившегося режима $m=0{,}001$.

Пример 2.9. Определить количество вредных веществ, выделяющихся в начальный период через фланцевое соединение, находящееся в жидкостном объеме аппарата.

Исходные данные. Давление среды в аппарате $p_{изб}=101\,325$ Па. Материал прокладки — паронит толщиной $\delta=3$ мм. Длина фланцевых соединений $l=2$ м. Состав жидкости в аппарате [в % (масс.)]: вода 40; бензол 30 и дихлорэтан 30.

Решение. Коэффициент, учитывающий материал прокладки для паронита, $k=1$. Коэффициент негерметичности для начального периода эксплуатации $m=0{,}005$. Количество смеси жидкостей, выделяющихся через неплотности фланцевых соединений:

$$G_{см} = km\sqrt{p/10^5}\,l; \qquad (2.20)$$

$$G_{см} = 0{,}005\cdot 1\sqrt{\frac{101\,325}{10^5}}\cdot 2 = 0{,}01\ \text{г/ч},$$

Количество компонентов жидкости, выделяющихся через неплотности фланцевых соединений, г/ч: $G_{H_2O}=0{,}01\cdot0{,}4=0{,}004$; $G_б=0{,}01\cdot0{,}3=0{,}003$; $G_д=0{,}001\cdot0{,}3=0{,}003$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через сальниковые уплотнения поршневых насосов. Во ВНИИТБ (г. Баку) получена формула для определения количества вредных веществ, проходящих через штоковый сальник поршневых насосов, перекачивающих малосернистые нефтепродукты (жидкие), г/ч.

$$G=3{,}19\cdot10^{-3}\pi DБ\sqrt{p}, \qquad (2.21)$$

где D — диаметр штока, мм; $Б$ — опытный коэффициент, равный 5 для агрессивных нефтепродуктов (например, алкилатов) и 2,5 для бензинов, лигроинов, керосинов и др; p — давление, развиваемое насосом, Па.

Пример 2.10. Определить количество бензина, выделяющегося через штоковый сальник насоса.

Исходные данные. Давление, развиваемое насосом, $p=2{,}94\cdot10^5$ Па. Коэффициент $Б$ для бензина $Б=2{,}5$

Решение. Количество выделяющегося бензина через штоковый сальник

$$G=3{,}19\ 10^{-3}\cdot3{,}14\cdot2{,}5\cdot25\sqrt{2{,}94\cdot10^5}=340\ \text{г/ч}.$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через уплотнения центробежных насосов в отсутствие паспортных данных. Количество вредных веществ, выделяющихся через кольцевой зазор сальникового уплотнения центробежного насоса, определяется в зависимости от режима истечения вредных веществ из щели. Различают ламинарный и турбулентный режимы истечения. Турбулентный режим истечения наблюдается при концентрической кольцевой щели при числе Рейнольдса $Re>1000$, при эксцентрической кольцевой щели при числе Рейнольдса $Re>300$. Число Рейнольдса вычисляется по формуле:

$$Re=Sv/\nu, \qquad (2.22)$$

где S — ширина кольцевой щели (или радиального зазора), см; принимается, исходя из допусков и посадок вращающихся валов химических аппаратов в зависимости от диаметров вала $d_в$:

$d_в$, м	$\leqslant0{,}01$	0,01—0,03	0,03—0,12	$>0{,}12$
S, см	0	0,001	0,002	0,005

v — скорость потока в щели, см/с; ν — коэффициент кинематической вязкости среды, см²/с.

При турбулентном потоке количество вредных веществ определяется по формуле, г/ч:

$$G=2617\cdot3{,}6S^3D_{ср}p_{изб}/(z\mu), \qquad (2.23)$$

где $D_{ср}$ — средний диаметр кольцевой щели, см:

$$D_{ср}=100d_в+S; \qquad (2.24)$$

$p_{изб}$ — избыточное давление среды в насосе, Па; z — длина направляющей втулки, см, μ - коэффициент динамической вязкости, среды, Па·с.

Количество веществ, выделяющихся через концентрическую кольцевую щель, при ламинарном течении определяется из выражения, г/ч:

$$G=9{,}24\ \frac{p_{изб}S^3D_{ср}g\rho}{\mu z}\ 10^{-7}, \qquad (2.25)$$

где ρ — плотность среды, кг/м³.

При эксцентрической форме вала или щели потери вещества увеличиваются, и в этом случае они определяются по формуле:

$$G = 9{,}24\,\frac{p_{изб}S^3D_{ср}g\rho}{\mu z}\,(1-1{,}5l^2)\,10^{-7}, \qquad (2.26)$$

где l — относительная величина, равная отношению эксцентриситета к размеру максимального зазора; g — ускорение свободного падения. Потери через максимально эксцентрическую шель ($l=S$) в 2,0 раза больше, чем через концентрическую.

Пример 2.11. Определить количество бензина, выделяющегося через кольцевую щель сальника центробежного насоса.

Исходные данные. Диаметр вала 25 мм Давление, развиваемое насосом, $2{,}94\cdot10^5$ Па (30 м водяного столба). Вал концентричен. Длина направляющей втулки 50 мм. Температура перекачиваемого бензина $t=30$ °С.

Решение. При диаметре вала 0,01 м$<d_в<$0,03 м ширина кольцевой щели составнт $S=0{,}001$, что соответствует и машиностроительным нормам, когда S для 3-го класса точности составляет 0,3% $d_в$, или

$$S = 0{,}03\cdot2{,}5/100 = 0{,}00075 \text{ см}.$$

Средний диаметр кольцевой щели, см:

$$D_{ср} = 100d_в + S = 100\cdot0{,}025 + 0{,}001 = 2{,}501 \text{ см}.$$

Коэффициент динамической вязкости среды — бензина при $t=0$ °С:

$$\mu_0 = 60{,}3\cdot10^{7} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Коэффициент динамической вязкости бензина при $t=30$ °С:

$$\mu_t = \mu_0/(1 + 0{,}0368t + 0{,}000221t^2);$$

$$\mu_t = \frac{60{,}3\cdot10^{-7}}{1 + 0{,}0368\cdot30 + 0{,}000221\cdot30^2} = 26{,}18\cdot10^{-7} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Плотность бензина $\rho=751$ кг/м^3.

Количество выделяющегося бензина составляет (при ламинарном режиме и концентрической щели):

$$G = 9{,}24\,\frac{2{,}94\cdot10^5\cdot0{,}001^3\cdot2{,}501\cdot9{,}81\cdot10^{-7}\cdot751}{26{,}18\cdot10^{-7}\cdot5} = 0{,}403 \text{ г/ч}.$$

Объем просочившегося бензина: $V = \frac{G}{\rho} = \frac{0{,}403}{751}\cdot10^3 = 0{,}5366$ см^3/ч.

Площадь щели: $F=\pi D_{ср}S=3{,}14\cdot2{,}501\cdot0{,}001=0{,}00785$ см^2. Скорость потока в щели:

$$v = V/F = 0{,}5366/3600\cdot0{,}00785 = 0{,}019 \text{ см/с}.$$

Коэффициент кинематической вязкости бензина:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{26{,}18\cdot10^{-7}}{751}\cdot10^4 = 0{,}0349\cdot10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{Sv}{\nu} = \frac{0{,}001\cdot0{,}019}{0{,}0349\cdot10^{-3}} = 0{,}544.$$

Сравниваем расчетное число Рейнольдса с критическим, определяющим режим истечения из щели: $0{,}544<1000$, следовательно, режим истечения ламинарный и предварительно принятая расчетная формула для определе-

чий количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через концентрическую щель сальникового уплотнения насоса, справедлива.

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через уплотнения центробежных насосов при наличии паспортных данных. При наличии паспортных данных о количестве просачивающихся вредных веществ через сальниковое уплотнение насоса $G_{см}$, г/ч количество компонентов жидкостной смеси определяется по формуле

$$G_i = G_{см} a_i, \qquad (2.27)$$

где a_i — массовая доля компонента в смеси жидкости, %.

Пример 2.12. Определить количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух через сальниковое уплотнение насоса при наличии паспортных данных о количестве выделяющейся смеси $G_{см}=10$ г/ч.

Исходные данные. Состав жидкости, % (масс.): вода 40; бензол 30 и дихлорэтан 30.

Решение. Количество компонентов жидкости, просачивающейся через сальниковое уплотнение насоса, г/ч:

$$G_i = G_{см} a_i; \qquad G_{H_2O} = 10 \cdot 0{,}4 = 4{,}0;$$

$$G_б = 10 \cdot 0{,}3 = 3{,}0; \qquad G_д = 10 \cdot 0{,}3 = 3{,}0.$$

2.3.2. Расчет количества вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости

Количество вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости (при хранении в открытых резервуарах, пропитке, промывке, разливе и т. п.), зависит от ее химических свойств, температуры, площади зеркала испарения, продолжительности испарения и подвижности воздуха. Процесс переноса испаряющегося вещества от источника испарения в окружающую среду может быть диффузионным, а также обусловленным естественной или вынужденной конвекцией.

Процесс переноса испаряющегося вещества от источника испарения в окружающую среду определяется произведением критериев Грасгофа Gr и Прандтля Pr:

$$\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}', \qquad (2.28)$$

где

$$\mathrm{Gr} = gL^3 \Delta\rho / \nu^2 \rho; \qquad (2.29)$$

g — ускорение свободного падения, м/с²; L — определяющий размер, м; для круглой поверхности $L=d$, для квадрата $L=a$, для прямоугольника и поверхности неправильной формы $L=\sqrt{F}$; $\Delta\rho$ — разность плотностей среды над поверхностью жидкости и в удалении от нее, г/м³; ν — коэффициент кинематической вязкости окружающей среды на некотором удалении от поверхности, м²/с; ρ — плотность окружающей среды, г/м³.

Критерий Pr′ для процесса испарения принимается $\mathrm{Pr}'=0{,}66$.

Значения парциальных давлений и концентраций вредных газов и паров в атмосферном воздухе в формулах расчета количества испаряющихся веществ должны приниматься при температуре поверхности жидкости. При стационарном режиме эта температура устанавливается в соответствии с балансом тепла, которым учитывается также тепло, подводимое к жидкости извне; тепло, отдаваемое и получаемое жидкостью и воздухом в результате теплообмена между ними, и тепло, расходуемое на испарение.

В случае адиабатического процесса (подвод тепла к жидкости извне отсутствует) температуру поверхности испаряющейся жидкости можно найти, исходя из равенства теплосодержаний воздуха над поверхностью жидкости и на некотором удалении от места испарения:

$$c_{рв} t_0 + (r + c_p t_0) \frac{34{,}5 p_0 M_п}{(B - p_0)\,1000} = c_{рв} t_ж + (r + c_p t_ж) \frac{34{,}5 p_ж M_п}{(B - p_ж)\,1000}, \qquad (2.30)$$

где $c_{pв}$ и c_p — теплоемкость воздуха и пара данного вещества, кДж/(кг·К); $t_ж$ и t_0 — температура поверхности жидкости и воздуха, °С; r — скрытая теплота испарения вещества, кДж/кг; $M_п$ — молярная масса паров вещества; B — барометрическое давление.

Если не учитывать при расчетах снижение температуры поверхности жидкостей, особенно кипящих при низких температурах, то ошибка в расчетах может составить значительную величину. Для реальных условий, когда процесс испарения фактически является неадиабатическим, температуру поверхности испарения (например, поверхности горячей воды в спокойном состоянии) можно определить из приведенных ниже данных:

Температура жидкости при $t_в$=20 °С и φ=70%, °С . .	20	25	30	35	40	45	50	55	
Температура поверхности испарения, °С	18	23	28	33	37	41	45	48	
Температура жидкости при $t_в$=20 °С и φ=70%, °С . .	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Температура поверхности испарения, °С	51	54	58	63	69	75	82	90	97

При снижении температуры поверхности жидкости в формулы определения выделяющихся вредных веществ вводят поправочный коэффициент k_1:

Температура кипения жидкости, °С . .	≤80	100	150	>150
Поправочный коэффициент k_1	1,5	1,3	1,1	1,0

Если поверхность испарения снабжена укрытиями, то количество газов и паров, выделяющихся в окружающую среду, нужно определять с учетом коэффициента k_2, принимаемого в зависимости от отношения F_1/F_2, где F_1 — открытая поверхность испарения, м², F_2 — полная поверхность испарения, м²:

F_1/F_2 . . .	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,5	0,8	>0,8
k_2	0	0,01	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0

Определение количества вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости при пленочном режиме. При таком режиме около поверхности жидкости создается пленка неподвижного воздуха сравнительно большой толщины. Перенос вещества с поверхности через эту пленку обеспечивается диффузией. Диффузионный процесс переноса вещества характеризуется произведением определяющих процесс критериев $Gr \cdot Pr' < 1$.

При испарении жидкости из глубокого сосуда количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух, вычисляют по формуле, г/ч:

$$G_i = \frac{k_2}{k_1} 10^{-3} \frac{D_i F C_i}{h} \ln \frac{B - p_{0i}}{B - p_{жi}}, \qquad (2.31)$$

где D_i — коэффициент диффузии паров жидкости, см²/ч; F — площадь сосуда, м²; C_i — концентрация компонента в газовой смеси, мг/м³; h — глубина, считая от верхнего края сосуда до поверхности жидкости, м; B — барометрическое давление, Па; p_{0i} — парциальное давление паров на некотором удалении от источника, Па; $p_{жi}$ — парциальное давление паров над поверхностью жидкости при температуре испарения, Па; k_1 — коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения; k_2 — коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения.

При испарении жидкости с малых поверхностей (например, с шариков ртути) количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух, определяется по формуле, г/ч:

$$G_i = 7{,}2 D_i \sqrt{\frac{F}{0{,}785}} \frac{p_{жi} - p_{0i}}{B} \frac{k_2}{k_1} \rho_{t_0} \qquad (2.32)$$

где F — поверхность испарения, м²; $p_{жi}$ — парциальное давление паров над поверхностью жидкости, Па; ρ — плотность паров жидкости, кг/м³.

Пример 2.13. Определить количество испаряющихся через люк вредных веществ.

Исходные данные. Давление атмосферное $B=101\,325$ Па; диаметр люка 0,5 м. Диаметр аппарата 1,4 м, высота аппарата 2,5 м. Степень заполнения жидкостью $k_з=0{,}7$. Состав жидкости в аппарате, % (масс): вода 40, бензол 30 и дихлорэтан 30. Газовая среда в аппарате и снаружи — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi=50\%$. Концентрация аммиака в воздухе $C=10$ мг/м³. Температура жидкости и газовой среды в аппарате $t=40$ °С.

Решение. Из решения примера 2.2 парциальные давления паров компонентов над смесью жидкости, Па: $p_{H_2O}=5759$; $p_б=3206{,}4$; $p_д=2148{,}0$.

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t=0$ °С и $p_0=101\,308$ Па (см. Приложение I), м/с: $D_{0H_2O}=18{,}8\cdot10^{-6}$; $D_{0б}=9{,}05\cdot10^{-6}$; $D_{0д}=8{,}02\cdot10^{-6}$.

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t=40$ °С и $p=101\,325$ Па, м²/с:

$$D_t=\frac{p_0}{p}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 D_0;$$

$$D_{tH_2O}=18{,}8\cdot10^{-6}\,\frac{101\,308}{101\,325}\left(\frac{273+40}{273}\right)^2=24{,}69\cdot10^{-6};$$

$$D_{tб}=9{,}05\cdot10^{-6}\,\frac{101\,308}{101\,325}\left(\frac{273+40}{273}\right)^2=11{,}89\cdot10^{-6};$$

$$D_{tд}=8{,}02\cdot10^{-6}\,\frac{101\,308}{101\,325}\left(\frac{273+40}{273}\right)^2=10{,}54\cdot10^{-6}.$$

Площадь поверхности испарения в аппарате:

$$F_{ап}=0{,}785d^2_{ап}=0{,}785\cdot1{,}4^2=1{,}5386\ \text{м}^2.$$

Площадь люка:

$$F_л=0{,}785d^2_л=0{,}785\cdot0{,}5^2=0{,}1962\ \text{м}^2.$$

Отношение:

$$F_л/F_{ап}=0{,}1962/1{,}5386=0{,}127.$$

Коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения, при $F_л/F_{ап}=0{,}127$ составит $k_2=0{,}2$.

Температура кипения компонентов жидкости, °С: вода — 100, бензол — 80,1 и дихлорэтан — 83,5.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения, для воды $k_1=1{,}0$, бензола $k_1=1{,}3$ и дихлорэтана $k_1=1{,}3$.

Глубина, считая от верхнего края люка до поверхности жидкости:

$$h=H_{ап}(1-k_з)=2{,}5(1-0{,}7)=0{,}75\ \text{м}.$$

Концентрации компонентов газовой смеси над поверхностью жидкости (из расчета примера 2.2), мг/м³: $C_{H_2O}=39\,876$; $C_б=96\,258$ и $C_д=81\,710$.

Парциальное давление компонентов газовой смеси в наружной среде, Па: $p_{H_2O}=3328$; $p_б=0$ и $p_д=0$.

Количество компонентов газовой смеси, выделяющихся с поверхности испарения и поступающих в наружную среду через люк, г/ч:

$$G=\frac{k_2}{k_1}\,10^{-3}\,\frac{D_iFC_i}{h}\ln\frac{B-p_{0i}}{B-p_{жi}};$$

$$G_{H_2O} = \frac{0,2}{1,0} 10^{-3} \frac{24,69 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 1,5386 \cdot 39\,876}{0,75};$$

$$\ln \frac{101\,325 - 3328}{101\,325 - 5759} = 0,0364;$$

$$G_б = \frac{0,2}{1,3} 10^{3} \frac{11,89\ 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 1,5386\ 96\,258}{0,75};$$

$$\ln \frac{101\,325 - 0}{101\,325 - 3206,4} = 0,0419;$$

$$G_д = \frac{0,2}{1,3} 10^{-3} \frac{10,54 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 1,5386 \cdot 81\,710}{0,75};$$

$$\ln \frac{101\,325 - 0}{101\,325 - 2148} = 0,0038.$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при испарении с поверхности жидкости при ламинарном и локонообразном режимах. Ламинарный и локонообразный режимы движения воздуха наружной среды вблизи поверхности испарения наблюдаются при

$$2 \cdot 10^2 < \mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}' < (\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}')_{кр}. \quad (2.33)$$

При испарении со смоченных вертикальных стенок можно считать, что

$$(\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}')_{кр} \approx 2,3 \cdot 10^8. \quad (2.34)$$

Если испарение происходит с горизонтальной поверхности жидкости, пары которой легче воздуха или наружной среды, то

$$(\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}')_{кр} \approx 7,1 \cdot 10^5, \quad (2.35)$$

а если пары тяжелее воздуха или наружной среды, то

$$(\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}')_{кр} \approx 1,1 \cdot 10^9. \quad (2.36)$$

Ниже приведены формулы для определения количества испаряющихся веществ с горизонтальной и вертикальной поверхностей в зависимости от разности концентраций и разности парциальных давлений.

1. Пары испаряющейся жидкости легче воздуха или наружной среды (поверхность испарения — горизонтальная)

$$G_i = 118 F L^{-1/4} D_i^{1/2} (C_ж - C_0)^{5/4} \left(\frac{M_{н.\,ср}}{M_i} - 1 \right)^{1/4} \rho_{н.\,ср}^{-1/4} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.37)$$

$$G_i = 11,4 \cdot 10^{-4} F L^{-1/4} D_i^{1/2} (p_ж - p_0)^{5/4} M_i^{5/4} \left(\frac{M_{н.\,ср}}{M_i} - 1 \right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1}, \quad (2.38)$$

где G — количество испаряющихся веществ, г/ч; F — площадь испарения, м²; L — определяющий размер поверхности (диаметр, сторона квадрата, меньшая сторона прямоугольника или для поверхности неправильной формы $L = \sqrt{F}$); $M_{н.ср}$ — молекулярная масса паров наружной среды; M_i — молекулярная масса паров определяемого вещества; $\rho_{н\,ср}$ — плотность наружной среды над поверхностью жидкости; $p_ж$ и p_0 — парциальное давление паров соответственно над поверхностью жидкости и в наружной среде, Па; $C_ж$ и C_0 — концентрация паров над поверхностью жидкости и в наружной среде, г/м³; k_1 — коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения; k_2 — коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения; D_i — коэффициент диффузии паров жидкости, см²/с.

2. Пары испаряющейся жидкости тяжелее воздуха или наружной среды (поверхность испарения — горизонтальная); $M_i > M_{н.ср}$:

$$G_i = 65FL^{1/4}D_i^{1/3}(C_ж - C_0)^{5/4}\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/4}\rho_{н.ср}^{-1/4}\frac{k_2}{k_1}; \quad (2.39)$$

$$G_i = 6{,}4\cdot10^{-4}FL^{-1/3}D_i^{1/3}(p_ж - p_0)^{5/4}M_i^{5/4}\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/4}\frac{k_2}{k_1}. \quad (2.40)$$

3. Пары испаряющейся жидкости легче (или тяжелее) воздуха или наружной среды (поверхность испарения — вертикальная):

$$G_i = 79FL^{-1/4}D_i^{1/2}(C_ж - C_0)^{5/4}\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/4}\rho_{н.ср}^{-1/4}\frac{k_2}{k_1}; \quad (2.41)$$

$$G_i = 7{,}5\cdot10^{-4}FL^{-1/4}D_i^{1/2}(p_ж - p_0)^{5/4}M_i^{5/4}\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/4}\frac{k_2}{k_1}. \quad (2.42)$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух, при испарении их с поверхности жидкости при турбулентном режиме. Турбулентный режим движения воздуха (наружной среды) вблизи поверхности испарения наблюдается при

$$Gr\cdot Pr' > (Gr\cdot Pr')_{кр}. \quad (2.43)$$

1. Пары испаряющейся жидкости легче воздуха или наружной среды $M_i < M_{н.ср}$ (поверхность испарения — горизонтальная):

$$G_i = 104FD_i^{1/3}(C_ж - C_0)^{4/3}\left(\frac{M_{н.ср}}{M_i} - 1\right)^{1/3}\rho_{н.ср}^{-1/3}\frac{k_2}{k_1}; \quad (2.44)$$

$$G_i = 3{,}0\cdot10^{-4}FD_i^{1/3}(p_ж - p_0)^{4/3}M_i^{4/3}\left(\frac{M_{н.ср}}{M_i} - 1\right)^{1/3}\frac{k_2}{k_1}. \quad (2.45)$$

2. Пары испаряющейся жидкости тяжелее воздуха или наружной среды $M_i > M_{н.ср}$ (поверхность испарения — горизонтальная):

$$G_i = 52FD_i^{1/3}(C_ж - C_0)^{4/3}\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/3}\rho_{н.ср}^{-1/3}\frac{k_2}{k_1}; \quad (2.46)$$

$$G_i = 1{,}5\ 10^{-4}FD_i^{1/3}(p_ж - p_0)^{4/3}M_i^{4/3}\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/3}\frac{k_2}{k_1}. \quad (2.47)$$

3. Пары испаряющейся жидкости легче (или тяжелее) воздуха или наружной среды (поверхность испарения — вертикальная):

$$G_i = 78FD_i^{1/3}(C_ж - C_0)^{4/3}\left|\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)\right|^{1/3}\rho_{н.ср}^{-1/3}\frac{k_2}{k_1}; \quad (2.48)$$

$$G_i = 2{,}25\ 10^{-4}FD_i^{1/3}(p_ж - p_0)^{4/3}M_i^{4/3}\left|\left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)\right|^{1/3}\frac{k_2}{k_1}. \quad (2.49)$$

Все приведенные формулы относятся к испарению при естественной конвекции, которая наблюдается, когда коэффициент обмена A близок или равен коэффициенту молекулярной диффузии вещества D. Методику определения коэффициента обмена A см. в гл. 4.

Пример 2.14. Определить количество вредных веществ, испаряющихся через открытую поверхность аппарата, полностью заполненного жидкостью.

Исходные данные. Диаметр аппарата 1,4 м. Состав жидкости в аппарате, % (масс.): вода 40, бензол 30 и дихлорэтан 30. Наружная среда — воздух с примесью аммиака Влажность воздуха $\varphi = 50\%$. Концентрация аммиака в воздухе $C_{NH_3} = 10$ мг/м³. Температура жидкости $t = 40$ °С. Тепло к аппарату не подводится. Барометрическое давление наружной среды $B = 101\,325$ Па Температура наружной среды $t = 16$ °С.

Решение. Относительные молекулярные массы компонентов, составляющих наружную среду: $M_в = 28{,}96$; $M_{H_2O} = 18{,}015$; $M_{NH_3} = 17{,}31$. Парциальное давление насыщенных водяных паров в воздухе наружной среды:

$$\lg p^н_{H_2O} = 0{,}622 + 7{,}5t/(238 + t) = 0{,}622 + 7{,}5 \cdot 16/(238 + 16) = 1{,}0944;$$

$$p = 12{,}4 \text{ мм рт ст., или } 1653 \text{ Па.}$$

Парциальное давление водяных паров в воздухе наружной среды при заданной влажности:

$$p_{H_2O} = p^н_{H_2O}\varphi = 1653 \cdot 0{,}5 = 826{,}5 \text{ Па.}$$

Парциальное давление примеси (аммиака) в наружной среде:

$$p_i = \frac{C_i (273 + t)\, 133{,}3}{M_i \cdot 16 \cdot 1000};$$

$$p_{NH_3} = 10 (273 + 16)\, 133{,}3/17{,}31 \cdot 16 \cdot 1000 = 1{,}503 \text{ Па.}$$

Парциальное давление основного компонента наружной среды — воздуха:

$$p_в = B - \Sigma p_i = 101\,325 - (826{,}5 + 1{,}503) = 100\,397 \text{ Па.}$$

Объемные доли составляющих наружную среду:

$$i_i = p_i/B;$$

$$i_в = 100\,397/101\,325 = 0{,}9908;$$

$$i_{H_2O} = 826{,}5/101\,325 = 0{,}0081;$$

$$i_{NH_3} = 1{,}503/101\,325 = 0{,}00001.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов наружной среды:

$$M_{см} = \Sigma i_i M_i = 28{,}96 \cdot 0{,}9908 + 0{,}0081 \cdot 18{,}015 + 0{,}00001 \cdot 17{,}31 = 28{,}84.$$

Концентрации составляющих наружную среду:

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000/[(273 + t) 133{,}3];$$

$$C_{H_2O} = 16 \cdot 826{,}5 \cdot 18{,}015 \cdot 1000/[(273 + 16)\, 133{,}3] = 6784 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_в = 16 \cdot 100\,397 \cdot 28{,}96 \cdot 1000/[(273 + 16) 133{,}3] = 1\,207\,570 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{NH_3} = 10 \text{ мг/м}^3.$$

Произведение $i_i \rho_i$ для газовых составляющих наружной среды, мг/м³ (кг/м³):

$$i_в \rho_в = 1207570 \quad (1{,}2076);$$

$$i_{H_2O} \rho_{H_2O} = 6784 \quad (0{,}0068);$$

$$i_{NH_3} \rho_{NH_3} = 10 \quad (0{,}00001).$$

Плотность наружной среды:

$$\rho_{н\,ср} = \Sigma i_i \rho_i = 1{,}2076 + 0{,}0068 + 0{,}00001 = 1{,}2144 \text{ кг/м}^3.$$

Относительные молекулярные массы составляющих газовой среды над жидкостью: $M_{H_2O} = 18{,}015$; $M_б = 78{,}10$; $M_д = 98{,}97$; $M_в = 28{,}96$; $M_{NH_3} = 17{,}31$.

Мольные доли составляющих жидкости:

$$n_i = \frac{a_i/M_i}{\sum (a_i/M_i)};$$

$$n_{H_2O} = \frac{0,4/18,015}{0,4/18,015 + 0,3/78\ 10 + 0,3/98,97} = 0,7637;$$

$$n_б = \frac{0,3/78,10}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,1321;$$

$$n_д = \frac{0,3/98,97}{0,4/18.015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,1042.$$

Из Приложения I находим эмпирические коэффициенты *A, B, C* для каждого компонента смеси жидкости:

вода	$A = 7,9608;$	$B = 1678;$	$C = 230;$
бензол	$A = 6,912;$	$B = 1214,6;$	$C = 221,2;$
дихлорэтан	$A = 7.184;$	$B = 1358,5;$	$C = 232.$

Парциальное давление насыщенных паров компонентов над чистыми жидкими веществами:

$$\lg p^н = A - B/(C + t);$$

$$\lg p^н_{H_2O} = 7\ 9608 - 1678/(230 + 40) = 1,7460;$$

$$p^н_{H_2O} = 56,7 \text{ мм рт. ст., или } 7541,1 \text{ Па};$$

$$\lg p_б^н = 6,912 - 1214,6/(221,2 + 40);$$

$$p_б^н = 182,5 \text{ мм рт. ст., или } 24272,5 \text{ Па};$$

$$\lg p_д^н = 7,184 - 1358,5/(232 + 40);$$

$$p_д^н = 155 \text{ мм рт. ст., или } 20\,615 \text{ Па}.$$

Парциальное давление паров компонентов над смесью жидкости, Па:

$$p_i = n_i p^н_i; \quad p_{H_2O} = 7541,1 \cdot 0,7637 = 5759,14; \quad p_б = 24272,5 \cdot 0,1321 = 3206,4;$$

$$p_д = 20\,615 \cdot 0,1042 = 2148,0.$$

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха:

$$p_в = 101\,325 - (5759,14 + 3206,4 + 2148 + 1,503) = 90\,210 \text{ Па}.$$

Концентрации составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³:

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000/[(273 + t)\,133,3];$$

$$C_{H_2O} = 16 \cdot 5759 \cdot 18,015 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133,3] = 39\,876;$$

$$C_б = 16 \cdot 3206,4 \cdot 78,10 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133,3] = 96\,258;$$

$$C_д = 16 \cdot 2148 \cdot 98,97 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133,3] = 81\,710;$$

$$C_{NH_3} = 10;$$

$$C_в = 16 \cdot 90\,210 \cdot 28,96 \cdot 1000/[(273 + 40)\,133,3] = 1\,001\,841.$$

Произведение $i_г\rho_i$ составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{H_2O}\rho_{H_2O} = 39\,876 \quad (0,0398); \qquad i_б\rho_б = 96\,258 \qquad (0,0963);$$

$$i_д\rho_д = 81\,710 \quad (0,0817); \qquad i_{NH_3}\rho_{NH_3} = 10 \qquad (0,00001);$$

$$i_г\rho_в = 1\,001\,841 \qquad (1,0018).$$

Плотность газовой смеси над жидкостью:

$$\rho_{см} = \Sigma i_l \rho_l = 0{,}0398 + 0{,}0963 + 0{,}0817 + 0{,}00001 + \\ + 1{,}0018 = 1{,}2196 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t_0=0$ и $p_0=101\,308$ Па (см. Приложение I), м²/с: $D_{0H_2O}=18{,}8$; $D_{0б}=9{,}05\cdot10^{-6}$; $D_{0д}=8{,}02\cdot10^{-6}$.

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t=40$ °С и $p=101\,325$ Па, м²/с (м²/ч):

$$D_l = \frac{p_0}{p}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 D_0;$$

$$D_{H_2O} = 18{,}8\cdot10^{-6}\cdot\frac{101\,308}{101\,325}\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 = 24{,}69\cdot10^{-6} \quad (0{,}0888);$$

$$D_б = 9{,}05\cdot10^{-6}\cdot\frac{101\,308}{101\,325}\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 = 11{,}89\cdot10^{-6} \quad (0{,}0428);$$

$$D_д = 8{,}02\cdot10^{-6}\cdot\frac{101\,308}{101\,325}\left(\frac{273+40}{273}\right)^2 = 10{,}54\cdot10^{-6} \quad (0{,}0379).$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t=0$ (см. Приложение I), Па·с:

$\mu_{0H_2O} = 82\cdot10^{-7}$; $\mu_{0б} = 70\cdot10^{-7}$; $\mu_{0д} = 61\cdot10^{-7}$; $\mu_{0NH_3} = 93\cdot10^{-7}$;
$\mu_{0в} = 171\cdot10^{-7}$.

Константы Сатерленда (см. Приложение I):

$Sat_{H_2O} = 673$; $Sat_б = 380$; $Sat_д = 524$; $Sat_{NH_3} = 503$; $Sat_в = 107$.

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t=40$ °С, Па·с:

$$\mu_l = \mu_0 \frac{273+\text{Sat}}{T+\text{Sat}}\left(\frac{T}{273}\right)^{1,5};$$

$$\mu_{H_2O} = 82\cdot10^{-7}\frac{273+673}{273+40+673}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 96{,}58\cdot10^{-7};$$

$$\mu_б = 70\cdot10^{-7}\frac{273+380}{273+40+380}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 80{,}97\cdot10^{-7};$$

$$\mu_д = 61\cdot10^{-7}\frac{273+524}{273+40+524}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 71{,}3\cdot10^{-7};$$

$$\mu_{NH_3} = 93\cdot10^{-7}\frac{273+503}{273+40+503}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 109\cdot10^{-7};$$

$$\mu_в = 171\cdot10^{-7}\frac{273+107}{273+40+107}\left(\frac{273+40}{273}\right)^{1,5} = 189{,}9\cdot10^{-7}.$$

Объемные доли газовых составляющих над жидкостью:

$i = p_l/p_{абс}$: $i_{H_2O} = 5759{,}14/101\,325 = 0{,}0568$; $i_б = 3206{,}4/101\,325 = 0{,}0316$;
$i_д = 2148/101\,325 = 0{,}0212$; $i_{NH_3} = 1{,}503/101\,325 = 0{,}00001$;
$i_в = 90\,210/101\,325 = 0{,}8903$.

Относительная молекулярная масса смеси газов над жидкостью:

$$M_{см} = \Sigma i_i M_i = 0{,}0568 \cdot 18{,}015 + 0{,}0316 \cdot 78{,}10 + \\ + 0{,}0212 \cdot 98{,}97 + 0{,}00001 \cdot 17{,}31 + 0{,}8903 \cdot 28{,}96 = 31{,}37.$$

Динамическая вязкость смеси газов над жидкостью

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum i_i M_i / \mu_i};$$

$$\mu_{см} = \frac{31{,}37}{\frac{0{,}0568 \cdot 18{,}015}{96{,}58 \cdot 10^{-7}} + \frac{0{,}0316 \cdot 78{,}10}{80{,}97 \cdot 10^{-7}} + \frac{0{,}0212 \cdot 98{,}97}{71{,}30 \cdot 10^{-7}} + \\ + \frac{0{,}00001 \cdot 17{,}31}{109 \cdot 10^{-7}} + \frac{0{,}8903 \cdot 28{,}96}{189{,}93 \cdot 10^{-7}}} = 160 \cdot 10^{-7} \text{ Па·с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов над жидкостью:

$$\nu_{см} = \mu_{см}/\rho_{см} = 160 \cdot 10^{-7}/1{,}2196 = 131{,}19 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определяющий размер поверхности испарения: $L = 1{,}4$ м. Критерий Грасгофа

$$Gr = gL^3 \Delta\rho/\nu^2\rho;$$

$$Gr = \frac{9{,}81 \cdot 1{,}4^3 (1219{,}6 - 1214{,}4)}{(131{,}19 \cdot 10^{-2})^2 \, 1219{,}6} = 6{,}66 \cdot 10^8.$$

Критерий Прандтля $Pr' = 0{,}66$.

Произведение критериев $Gr \cdot Pr' = 6{,}66 \cdot 10^8 \cdot 0{,}66 = 4{,}39 \cdot 10^8$.

По нашим расчетам $M_{н.ср} = 28{,}84$, а $M_{H_2O} = 18{,}05$; $M_б = 78{,}10$; $M_д = 98{,}97$, т. е. $M_{H_2O} < M_{н.ср}$; $M_б > M_{н.ср}$ и $M_д > M_{н.ср}$.

Границы применения формул для расчета количества вредных веществ, испаряющихся с горизонтальной поверхности:

для водяных паров $Gr \cdot Pr'_{кр} = 7{,}1 \cdot 10^5$, наше значение $Gr \cdot Pr' = 4{,}39 \cdot 10^8$, следовательно, режим испарения турбулентный;

для бензола $Gr \cdot Pr'_{кр} = 1{,}1 \cdot 10^9$, наше значение $Gr \cdot Pr' = 4{,}39 \cdot 10^8$, следовательно, режим испарения ламинарный или локонообразный;

для дихлорэтана $Gr \cdot Pr'_{кр} = 1{,}1 \cdot 10^9$, наше значение $Gr \cdot Pr' = 4{,}39 \cdot 10^8$, следовательно, режим испарения ламинарный или локонообразный.

Температура кипения компонентов жидкости, °С: вода 100, бензол 80.1 и дихлорэтан 83,5.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения: $k_1 = 1{,}0$ для воды, $k_1 = 1{,}3$ для бензола и дихлорэтана.

Коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения k_2 при $F_и/F_{ап} = 1$ равен $k_2 = 1$.

Площадь поверхности испарения: $F = 0{,}785 \, D^2_{ап} = 0{,}785 \cdot 1{,}4^2 = 1{,}5386$ м^2.

Количество испаряющихся вредных веществ:

для воды:

$$G_i = 3{,}0 \cdot 10^{-4} F D^{1/3} (p_ж - p_0)^{4/3} M^{4/3}_i \left(\frac{M_{н.ср}}{M_i} - 1 \right)^{1/3} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_{H_2O} = 3{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}5386 \cdot 0{,}0888^{1/3} (5759 - 826{,}5)^{4/3} \, 18{,}015^{4/3} \times \\ \times \left(\frac{28{,}84}{18{,}015} - 1 \right)^{1/3} \frac{1}{1{,}3} = 685{,}1 \text{ г/ч};$$

для бензола:

$$G_i = 6{,}4 \cdot 10^{-4} F D^{1/3} L^{-1/4} (p_ж - p_0)^{5/4} M^{5/4}_i \left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_б = 6{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}5386 \cdot 1{,}4^{-1/4} \cdot 0{,}0428^{1/2} (3206{,}4 - 0)^{5/4} 78{,}1^{5/4} \times$$

$$\cdot \left(1 - \frac{28{,}84}{78{,}1}\right)^{1/4} \frac{1}{1{,}3} = 718{,}4 \text{ г/ч};$$

для дихлорэтана.

$$G_i = 6{,}4\ 10^{-4} F D^{1/3} L^{-1/4} (p_ж - p_0)^{5/4} M^{5/4}_i \left(1 - \frac{M_{н.ср}}{M_i}\right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_д = 6{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}5386 \cdot 1{,}4 \cdot 0{,}0379^{1/2} (2148 - 0)^{5/4} 98{,}97^{5/4} \times$$

$$\cdot \left(1 - \frac{28{,}84}{98{,}97}\right)^{1/4} \frac{1}{1{,}3} = 567{,}7 \text{ г/ч}.$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при испарении их с поверхности жидкости при вынужденной конвекции газового потока. В потоке воздуха (вынужденная конвекция) количество испаряющейся жидкости описывается уравнением, г/ч:

$$G_i = 7{,}5 \cdot 10^{-3} (5{,}38 + 4{,}1v) F p_i \sqrt{M_i} \frac{k_2}{k_1}, \qquad (2.50)$$

где v — скорость движения воздуха над поверхностью испарения, м/с.

Пример 2.15. Определить количество испаряющихся вредных веществ из аппарата, наполненного смесью жидкостей, % (масс.): вода 40, бензол 30, дихлорэтан 30

Исходные данные. Диаметр аппарата $D = 1{,}4$ м. Температура жидкости $t = 40$ °С. Тепло к аппарату не подводится. Барометрическое давление наружной среды $B \approx 101\,325$ Па. Скорость движения наружной среды над поверхностью жидкости $v = 2$ м/с.

Решение. Поверхность испарения жидкости: $F = 0{,}785\ D^2_{ап} = 0{,}785 \cdot 1{,}4^2 = 1{,}5386$ м^2.

Парциальное давление компонентов жидкости над ее поверхностью (см. решения примера 2.2), Па: $p_{H_2O} = 5759$; $p_б = 3206{,}4$; $p_д = 2148{,}0$.

Относительные молекулярные массы компонентов: $M_{H_2O} = 18{,}015$; $M_б = 78{,}10$; $M_д = 98{,}97$.

Температура кипения компонентов жидкости $t_к$, °С: вода 100, бензол 80,1, дихлорэтан 83,5.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения: для воды $k_1 = 1{,}0$; бензола $k_1 = 1{,}3$, дихлорэтана $k_1 = 1{,}3$.

Коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения, $k_2 = 1$ (при открытой поверхности испарения).

Количество испаряющихся вредных веществ, г/ч:

$$G_i = 7{,}5 \cdot 10^{-3} (5{,}38 + 4{,}1v) F p_i \sqrt{M_i} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_{H_2O} = 7{,}5\ 10^{-3} (5{,}38 + 4{,}1 \cdot 2)\ 1{,}5386 \cdot 5759 \sqrt{18{,}015} \cdot \frac{1}{1} = 3830;$$

$$G_б = 7{,}5\ 10^{-3} (5{,}38 + 4{,}1 \cdot 2)\ 1{,}5386 \cdot 3206{,}4 \sqrt{78{,}1} \cdot \frac{1}{1{,}3} = 3415{,}4;$$

$$G_д = 7{,}5 \cdot 10^{-3} (5{,}38 + 4{,}1 \cdot 2)\ 1{,}5386 \cdot 2148 \sqrt{98{,}97} \cdot \frac{1}{1{,}3} = 2575{,}7.$$

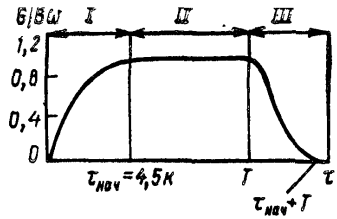


Рис. 2.1. Зависимость интенсивности выделения вредных веществ с поверхностей, на которых образуется пленка при высыхании: *I* — начальный период сушки; *II* — основной; *III* — конечный период сушки

2.4. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ С ПОВЕРХНОСТЕЙ, НА КОТОРЫХ ОБРАЗУЕТСЯ ПЛЕНКА

Сушка многих веществ сопровождается образованием пленки на поверхности испарения. К таким веществам относятся различные лакокрасочные материалы, связующие стеклопластиков, клеи, смолы, кремнийорганические соединения и др. После нанесения этих веществ на поверхность оборудования происходит испарение растворителя и образование пленки — слоя вязкого геля. Толщина и твердость пленки со временем увеличиваются. Поэтому испарение растворителя с открытой поверхности происходит только в первые 1—3 мин. В этом промежутке времени процесс испарения подчиняется законам, изложенным в разделе 2.3. В дальнейшем пленка начинает препятствовать испарению, и скорость его уменьшается. Интенсивность выделения летучих веществ в последнем случае зависит от физико-химических свойств материала, а также от метеорологических условий окружающей воздушной среды.

При окраске поверхности оборудования, а также при разливе материала различают три периода выделения летучих веществ:

начальный — нанесение материала на поверхность сопровождается выделением летучих веществ с возрастающей интенсивностью;

основной — при нанесении материала интенсивность выделения летучих веществ со всей окрашенной поверхности постоянна;

конечный — материал на поверхность не наносится, интенсивность выделения летучих веществ уменьшается.

Графическое изображение периодов интенсивности выделения летучих веществ с поверхностей, на которых образуется пленка при высыхании, представлена на рис 2.1.

Интенсивность испарения в каждый момент времени начального периода определяют из выражения, г/мин:

$$v = B\omega(1 - e^{-k\tau}), \qquad (2.51)$$

где B — количество вещества, выделяющегося с единицы площади при полном высыхании материала, кг/м²; ω — скорость покрытия поверхности лакокрасочным материалом, м²/мин; k — коэффициент, характеризующий интенсивность испарения растворнтеля при определенных метеорологических условиях, мин$^{-1}$; τ — время от начала нанесения лакокрасочного материала до расчетного момента, мин.

При показателе степени $k\tau = 4{,}5$ величина $e^{-k\tau}$ приближается к нулю Поэтому можно считать, что начальный период составляет, мин:

$$\tau_{нач} = 4{,}5/k. \qquad (2.52)$$

Так как значение k колеблется в пределах 0,01—0,2, начальный период составляет 22,5—450 мин. В основной период интенсивность испарения постоянна и определяется из выражения (в г/мин):

$$v = B\omega \qquad (2.53)$$

Количество выделяющихся вредных веществ

$$G = v\tau_{осн}, \qquad (2.54)$$

где $\tau_{осн}$ — время основного периода, мин.

Если время окончания нанесения материала обозначить через T, то интенсивность испарения в момент времени $\tau \geqslant T$ составит

$$v = B\omega\left[e^{-k(\tau-T)} - e^{-k\tau}\right], \qquad (2.55)$$

При $k\tau \geqslant 4{,}5$ величиной $e^{-k\tau}$ можно пренебречь и считать

$$v = B\omega e^{-k(\tau-T)}, \qquad (2.56)$$

Количество летучих веществ, выделяющихся от начала нанесения материала до момента времени τ, в течение которого увеличивается покрытая материалом площадь (начальный и основной периоды), составит, ч:

$$G_1 + G_2 = \frac{B\omega}{k}\left(k\tau - 1 + e^{-k\tau}\right). \qquad (2.57)$$

Для практических расчетов целесообразно использовать величину k_{20}, характеризующую интенсивность испарения летучих веществ в неподвижном воздухе при 20 °С, относительной влажности 50% и обычной толщине слоя наносимого материала. Экспериментальные значения коэффициента k_{20} для некоторых материалов приведены ниже:

Грунт	k_{20}
Бутиральный:	
ВЛ-02	0,15
ВЛ-023	0,16
ВЛ-08	0,1
Глифталевый:	
ГФ-020	0,1
ГФ-138	0,05
Хлорвиниловый:	
ХС-04	0,05
ХС-010	0,25
Фенольный:	
ФЛ-03к	0,04
ФЛ-03ж	0,04
Хлорвиниловый:	
ХС-04	0,05
ХС-010	0,25
Краски	
Глифталевая:	
С-5, С-3	0,07
ПФ-218	0,04
ПФ-223	0,04
ПФ-115	0,01
ПФ-837	0,05
Полихлорвиниловая ХФ-53	0,07
Хлорвиниловая:	
ХВ-16	0,1
ХВ-125	0,16
ХО-52	0,2
ХС-54	0,1
ХС-717	0,17
ХС-720	0,2
ХС-710к	0,2
ХС-510	0,12
ХС-527	0,2
ХС-747	—
Этинолевая:	
ЭКЕС-40	0,075
ЭКА-15	0,14
Эпоксидные ЭП-755	0,11
Эмали	
Пентафталевая ПФ-223	0,04
Алкидная АЛ-70	0,05
Смола	
Полиэфирная:	
П-3	0,03
НПС-609-21М	0,05
Клеи	
Индитоловый ИДС	0,01
Нитроглифталевый ЛКС	0,015
Дифенольный ДФК	0,015
Лаки	
Бакелитовый АВС-1	0,12
Глифталевый 4с	0,05
Пентафталевый ПФ-170	—
Шпаклевки	
Эпоксидные ЭП-00-10	0,1

Для лакокрасочных материалов коэффициент k_{20} можно определить из выражения:

$$k_{20} = 0{,}075/\tau_{\text{п}}, \qquad (2.58)$$

где $\tau_{\text{п}}$ — продолжительность высыхания лакокрасочных материалов «от пыли», ч.

Согласно ОСТ 10086—39 под определением времени высыхания от пыли понимают время образования на выкрашенной поверхности тончайшей плен-

ки, к которой пыль не прилипает. Значения $\tau_п$ для лакокрасочных материалов при 18—22 °С приведены в ГОСТе и ТУ на лакокрасочные материалы.

При изменении метеорологических условий следует ввести поправку на температуру k_t, относительную влажность k_φ и подвижность воздуха k_v (см. Приложение XV). Поправки на фактическую толщину слоя k_g можно характеризовать удельным расходом материала, кг/м², и определять по графику (см. Приложение XV). Тогда значение коэффициента k следует вычислять по формуле:

$$k = k_{20} k_t k_\varphi k_v k_g k_2. \qquad (2.59)$$

Значения величины $(1-e^{-k\tau})$ в зависимости от τ приведены в Приложении XV.

Пример 2.16. Определить количество вредных веществ, выделяющихся в атмосферный воздух при окраске изделий нитролаком.

Исходные данные. Продолжительность окраски 3 ч. Скорость окраски 0,2 м²/мин. Количество растворителя, выделяющегося с единицы площади при полном высыхании материала, 150 г/м². Температура воздуха в помещении 25 °С. Относительная влажность 70%. Подвижность воздуха 0,2 м/с. Продолжительность высыхания материала «от пыли» 0,5 ч. Расположение окрашиваемой поверхности — вертикальное.

Решение. Общее количество вредных веществ, выделяющихся в атмосферный воздух при полном высыхании изделий:

$$G = 0{,}2 \cdot 150 \cdot 180 = 5400 \text{ г}.$$

Коэффициент k_{20}:

$$k_{20} = 0{,}075/0{,}5 = 0{,}150.$$

Поправки k_t, k_φ, k_v и k_g находим из Приложения XV; $k_t = 1{,}22$; $k_\varphi = 1{,}0$; $k_v = 1{,}8$; $k_g = 1$; $k_2 = 1$. Тогда коэффициент $k = 0{,}15 \cdot 1{,}22 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}8 \cdot 1 \cdot 1 = 0{,}329$; произведение $k\tau = 0{,}329 \cdot 180 = 59{,}3$.

Значение величины $(1-e^{-k\tau})$ также находим из Приложения XV; $(1-e^{-k\tau}) = 1$. Количество летучих веществ, выделяющихся в начальный и основной периоды нанесения нитролака

$$G_1 + G_2 = \frac{B\omega}{k}(k\tau - 1 + e^{-k\tau});$$

$$G_1 + G_2 = \frac{B\omega}{k}(k\tau - 1) = \frac{150 \cdot 0{,}2}{0{,}329}(0{,}329 \cdot 180 - 1) = 5309 \text{ г}.$$

Время начального периода: $\tau_{нач} = 4{,}5/k = 4{,}5/0{,}329 = 13{,}7$ мин.

Время основного периода: $\tau_{осн} = 180 - 13{,}7 = 166{,}3$ мин.

Интенсивность выделения летучих веществ в основной период:

$$v = B\omega = 150 \cdot 0{,}2 = 30 \text{ г/мин}.$$

Количество летучих веществ, выделяющихся в основной период:

$$G_2 = v\tau_{осн} = 30 \cdot 166{,}3 = 4989 \text{ г}.$$

Количество летучих веществ, выделяющихся в начальный период:

$$G_1 = 5309 - 4989 = 320 \text{ г}.$$

Количество летучих веществ, выделяющихся в конечный период (после окончания окраски):

$$G_3 = G - (G_1 + G_2) = 5400 - 5309 = 91 \text{ г}.$$

Ниже приведены величины удельных количеств, выделяющихся вредных веществ при различных способах нанесения лакокрасочных покрытий, при-

Таблица 2.6. Количество паров органических растворителей, выделяющихся при нанесении методом окунания

Лакокрасочные материалы	Летучие компоненты, содержащиеся в ЛКМ * при рабочей вязкости	Количество паров органических растворителей, выделяющихся от ванн окунания, г/(м²·ч)	Количество паров органических растворителей, выделяющихся от поверхности изделия, г/м² изделия	
			лоток для стока	сушильное устройство
Глифталевые, пентафталевые и фенольные	Ксилол	130,0	3,4	10,1
	Сольвент	70,0	3,2	9,5
	Уайт-спирит	70,0	3,8	11,5
Полиуретановые	*н*-Бутилацетат	60,0	5,8	17,4
	Ксилол	270,0	21,5	64,5
Полиакриловые	Ацетон	300,0	2,4	4,1
	н-Бутилацетат	60,0	11,4	34,3
	Ксилол	76,0	12,1	36,3
	Сольвент	10,0	3,2	3,6
	Этанол	200,0	3,7	11,0
	Бутанол	30,0	6,9	20,6
	Толуол	200,0	9,9	29,6
Перхлорвиниловые	Ацетон	1900,0	11,5	34,5
	н-Бутилацетат	40,0	9,8	29,4
	Ксилол	40,0	7,8	23,5
	Толуол	30,0	26,2	78,7
Сополимервинилхлоридные	Ацетон	1800,0	9,3	27,9
	н-Бутилацетат	20,0	4,3	12,9
	Толуол	300,0	21,1	63,4
	Циклогексан	120,0	10,5	31,6
Мочевинные	Ксилол	100,0	4,8	14,3
	Бутанол	80,0	3,9	11,7
	Этилцеллозольв	40,0	3,5	10,6
Эпоксидные	Ацетон	1300,0	4,9	14,7
	н-Бутилацетат	40,0	6,2	18,3
	Ксилол	50,0	7,2	21,7
	Этанол	110,0	1,6	4,8
	Бутанол	10,0	1,9	5,7
	Этилацетат	30,0	3,7	11,1
	Толуол	100,0	6,1	18,4
	Этилцеллозольв	10,0	2,9	8,7
Нитроцеллюлозные	Ацетон	400	1,7	5,2
	Бутилацетат	40	5,9	17,8
	Этанол	200	4,2	12,5
	Бутанол	20	4,3	12,9
	Толуол	300	14,8	44,3
	Этилацетат	200	3,2	9,5
	Этилцеллозольв	10	2,2	6,5

* **ЛКМ** — лакокрасочный материал

Таблица 2.7. Количество паров органических растворителей, выделяющихся в атмосферу при нанесении ЛКМ на 1 м² поверхности методом электроокраски, г

Лакокрасочные материалы	Летучие компоненты, содержащиеся в ЛКМ при рабочей вязкости	Линия электроокраски	Конвейер	Устройство окончательной сушки
Масляно-стирольные	Ксилол	33,8	31,9	0,0
	Сольвент	11,2	21,4	0,0
	Бутанол	6,1	10,2	0,0
	Уайт-спирит	11,5	37,2	6,4
Глифталевые, пента-	Ксилол	10,2	0,6	8,0
✓ фталевые, фенольные	Сольвент	6,0	0,4	10,2
	Уайт-спирит	4,4	0,2	15,6
Меламиные	Ксилол	11,7	—	10,6
	Сольвент	5,9	—	5,2
	Бутанол	5,5	—	4,9
	Толуол	8,9	—	8,3
	Уайт-спирит	1,9	—	1,7

меняемых в различных отраслях промышленности, пневматическое распыление, электроокраска, окунание и нанесение лакокрасочных материалов кистью и шпателем.

Количество паров органических растворителей, выделяющихся с поверхности зеркала испарения ванн окунания, г/ч:

$$G = g_{уд} m F, \qquad (2.60)$$

где F — площадь зеркала испарения ванны, м²; m — коэффициент, зависящий от площади зеркала испарения ванны, отнесенный к коэффициенту 0,0375, соответствующему площади испарения с 1 м²; определяется по данным, приведенным ниже:

F, м²	m	F, м²	m
0,05	2,886	0,55	1,386
0,1	2,56	0,6	1,333
0,15	2,346	0,7	1,272
0,2	2,173	0,75	1,178
0,25	2,0	0,8	1,133
0,3	1,853	0,85	1,093
0,35	1,72	0,9	1,061
0,4	1,6	0,95	1,034
0,45	1,52	1,0	1,0
		и более	и более
0,5	1,453		

$g_{уд}$ — удельное количество паров органических растворителей, выделяющихся с 1 м² поверхности зеркала испарения ванны окунания (табл. 2.6).

После расчета количества испаряющихся летучих веществ необходимо определить количества каждого вида растворителя в зависимости от метода окраски и типа лакокрасочного материала (табл. 2.7—2.11). Ниже приводятся поправки, необходимые при расчетах.

Поправка на температуру воздуха помещения (коэффициент k_t):

t, °С	15	20	25	30
k_t	0,8	1,03	1,4	1,9

Таблица 2.8. Количество паров органических растворителей, выделяющихся в атмосферу при нанесении ЛКМ на 1 м² поверхности кистью, г

Лакокрасочные материалы	Летучие компоненты, содержащиеся в ЛКМ при рабочей вязкости	Рабочее место окраски	Сушильное устройство до полного высыхания
Глифталевые,	Ксилол	1,7	15,5
пентафталевые,	Сольвент	1,6	14,6
фенольные	Уайт-спирит	2,0	17,8
Алкидно-акриловые	Ацетон	4,4	39,8
	н-Бутилацетат	4,4	39,8
	Ксилол	6,3	56,6
	Бутанол	1,0	9,4
Сополимервинилхлоридные	Ацетон	3,0	26,8
	н-Бутилацетат	1,4	12,3
	Этанол	0,7	6,4
	Толуол	6,8	60,8
	Циклогексанол	2,7	24,0
Эпоксидные	Ацетон	1,5	13,2
	н-Бутилацетат	1,8	16,6
	Ксилол	2,2	19,4
	Этанол	0,5	4,3
	Бутанол	0,6	5,1
	Толуол	1,8	16,5
	Этилацетат	1,1	1,0
	Этилцеллозольв	0,0	7,8
Кремнийорганические	Ацетон	1,4	12,9
	н-Бутилацетат	2,0	18,3
	Ксилол	1,8	16,7
	Толуол	5,4	48,3
	Этанол	0,8	7,4
	Бутанол	0,8	7,5
	Этилацетат	2,4	21,7
Поливинилацетатные	Ксилол	1,1	5,7
	Этанол	4,6	41,0
	Бутанол	1,8	15,9
	Этилцеллозольв	1,2	11,2

Поправка на подвижность воздуха в помещении — коэффициент k_v:

$v_п$, м/с	0,2	0,4	0,6	0,8	1
k_v	1,7	2,3	2,5	2,82	2,0

Поправка на относительную влажность (коэффициент $k_φ$) принимается равной 75%. Поправка на фактическую толщину слоя (коэффициент k_q, характеризующий удельный расход материала) приведена ниже:

δ, мм	0,25	0,5	0,75	1
k_q	1	0,5	0,25	0,22

Поправка на расположение окрашиваемой поверхности (коэффициент k_2) принимается для вертикальных поверхностей равной 1, для горизонтальных, направленных вверх (пол), равной 0,7 и для горизонтальных, направленных вниз (потолок), равной 1,3.

Выделение в атмосферный воздух окрасочного аэрозоля, образующегося при пневматическом распылении ЛКМ, можно не учитывать при установке

Таблица 2.9. Количество паров органических растворителей, выделяющихся в атмосферу при нанесении ЛКМ на 1 м² поверхности шпателем, г

Лакокрасочные материалы	Летучие компоненты, содержащиеся в ЛКМ при рабочей вязкости	Рабочее место нанесения	Сушильное устройство до полного высыхания
Шпатлевки эпоксидные	Ацетон	0,5	4,2
	н-Бутилацетат	0,3	2,8
	Ксилол	0,2	2,0
	Этанол	0,2	2,2
	Толуол	0,7	6,3
Шпатлевки нитроцеллюлозные	Ацетон	0,2	1,6
	н-Бутилацетат	1,1	9,6
	Этанол	0,6	5,3
	Бутанол	0,6	5,3
	Толуол	2,9	26,5
	Этилацетат	0,5	4,8
Шпатлевки перхлорвиниловые	Ацетон	3,7	33,0
	н-Бутилацетат	3,7	33,0
	Ксилол	4,9	43,9
Шпатлевки пентафталевые	Сольвент	2,1	19,0
	Уайт-спирит	2,1	19,0

Таблица 2.10. Значение коэффициента А

Растворитель	Пневматическое и безвоздушное распыление	Электроокраска	Растворитель	Пневматическое и безвоздушное распыление	Электроокраска
Циклогексанон	0,18	—	Сольвент	0,44	0,44
Этилцеллозольв	0,23	—	Толуол	0,50	—
Бутилацетат	0,28	—	Этилацетат	0,67	—
Бутанол	0,29	0,30	Этанол	0,69	—
Уайт-спирит	0,30	0,31	Ацетон	0,98	—
Ксилол	0,39	0,42			

Таблица 2.11. Количество паров органических растворителей, выделяющихся в атмосферу от источников выделения при нанесении ЛКМ на 1 м² поверхности методом пневматического распыления, г

Лакокрасочные покрытия	Летучие компоненты, содержащиеся в ЛКМ при рабочей вязкости	Окрасочная камера	Сушильное устройство
Глифталевые,	Ксилол	8,9	6,0
пентафталевые,	Сольвент	6,7	8,2
фенольные	Уайт-спирит	5,3	12,2
Перхлорвиниловые	Ацетон	32,2	0,0
	н-Бутилацетат	7,5	24,2
	Ксилол	6,8	19,2
	Толуол	33,3	57,3
Сополимервинилхлоридные	Ацетон	26,1	0,0
	н-Бутилацетат	4,5	10,7
	Толуол	30,0	50,0
	Циклогексанон	4,7	21,2

Таблица 2.11. (продолжени

Лакокрасочные покрытия	Летучие компоненты, содержащиеся в ЛКМ при рабочей вязкости	Окрасочная камера	Сушильное устройство
Эпоксидные	Ацетон	13,4	0,0
	Бутилацетат	4,3	14,8
	Ксилол	5,8	17,1
	Этанол	3,0	1,8
	Бутанол	1,1	4,6
	Толуол	6,6	12,6
	Этилацетат	7,3	3,4
	Этилцеллозольв	1,3	7,1
Кремнийорганические	Ацетон	12,2	0,0
	н-Бутилацетат	5,4	15,1
	Ксилол	5,8	13,6
	Толуол	21,3	33,8
	Этанол	5,1	2,7
	Бутанол	1,8	6,3
	Этилацетат	12,9	9,8
Полиакриловые	Ацетон	7,1	0,0
	н-Бутилацетат	24,2	47,1
	Ксилол	28,8	48,2
	Сольвент	4,8	14,0
	Этанол	19,0	0,0
	Бутанол	11,9	29,3
	Толуол	33,6	24,6
Нитроцеллюлозные	Ацетон	11,1	0,0
	н-Бутилацетат	13,0	32,6
	Бутанол	20,6	8,3
	Этанол	7,5	24,0
	Толуол	46,4	67,4
	Этилацетат	16,6	4,3
	Этилцеллозольв	3,1	12,1
Меламинные	Ксилол	10,3	20,7
	Сольвент	10,3	18,0
	Толуол	10,2	0,9
	Уайт-спирит	2,6	10,2
	Бутанол	9,9	15,0
Полиуретановые	*н*-Бутилацетат	7,1	10,5
	Ксилол	30,3	36,7
Канифольные	Сольвент	3,6	2,1
	Уайт-спирит	12,3	18,0
Мочевинные	Ксилол	9,1	8,3
	Бутанол	6,1	3,3
	Этилцеллозольв	4,4	2,1
Масляно-стирольные	Ксилол	27,3	20,7
	Сольвент	10,8	14,1
	Бутанол	5,7	6,7
	Уайт-спирит	11,7	28,6
Алкидно-акриловые	Ацетон	38,7	0,0
	н-Бутилацетат	12,2	34,7
	Ксилол	19,9	49,1
	Бутанол	2,3	8,3
Поливинилацетатные	Ксилол	3,5	9,7
	Этанол	24,3	30,7
	Бутанол	4,1	16,1
	Этилцеллозольв	12,6	0,0

гидрофильтров, так как аэрозоль практически полностью улавливается ими, а также осаждается на стенках воздуховодов и в вентиляторе.

Количество паров растворителей, выделяющихся при окраске и сушке изделий, определяют по формулам, кг/ч:

$$G_{ок} = 0{,}008M\rho\Pi A, \qquad (2.61)$$

$$G_{суш} = 0{,}006M\rho\Pi A(1 - A). \qquad (2.62)$$

Таблица 3.1. Количество пыли, выделяющейся в атмосферу при очистке литья

Технологический процесс и вид оборудования	Чугунное литье		Стальное литье	
	кг/ч	кг/т отливки	кг/ч	кг/т отливки
Пескоструйная очистка в камерах объемом, м³:				
до 1	7,2	7,2	—	—
» 8	20,0	10,0	—	—
» 80	80,0	30,0	—	—
Дробеметная очистка, барабаны очистные дробеметные для отливок массой, кг:				
25	28,0	9,3	21,1	14,0
80	64,0	12,8	48,0	19,3
400	141,0	20,1	106,0	30,3
Камеры очистные дробеметные объемом, м³:				
до 2	33,0	11,0	24,8	15,6
» 10	66,1	13,2	49,6	19,8
» 80	167,9	24,0	126,2	96,1
Камеры очистные дробеметные непрерывного действия с вращающимися подвесками:				
для мелкого и среднего литья	120,0	6,0	90,2	9,1
для крупного литья	180,0	2,8	135,1	4,2
Дробеструйная очистка:				
камеры очистные дробеструйные, обслуживаемые рабочими снаружи:				
при диаметре сопла 6—8 мм, тупиковые	24,0	8,0	18,1	12,1
то же, проходные	77,0	12,4	58,2	19,3
камеры дробеструйные, обслуживаемые рабочими, находящимися внутри камеры:				
при диаметре сопла 10—12 мм, тупиковые	46,4	18,5	34,9	27,9
то же, проходные	178,5	25,5	134,2	38,4
камеры очистные дробеструйные двухзаходные с вращающимися подвесками:				
для мелкого и среднего литья	34,8	8,7	26,1	13,0
» крупного литья	182,3	26,1	137,2	39,3
Галтовка:				
барабаны очистные галтовочные для отливок массой, кг:				
до 1%	6,0	3,0	4,5	4,5
» 40	30,0	7,5	22,6	11,3
» 100	144,0	24,0	108,2	36,1

где ρ — удельная норма расхода окрасочного материала на единицу площади, кг/м^2; M — производительность окрасочного оборудования, м^2/ч; $П$ — содержание растворителя в окрасочном материале с учетом его количества, затрачиваемого на доведение ЛКМ до рабочей вязкости, % (масс.); A — коэффициент, характеризующий относительную часть от общего количества растворителя, содержащегося в ЛКМ, которая испаряется при окраске в окрасочной камере (см. табл. 2.10).

Глава 3

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ПО УДЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

3.1. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ ОТ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ПРОИЗВОДСТВ

3.1.1. Вредные вещества, поступающие в атмосферный воздух от гальванических производств

Все производственные операции, связанные с нанесением на поверхность изделия покрытий, можно разделить на три основные группы: механическая подготовка поверхности изделий (очистка, шлифование и полирование), обработка поверхностей изделий в растворе (травление, обезжиривание, промывка) и нанесение гальванических и химических покрытий. Каждой из этих групп соответствуют свои виды и количества поступающих в атмосферный воздух вредных веществ.

Механическая подготовка поверхностей изделий. Для очистки поверхностей деталей применяют пескоструйную и гидроабразивную обработку. Удаление с поверхностей деталей неровностей, царапин, образование блестящей поверхности достигается шлифованием, полированием, галтовкой, вибрационной обработкой.

Количество пыли, выделяющейся при подготовке поверхности, приведено в табл. 3.1 и 3.2.

Приведенные количества даны с учетом необходимых скоростей в местных отсосах в соответствии с нормами проектирования вентиляционных

Таблица 3.2. Характеристика выбросов — пыли от основного технологического

Технологическое оборудование	Ориентировочный объем аспирируемого воздуха, тыс м^3/ч	Характер пыли
Барабаны очистные:		
галтовочные	10—20	Механическая окалина, песчаная
дробеметные	4—15	»
Камеры очистные дробеметные (до 3 т/ч)	10—15	»
Шлифовальные станки	0,5—3,0	Абразивная металлическая
Полировальные станки	—	Текстильная, от полировальной пасты
Крацевальные станки	3,0—6,0	Механическая окалина

систем от установок механической очистки. Скорость воздушного потока составляет не менее 18—20 м/с, расход воздуха 300—350 м³/ч на 1 м³ внутреннего объема камеры. Для шлифовально-полировальных отделений объемные расходы аспирируемого воздуха зависят от диаметра шлифовальных кругов и составляют в среднем 2 м³ воздуха в 1 ч на 1 мм диаметра нового круга. Характер выделяющихся веществ зависит от состава раствора и вида процесса. В окружающую среду выделяются водород, кислород и другие газы, образующиеся при химических реакциях, испарении составных частей раствора. Из ванн цианистого кадмирования и серебрения выделяется цианистый водород, количество которого зависит от плотности тока:

Плотность тока, А/дм²	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Количество HCN, г/(дм²·ч)	0,06	0,07	0,08	0,085	0,09	0,095	0,1

Кроме того, цианистый водород образуется при взаимодействии поверхностного слоя электролита с диоксидом углерода, содержащимся в воздухе в зависимости от температуры электролита:

Температура электролита, °С	25	30	35	40	45
Количество HCN, г/(м²·ч)	0,5	1,25	2,5	4,0	6,0

Для процессов цинкования и меднения количество выделяющегося цианистого водорода составляет 20% от приведенных значений.

При технологических процессах, связанных с капельным уносом, происходит увеличение массы паров в воздухе, отсасываемом вытяжной вентиляцией, по сравнению с массой паров, испаряющихся с зеркала ванны, что обусловлено увеличением площади поверхности испарения, так как на поверхности раствора образуются пузырьки газа, а в отсасываемый воздух попадают капли раствора.

Анализ дисперсного состава аэрозолей в воздухе, выбрасываемом через систему местных отсосов, показал, что средний размер частиц находится в следующих пределах, мкм: 5—6,5 — при травлении, 5—5,5 — при обезжиривании, 8—10 — при хромировании и 5—8 — при цианистом цинковании.

Подготовка поверхностей деталей обработкой их в растворах. При обработке деталей в растворах с их поверхности удаляются жировые загрязнения, смазка и масло, окалина, продукты коррозии, оксидные пленки и др. Обработка состоит из ряда операций: обезжиривания, травления, химического и электрохимического полирования и активирования поверхностей деталей. Для этих целей применяют органические растворители, щелочные, водные, кислотные и эмульсионные моющие растворы.

В качестве органических растворителей используют бензин, уайт-спирит, бензол, а также трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, фреон-113, хлорированные

оборудования

Концентрация, г/м³	Медианный диаметр, мкм	Среднеквадратичное отклонение	Плотность частиц, г/см³
0,8—0,5	10—15	2,2—2,5	3,7—5,0
1,0—3	10—30	2,0—2,5	3,7—5,0
2—5,0	30—40	2,1—2,3	3,7—5,0
0,3—0,8	10,5	2,7—3,3	3,4—4,8
0,1—0,3	25—100	1,6—3,6	1,5
0,1—0,3	В зависимости от обрабатываемого материала и материала щеток		

Таблица 3.3. Удельные выбросы вредных веществ от основных операций подготовки поверхностей деталей

Техиологический процесс	Выделяющиеся вещества	Количество вредных веществ, выделяющихся с поверхности зеркала ванн, г/(м · ч)
Обезжиривание изделий:		
органическими растворителями	Бензин	4530
	Керосин	1560
	Уайт-спирит	5800
	Бензол	2970
	Трихлорэтилен	3940
	Тетрахлорэтилен	4200
	Трифтортрихлорэтан (фреон 113)	14910
химическое в растворах щелочи	Едкая щелочь	1,0
электрохимическое	То же	39,6
Химическое травление изделий:		
в растворах хромовой кислоты и ее солей при $t > 50$ °С	Хромовый ангидрид	0,02
в растворах щелочи при $t > 50$ °С	Едкая щелочь	198,0
в концентрированных растворах и нагретых до $t > 50$ °С разбавленных растворах серной кислоты	Серная кислота	25,2
в растворах соляной кислоты, концентрацией, г/л:		
до 200	Хлористый водород	1,1
200—250	То же	3,0
250—300	»	10,0
300—350	»	20,0
350—500	»	50,0
500—1000	»	288,0
в разбавленных, нагретых до $t > 50$ °С и концентрированных холодных растворах ортофосфорной кислоты	Фосфорная кислота	2,20
в растворах, содержащих фтористоводородную кислоту и ее соли, концентрацией, г/л:		
до 10	Фтористый водород	1,0
10—20	То же	5,0
20—50	»	10,0
50—100	»	18,0
100—150	»	36,0
150—200	»	42,0
>200	»	72,0
в разбавленных растворах, содержащих азотную кислоту, концентрацией более 100 г/л	Азотная кислота и оксиды азота	10,8
Снятие старых покрытий:		
олова и хрома	Едкая щелочь	39,6
меди	Триоксид хрома	36,0
никеля и серебра	Серная кислота	25,2

Таблица 3.3 (продолжение)

Технологический процесс	Выделяющиеся вещества	Количество вредных веществ, выделяющихся с поверхности зеркала ванн, г/(м· ч)
Полирование:		
химическое:		
в концентрированных холодных ($t < 50$ °С) растворах ортофосфорной кислоты	Фосфорная кислота	2,2
то же, нагретых при $t > 50$ °С	То же	18,0
в разбавленных растворах, содержащих азотную кислоту, концентрацией >100 г/л	Азотная кислота и оксиды азота	10,8
в нагретых разбавленных растворах, содержащих серную кислоту	Серная кислота	25,2
электрохимическое:		
в растворах, содержащих хромовую кислоту или триоксид хрома, концентрацией 30—60 г/л	Триоксид хрома	7,2
в растворах, содержащих серную кислоту, концентраций > 150 г/л	Серная кислота	25,2
в концентрированных холодных растворах ортофосфорной кислоты	Фосфорная кислота	18,0
Удаление жировых загрязнений с поверхности деталей в моющих средствах при $t = 70 \pm 10$ °С	Препараты МЛ-51, МЛ-52 в пересчете на аэрозоль соды кальцинированной, ТМС-31	5,76
Пассивирование:		
радужное	Ликонда 2А в пересчете на бихромат натрия	0,648
бесцветное	Ликонда 21 в пересчете на бихромат натрия	0,648
зеленое или цвета хаки	Ликонда 41 в пересчете на бихромат натрия	1,4
	Триоксид хрома	0,022
черное	Ликонда 31 в пересчете на бихромат натрия	0,72
	Триоксид хрома	0,022
Промывка в этиленгликоле	Этиленгликоль	19,44
Консервация	Канифоль, спирт этиловый	4,68
	спирт технический	11,7
Ингибирование	Ингибитор И-1Е	0,288
Электродекапирование в цианистых растворах	Цианистый водород	19,8
Химическое декапирование в цианистых растворах	То же	5,4

и другие углеводороды. В состав моющих и травильных растворов входят концентрированные щелочи, кальцинированная сода, фосфаты и поверхностно-активные вещества типа синтамида-5, синтанола ДС-10, сульфанола НП-3, серная, соляная, азотная и фосфорные кислоты и другие вещества. Удельные выбросы вредных веществ в атмосферу от основных видов оборудования процессов подготовки деталей в растворах приведены в табл. 3.3.

Нанесение покрытий. Для нанесения покрытий используют различные химические вещества как в чистом виде, так и в составе смесей при разных

Таблица 3.4. Удельные выбросы веществ в процессах нанесения покрытий

Технологнческнй процесс	Выделяющиеся вредные вещества	Колнчество поверхности зеркала ванны, г/(м²· ч)
Электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих хромовую кислоту:		
концентрацией 150—300 г/л, при силе тока 1000 А (хромирование)	Триоксид хрома	36
концентрацией 20—100 г/л при силе тока 500 А, а также химическое оксидирование алюминия и магния (анодирование алюминия, магниевых сплавов и др.)	То же	3,6
концентрацией 20 г/л	»	0,0022
Химическая обработка металлов в растворах щелочи (оксидирование стали)	Щелочь	198
Электрохимическая обработка металлов в растворах щелочи (лужение, оксидирование меди)	Щелочь	39,6
Оксидирование в растворах, содержащих сернистый натрий	Сернистый натрий	0,072
Нанесение покрытий в цианистых растворах:		
кадмирование, золочение электрохимическое, серебрение, покрытне сплавом серебро-сурьма, железнение, электродекапирование	Цианистый водород	19,8
цинкование, меднение, латунирование, амальгамирование	То же	5,4
покрытие сплавом золото-кобальт, золото-никель	»	7,92
золочение химическое	»	1,98
Химическая и электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих фтористоводородную кислоту и ее соли, концентрацией, г/л:		
до 10	Фтористый водород	1,04
10—25	Фтористый водород	10,08
25—100	То же	36
100—200	»	50,04
> 200	»	72
Химическая и электрохимическая обработка металлов в растворах:		
содержащих серную кислоту концентрацией 150—350 г/л (анодирование, оксидирование алюминия)	Серная кислота	25,2
концентрацией 45—52 г/л (родирование)	То же	0,68
Химическая обработка металлов в концентрированных холодных и разбавленных нагретых растворах, содержащих ортофосфорную кислоту и ее соли (фосфатирование)	Ортофосфорная кислота	2,16
Фосфатирование в растворе соли «Мажеф»	Соль «Мажеф»	0,18

Таблица 3.4. (продолжение)

Технологический процесс	Выделяющиеся вредные вещества	Количество с поверхности зеркала ванны, г/(м²· ч)
Нанесение покрытий в пирофосфатных растворах:		
меднение	Натрий (калий) пирофосфорнокислый	10,44
цинкование	То же	11,52
покрытие сплавом олово-цинк	»	10,44
покрытие сплавом медь-цинк	»	0,36
покрытие сплавом серебро-палладий	»	0,324
Железнение:		
кислое	Железо сернокислое	2,99
	Калий сернокислый	0,49
хлористое при концентрации хлорида железа, г/л:		
200—250	Хлорид железа	0,11
600—650	То же	0,4
Меднение:		
борофтористое	Фтористый водород	10,01
кремнефтористое кислое:		
$t = 25 \pm 5$ °С	Купорос медный	0,072
$t = 45 \pm 5$ °С	То же	0,58
железосинеродистое	Цианистый водород	3,9
Цинкование:		
хлористоаммонийное	Аммиак	6,34
кислое	Цинк сернокислый	10,44
щелочное	Едкий натр	39,6
хлористое	Хлорид калия	2,38
Кадмирование:		
хлористоаммонийное	Аммиак	9,13
кислое в присутствии серной кислоты	Сульфат кадмия	0,43
в присутствии сульфата аммония	Серная кислота	0,68
	Аммиак	1,37
Оловянирование:		
кислое:		
при $t = 15$—30 °С	Сульфат олова	0,64
	Серная кислота	0,29
при $t = 40$—50 °С	Кислота паросульфоновая	1,66
	Сульфат олова	0,83
химическим способом при концентрации тиомочевины:		
35—45 г/л в холодных растворах	Тиомочевина	0,29
при концентрации тиомочевины 80—90 г/л в горячих растворах	То же	1,08
Нанесение покрытий сплавом олово-висмут	Сульфат олова	1,26
Свинцевание:		
борофтористо-водородное	Свинец борофтористо-водородный	0,396
в растворах, содержащих фенолсульфоновые соли	Свинец фенолсульфоновый	0,25
Покрытие сплавом олово-свинец в растворах, содержащих борофтористо-водородную кислоту и оксид свинца, концентрацией 45—95 г/л	Кислота борофтористоводородная	0,31
	Оксид свинца	0,72—0,18

Таблица 3.4. (продолжение)

Технологический процесс	Выделяющиеся вредные вещества	Количество с поверхности зеркала ванны, г/(м²· ч)
Палладирование:		
хлористоаммонийное при концентрации аммония, г/л:		
15—20	Аммиак	0,7
50—80	»	1,4
в фосфорнокислых растворах	Фосфат натрия	0,59
Никелирование в хлоридных растворах при плотности тока 1—3 А/дм²	Растворимые соли никеля	0,54
Никелирование в сульфатных растворах при плотности тока 1—3 А/дм²	То же	0,11
Обработка металлов в хлоридных, сульфатных, никелевых растворах (окрашивание медных, никелевых покрытий, латуни, оловянного покрытия)	»	0,01
Анодное окисление алюминия, анодирование в растворах с концентрацией сульфосалициловой кислоты до 110 г/л	Кислота сульфосалициловая	0,25
Серебрение железосинеродистое	Цианистый водород	3,9
Амальгамирование	Ртуть азотнокислая оксидная	0,11
Снятие включений:		
контактной меди кадмия при концентрации нитрата аммония, г/л:	Аммиак	9,13
100—150	»	4,56
450—550	»	13,69
хрома, оксидного покрытия стали в растворе соляной кислоты, концентрацией 200 г/л	Хлористый водород	0,3
хрома в растворе щелочи никеля	Щелочь	11,0
	Растворимые соли никеля	0,15
оксидно-фторидного покрытия алюминия:		
в растворе азотной кислоты	Кислота азотная	9,22
в растворе щелочи	Щелочь	0,2
Оплавление оловянного покрытия	Глицерин дистиллированный	0
Промасливание	Масло веретенное АУ	0,05
Никелирование в холодных растворах при плотности тока 1—3 А/дм²	Растворимые соли никеля	$5{,}4 \cdot 10^{-1}$
Никелирование в сульфатных растворах при плотности тока 1—3 А/дм²	То же	$1{,}8 \cdot 10^{-1}$
Меднение в этилендиаминовом электролите	Этилендиамин	0
Кадмирование и лужение в кислых электролитах с добавкой фенола	Фенол	0
Крашение в анилиновом красителе	Анилин	0
Промывка в горячей воде при 50 °С	Пары воды	—

температурах, что обусловливает содержание выделяющихся в окружающую среду компонентов. В таблице 3.4 приведены удельные массы выделяющихся вредных веществ при разных технологических процессах нанесения покрытий.

3.1.2. Вредные вещества, выделяющиеся при сварочных работах

При выполнении сварочных работ атмосферный воздух загрязняется сварочным аэрозолем, в составе которого в зависимости от вида сварки, марок электродов и флюса находятся вредные для здоровья оксиды металлов (железа, марганца, хрома, ванадия, вольфрама, алюминия, титана, цинка, меди, никеля и др.), газообразные (фтористые соединения, оксиды углерода, азота, озон).

Количество образующихся при сварке пыли и газов принято характеризовать валовыми выделениями, отнесенными к 1 кг расходуемых материалов. Количество таких выделений, полученных экспериментально для наиболее распространенных сварочных материалов, приведено в табл. 3.5—3.8.

Образующийся при сварке и резке аэрозоль (табл 3 7) характеризуется очень мелкой дисперсностью — более 90% частиц (по массе), скорость витания частиц меньше 0,1 м/с. По мере удаления от источника выделения как по горизонтали, так и по вертикали концентрация вредных веществ в воздухе резко уменьшается и на расстоянии соответственно 2—4 м приближается к общему фону загрязнения воздуха в помещении.

Пример 3.1. Определить количество выделяющихся вредных веществ при ручной сварке стали электродами АНО-6

Исходные данные. Расход электродов 2 кг/ч.

Решение. Из табл 3.5 определяем виды выделяющихся вредных веществ и удельные валовые выделения их при ручной сварке электродами АНО-6: пыль 16,8 г/кг, в том числе MnO_2 1,95 г/кг Количество выделяющихся вредных веществ при заданном расходе электродов: пыль 16,8·2=33,6 г/ч; в том числе MnO_2=1,95 2=3,90 г/ч.

3.1.3. Вредные вещества, поступающие в атмосферный воздух от участков механической обработки материалов

Под механической обработкой материалов понимают процессы резания (точение, фрезерование, сверление, строгание), абразивной обработки (обдирка, заточка, шлифование, полировка), а также ряд других, связанных с изготовлением изделий из неметаллических материалов

При механической обработке материалов источниками образования и выделения вредных веществ в атмосферу являются различные металлорежущие и абразивные станки, работающие с охлаждением и без него; штамповочно-прессовое и литьевое оборудование для изготовления изделий из пластмасс и пресс-порошков; отдельные типы вспомогательного оборудования.

При работе этого оборудования в воздух выделяются вредные вещества в виде пыли, аэрозолей и туманов масел и других охлаждающих жидкостей, различных газообразных компонентов

Основу большинства производственных процессов обработки материалов в механических цехах составляют процессы резания. Резание таких хрупких материалов, как бронза, чугун, текстолит, стеклопластик, дерево, связано с образованием наряду со стружкой, размеры которой достигают нескольких миллиметров, довольно мелких пылевых частиц размерами от нескольких до сотен микрометров. Следует отметить, что интенсивность пылеобразования зависит от ряда технологических факторов: скорости резания, величины подачи режущего инструмента и, конечно, геометрических параметров инструмента и обрабатываемых изделий, а также от состава материалов, из которых изготовлены изделия. Данные о пылеобразовании, приводимые в работах разных авторов, не всегда совпадают. Это связано с различными условиями ведения одних и тех же технологических процессов.

Так, при обработке резцами серого чугуна увеличение скорости в 3 раза приводит к возрастанию концентрации пыли почти в 4,5 раза, а при обработке оловянистой бронзы увеличение скорости в 4 раза влечет за собой

Таблица 3.5. Удельные выделения вредных веществ при сварке и наплавке металлов, г/кг расходуемых материалов

Процесс	Сварочные наплавочные материалы	Пыль	Аэрозоли в составе пыли				Газы			
			MnO_2	CrO_3	Cr_2O_3	другие компоненты	CO	NO_2	HF	O_3
Ручная дуговая сварка сталей штучными электродами	УОНИ-13/45	14,0	0,51	—	—	Соед. кремния 1,40; фториды 1,40	—	—	1,00	—
	УОНИ-13/55	18,0	0,97	—	—	Соед. кремния 1,0; фториды 2,60	—	—	0,93	—
	УОНИ-13/65	7,5	1,41	—	—	Соед. кремния 0,80; фториды 0,80	—	—	1,17	—
	УОНИ-13/80	11,2	0,78	—	—	Соед. кремния 1,05; фториды 1,05	—	—	1,14	—
	УОНИ-13/85	13,0	0,60	—	—	Соед. кремния 1,30; фториды 1,30	—	—	1,10	—
	ЭА-606/11	11,0	0,68	0,60	0,30	Фториды 2,10	1,40	1,30	0,004	—
	ЭА-395/9	17,0	1,10	0,43	—	—	—	—	—	—
	ЭА-981/15	9,50	0,70	0,72	—	—	—	—	0,80	—
	ЭА-400/10у	5,70	0,43	—	0,25	Оксиды никеля	—	—	0,54	—
	ЭА-903/12	25,0	2,80	—	—	—	—	—	—	—
	ЭА-48/22	9,70	0,80	1,30	0,70	Фториды 1,50	—	0,7	0,001	—
	ЭА-686/11	13,0	0,80	0,40	—	—	—	—	—	—
	Э-48-М/18	10,0	1,00	1,43	—	Фториды 1,50	—	—	0,001	—
	АНО-1	7,10	0,43	—	—	—	—	—	2,13	—
	АНО-3	17,0	1,85	—	—	—	—	—	—	—
	АНО-4	6,0	0,69	—	—	—	—	—	—	—
	АНО-5	14,4	1,87	—	—	—	—	—	—	—
	АНО-6	16,3	1,95	—	—	—	—	—	—	—
	АНО-7	12,4	1,45	—	—	—	—	—	—	—
	АНО-9	16,0	0,90	—	—	Фториды 0,13	—	—	0,47	—
	АНО-11	22,4	0,87	—	—	Фториды 2,62	—	—	0,96	—
	АНО-15	19,5	0,99	—	—	Фториды 2,28	—	—	0,43	—
	ОМА-2	9,2	0,83	—	—	—	—	—	—	—
	ОЗС-3	15,3	0,42	—	—	Фториды 2,28	—	—	—	—
	ОЗС-4	10,9	1,27	—	—	—	—	—	—	—
	ОЗС-6	13,8	0,86	—	—	—	—	—	1,53	—

КНЗ-22	11,4	1,36	—	—	—	—	—	—	—
ВИ-10-6	15,6	0,31	0,45	—	—	—	—	0,39	—
ВИ-ИМ-1	5,8	0,42	0,12	—	Оксиды никеля 0,6	—	—	0,63	—
ЖД-3	9,8	1,32	—	—	—	—	—	—	—
УКС-42	14,5	1,20	—	—	—	—	—	—	—
РДЗБ-2	17,4	1,08	—	—	—	—	—	—	—
ОММ-5	30,0	2,0	—	—	Соед. кремния 1,90	—	—	—	—
МЗЗ-04	27,0—41,0	1,0	—	—	—	—	—	—	—
МЗЗ-Ш	41,0	—	—	—	—	—	—	—	—
ЦМ-6	48,7	4,3	—	—	—	—	—	—	—
ЦМ-7	22,0—52,0	1,50	—	—	—	—	—	—	—
ЦМ-8	25,0	1,50	—	—	—	—	—	—	—
ЦМ-9	10,0	0,30	—	—	Соед. кремния 2,8	—	—	—	—
ЦМ-УПУ	18,5	1,50	—	—	—	—	—	—	—
ЦТ-15	7,9	0,55	0,35	—	Оксиды никеля 0,04	—	—	1;61	—
ЦТ-28	13,9	0,93	0,21	—	Молибден 0,08 Оксиды никеля 2,0	—	—	1,05	—
ЦТ-36	7,6	1,19	—	—	Оксиды никеля 0,12	—	—	0,66	—
ЦЛ-17	10,0	0,60	0,17	—	—	—	—	—	—
ОЗЛ-5	3,9	0,37	0,47	—	—	—	—	0,42	—
ОЗЛ-6	6,9	0,25	0,59	—	—	—	—	1,23	—
ОЗЛ-7	7,6	0,21	0,47	—	—	—	—	0,69	—
ОЗЛ-14	8,4	1,41	0,46	—	—	—	—	0,91	—
ОЗЛ-9А	5,0	0,97	0,27	—	Оксиды никеля 0,39	—	—	0,13	—
МР-1	10,8	1,08	—	—	—	—	—	—	—
МР-3	11,5	1,80	—	—	—	—	—	0,40	—
МР-4	10,8	1,10	—	—	—	—	—	1,53	—
РБУ-4	6,9	0,74	—	—	—	—	—	—	—
ЭРС-3	12,8	1,23	—	—	—	—	—	—	—
СМ-5	11,4	2,18	—	—	—	—	—	—	—
ЦН-6Л	13,0	0,62	0,23	—	Оксиды железа 0,43	—	—	1,21	—
БСЦ-4	20,2	0,61	—	—	» » 19,59	—	—	—	—
БСЦ-4а	24,3	0,73	—	—	» » 23,67	—	—	—	—
ВСЦ-4	20,0	0.6	—	—	—	—	—	—	—
НИАТ-1	4,7	0,12	0,40	—	—	—	—	0,35	—

Таблица 3.5 (продолжение)

Процесс	Сварочные наплавочные материалы	Пыль	Аэрозоли в составе пыли				Газы			
			MnO_2	CrO_3	Cr_2O_3	другие компоненты	CO	NO_2	HF	O_3
	НИАТ-3Н	0,1	0,21	—	—	—	—	—	—	—
	НЖ-13	4,2	0,53	0,24	—	—	—	—	1,60	—
	ИМЕГ-10	6,9	0,34	0,18	—	Оксид никеля 1,02 Молибден 0,31	—	—	1,29	—
	К-5А	24,1	1,11	—	—	Фториды 4,45	—	—	0,50	—
	СК-2-50	12,0	0,90	—	—	—	—	—	—	—
	ЧМКТ-10	6,9	0,34	0,12	—	Оксид никеля 1,02 Молибден 0,32	—	—	1,29	—
	ВСН-6	17,9	0,53	1,54	—	—	—	—	0,80	—
	А-981/15	9,46	0,68	0,72	—	—	—	—	—	—
	ЕИ-10-60	15,6	0,31	0,45	—	—	—	—	0,39	—
	ЗСР-3	—	1,03	—	—	—	—	—	—	—
	ВСФ-65; ВСФС-60	—	1,1—1,53	—	—	—	—	—	—	—
	ЭБ-55; УОНИ-55Д; УОНИ-55У	—	—	—	—	—	—	—	2,13—2,70	—
Ручная дуговая наплавка сталей	ОЗН-250	22,4	1,63	—	—	Оксиды железа 19,73	—	—	1,04	—
	ОЗН-300	22,5	4,42	—	—	—	—	—	1,09	—
	ОЗШ-1	13,5	1,01	0,14	—	—	—	—	1,10	—
	ЭН-60М	15,1	0,49	0,15	—	—	—	—	1,28	—
	УОНИ-13/НЖ	10,2	0,53	0,39	—	—	—	—	0,97	—
	ОМГ-Н	37,6	0,92	1,54	—	Оксиды никеля 0,016	—	—	1,74	—
	НР-70	21,5	3,90	—	—	—	—	—	—	—
	ОЗИ-3	14,0	0,49	0,18	—	—	—	—	1,97	—
Ручная дуговая сварка и наплавка чугуна	ЦЧ-4	13,8	0,43	—	—	Ванадий 0,54	—	—	1,87	—
	ОЗЧ-1	14,7	0,47	—	—	Медь 4,45	—	—	1,65	—
	ОЗЧ-3	14,0	0,49	0,18	—	—	—	—	1,97	—
	МНЧ-2	20,4	0,92	—	—	Медь 6,05 Оксиды никеля 2,73	—	—	1,34	—
	Т-590	45,5	—	3,70	—	—	—	—	—	—
	Т-620	42,5	—	2,87	—	—	—	—	—	—

Ручная электрическая сварка меди, ее сплавов и титана	Комсомолец-100	20,8	0,27	—	—	Медь 9,80	—	0,76	1,11	—
	Вольфрамовый под защитой гелия	19,5	—	—	—	Медь 2,10 Вольфрам 0,08	—	—	—	—
	Не плавящийся в аргоне и гелии	9,2	—	—	—	Титан и его оксиды 3,60	—	—	—	—
	Электродная проволока СрМ-0,75	17,1	0,44	—	—	Медь 15,40	—	—	—	—
Ручная электрическая сварка алюминия и его сплавов	ОЗА-1	38,1	—	—	—	Оксиды алюминия 20,0	—	—	—	—
	ОЗА-2/АК	61,0	—	—	—	» » 27,0	—	—	—	—
	Не плавящийся в аргоне и гелии	5,0	—	—	—	» » 2,0	—	—	—	—
Полуавтоматическая сварка сталей	Присадочная проволока:									
	ЭП-245	12,4	0,54	—	—	Оксиды железа 11,50	—	—	0,36	—
	ЦСК-3	13,9	1,11	—	—	Оксиды железа 12,26	—	—	0,53	—
То же, без газовой защиты	Порошковая проволока:									
	ЭПС-15/2	8,4	0,89	—	—	—	—	—	0,77	—
	ПП-ДСК-1	11,7	0,77	—	—	—	—	—	—	—
	ПП-ДСК-2	11,2	0,42	—	—	—	—	—	0,10	—
	ПП-106	8,0— 12,0	0,2— 0,7	—	—	Оксиды железа 3,9—10,0	—	До 0,80	—	—
	ПП-108					Оксиды титана 0,1—0,7	—	—	—	—
						Фториды 0,1—1,0	—	—	—	—
	ПСК-3	7,7	0,41	—	—	—	—	—	0,72	—
	ПП-АН-3	13,7	1,36	—	—	—	—	—	2,70	—
	ПП-АН-4	7,5	2,18	—	—	—	—	—	1,95	—
	ПП-АН-7	14,4	2,18	—	—	—	—	—	1,45	—
То же, в среде диоксида углерода	Электродная (плавящаяся) проволока:									
	Св-08Г2С	9,7	0,50	0,02	—	Оксиды железа 7,48	14,0	—	—	—
	Св-Х19Н9Ф2С3	7,0	0,42	0,3—1,5	—	Оксиды никеля 0,04	14,0	—	—	—
	Св-16Х-16Н25М6	15,0	0,35	0,10	—	Оксиды никеля 2,0	2,5	—	—	—
	Св-10Х20Н7СТ	8,0	0,45	0,03	0,04	Оксид кремния 1,8	—	—	—	—
	Св-08Х19НФ-2ц2	8,0	0,40	0,50	—	Оксиды никеля 0,66	—	—	—	—
	Св-10Г2Н2СМТ	12,0	0,14	—	—	—	—	—	—	—
	Св-08ХГСН3ДМ	4,4	0,22	—	0,16	—	11,0	0,80	—	—

Таблица 3.5 (продолжение)

Процесс	Сварочные наплавочные материалы	Пыль	Аэрозоли в составе пыли				Газы			
			MnO_2	CrO_3	Cr_2O_3	другие компоненты	CO	NO_2	HF	O_3
	Св-08ХГН2МТ	6,5	0,2	—	0,03	Соединения кремния 1,9 Оксиды титана 0,4	11,0	0,8	—	—
	ЭП-245	12,4	0,61	—	—	—	3,2	—	—	—
	ЭП-704	8,4	0,22	0,07	—	—	3,0	—	—	—
	ЭП-854	7,4	0,70	—	0,6	—	2,0	—	—	—
	Св-08Г6Х16Н25М6	15,0	1,8	0,5	—	Оксиды никеля 2,0	—	—	—	—
	Св-08Х79Н9С2С2	8,0	0,2	0,6	—	» » 0,1	5,0	—	—	—
	0,7ХН3МД	4,0	0,2	—	0,1	Оксиды железа 1,2	—	—	—	—
Полуавтоматическая сварка меди, алюминия, титана и их сплавов:	Электродная проволока:									
	МНЖ-КГ-5-1-02-0,2 (медь)	16,2	0,2	—	—	Медь 11,0 Оксиды никеля 0,5	—	—	—	—
	МНЖ-КГ-5-1-02-0,2 (медно-никелевые сплавы)	18,0	0,3	—	—	Медь 7,0 Оксиды никеля 0,80	—	—	—	—
	М1 (медные сплавы)	18,0	0,3	—	—	Медь 11,0	—	—	—	—
в среде азота	КМЦ (медь и сплавы)	8,8	0,59	—	—	Соед. кремния 0,26 и меди 6,30	—	—	—	—
	МНЛНТ-5-1-0,2-0,2	1,4	0,2	—	—	Медь 7,0	—	—	—	—
в среде аргона и гелия	Проволока для алюминия:									
	Д-20	10,9	0,09	—	—	Оксиды алюминия 7,6	—	—	—	—
	АМЦ	22,5	0,62	—	—	Оксиды алюминия, 20,4	—	2,45	—	—
	АМГ-6Т	52,7	0,23	—	—	Оксиды алюминия, 8,50	—	0,33	—	—
	АМГ	20,6	0,78	—	—	Оксиды алюминия, 16,50	—	—	—	0,1
	Алюминиевая	10,0	—	—	—	—	—	0,9	—	—
	Сплав-3	26,0	1,05	—	—	Оксиды алюминия 19,20	—	—	—	—

	Электроды неплавящиеся:									
	ОЗА-1	38,4	—	—	—	Оксиды алюминия 20,0	—	—	—	—
	ОЗА-2/ак	61,0	—	—	—	Оксиды алюминия, 28,0	—	—	—	—
	Проволока для титановых сплавов	14,7	—	—	—	Оксиды титана 4,75	—	—	—	0,1
Автоматическая и полуавтоматическая сварка и наплавка металлов под флюсами	С плавленными флюсами:									
	ОСЦ-45	0,09—0,28	0,01—0,03	—	—	Соед. кремния 0,05 Фториды 0,012	1,1—1,47	0,006	0,10—0,20	—
	АН-348А	0,10	0,024	—	—	Соед. кремния 0,05 Фториды 0,01—0,07	— 0,001	0,03	—	
	ФЦ-7	0,08	0,01	—	—	Соед. кремния 0,04	—	0,003	0,05	—
	ФЦ-11	0,09	0,05	—	—	—	—	—	0,02	—
сварка и наплавка стали	ФЦ-12	0,09	0,03	—	—	—	—	—	0,02	—
	АН-22	0,12	0,009	—	—	—	—	—	0,02	—
	АН-26	0,08	0,004	—	—	—	—	—	0,03	—
	АН-30	0,09	0,033	—	—	—	—	—	0,03	—
	АН-42	0,08	0,033	—	—	—	—	—	0,02	—
	АН-60	0,09	0,012	—	—	—	—	—	—	—
	АН-64	0,09	0,02	—	—	—	—	—	—	—
	48-ОФ-6	0,11	0,002	—	—	—	—	—	0,07	—
	48-ОФ-64	0,10	0,009	—	—	—	—	—	0,04	—
	48-ОФ-7	0,09	0,05	—	—	—	—	—	0,02	—
	48-ОФ-11	0,08	0,073	—	—	—	—	—	0,006	—
	ФЦП-2	0,08	—	—	—	Соединения кремния 0,05	—	0,005	0,03	—
	ФЦ-2	0,09	0,007	—	—	Соединения кремния 0,05	—	0,006	0,033	—
	ФЦ-6	0,09	0,007	—	—	Соединения кремния 0,05	—	—	0,033	—
	С керамическими флюсами:									
	АНК-18	0,45	0,013	—	—	—	—	—	0,042	—
	АНК-30	0,26	0,012	—	—	—	—	—	0,018	—
	ЖС-450	5,80	0,142	—	—	—	22,4	—	0,18	—
	К-1	0,06	0,023	—	—	—	0,5	—	0,15	—
	К-8	4,90	—	—	—	—	17,8	—	0,13	—
	К-11	1,30	0,089	—	—	—	—	0,60	0,14	—
	КС-12ГА2	3,40	0,133	—	—	—	20,0	—	0,43	—

Таблица 3.5 (продолжение)

Процесс	Сварочные наплавочные материалы	Пыль	Аэрозоли в составе пыли				Газы			
			MnO_2	CrO_3	Cr_2O_3	другие компоненты	CO	NO_2	HF	O_3
сварка и наплавка алюминия и его сплавов	С плавленными флюсами:									
	АН-А1	52,80	—	—	—	Оксиды алюминия 31,2	—	—	4,16	—
	С керамическими флюсами:									
	ЖА-64	0,30	—	—	—	Оксиды алюминия 0,12	—	—	0,076	—
Наплавка литыми твердыми сплавами и карбидно-боридными соединениями:	С-27 (ручная электро-дуг. сварка)	22,2	—	1,01	—	Оксиды никеля 0,05	—	—	—	—
	С-27 (ручная газовая сварка)	3,16	—	0,005	—	Оксиды никеля 0,02	—	—	—	—
	В-2К (ручная электро-дуг. сварка)	16,6	—	1,66	—	Кобальт 0,60	—	—	—	—
	В-2К (ручная газовая сварка)	2,32	—	0,47	—	Кобальт 0,01	—	—	—	—
а) стержневыми электродами и легирующей добавкой	КБХ-45	39,6	—	2,12	—	—	—	—	—	—
	БХ-24	42,9	—	2,56	—	—	—	—	—	—
	ХР-19 (ручная электродуговая сварка)	41,4	—	4,35	—	—	—	—	—	—
б) литыми карбидами (трубчатые электроды)	РЭЛИТ-ТЗ (ручная газовая сварка)	3,94	—	—	—	—	—	—	—	—
в) наплавленными смесями	КБХ	81,1	—	0,033	—	—	—	—	—	—
	БХ	54,2	—	0,008	—	—	—	—	—	—
	Сталинит М (ручная электродуговая сварка)	92,5	9,48	0,001	—	—	—	—	—	—
г) порошками для напыления	СНГН	39,7	—	0,357	—	Бор 0,235	—	—	—	—
	ВСНГН	23,4	—	0,062	—	Бор 0,288 Оксиды никеля 0,095	—	—	—	—

Таблица 3.6. Удельные величины вредных веществ, образующихся при контактной электросварке, плазменном напылении и металлизации

Технологический процесс или тип оборудования	Выделяющиеся вредные вещества	
	наименование	количество
Контактная электросварка стали:		
стыковая и линейная	Сварочный аэрозоль (оксиды железа с примесью до 3% оксидов марганца), г/ч на 100 кВА номинальной мощности машины	33,3
машины стыковые:		
МС-1602	То же, г/ч	33,3
МС-1202	»	18,6
МС-802	»	8,7
машины точечные:		
МТПУ-300	»	15,0
МТ-2510	»	8,0
МР-2507	»	6,2
МТ-1617	»	5,0
МПТ-75	»	3,5
МТПП	»	5,0
точечная	То же, г/ч на 100 кВА номинальной мощности машины	5,0
Сварка трением	Оксид углерода, мг/см^2 площади стыка	8,0
Плазменное напыление алюминия	Оксид алюминия, г/кг расходуемого порошка	77,5
Установка УМП-5-68	То же, г/ч	310,0
Металлизация стали цинком	Оксид цинка, г/кг расходуемой проволоки	96,0
Металлизатор электрический ЭМ-12-67	То же, г/ч	1,47
Радиочастотная сварка алюминия, агрегат «16-76»	Оксид алюминия, г/ч	7,3

возрастание концентрации в 5,3 раза. Одновременно с этим в пыли чугуна увеличивается содержание частиц размерами до 5 кмк, в то время как в случае бронзы оно уменьшается. При обработке стали Ст. 45 с ростом скорости резания концентрация пыли увеличивается в небольших пределах, но резко возрастает образование частиц размерами 2 кмк (до 75%).

Поступление вредных веществ в атмосферный воздух при абразивной обработке материалов (заточке, зачистке, шлифовании) зависит от мощности шлифовальных станков, глубины резания, диаметра круга. В табл. 3.9 приведена взаимосвязь между съемом металла и износом абразива для шлифовальных кругов некоторых типов при номинальных режимах шлифования (зачистка стальных отливок и обработка проката).

Количественное соотношение между металлической и абразивной пылями в отходах шлифования может изменяться в довольно широких пределах: 40—85% для металла и 15—60% для абразивных зерен.

Ниже приведены удельные выделения пыли (на единицу оборудования) при механической обработке хрупких материалов с использованием технологического оборудования различных видов, г/ч:

Обработка чугуна на станках:

токарных	20—40
фрезерных	15—25
сверлильных	3—5
расточных	6—10

Таблица 3.7. Количество вредных веществ, образующихся при газовой плазменной резке сталей и сплавов

Материал	Толщина разрезаемых листов, мм	Выделяющиеся вещества, г/м			
		пыль	MnO_2	CO	NO_x
		Газовая резка			
Сталь малоуглеродистая	5	3,5	0,6	1,3	0,9
	10	7,0	1,2	1,9	1,2
	20	14,0	2,4	2,5	1,5
Сталь качественная легированная 45Г17ЮЗ	10	5,0	1,2	2,0	1,6
	20	10,0	2,4	2,7	2,2
Сплавы титана	4	5,0	—	1,0	0,5
	12	15,0	—	1,0	0,9
	20	24,0	—	2,2	1,1
	30	36,0	—	2,7	1,5
		Плазменная резка			
Сталь 09Г2	14	5,0	—	2,0	10
	20	10,0	—	2,5	14
Сталь качествеиная легированная	5	3,0	—	1,5	2,5
	10	5,0	—	1,7	6,0
	20	12,0	—	1,9	8,0
Сплавы АМГ	8	2,5	—	0,6	2,5
	20	4,5	—	0,9	4,0
	80	6,0	—	1,8	8,0

Таблица 3.8. Количество вредных веществ, образующихся при газовой сварке сталей и электродуговой резке алюминиевых сплавов

Процесс	Вредные вещества	Количество, г
Газовая сварка:		
ацетиленокислородная	Оксид азота	22 на 1 кг ацетилена
с пропанобутановой смесью	То же	15 на 1 кг смеси
Электродуговая резка алюминиевых сплавов	Оксид алюминия	0,2 на 1 м длины реза толщиной 1 мм

Таблица 3.9. Взаимосвязь между съемом металла и износом абразива для шлифовальных кругов некоторых типов

Материал круга	Размеры круга, мм	Съем металла, кг/ч	Износ круга, кг/ч
14А125СТ2Б (шлифование заготовок из конструкционных сталей)	300×40×76	15,0	12,5
	500×63×203	45,0	18,0
	600×80×305	80,0	20,0
53С160СТ3БК, МЗШИ (зачистка быстрорежущей стали)	150×63×203	40,0	20,0
14А125СТ3Б (зачистка быстрорежущей стали)	300×40×75	9,0	9,0

Таблица 3.10. Удельные выделения аэрозолей масла, эмульсола и паров воды при механической обработке металлов с охлаждением

Оборудование	Установочная мощность, кВт	Аэрозоль масла, г/ч	Аэрозоль эмульсола, мг/ч	Пары воды, кг/ч
Токарные станки малых и средних размеров	0,65—14	0,1—2,8	4—88	0,1—2,1
Токарные станки крупных размеров	10—200	2,0—40	63—1260	1,5—30
Токарно-револьверные станки	2,8—14	0,6—2,8	17—88	0,4—2,1
Токарно-карусельные станки	20—150	4—30	126—945	3—23
Одношпиндельные токарно-револьверные автоматы	2,8—4,5	0,6—0,9	17—28	0,4—0,7
Многошпиндельные токарные полуавтоматы	14—28	2,8—5,6	88—176	2,1—4,2
Многорезцовые токарные полуавтоматы	4,5—40	0,9—8,0	28—252	0,7—6,0
Многошпиндельные токарные прутковые автоматы	10—28	2,0—5,6	63—176	1,5—4,2
Вертикально-сверлильные станки	1—10	0,2—2,0	60—63	0,2—1,5
Радиально-сверлильные станки	1,7—14	0,3—2,8	11—88	0,3—2,1
Горизонтальные расточные станки	4,5—59	0,9—12	28—372	0,7—8,9
Координатно- и алмазно-расточные станки	0,7—4,5	0,1—0,9	4—28	0,1—0,7
Продольно-фрезерные станки	7—40	1,4—8,0	40—252	1,1—6,0
Карусельно-фрезерные станки	14	2,8	88	2,1
Барабанно-фрезерные станки	10—20	2,0—4,0	63—126	1,5—3,0
Продольно-строгальные станки	40—180	8,0—36	252—1134	6—27
Протяжные станки	10—55	2,0—11	63—346	1,5—8,3
Резьбонакатные станки	0,6—14,0	0,1—2,8	4—88	0,1—2,1
Зубофрезерные станки	0,6—20	0,1—4,0	4—126	0,1—3,0
Зуборезные и зубодолбежные станки	0,6—7,0	0,1—1,4	4—40	0,1—1,1
Фрезерные станки	2,8—14,0	0,6—2,8	17—88	0,4—2,1
Внутришлифовальные станки	2,0—4,5	60—135	330—742	0,3—0,7
Круглошлифовальные станки	0,7—10	21—300	115—1650	0,1—1,5
То же	7,0—29	210—870	1155—4785	1,1—4,4
Плоскошлифовальные станки	1,7—28	51—840	280—4620	0,3—4,2
Бесцентрово-шлифовальные станки	4,5—20	135—600	742—3300	0,7—3,0
Зубошлифовальные станки	3,1—10	93—300	511—1650	0,5—1,5
Резьбо- и шлицешлифовальные станки	2,8—4,2	84—126	462—693	0,4—0,6

Примечания. 1. От технологического оборудования для приготовления эмульсий, имеющего открытые стоки, емкости с машалками и т. п., выделяется 1,4 г аэрозолей эмульсола и 2800 г паров воды в час на 1 т приготовляемой эмульсии. 2. Для станочного парка цехов прецизионного станкостроения выделение паров воды увеличивается на 18—20%.

Таблица 3.11. Фракционный состав пылей, выделяющихся при некоторых процессах абразивной обработки металлов в механических цехах и цехах гальванопокрытий

Отделение (станок)	Объем аспирируемого воздуха, тыс $м^3/ч$	Пыль	Концентрация пыли в воздухе, $г/м^3$	Медианный диаметр частиц, мкм	Среднеквадратичное отклонение	Плотность частиц, $г/см^3$
		Механические цехи				
Обдирочное	5,0—14	Литейная земля + металлическая + абразивная	0,1—0,5	30—60	3,1—4,0	2,2—5,2
То же, участок зачистки деталей наждаком	2,0—7,0	Абразивная + металлическая	0,2—0,5	44—60	1,9—4,0	3,4—4,8
Заточное	2,5—6,5	Металлическая + горелая земля + окалина	0,1—0,4	14—60	2,0—2,5	3,4—4,8
Шлифовальное	3,0—7,0	Абразивная + металлическая	0,5—1,0	19—35	2,7—3,3	3,4—4,8
Полировальное	9,0—20,0	Абразивная + текстильная + пыль полировальной пасты	0,9—1,1	40—240	1,6—3,6	1,5
		Цехи гальванопокрытий				
Шлифовальный	0,5—3,0	Абразивная + металлическая	0,3—0,8	10—20	2,7—3,3	3,4—4,8
Полировальный	0,7—2,5	Текстильная + пыль полировальной пасты	0,1—0,3	25—100	1,6—3,6	1,5—1,8

Таблица 3.12. Удельное количество выделяющихся вредных веществ при обработке полимерных материалов

Технологический процесс, агрегат, установка	Материал	Загрузка оборудования, кг/ч	Выделяющиеся вредные вещества	Удельное количество вредных веществ, г/ч
Таблетирование пресс-порошков, ротационная машина таблетирования	Фенопласт Э2-330-02 (порошок)	48,45	Пыль пресс-порошка	29,60
			Фенол	5,96
			Формальдегид	0,0071
Подготовка стекловолокнитов:	—	—	Фенол	18,10
			Формальдегид	0,20
автомат для фильтрования	АГ-4В	40,0	Пыль стекловолокна	38,50
устройство для резки стекловолокнитов	АГ-4С	6,0	Пыль стекловолокнита	13,60
фильерирование, гидропресс ПД-476	АГ-4В	5,0	Фенол	1,00
			Формальдегид	0,01
			Пыль стекловолокнита	0,50
Предварительный разогрев таблеток на установках ТВЧ	Фенопласт 03-010-02	1,77	Фенол	0,53
			Формальдегид	0,03
Прессование	Фенопласт СП1-342-02	1,958	Фенол	0,40
			Формальдегид	0,02
Гидропрессы:	Фенопласт	0,16	Фенол	0,20
			Формальдегид	0,10
ИЖ-50	03—010/02 (таблетки)			
П-476	То же	2,1	Фенол	0,90
			Формальдегид	0,29
УД-476	Фенопласт УЧ-080-02 (таблетки)	0,954	Фенол	0,05
			Формальдегид	0,01
ДБ2 432	То же	1,35	Фенол	0,20
			Формальдегид	0,01
			Пыль стекловолокнита	0,30

Таблица 3.12 (продолжение)

Технологический процесс, агрегат, установка	Материал	Загрузка оборудования, кг/ч	Выделяющиеся вредные вещества	Удельное количество вредных веществ, г/ч
ИЖ-50	АГ-4С	0,43	Фенол	0,10
			Формальдегид	0,02
			Пыль стекловолокнита	0,10
Д-4305	АГ-4В	0,60	Фенол	0,60
			Формальдегид	0,06
			Пыль стекловолокнита	0,30
ДБ2428	Полиамидная смола КПС-30 (гранулы)	1,44	Аммиак	0,80
			Оксид углерода	1,70
ПД-476	Полиамидная смола 63ВС (гранулы)	0,48	Аммиак	0,70
			Оксид углерода	0,50
ИЖ-50	СФД (гранулы)	0,018	Формальдегид	0,30
ДБ2428	Дифлон (гранулы)	0,2	Фенол	0,10
ДБ2432	Резина НО-68-1	0,76	Акрилонитрил	0,20
			Оксид углерода	0,40
КшРУ-100	Резина (3687)	0,675	Диоксид серы	0,30
			Оксид углерода	1,90
			Сероводород	0,80
Н3468А (четырехэтапный)	Резина (В-14)	1,63	Акрилонитрил	0,20
			Оксид углерода	0,50
ДБ2426Б	Фенопласт 03-010-02 (пресс-порошок)	1,32	Фенол	1,50
			Формальдегид	0,20
			Пыль пресс-порошка	34,20
П-483	Фенопласт 03-010-02 (пресс-порошок)	0,12	Фенол	0,10
			Формальдегид	0,10
			Пыль пресс-порошка	1,70

Литье под давлением, литьевые машины:				
КиА У100/25	Полистирол УПМ-612	1,80	Стирол	0,01
			Оксид углерода	6,70
КиА У1700/400	Полистирол УПМ-612	38,6	Стирол	0,40
			Оксид углерода	7,30
СНК У650/250	Полистирол УПМ-0612л-07	19,2	Стирол	0,20
			Оксид углерода	2,00
КиА У260/100	ОТД	4,95	Формальдегид	0,10
ДБ-3328	ОТД	0,72		0,04
НиА У100/25	АВС-2	1,29	Стирол	0,09
			Оксид углерода	0,60
КиА У100-25	АВС-2020	1,2	Акрилонитрил	0,30
			Стирол	0,10
			Оксид углерода	1,00
Matsuda (Япония) М-1-2/175	Э2-330-02	9,19	Фенол	1,70
			Формальдегид	0,04
			Пыль пресс-порошка	3,90
КшА У100/25	Стеклонаполненный полиамид	0,65	Оксид углерода	17,30
			Аммиак	1,00
Термопласт-автомат Д3328	Полиэтилен высокого давления	0,88	Оксид углерода	0,40
Переработка отходов, агрегат гранулирования ОА-1072	БАСФ 5264002	20,35	Стирол	0,10
			Оксид углерода	0,60
			Формальдегид	0,004
Механическая обработка деталей из пластмасс:				
станок токарный ТС-36-491	АГ-4В	5,14	Пыль стекловолокнита	3,60
станок токарный 1А616	Текстолит	—	Пыль текстолита	14,40
станок токарный 1А612	»	—	То же	34,50
станок сверлильный	»	—	»	11,80
станок фрезерный	»	—	»	6,40

Обработка бронзы и других хрупких цветных металлов на станках:	
токарных	8—10
фрезерных	6—8
сверлильных	12—16
расточных	2,0—2,8
Обработка текстолита на станках:	
токарных	50—80
фрезерных	100—120
зубофрезерных	20—40
Раскрой пакетов стеклоткани (толщиной до 50 мм) на ленточном станке	9—20
Обработка карболита на станках:	
токарных и расточных	40—80
фрезерных	180—200
сверлильных	36—50
Таблетирование пресс-порошков (аминопластов, стеклянного, фенолюта и волокнистых материалов) на машинах ротационного типа	250—350
Механическая обработка изделий на станках:	
сверлильных	7—10
фрезерных	3—5
Резание органического стекла дисковыми пилами	800—950
Мельницы помола отходов полистирола	420—650
Изготовление деталей литьевыми машинами (пары стирола)	26—74
Гранулляторные машины (пыль)	63—106
То же (пары стирола)	21—38
Смесительные барабаны	45—75
Смесительные машины	1440—2440
Дробилки	1079—4100
Зачистные станки (пары стирола)	11—19
То же (пыль)	126—432

Удельные выделения пыли основным технологическим оборудованием при механической обработке металлов приведены ниже (состав пыли определяется материалами шлифовального круга и обрабатываемой детали):

Диаметр шлифовального круга, мм	Удельное выделение пыли, г/ч
Круглошлифовальный станок	
150	117
300	155
350	107
400	180
600	235
750	270
900	310
Плоскошлифовальный станок	
175	130
250	150
350	181
400	198
450	212
500	225
Бесцентрово-шлифовальный станок	
100—30	44—47
395—500	58—80
480—600	78—100
300	80
Зубошлифовальный станок	
75—200	42—49
120	44
160	47—48
400	65
Внутришлифовальный станок	
5—20	25—30
10—50	26—45
17—80	28—58
40—150	40—87
125—200	80—108
Заточный станок	
100	30—40
150	40—62
200	62—85
250	85—110
300	110—135
350	135—160
400	160—182
450	182—205

500	205—230	400	120—160
550	230—255	500	160—200
Полировальный станок		600	200—260
с войлочными кругами		*Отрезной станок*	
100	40—60	—	260—730
200	60—80	*Крацевальный станок*	
300	80—120	—	200—350

В табл. 3.10 приведены удельные выделения аэрозолей масла, эмульсола и паров воды (при охлаждении соответственно маслом, эмульсией и содовым раствором) от оборудования механической обработки металлов при работе с охлаждением.

В табл. 3.11 приведен фракционный состав пылей, выделяющихся при наиболее типовых процессах абразивной обработки металлов в механических цехах и в цехах гальванопокрытий.

Вылетающие в процессе шлифования частицы металла и абразива образуют факел. Размеры частиц, находящихся внутри факела, могут изменяться в довольно широких пределах в зависимости от вида обрабатываемого материала. Дисперсный состав частиц, образующихся при заточке инструмента, характеризуется медианным диаметром $d_{50}=15—30$ мкм при его стандартном отклонении $\sigma=1,8—2,2$.

При обработке стеклопластиков наибольшая концентрация пыли возникает в процессе обдирки и наименьшая — при фрезеровании. Дисперсный состав частиц, способных к образованию пылевого облака в зоне дыхания, характеризуется параметрами: $d_{50}=15—40$ мкм и $\sigma=2,5—3,2$. Частицы графита и угля, получающиеся в результате обработки изделий из графита и угля, имеют средние размеры 20—100 мкм с широким спектром распределений для различных процессов резания.

Одновременно с пылью при обработке полимерных материалов могут выделяться в атмосферу пары различных химических веществ и соединений: фенолов, формальдегида, малеинового ангидрида, стиролов и других, входящих в состав обрабатываемых материалов. Данные о количественных характеристиках этих веществ в вентиляционных выбросах весьма разнообразны (табл. 3.12).

3.1.4. Вредные вещества, поступающие в атмосферный воздух при деревообработке

При деревообработке в атмосферный воздух выделяются следующие вещества:

опилки, стружка, шлифовальная пыль — при механической обработке древесины;

пары формальдегида, фенола, аммиака — при горячем прессовании, намазке, склеивании и сушке шпона;

пары ароматических углеводородов, эфиры, спирты — при отделке изделий.

Количество опилок, стружек или пыли, выделяющихся при механической обработке древесины, зависит от применяемого станка и коэффициента использования машинного времени. Количество пылевидных отходов (пыль с частицами размером менее 200 мкм) определяется по формуле, кг/ч:

$$G = G_0 k_п, \qquad (3.1)$$

где G_0 — среднечасовое количество отходов, получаемое от рассматриваемого оборудования, кг/ч; $k_п$ — коэффициент содержания пылевидных отходов (частицы размером менее 200 мкм).

Значения G_0 и $k_п$ приведены в таблице 3.13. Усредненные данные фракционного состава пыли, образующейся при различных технологических операциях механической обработки древесины, приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.13. Среднечасовое количество отходов, получаемое на различных станках при обработке древесины

Станки	Коэффициент использования машинного времени	Минимальный объем отсасываемого воздуха, тыс $м^3/ч$	Среднее количество отходов, кг/ч	Среднее содержание пыли с размером частиц менее 200 мкм	
				%	кг/ч
Круглопильные:			Пыль, опилки		
Ц6-2	—	0,84	29,7	36	10,7
ЦТЭФ	—	2,52	46,3	34	15,7
ЦКБ-4, ЦМЭ-2	0,5—0,6	0,86	44,0	36	15,8
ЦПА-40	0,6	0,84	44,0	35	15,3
Ц2К12	0,6	—	35	34	11,8
ЦД-2А	0,9	1,50	61,0	35	21,5
ЦДК-4	0,9	—	78,0	36	28,1
ЦА-2	0,9	—	110,0	36	39,7
ЦМР-1	0,95	1,90	170,0	36	61,2
универсальный круглопильный Ц6	0,7	—	28,0	30	8,4
универсальный круглопильный УП	0,7	—	21,0	30	6,3
Строгальные:			Стружка, пыль		
фуговальные с ручной подачей:					
СФ-3	0,7	—	33,0	25	8,2
СФ-6	0,6	—	73,0	25	18,2
фуговальные с механической подачей:					
СФ-4	0,9	—	97,0	25	24,3
СФ-6	0,9	—	190,0	25	47,5
СФА-4	0,9	—	97,0	25	24,2
СФА-6	0,9	—	190,0	25	47,6
СР-3	0,9	—	97,0	25	24,2
СК-15, С16-4, С16-5	0,9	—	310,0	25	77,7
С2Р6, С2Р8	0,9	2,50	445,0	25	112,0
С2Р12	0,9	3,10	490,0	25	122,5
С2Р16	0,9	—	555,0	25	139,0
Фрезерные:			Стружка, пыль		
ФЛ, ФЛА, ФСШ-1	—	0,9	24,0	20	4,8
Ф-4, Ф-6	0,7	1,35	26,1	20	5,2
Ф-5	0,7	1,50	26,1	20	5,2
ФА-1	0,8	—	44,0	20	8,8
Ф	0,8	—	22,0	20	4,4
ФС-1	—	1,35	47,5	20	9,5
ВФК-2	—	0,40	27,0	20	5,4
СР-6	0,9	—	245,0	25	61,2
СР-12	0,9	—	335,0	25	83,7
СР-18	0,9	—	500,0	25	125,0
СП-30, С-26	0,9	—	600,0	25	150,0
Шипорезные:					
шипорезные фрезы	—	1,51	73,0	16	11,6
ШО-10 (пила)	—	0,72	4,6	16	0,7

Таблица 3.13 (продолжение)

Станки	Коэффициент использования машинного времени	Минимальный объем отсасываемого воздуха, тыс $м^3/ч$	Среднее количество отходов, кг/ч	Среднее содержание пыли с размером частиц менее 200 мкм	
				%	кг/ч
проушечные фрезы	—	0,83	24,0	16	3,8
ШО-6 (пила)	—	0,72	3,7	16	0,6
шипорезные головки	—	1,22	54,0	16	8,6
проушечный диск	—	0,79	15,3	16	2,4
пила	0,96	—	74.0	34	25,2
фрезерные головки	0,95	—	68,0	20	13,6
шипорезный рамный ШД-10	—	—	9,2	16	1,5
шипорезные фрезы	—	—	145,0	16	23,2
проушечные фрезы	—	—	48,0	16	7,7
шипорезный ящичный ШПА-40, Ш2ПА	—	1,0	8,5	24	2,0
ШЛХ-3	—	1,98	62,3	16	10,0
Ленточнопильные:			Опилки, пыль		
ЛО-80	0,8	1,15	29,0	34	9,8
ЛД-140	0,8	2,5	245,0	34	83,5
ЛС-80-1, ЛС-40-1	—	1,2	36,0	33	12,0
формативный четырехпильный с фрезерными головками ЦФ-2	*0,9*	—	*245,0*	*25*	*61,3*
Сверлильные и долбежные:			Стружка, пыль		
СВПА	0,6	—	22,0	18	1,5
СВА-2	0,5	0,15	14,0	18	2,5
СВА-2М	—	0,15	25,9	—	1,6
СВП-2	—	0,15	25,9	—	1,6
СГВП-1	—	1,0	23,1	—	1,5
сверлильный 2Н, 125Л	—	0,8	26,0	21	6,0
ДЦА-2	0,4	—	27,0	18	4,8
токарный 1Е61М, 1А61В	—	1,8	26,0	21	60
Шлифовальные:			Пыль		
ШлПС-5П	—	3,0	2,8	100	2,8
ШлПС-7	—	3,0	5,6	100	5,6
ШлНСВ	—	2,4	1,2	100	1,2
ШлДБ	0,78	—	3,2	95	3,1
ШлНС	0,85	—	2,8	95	2,7
ШлСЛ	0,85	—	1,8	95	1,7
Шл2Д	0,7	—	4,0	95	3,8
Шл3Ц-2	0,85	—	27,0	95	26,5
Шл3ЦВ-3	0,85	—	48,0	95	45,6
Шлифовально-дисковые					
ШлДБ-4	—	1,4	12,0	67	8

Таблица 3.14. Фракционный состав пыли, образующейся при различных технологических операциях механической обработки древесины

Технологический процесс	Содержание, %, фракций пыли мкм				
	200—100	100—75	75—53	53—40	40 и менее
Пиление	16	68	10	3	3
Фрезерование	40	53	4,5	2	0,5
Сверление	46	45,5	4,5	2,5	1,5
Строгание	52	43	3	1,2	0,8
Шлифование	21	28	17,5	12	21,5

Количество пылевидных отходов, поступающих в систему пневмотранспорта или аспирации, определяется по формуле, кг/ч:

$$G = G_0 k_п k_{э.м\,о}, \qquad (3.2)$$

где $k_{э.м.о}$ — коэффициент эффективности работы местного отсоса, определяемый в зависимости от сечения отсоса, объема отсасываемого воздуха и места расположения отсоса по отношению к месту выделения вредности (см. гл. 4).

Количество пылевидных отходов, поступающих в атмосферный воздух после очистки в пылеулавливающем оборудовании, определяется по формуле, кг/ч:

$$G = G_0 k_п k_{э.м\,о}(1 - k_{э.о}), \qquad (3.3)$$

где $k_{э.о}$ — степень эффективности пылеулавливающего оборудования.

Пример 3.2. Определить количество пылевидных отходов, поступающих в атмосферный воздух от аспирационной системы, обслуживающей два одновременно работающих универсальных круглопильных станка Ц-6.

Исходные данные. Коэффициент эффективности местных отсосов (из расчета, см гл. 4) $k_{э.м.о}$=0,9. Степень эффективности пылеулавливающего оборудования (циклона), установленного в системе, $k_{э.о}$=0,95 (по расчету, исходя из при.ятого циклона и фракционного состава пыли).

Решение. Находим по табл. 3.13 среднечасовое количество отходов:

$$G_0 = 2 \cdot 28 = 56 \text{ кг/ч}.$$

Определяем количество пылевидных отходов (пыль размером менее 200 мкм):

$$G = G_0 k_п = 56 \cdot 0{,}3 = 16{,}8 \text{ кг/ч}.$$

$k_п$ находим из табл. 3.13; $k_п$=0,3. Находим количество пылевидных отходов, поступающих в систему аспирации:

$$G = G_0 k_п k_{э\,м.о} = 56 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}9 = 15{,}12 \text{ кг/ч}.$$

Рассчитываем количество пылевидных отходов, поступающих в атмосферный воздух после очистки в пылеулавливающем оборудовании:

$$G = G_0 k_п k_{э\,м\,о}(1 - k_{э.о}) = 56 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}9(1 - 0{,}95) = 0{,}76 \text{ кг/ч}.$$

При проведении технологических операций склеивания, отделки (шпатлевка, грунтовка, окраска, облагораживание, импрегнирование, печать и др.) выделяются вредные вещества из применяемых смолосодержащих и лакокрасочных материалов в виде паровоздушных смесей. В процессах, где применяют карбамидоформальдегидные и фенолоформальдегидные смолы, количество вредных веществ (формальдегида, фенола), поступающих в атмосферу, определяют по формуле, кг/ч:

$$G = G_{см} k_1 (1 - k_2) k_3, \qquad (3.4)$$

Таблица 3.15. Содержание свободного формальдегида и фенола в составе смолы, %

Марка смолы	Свободный формальдегид	Свободный фенол	Марка смолы	Свободный формальдегид	Свободный фенол
МФ	3—4	—	МФП	0,5—1,0	—
М-60	1—1,5	—	СПМФ-4	0,5	—
М-70	1,5—3,0	—	КФ-МТ	0,3	—
М-19-62	1,0—1,2	—	КФ-Б	0,9	—
МФПС-1	2	—	КФ-Ж	1,0	—
МФПС-2	1	—	СФЖ-3014	0,15	0,1
ПМФ-1,	1	—	СФЖ-3013	0,18	0,18
ПМФ-2			СФЖ-3011	1,0	2,5
ММПК-25	1,4	—			
ММПК-50	1,1	—			

Таблица 3.16. Распределение свободного формальдегида и фенола

Процесс	Коэффициент, характеризующий количество свободного формальдегида и фенола, остающихся в готовой продукции k_2	Участок процесса	Коэффициент, характеризующий распределение веществ по участкам k_3
Намазка и фанерование натурального и синтетического шпона при производстве мебели	0,7	1. Размещение клеенамазывающих вальцев и горячих прессов	0,83
		2. Участок выдержки фанерованных изделий	0,17
Пропитка бумаги (ламинирование)	0,5	Пропитка	1,0
Пропитка стружки смолой горячего прессования; охлаждение древесностружечных плит	0,6	1. Размещение главного конвейера и пресса	0,9
		2. Приготовление связующих	0,09
		3. Склад готовой продукции	0,01
Намазка, сушка; склеивание шпона и охлаждение фанеры после прессов	0,5	1. Клеевые вальцы	0,1
		2. Сушилки для намазанного шпона; горячие прессы	0,75
		3. Камеры охлаждения	0,15

Таблица 3.17. Содержание формальдегида и аммиака в воздухе в зависимости от содержания формальдегида в смоле

Содержание формальдегида в смоле, %	Содержание в воздухе, г/кг		Содержание формальдегида в смоле, %	Содержание в воздухе, г/кг	
	формальдегида	аммиака		формальдегида	аммиака
0,3	1,2	—	1,0	4,0	1,88
0,5	2,0	—	1,2	4,81	2,1

Таблица 3.18. Состав растворителей, %

Компоненты	Р-4	Р-5	Р-6	Р-7
Ацетон	26	30	—	—
Бензол	—	—	40	—
Бутилацетат	12	30	15	—
Бутиловый спирт	—	—	15	—
Ксилол	—	40	—	—
Метилэтилкетон	—	—	—	—
Сольвент-нафта	—	—	—	—
Толуол	62	—	—	—
Циклогексанон	—	—	—	50
Этилгликольацетат	—	—	—	—
Этиловый спирт	—	—	30	50
Этилцеллозольв	—	—	—	—

Компоненты	Р-219	Р-548	Р-1101	Р-1166
Ацетон	30	—	—	—
Бутиловый спирт	—	—	—	—
Ксилол	—	—	—	50
Метилэтилкетон	—	—	—	—
Пропиленкарбонат	—	30	—	—
Сольвент-нафта	—	—	55	—
Толуол	33	—	25	—
Уайт-спирит	—	—	—	—
Хлорбензол	—	—	—	—
Циклогексанон	34	—	—	15
Этилацетат	—	—	—	20
Этилгликольацетат	—	—	20	—
Этиловый спирт	—	—	—	—
Этилцеллозольв	—	70	—	15

Компоненты	№ 645	№ 646	№ 647	№ 648	№ 649	№ 650
Ацетон	3	7	—	—	—	—
Бутилацетат	18	10	29,8	50	—	—
Бутиловый спирт	10	15	7,7	20	20	30
Ксилол	—	—	—	—	50	50
Метилизобутилкетон	—	—	—	—	—	—
Толуол	50	50	41,3	20	—	—
Циклогексанон	—	—	—	—	—	—
Этилацетат	9	—	21,2	—	—	—
Этиловый спирт	10	10	—	10	—	—
Этилцеллозольв	—	8	—	—	30	20

Р-12	Р-14	Р-24	Р-40	Р-60	Р-189	Р-198
—	—	15	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	13	—
—	—	—	—	—	—	—
10	—	35	—	—	13	27
—	—	—	—	—	37	—
—	—	50	—	—	—	—
60	50	—	50	—	—	—
—	50	—	—	—	—	50
—	—	—	—	—	37	—
—	—	—	—	70	—	—
—	—	—	50	30	—	50

Р-2106	Р-3160	РЛ-176	РЛ-277	РЛ-278	РЛ-298	РВЛ	РФГ	РС-2
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	60	—	—	20	—	—	75	—
—	—	—	—	30	70	—	—	30
—	—	—	50	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	50	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	25	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	70
—	—	—	—	—	—	50	—	—
30	—	50	50	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	40	—	—	15	—	—	25	—
—	—	—	—	10	30	50	—	—

РМЛ-218	РМЛ-315	РДВ	РКБ-1	РКБ-2	М	АМР-3	Р 251 «Б»
—	—	3	—	—	—	—	—
9	18	18	—	—	30	25	—
9	15	10	50	95	5	22	—
23,5	25	—	50	5	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	40
23,5	25	50	—	—	—	30	—
—	—	—	—	—	—	—	60
16	—	9	—	—	5	—	—
16	—	10	—	—	60	23	—
3	17	—	—	—	—	—	—

Таблица 3.19. Состав нитрогрунтовок, нитроцеллюлозных лаков, распределительной и разравнивающей жидкостей, %

Компоненты	Грунтовки		Лаки							Разравнив жидкость РМЕ	Распред жидкость НЦ-313	Нитрополитура НЦ-314	Полировочная вода № 18
	НЦ-0140	БНК	НЦ-221	НЦ-222	НЦ-223	НЦ 224	НЦ-218	НЦ 243	НЦ-52				
Ацетон	—	2,3	4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Бутанол	12	5,3	16,6	7,4	10,05	8	6,3	11,1	33	4	2	—	5
Бутилацетат	16	3,5	12,5	7,2	12,06	10,2	6,3	7,4	—	15	6,4	8,1	1
Этилацетат	12	9,4	8,3	12,4	3,35	10,5	11,2	5,18	—	20	5,2	—	2
Этиловый спирт	8	9,4	8,3	12,2	—	34,05	11,2	7,4	1	54	76,7	55,64	69
Ксилол	—	17,8	—	—	16,75	10,3	16,45	—	—	—	—	—	—
Толуол	16	20,6	33,2	36,3	16,75		16,45	37	—	—	3,6	8,7	—
Этилцеллозольв	12	1,7	—	2,5	8,04	—	2,1	5,92	—	—	3	13,6	—
Циклогексанон	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Окситерпеновый растворитель	—	—	—	—	—	1,95	—	—	—	1	—	—	—
Сольвент-нафта	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—
Формальдегид	—	—	—	—	—	—	—	—	0,76	—	—	—	—
Бензин «галоша»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20
Летучая часть	80	70	83,1	78	67	75	70	74	38,76	94	96,9	86	97
Сухой остаток	20	30	16,9	22	33	25	30	26	71,24	6	3,1	14	3

где $G_{см}$ — расход смолы, кг/ч; k_1 — содержание свободного формальдегида, фенола в составе смолы, принимается в зависимости от марки используемой смолы, % (табл. 3.15); k_2 — коэффициент, характеризующий количество свободного формальдегида и фенола, остающихся в готовой продукции; принимается в зависимости от технологического процесса, % (см. табл. 3.15); k_3 — коэффициент, характеризующий распределение вредных веществ (формальдегида, фенола) по участкам (табл. 3.16).

Количество формальдегида и аммиака, поступающих в атмосферный воздух, можно определить и по удельным показателям расходуемой смолы (табл. 3.17).

Пример 3.3 Определить количество формальдегида, поступающего на участке размещения главного конвейера и пресса производства древесностружечных плит.

Исходные данные. Расход смолы КФ-МТ составляет 500 кг/ч.

Решение. По табл. 3.15 находим коэффициент, характеризующий содержание свободного формальдегида в составе смолы КФ-МТ: k_1=0,3%. По табл. 3.16 находим коэффициент, характеризующий количество свободного формальдегида, остающегося в готовой продукции, k_2=0,6. По табл. 3.16 находим коэффициент, характеризующий распределение формальдегида по участкам. Для участка размещения главного конвейера и пресса k_3=0,9. Определяем количество формальдегида:

$$G = G_{см}k_1(1 - k_2)k_3 = 500 \cdot 0{,}003(1 - 0{,}6)0{,}9 = 0{,}54 \text{ кг/ч}.$$

В процессах отделки изделий, в том числе импрегнирования, печати рисунка и в других операциях применяют лакокрасочные материалы, содержащие неорганические растворители. Количество вредного вещества, поступающего в атмосферный воздух из отделочных материалов, следует определять по формуле, кг/ч:

$$G = G_м k_к \cdot 0{,}8, \qquad (3.5)$$

где $G_м$ — расход отделочного материала, кг/ч; $k_к$ — содержание рассчитываемого компонента в составе летучей части отделочного материала, %; 0,8 — коэффициент поступления летучих веществ в атмосферный воздух.

Состав отделочных материалов (растворители, нитрогрунтовки, лаки, эмали, шпатлевки) приведен в табл. 3.18—3.22.

Распределение поступления летучей части веществ по операциям непрерывного технологического процесса отделки мебели: по 25% — для лакоразливных машин и пульверизационных камер, 50% — для сушильных камер и камеры выдержки.

Для периодических технологических процессов отделки изделий количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух, следует определять, исходя из продолжительности технологических процессов (см. гл. 2).

Пример 3.4. Определить количество бутанола и ксилола, поступающих в атмосферный воздух при непрерывном технологическом процессе отделки древесины.

Исходные данные. Расход растворителя РКБ-1 составляет 20 кг/ч.

Решение. Находим по табл. 3.18 рецептуру растворителя РКБ-1: летучая часть 100%, в том числе 50% бутанола и 50% ксилола.

Определяем количество бутанола и ксилола, поступающих в атмосферный воздух, по формуле:

$$G = G_м k_к \cdot 0{,}8;$$

$$G_{бут} = 20 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 8 \text{ кг/ч}; \qquad G_{ксил} = 20 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 8 \text{ кг/ч},$$

Таблица 3.20. Состав полиэфирных, поли- и нитроуретановых лаков, %

Компоненты	ПЭ-246	ПЭ-265	ПЭ-232	ПЭ-220	ПЭ-250М	УР-277М	ПЭ-251, «Б»	УР-249, «М»
Ацетон	1—2	1—2	29	31	38	—	—	—
Бутилацетат	5	5	—	—	—	—	—	26
Стирол	2—1	2—1	—	—	—	—	3—5	—
Ксилол	—	—	1	1,5	1	5	1	16
Толуол	—	—	5	2,5	4	—	1	—
Метилизобутилкетон	—	—	—	—	—	—	8—11	—
Циклогексанон	—	—	—	—	—	34	8—11	14
Этилгликольацетат	—	—	—	—	—	26	—	15
Летучая часть	8	8	35	35	43	65	21—29	71
Сухой остаток	92	92	65	65	57	35	79—71	39

Таблица 3.21. Состав эмалей, %

Компоненты	НЦ-25	НЦ-132П	НЦ-1125	НЦ-257	НЦ-258	ХВ-518	ПФ-115	ПФ-133	МС-17	ПЭ-276
Бутилацетат	6,6	6,4	6	6,2	6,5	7	—	—	—	5
Этилцеллозольв	5,28	6,4	4,8	4,96	—	—	—	—	—	—
Ацетон	4,62	6,4	4,2	4,34	—	19,6	—	—	—	2—4
Спирт бутиловый	9,9	12	6	9,3	10,4	—	—	—	—	—
Спирт этиловый	9,9	16	9	6,2	5,85	—	—	—	—	—
Толуол	29,7	32,8	30	31	13	—	—	—	—	—

Этилацетат	—	—	—	—	0,75	—	—	—	—	—
Стирол	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2—1
Ксилол	—	—	—	—	16,25	—	22,5	25	60	—
Сольвент-нафта	—	—	—	—	—	43,4	—	—	—	—
Уайт-спирит	—	—	—	—	—	—	22,5	—	—	—
Циклогексанон	—	—	—	—	3,25	—	—	—	—	—
Летучая часть	66	80	60	62	65	70	45,0	50	60	9—10
Сухой остаток	34	20	40	38	35	30	55	50	40	91—90

Таблица 3.22. Состав шпатлевок и грунтовок

Компоненты	ПФ-002	НЦ-008	АЛГ-5	ХВ-005	ПР-032, ГС или ГФ-0163	ГФ-030	ГФ-031	ГФ-032	ФЛ-03К	ХС-010	АК-070
Ацетон	—	4,5	23—36	8,5	—	—	—	—	—	17,4	—
Бутилацетат	—	9	—	4,0	—	—	—	—	—	8,0	43,5
Толуол	—	9	—	20,5	—	—	—	—	—	41,6	17,4
Этанол	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,7
Бутанол	—	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	17,4
Ксилол	—	—	—	—	—	—	51	61	15	—	—
Сольвент-нафта	25	—	—	—	32	—	—	—	—	—	
Этилацетат	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	8,7
Уайт-спирит	—	—	—	—	—	19,5—30	—	—	15	—	—
Летучая часть	25	30	23—36	33	32	19,5—30	51	61	30	67	87
Сухой остаток	75	70	77—64	67	68	80,5—70	49	39	70	33	13

3.2. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ПРИ ГОРЕНИИ ТОПЛИВА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

Предлагаемая методика предназначена для расчета выбросов вредных веществ с газообразными продуктами сгорания при сжигании твердого топлива, мазута и газа в топках промышленных и коммунальных котлоагрегатов и теплогенераторов (малометражные отопительные котлы, отопительно-варочные аппараты, печи) производительностью до 30 т/ч.

При сжигании твердого топлива наряду с основными продуктами сгорания (CO_2, H_2O, NO_2) в атмосферу поступают: летучая зола с частицами несгоревшего топлива, оксиды серы, углерода и азота. При сжигании мазутов с дымовыми газами выбрасываются: оксиды серы, диоксид азота, твердые продукты неполного сгорания и соединения ванадия. При сжигании газа с дымовыми газами выбрасываются: диоксид азота, оксид углерода.

Ниже приведены методики определения вредных веществ в дымовых газах.

3.2.1. Расчет выбросов твердых частиц

Количество золы и несгоревшего топлива, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами от котлоагрегата при сжигании твердого и жидкого топлива, рассчитывают по формуле:

$$M_{тв} = BA^p f(1 - \eta_з), \qquad (3.6)$$

где B — расход натурального топлива, т/год, г/с; A^p — зольность топлива в рабочем состоянии, %; $\eta_з$ — доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях;

$$f = \alpha_{ун}/(100 - Г_{ун}); \qquad (3.7)$$

$\alpha_{ун}$ — доля золы, уносимой дымовыми газами; $Г_{ун}$ — содержание горючих в уносимых газах, %; в отсутствие эксплуатационных данных $Г_{ун}$ принимается в соответствии с потерей тепла g от механической неполноты сгорания топлива, %, по нормам теплового расчета котельных агрегатов (нормативный метод).

Значения A^p, $Г_{ун}$, $\alpha_{ун}$, $\eta_з$ принимаются по фактическим средним показателям; в отсутствие этих данных A^p определяется по характеристикам сжигаемого топлива (табл. 3.23), величина $\eta_з$ — по техническим даниым золоуловителей.

Пример 3.5. Определить количество золы, удаляемой с дымовыми газами от котлоагрегата производительностью по пару 2,5 т/ч при сжигании в нем каменного угля марки ОС Кузнецкого бассейна.

Исходные данные. За котлом установлен золоуловитель циклонного типа. Расход топлива G_{max}=210 кг/ч, $G_{год}$=720 т. Топка с неподвижной решеткой и ручным забросом топлива.

Решение. Зольность топлива на рабочую массу по табл. 3.23 составляет A^p=27,9%. Коэффициент f для каменного угля и топки с неподвижной решеткой и ручным забросом топлива по табл. 3.24 составляет f=0,0023. Расход топлива в 1 с: B_c=210/3600=0,058 кг/с.

Расход топлива в год $G_{год}$=720 т/год. Эффективность золоуловителя циклонного типа $\eta_з$=70% или 0,7.

Количество золы, выбрасываемой в атмосферу с дымовыми газами:

за 1 с $M_{тв\,с}$=0,0023·0,058·27,9(1—0,7)=0,001 г.

за 1 год $M_{тв.год}$=720·0,0023·27,9(1—0,7)=13,885 т.

3.2.2. Расчет выбросов оксидов серы

Количество оксидов серы SO_2 и SO_3 в пересчете на SO_2, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами котлоагрегата при сжигании твердого или

Таблица 3.23. Характеристика твердых топлив

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	$W^{р}$, %	$A^{р}$, %	$S^{р}$, %	$Q^{р}_{н}$, МДж/кг
	Угли				
	Европейская часть СССР				
Донецкий бассейн	ДР	13,0	28,0	3,5	18,50
	Д концентрат	14,0	10,0	3,0	23,74
	ГР	10,0	28,0	3,5	20,47
	Г концентрат	10,0	11,0	3,0	25,95
	Г промпродукт	12,0	40,0	3,3	15,05
	ЖР	6,0	25,0	3,0	23,36
	Ж концентрат энергетический	10,0	16,0	3,5	25,12
	ОСР	*5,0*	*25,0*	*3,0*	*24,20*
	Ж, К, ОС промпродукт	12,0	39,0	3,2	17,0
	ТР	6,0	25,0	2,7	24,07
	ПАРШ	5,0	26,0	2,2	24,03
	АШ, АСШ	8,5	30,0	1,9	16,39
Львовско-Волынский бассейн:					
Волынское месторождение	ГР, ГСШ	10,0	23,0	3,4	21,44
Межреченское месторождение	ГЖР, ГЖ, СШ	8,0	30,0	3,3	20,89
Днепровский бассейн:					
разрез Стрижевский	Б1Р	55,0	31,0	4,4	6,45
шахты:					
Стрижёвская	Б1Р	55,6	22,5	3,9	7,91
Казацкая	Б1Р	54,0	23,8	5,0	8,12
Ватутинская	Б1Р	54,0	20,5	3,9	8,96
Александруголь:					
разрезы:					
Головковский	Б1Р	56,7	34,2	4,6	4,98
Балаховский	Б1Р	54,6	22,5	4,5	7,45
Морозовский	Б1Р	50,0	36,0	4,1	7,16
шахты:					
Светлопольская	Б1Р	57,5	19,7	4,3	7,79
Верболозовская	Б1Р	56,1	11,7	4,3	9,59
Ново-Дмитровское месторождение	Б1	50,0	18,0	3,3	10,05
Подмосковный бассейн, Тулауголь, шахты:	Б2Р, Б20МСШ, Б2МСШ	32,0	39,0	4,2	9,88
Щекинская (21)	Б2Р	31,0	37,6	3,7	10,38
	Б2МСШ	31,5	38,0	5,3	9,96
	Б20МСШ	29,9	36,9	5,1	10,38
Западная (1)	Б2Р	31,0	37,0	3,5	10,47
	Б20МСШ	31,5	36,8	3,7	10,17
	Б2МСШ	32,0	34,6	6,5	10,88
Западная (3)	Б2Р	31,2	45,2	4,1	8,92
Мостовская (12)	Б2Р	35,5	36,4	3,6	10,09
	Б2МСШ	33,2	38,1	5,1	9,54
Мостовская (13)	Б2Р	31,9	37,8	4,3	10,34
	Б2МСШ	32,5	40,2	4,3	9,67
	Б20МСШ	*32,1*	*39,4*	*4,2*	*9,88*

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
Новомосковскуголь, шахты:					
Северная (1)	Б2МСШ	33,0	28,5	5,0	11,24
Россошинская	Б2Р	32,8	35,7	2,5	10,30
Горняк (3)	Б2Р	32,9	28,8	4,1	11,48
	Б2МСШ	34,0	29,2	4,1	11,08
Красноармейская (2)	Б2Р	32,0	33,2	3,6	11,30
	Б2МСШ	33,8	26,1	4,3	11,65
Дубовская (15)	Б2Р	30,5	35,9	5,3	10,97
Дружба (4)	Б2Р	35,1	27,1	4,0	11,70
Зубовская (1)	Б2Р	36,6	41,5	3,7	9,29
Соколовская (5)	Б2Р	35,4	30,8	5,7	11,35
Донская (47)	Б2Р	32,2	35,9	3,9	10,43
Скопинское шахтоуправление, шахты:					
№ 53	Б2Р	32,1	36,1	7,7	10,34
№ 57	Б2Р	31,2	36,5	6,8	10,80
№ 3	Б2Р	31,1	35,5	7,8	10,59
Нелидовское шахтоуправление, шахты:					
№ 3	Б2Р	36,8	32,1	3,8	10,26
№ 4	Б2Р	37,5	29,1	3,2	11,25
№ 7	Б2Р	36,8	33,1	3,0	10,26
Печорский бассейн:					
Интауголь	ДР, Д отсев	11,5	31,0	3,2	17,54
Воркутауголь	ЖР отсев	5,5	30,0	0,9	22,02
	Ж концентрат	7,0	12,0	0,6	27,47
	Урал				
Кизеловский бассейн	ГР, ГМСШ	6,0	31,0	6,1	19,65
Челябинский бассейн:	Б3	17,0	29,9	1,0	14,19
Булаиашское месторождение	Г6Р	9,0	22,8	0,8	20,87
Дальне-Буланашское месторождение	ГР	8,5	18,3	1,7	22,55
Веселовско-Богословское месторождение	Б3Р	22,0	28,9	0,2	11,04
Волчанское месторождение	Б3Р	22,0	31,2	0,2	10,66
Егоршинское месторождение	ТР	8,0	28,1	1,9	20,62
Южно-уральский бассейн	Б1Р	56,0	6,6	0,7	9,11
	Казахская ССР				
Карагандинский бассейн	КР, К2Р	8,0	27,6	0,8	21,12
	КСШ, К2СШ	8,0	29,4	0,8	20,24
Куучекинское месторождение	К, К2	10,0	20,7	0,8	22,97
	К2Р	7,0	40,9	0,7	16,63
Экибастузский бассейн	ССР	7,0	32,6	0,7	18,94
Ленгерское месторождение	Б3Р, БЭСШ	29,0	14,2	1,8	15,33
Тургайский бассейн:					
Кушмурунское месторождение	Б2	37,0	11,3	1,6	13,18
Приозерное месторождение	Б2	36,0	11,5	0,5	13,23

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
	Сибирь				
Кузнецкий бассейн	ДР, ДСШ	12,0	13,2	0,4	22,93
	ГР, 1М, ГСШ	8,0	14,3	0,5	25,32
	Г (промпродукт)	12,0	23,8	0,5	20,07
	ССР	6,0	14,1	0,6	27,51
	ОС (промпродукт)	7,0	27,9	0,8	21,84
	ОС, шлам	21,0	16,6	0,4	21,04
	СС2ССМ	9,0	18,2	0,4	24,78
	ТОМСШ	7,0	18,6	0,6	25,20
	СС1ССМ	9,0	18,2	0,3	23,64
Горловский бассейн	АР	10,0	11,7	0,4	26,12
Инское шахтоуправление	ДКО	8,5	7,3	0,3	26,04
	ДМ	10,0	10,8	0,3	24,44
Шахта имени Ярославского	ДСШ	12,0	13,2	0,4	22,97
Кольчугинское шахтоуправление, шахты:	ДР, ДСШ	10,0	13,5	0,4	23,43
Полысаевская	ГКОМ	6,0	7,5	0,4	27,84
	ГМ, ГСШ	8,0	14,7	0,5	25,03
Октябрьская	ГР, ГМ, ГСШ	8,0	11,0	0,4	25,87
Кузнецкая	ГМ, ГСШ	8,0	10,6	0,4	25,87
	ГР	9,0	13,6	0,3	24,19
«Пионерка»	ГР	7,5	22,7	0,4	22,72
Распадская	ГР	6,5	15,4	0,6	21,16
Байдаевская	ГР	7,0	12,1	0,5	26,20
Зыряновская	ГР	9,5	13,6	0,4	24,90
Новокузнецкая	ГР	7,5	10,6	0,4	26,92
Ягуновская	СС2ССКО	6,0	8,5	0,4	29,44
	СС2ССМ	6,0	11,3	0,4	28,43
	СС2ССШ	8,0	13,8	0,4	26,76
	ТР	7,0	15,8	0,5	26,20
Краснокаменская	СС2ССШ	5,5	12,3	0,4	27,93
	СС1ССРОК1	10,0	11,7	0,4	23,43
	СС1ССРОК11	19,0	16,2	0,3	17,22
им. В. И. Ленина	СС2 ССР	8,0	14,7	0,4	26,33
	СС1ССРОК1	11,0	16,0	0,4	23,81
им. Шевякова	СС2ССР	10,0	24,3	0,3	21,75
им. Вахрушева	СС2ССР	6,0	14,1	0,3	27,34
Киселевская	СС1ССР	8,0	15,6	0,4	24,40
Северная	СС1ССР	9,0	14,6	0,3	25,45
Южная	СС1ССМ	7,0	13,0	0,3	26,16
	СС1СССШ	9,0	15,5	0,3	24,61
им. Волкова	СС1ССР	9,0	19,1	0,3	23,43
Шуштулепская	ТОМСШ	8,0	18,4	0,6	24,99
им. Орджоникидзе	ТОМСШ	7,0	19,5	0,6	24,90
им. Дмитрова	ТОМСШ	6,0	22,6	0,7	24,66
ОФ «Комсомолец»	ГР	7,5	15,7	0,6	25,11
ОФ им. С. М. Кирова	ГР + Г (промпродукт)	10,0	17,1	0,7	23,31
ЦОФ Беловская	Ж (промпродукт)	8,0	35,0	0,7	18,90
ГОФ Чертинская	Ж (промпродукт)	8,0	34,0	0,6	19,23
ГОФ Красногорская	КЖ (промпродукт)	7,0	27,0	0,5	21,67
ЦОФ Зиминка	КЖ (промпродукт)	8,0	24,8	0,4	22,13

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторожденне, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
ГОФ Коксовая	К2 (промпродукт)	9,0	28,2	0,3	20,41
ГОФ Северная	К2 (промпродукт)	7,0	30,7	0,3	20,20
ОФ Тайбинская	К2 (промпродукт)	7,0	32,1	0,3	20,79
ЦОФ Киселевская	К (промпродукт)	8,0	32,7	0,3	19,99
ГОФ Судженская	К2 (промпродукт)	7,5	27,8	1,0	22,05
ОФ Томусинская	К (промпродукт)	9,0	33,7	0,3	18,64
ГОФ Анжерская	ОС (промпродукт)	7,0	24,6	1,1	23,39
Бунгурское шахтоуправление:					
Листвянская шахта	ТОМСШ	5,5	13,2	0,5	27,55
Бунгурская шахта	ТОМСШ	5,5	22,7	0,7	23,81
Редаково	ТР	6,0	19,7	0,5	25,28
«Красный углекоп»	ТМСШ	6,0	14,1	0,5	26,88
Маганак	ТМСШ	5,0	11,4	0,4	28,51
Кузнецкий бассейн (открытая добыча)	ДРОК1	15,0	11,0	0,4	21,46
	ДРОК11	18,0	10,7	0,3	19,11
	ГР, ГСШ	10,0	13,5	0,4	24,36
	ГРОК1	11,0	13,4	0,4	23,01
	ГРОК11	17,0	16,6	0,3	18,61
	КР	6,0	14,1	0,3	27,42
	СС1ССР	10,0	11,7	0,4	25,78
	СС1ССРОК1	12,0	11,4	0,4	24,06
	СС1ССРОК11	19,0	14,6	0,3	18,27
	СС1ССР	8,0	15,6	0,4	25,87
	СС2ССМСШ	8,0	13,8	0,4	27,25
	СС2ССРОК1	10,0	15,3	0,3	24,02
	ТМСШ, ГР	8,0	13,8	0,4	26,62
	ТРОК1	9,0	15,5	0,4	24,78
	ТРОК11	15,0	18,7	0,3	19,11
Месторождения Кузнецкого бассейна:					
Уропское	Д	16,6	8,3	0,2	22,09
Караканское	Д	17,3	11,2	0,2	20,49
Новоказанское	Д	13,0	10,4	0,3	22,80
	г, ГЖ	10,5	10,7	0,4	25,22
Талдинское	Г, ГЖ	8,0	8,3	0,4	26,50
Ерунаковское	Г	8,0	9,7	0,5	26,58
Сибиргинское	Т, А	8,0	20,7	0,3	23,56
Чумышское	Т, А	6,0	12,7	0,5	27,80
Разрезы Кузнецкого бассейна:					
Моховский	ГРОК1	11,0	11,1	0,4	23,56
	ГРОК11	18,0	12,3	0,3	19,23
	ДРОК1	12,0	10,6	0,4	22,76
	ДРОК11	18,0	10,7	0,3	19,11
Колмогоровский	ГР	8,0	12,0	0,5	25,53
	ДРОК1	18,0	10,7	0,5	20,49
Байдаевский	ГР	8,0	9,2	0,4	26,67
	ГРОК1	10,5	9,0	0,4	24,36
	ГРОК11	15,0	17,0	0,3	19,57
Грамотеинский	ГР, ГСШ	10,0	13,5	0,3	24,36
Новосергиевский	СС1ССР	8,0	13,8	0,5	25,83
	СС1ССРОК1	10,0	13,5	0,4	23,98
	СС2ССР	8,0	7,4	0,3	28,89

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
Прокопьевский	СС1ССР	10,0	9,0	0,4	26,71
	СС1ССРОК11	23,0	11,6	0,3	17,72
им. Вахрушева	СС1ССР	12,0	8,8	0,4	25,57
Киселевский	СС1ССР	8,0	7,4	0,4	27,63
	СС1ССРОК1	10,0	9,0	0,4	25,36
	СС1ССРОК11	20,0	8,0	0,3	19,40
Черниговский	СС1ССР	10,0	17,1	0,4	23,68
	СС2ССР	9,0	13,6	0,4	25,78
	СС2ССМСШОК1	10,0	13,5	0,4	24,86
	СС1ССРОК11	20,0	14,4	0,4	18,18
	СС2ССМСШ	8,0	13,8	0,3	26,29
	СС2ССРОК1	12,0	13,2	0,3	23,98
	СС1ССРОК11	20,0	12,8	0,2	19,39
им. 50 лет Октября	КР	6,0	9,4	0,4	28,98
	СС1ССР	8,0	12,9	0,4	26,75
	СС2ССР	8,0	5,5	0,4	29,14
	СС2ССМСШ	8,0	7,4	0,4	28,47
	СС2ССМСШОК1	11,0	7,1	0,4	27,04
	СС1ССРОК11	22,0	11,7	0,3	18,31
Томусинский	ГР, ГРОК1	9,0	14,6	0,5	24,40
	КР	5,0	14,2	0,3	27,76
	СС2ССР	10,0	14,4	0,4	25,45
	СС1ССРОК11	20,0	16,0	0,2	17,22
	КР	6,0	15,0	0,3	27,17
Междуреченский	СС2ССР	8,0	15,6	0,3	25,87
	СС2ССРОК1	10,0	15,3	0,3	24,36
	СС2ССШ	10,0	18,0	0,3	24,10
	СС1ССРОК11	15,0	17,0	0,3	19,48
Сибиргинский	СС2ССР	6,5	16,8	0,3	25,70
	СС2ССРОК1	10,0	16,2	0,3	23,77
	СС1ССРОК11	18,0	16,4	0,2	18,73
Листвянский	ТРОК1	8,0	18,4	0,5	24,44
	ТРОК11	15,0	18,7	0,4	18,56
	ТР, ТМСШ	8,0	17,5	0,3	25,41
Красногорский	ТРОК1	10,0	17,1	0,3	24,02
	ТРОК11	13,0	18,3	0,3	20,45
Краснобродский	ТР, ТМ, ТСШ	7,0	9,3	0,4	28,51
	ТРОК1	8,0	9,2	0,4	26,83
Канско-Ачинский бассейн:					
Ирша-Бородинский разрез	Б2Р	33,0	6,7	0,2	15,54
Назаровский разрез	Б2Р	39,0	7,3	0,4	13,06
Березовское месторождение	Б2	33,0	4,7	0,2	15,70
Барандатское месторождение	Б2	37,0	4,4	0,2	14,86
Итатское месторождение	Б1	40,5	6,8	0,4	12,85
Боготольское месторождение	Б1	44,0	6,7	0,5	11,84
Абанское месторождение	Б2	33,5	8,0	0,3	14,78
Большесырское месторождение	Б3	24,0	6,1	0,2	19,11
Минусинский бассейн:	ДР, ДМСШ	14,0	17,2	0,5	20,16
Черногорский разрез	ДР	14,0	14,6	0,5	20,62
Изыхское месторождение	ДР	14,0	17,2	0,5	20,16

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
Аскизское месторождение	Д	9,0	17,9	0,6	23,10
Бейское месторождение	Д	14,0	12,9	0,5	22,51
Иркутский бассейн:					
Черемховское месторождение	ДР, ДМСШ	13,0	27,0	1,0	17,93
Забитуйское месторождение	ДР	8,0	23,0	4,1	20,91
Азейский разрез	ВЗР	25,0	14,2	0,4	16,96
Тулунский разрез	БЗР	26,0	12,6	0,4	16,38
Мугунское месторождение	БЗ	22,0	14,8	0,9	17,55
Каахемское месторождение	ГР	5,0	12,4	0,4	26,46
Элекестинское месторождение	Ж	7,0	8,4	0,6	29,73
Бурятская АССР					
Гусиноозерское месторождение	ВЗР	23,0	16,9	0,7	16,88
Холбольджинский разрез	БЗР	26,0	11,8	0,3	16,08
Баянгольское месторождение	БЗ	23,0	15,4	0,5	18,10
Никольское месторождение	Д, ДГ	6,0	18,2	0,4	23,05
Северо-восточные районы					
Месторождения:					
Сангарское	ДР	10,0	13,5	0,3	24,31
Джебарики-Хая	ДР	11,0	11,1	0,3	23,10
Аркагалинское	ДР	19,0	12,2	0,2	19,15
Верхне-Аркагалинские	Д	20,0	10,4	0,3	19,40
Эрозионное	Ж	9,0	12,7	0,4	23,43
Буор-Кемюсское	Ж	8,0	11,0	0,3	27,34
Бухта Угольная	ГР	10,0	15,3	1,4	24,23
Нерюнгринское	ССР	7,0	16,7	0,2	24,61
Анадырское	БЗР	22,0	13,3	0,6	17,97
Кангаласское	Б2Р	32,5	10,1	0,2	14,53
Согинское	Б1	41,0	3,0	0,2	14,02
Куларское	Б1	51,0	12,2	0,1	7,68
Ланковское	Б1	51,0	5,9	0,1	9,24
Уяндинское	Б1	50,0	12,0	0,1	7,89
Кавказ					
Ткибули	КР	5,8	24,4	0,8	24,33
	ДМСШ	13,0	40,0	2,3	14,70
	Г концентрат	14,5	13,5	1,2	23,19
	Г промпродукт	15,0	30,0	2,0	17,08
Ткварчели	Ж концентрат	13,0	12,5	0,9	24,03
	Ж промпродукт и шлам	11,5	39,5	1,5	16,31
Узбекская ССР					
Ангренский разрез	Б20МСШ	34,5	22,0	2,0	13,44
Шаргуньское рудоуправление	СССШ	6,0	18,5	0,8	25,95

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
		Киргизская ССР			
Шахты:					
Джергалан	ДСШ	11,5	14,0	1,0	22,77
Кок-Янгак	ДСШ	10,5	21,0	1,8	21,31
Таш-Кумыр	ДСШ	14,5	25,0	1,5	17,87
Сулюктинское рудоуправление	БЗСШ	32,0	21,0	0,7	17,0
Кызылкийское рудоуправление, шахты:	БЗСШ	28,0	18,0	1,6	16,16
№ 4	БЗСШ	25,0	18,0	1,8	17,00
Центральная	БЗСШ	19,5	15,0	0,7	19,00
Кара-Киче	БЗ	19,0	10,0	1,0	19,80
		Таджикская ССР			
Шахты:					
№ 1/2, Шураб	БР	21,5	20,0	1,0	16,83
№ 8, Шураб	БСШ	29,5	18,0	1,0	15,24
		Дальний Восток			
Артемовское месторождение	БЗОМСШ	24,0	32,0	0,4	13,31
	БЗКОМ	24,5	26,0	0,4	14,82
	БЗСША	23,0	35,5	0,4	12,68
Партизанский (Сучанский) бассейн	Ж6Р	5,5	34,0	0,5	20,51
	Ж, Т промпродукт	9,0	40,0	0,5	17,25
Раздольненский бассейн: Месторождения:					
Липовецкое	ДКО	6,0	32,0	0,4	19,64
	ДМСШ	6,0	35,0	0,4	18,63
	ДР, ДСШ	6,0	36,0	0,4	18,13
Огоджинское	ДР	13,0	40,0	0,3	15,83
		Остров Сахалин			
Сахалинский бассейн	БЗР, БЗ концентрат	20,0	22,0	0,4	17,33
Углегорский район	ГСШ	10,5	20,0	0,3	22,86
	Г концентрат	9,0	18,0	0,6	24,74
Александровский район, шахты:	ГР	10,5	10,0	0,4	24,70
Макарьевка	ЖР	6,0	13,0	0,3	28,14
Мгачи	ГР	7,0	17,0	0,6	24,53
Арково	ДР	8,0	15,0	1,1	24,03
Макаровский район, шахты:					
Макаровская	БЗР	16,5	20,0	0,3	18,50
Тихмененская	БЗР	21,0	15,0	0,3	18,21
Шахтоуправление Лермонтовское	БЗР, БЗСШ	20,0	30,0	0,3	15,49
Шахта Шебунино	БЗР	22,0	16,0	0,4	18,17
Шахта Горнозаводская	БЗР концентрат	23,0	12,0	0,5	18,92
Разрез Новиковский	БЗР	16,0	28,0	0,7	16,91
Шахта Южно-сахалинская	ДР	8,5	25,0	0,4	20,93
Шахта Долинская	ДСШ, Д коицентрат	10,5	21,0	0,5	21,77

Таблица 3.23 (продолжение)

Бассейн, месторождение, разрезы, шахты	Марка угля	W^P, %	A^P, %	S^P, %	Q^P_H, МДж/кг
	Горючие сланцы				
Эстосланец	0—100 мм	12,0	50,5	1,6	11,34
Ленинградсланец:					
Шахта № 3	—	11,0	54,2	1,5	9,50
Каширская шахта	—	14,0	68,5	3,6	6,40
Болтышское месторождение	—	32,0	67,0	1,4	10,47
Мелинтовые сланцы Карпат	—	5,0	75,0	3,0	7,12
	Торф				
Месторождения:					
Ленинградское	»	48,0	11,3	0,2	8,92
Шатурское	»	48,0	11,0	0,3	8,83
Тюменское	»	48,0	10,9	0,3	8,29
Смоленское	»	47,9	12,0	0,3	8,29
	Другие виды топлива				
	Дрова		0,6	—	10,24
	Мазут:				
	малосернистый		0,1	0,5	40,30
	сернистый		0,1	1,9	39,85
	высокосернистый		0,1	4,1	38,89
	Стабилизированная нефть		0,1	2,9	39,90
	Дизельное топливо		0,02	0,3	42,75
	Соляровое масло		0,02	0,3	42,46
	Моторное топливо		0,05	0,4	41,49

жидкого топлива, рассчитывают по формуле:

$$G_{SO_2} = 0{,}02BS^P (1 - \eta'_{SO_2}) (1 - \eta''_{SO_2}), \qquad (3.8)$$

где B — расход натурального топлива, т/год, г/с; S^P — содержание серы в топливе на рабочую массу, %; η'_{SO_2} — доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива; принимается при сжигании сланцев эстонских и ленинградских равной 0,8; остальных сланцев 0,5; для углей Канско-Ачинского бассейна 0,2 (для березовских 0,5); для торфа 0,15; экибастузских углей 0,02; прочих углей 0,1; мазута 0,02; газа 0,0; η''_{SO_2} — доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе; для сухих пылеуловителей (электрофильтров, циклонов и др.) принимается равной нулю; в мокрых золоуловителях (циклоны, трубы Вентури и др.) *она зависит в основном от расхода и общей* щелочности орошающей воды, а также от приведенной сернистости топлива (рис. 3.1). При наличии в топливе сероводорода выбросы дополнительного количества оксидов серы в пересчете на SO_2 рассчитывают по формуле:

$$M_{SO_2} = 1{,}88 \cdot 10^{-2} (H_2S) B, \qquad (3.9)$$

где H_2S — содержание сероводорода в топливе, %.

Пример 3.6. Определить количество оксидов серы, удаляемых с дымовыми газами от котлоагрегата при сжигании в нем мазута с теплотой сгорания $Q_н^P$=4200 кДж/кг (1000 ккал/кг) и сернистостью S^P=1,5%.

Таблица 3.24. Значение коэффициентов f и k_{CO} в зависимости от типа топки и вида топлива

Тип топки	Вид топлива	f	k'_{CO}, кг/кДж
С неподвижной решеткой и ручным забросом топлива	Бурые и каменные угли	0,0023	1,9
	Антрациты:		
	АС и АМ	0,0030	0,9
	АРШ	0,0078	0,8
С пневматическими забрасывателями и неподвижной решеткой	Бурые и каменные угли	0,0026	0,7
	Антрацит АРШ	0,0088	0,6
С цепной решеткой прямого хода	Антрацит АС и АМ	0,0020	0,4
С забрасывателями и цепной решеткой	Бурые и каменные угли	0,0035	0,7
Шахтная	Твердое топливо	0,0019	2,0
Шахтно-цепная	Торф кусковой	0,0019	1,0
Наклонно-переталкивающаяся	Эстонские сланцы	0,0025	2,9
Слоевые топки бытовых теплогенераторов	Дрова	0,0050	14,0
	Бурые угли	0,0011	16,0
	Каменные угли	0,0011	7,0
	Антрацит, тощие угли	0,0011	3,0
Паровые и водогрейные котлы	Мазут	0,02	0,32
	Газ природный, попутный и коксовый	—	0,25
Камерная топка и бытовые теплогенераторы	Газ природный	—	0,08

Исходные данные. Расход топлива 3 300 000 м³/год, 700 кг/ч. Отходящие дымовые газы после котлоагрегата промываются водой с щелочностью 5 мг/(мол·л).

Решение. Приведенная сернистость топлива:

$$(1000 \cdot 1{,}5)/4200 = 0{,}36 \text{ кг/МДж}.$$

Доля оксидов серы, связанных летучей золой в котле, $\eta'_{SO_2} = 0{,}02$. Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях при щелочности 5 мг/(моль·л) по рис. 3.1; $\eta''_{SO_2} = 2{,}0\%$.

Количество оксидов серы, удаляемых с дымовыми газами:

$$G = 0{,}02BS^p(1 - \eta'_{SO_2})(1 - \eta''_{SO_2}).$$

За 1 с: $G_{SO_2} = 0{,}02 \cdot 700 \cdot 1{,}5(1-0{,}02)(1-0{,}02)/3{,}6 = 5{,}6$ г.

За 1 год: $G_{SO_2} = 0{,}02 \cdot 3\,300\,000 \cdot 1{,}5(1-0{,}02)(1-0{,}02) = 95$ т.

3.2.3. Расчет выбросов оксида углерода

Ниже приводятся методы расчета выбросов оксида углерода.

1. Согласно методическим указаниям количество оксида углерода, выбрасываемого в единицу времени (т/год, г/с) при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч, рассчитывают по формуле:

$$G_{CO} = 0{,}001C_{CO}B(1 - q_4/100), \qquad (3.10)$$

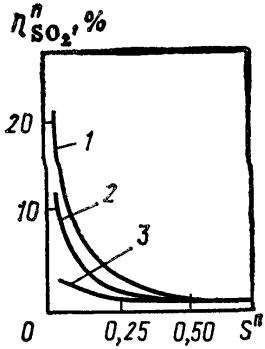


Рис. 3.1. Степень улавливания оксидов серы в мокр золоуловителях в зависимости от приведенной сернистости топлива (удельный расход воды в золоуловителях 0,1—0,15 л/м³).

1—3 — щелочность воды соответственно 10, 5 и 0 мг·экв/л; $\eta^{п}_{SO_2}$ — степень улавливания SO_2, %; $S^{п}$ — приведенная сернистость топлива

где B — расход топлива, т/год, тыс. м³/год, г/с, л/с; C_{CO} — выход оксида углерода при сжигании топлива, кг/т или кг/тыс. м³ топлива;

$$C_{CO} = q_3 R Q_н^р; \qquad (3.11)$$

q_3 — потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, %; R — коэффициент, учитывающий потери теплоты, обусловленные присутствием в продуктах неполного сгорания оксида углерода; принимается для твердого топлива 1,0; газа 0,5; мазута 0,65; $Q_н^р$ — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг, МДж/м³; q_4 — потери теплоты, вызванные механической неполнотой сгорания топлива, %.

В отсутствие эксплуатационных данных значения q_3, q_4 принимаются по табл. 3.25. Для ориентировочной оценки выброса оксида углерода M_{CO}, т/год (г/с) можно воспользоваться формулой

$$G_{CO} = 0{,}001 B Q_н^р k_{CO} (1 - q_4/100), \qquad (3.12)$$

где k_{CO} — количество оксида углерода, образующегося на единицу тепла, выделяющегося при горении топлива; принимается по табл. 3.25.

Пример 3.7. Определить количество оксида углерода, удаляемого с дымовыми газами котлоагрегата паропроизводительностью 2 т/ч при сжигании природного газа в камерной топке.

Исходные данные. Расход топлива: 180 м³/ч или 470 000 м³/год. Теплота сгорания природного газа Тюменского месторождения $Q_н^р = 35{,}7$ кДж/м³ (8550 ккал/м³).

Решение. Количество оксида углерода, образующегося на единицу тепла k_{CO} из табл. 3.25 для паровых и водогрейных котлов при сжигании природного газа, $k_{CO} = 0{,}25$ кг/кДж. Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива из табл. 3.25 для камерной топки $q_4 = 0{,}0\%$. Количество оксида углерода, образующегося при сжигании 1 м³ природного газа.

$$G_{CO} = 0{,}25 \cdot 35{,}7 (1 - 0{,}0/100) = 8{,}88 \text{ г/м}^3.$$

Количество оксида углерода, выбрасываемого с дымовыми газами:
За 1 с: $G_{CO} = 8{,}88 (180/3600) = 0{,}444$ г;
За 1 год: $G_{CO} = 0{,}001 \cdot 470 \cdot 35{,}7 \cdot 0{,}25 (1 - 0{,}0/100) = 4{,}174$ т.

2. Содержание оксида углерода в дымовых газах можно определить также, исходя из состава рабочего топлива и данных газового анализа, пользуясь следующими уравнениями:

при полном сгорании топлива и наличии только CO:

$$21 = RO_2 + O_2 + \beta RO_2; \qquad (3.13)$$

при неполном сгорании топлива и наличии только CO:

$$21 = RO_2 + O_2 + \beta RO_2 + (0{,}605 + \beta) CO, \qquad (3.14)$$

Таблица 3.25. Потери теплоты от химической q_3 и механической q_4 неполноты сгорания топлива

Топки	Топливо	$\alpha_т$	q_3, %	q_4, %
С цепной решеткой	Донецкий антрацит	1,5—1,6	0,5	13,5—10
Шахтно-цепные	Торф кусковой	1,3	1,0	2,0
С пневмомеханическим забрасывателем и цепной решеткой прямого хода	Угли типа кузнецких	1,3—1,4	0,5—1	5,5—3
	Угли типа донецкого	1,3—1,4	0,5—1	6—3,5
	Бурые угли	1,3—1,4	0,5—1	5,5—4
То же, и цепной решеткой обратного хода	Каменные угли	1,3—1,4	0,5—1	5,5—3
	Бурые угли	1,3—1,4	0,5—1	5,5—4,5
То же, и неподвижной решеткой	Донецкий антрацит	1,6—1,7	0,5—1	13,5—10
	Бурые угли типа подмосковных, бородинских	1,4—1,5	0,5—1	9—7,5
		1,4—1,5	0,5—1	6—3
	Угли типа кузнецких	1,4—1,5	0,5—1	5,5—3
Шахтные с наклонной решеткой	Дрова, дробленые отходы, опилки, торф кусковой	1,4	2	2
Скоростного горения	Дрова, щепа, опилки	1,3	1	4—2
Слоевые топки котлов паропроизводительностью более 2 т/ч	Эстонские сланцы	1,4	3	3
Камерные с твердым шлакоудалением	Каменные угли	1,2	0,5	5—3
	Бурые угли	1,2	0,5	3—1,5
	Фрезерный торф	1,2	0,5	3—1,5
Камерные	Мазут	1,1	0,5	0,0
	Газ (природный, попутный)	1,1	0,5	0,0
	Доменный газ	1,1	1,5	0,0
С неподвижной решеткой и ручным забросом топлива	Бурые угли	1,6	2,0	8,0
	Каменные угли	1,5	2,0	7,0
	Антрациты АМ и АС	1,7	1,0	10,0

Примечания 1 $\alpha_т$ — коэффициент избытка воздуха, меньшие значения — для парогенераторов при паропроизводительности $D > 10$ т/ч
2 Большие значения q_4 принимаются при отсутствии средств уменьшения уноса топлива, меньшие — при наличии средств возврата уноса, применении острого дутья, меньшие значения также характерны для котлов производительностью 25—35 т/ч

где RO_2, O_2, CO — соответственно содержание сухих трехатомных газов, кислорода и оксида углерода в продуктах сгорания, % (об.):

$$RO_2 + N_2 + O_2 + CO = 100\%; \tag{3.15}$$

$$RO_2 = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{с.г}} = 100\%; \tag{3.16}$$

$V_{с.г}$ — объем сухих газов, м³/кг; β — коэффициент, зависящий от состава топлива:

$$\beta = 2{,}37\frac{H^р - 0{,}126O^р + 0{,}038N^р}{C^р + 0{,}375S^р_л}; \tag{3.17}$$

$H^р$, $O^р$, $N^р$, $C^р$ — содержание составляющих топлива (водорода, кислорода, азота, углерода) на рабочую массу, %; $S_л^р$ — содержание летучей серы на рабочую массу, %.

Содержание трехатомных газов, % в сухих газах и коэффициент β связаны между собой уравнением:

$$RO_2 = (21 - O_2)/(1 + \beta);$$

При $O_2=0$, т. е. при $\alpha=1$, величина RO_2 достигает максимума:

$$RO_{2\,max} = 21/(1 + \beta).$$

Коэффициент β и содержание $RO_{2\,max}$ в продуктах сгорания для топлива некоторых видов приведены ниже:

Топливо	β	$RO_{2\,max}$, %
Донецкий уголь АШ	0,043	20,13
Кузнецкий уголь С	0,107	18,97
Подмосковный уголь	0,084	19,37
Торф	0,077	19,49
Мазут	0,28—0,35	16,4—15,55
Природный газ	0,01	20,79

Зависимость содержания CO в отходящих дымовых газах от RO_2 (сумма CO_2, SO_2) и O_2 приведена в Приложении XVI.

Коэффициент избытка воздуха для полного сгорания топлива по данным газового анализа определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{1 - 79O_2/21N_2}; \qquad (3.18)$$

для неполного сгорания — по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21}\,\frac{O_2 - 0{,}5\,(CO + H_2) - 2CH_4}{N_2}}. \qquad (3.19)$$

Приближенно коэффициент избытка воздуха можно определить также по формуле.

$$\alpha = RO_{2\,max}/RO_2. \qquad (3.20)$$

Для определения содержания оксида углерода можно воспользоваться уравнением:

$$CO = \frac{21 - \beta\,RO_2 - (RO_2 + O_2)}{0{,}605 + \beta}. \qquad (3.21)$$

После определения процентного содержания CO подсчитывают количество тепла, расходуемого на его образование:
при Q, выраженном в кДж:

$$Q = 0{,}238Q_н^р n; \qquad (3.22)$$

при Q, выраженном в ккал:

$$Q = Q_н^р n, \qquad (3.23)$$

где $Q_н^р$ — низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж, или ккал; n — содержание оксида углерода, %.

Объем оксида углерода определяют по формуле:

$$V_{г\,CO} = Q/Q^р_{н\,CO}, \qquad (3.24)$$

где $Q^р_{н\,CO}$ — теплота сгорания оксида углерода при нормальных условиях;

$$Q^р_{н\,CO} = 12\,675 \text{ кДж/м}^3, \text{ или } 3018 \text{ ккал/м}^3.$$

Массовое количество оксида углерода определяют из уравнения:

$$G_{CO} = V_{г\,CO}\rho, \qquad (3.25)$$

где ρ — плотность оксида углерода, равная 1,25 кг/м³. Данным методом расчета можно пользоваться только при достаточно достоверных данных газового анализа.

3. При нормальной эксплуатации топливосжигающих устройств для ориентировочных расчетов количества оксида углерода можно воспользоваться формулой, г/кг.

$$G_{CO} = 0{,}233C^{р}q_{х\,н}, \qquad (3.26)$$

где $C^{р}$ — содержание углерода в топливе, % (масс.); $q_{х\,н}$ — химическая неполнота сгорания топлива, %; для дров, торфа, бурого угля принимают $q_{х.н}$=4%; для каменного угля, антрацита, кокса и древесного угля $q_{х\,н}$=3%; для мазута и газов (естественных и искусственных) $q_{х\,н}$=2% По этому методу получаются заниженные значения выбросов вредных веществ из котлоагрегатов малой производительности (*до 30 т/ч*). *Им можно пользоваться* в отсутствие исходных данных, приведенных в табл 3.23 и 3 24 (q_3, q_4, $Q^{р}$, R).

При нормальной эксплуатации работающих на мазуте кузнечных и методических печей количество оксида углерода, содержащегося в продуктах сгорания, можно принять равным 40—50 г на 1 кг сжигаемого мазута. Если имеются дымоотводящие каналы или местные отсосы у печей и горнов, то объем газов, поступающих в цех, принимают 3—8% от общего объема продуктов горения.

Пример 3.8. Определить количество оксида углерода, образующегося при сжигании природного газа.

Исходные данные. В дымовых газах содержится 12,3% RO_2 и 7% O_2 (данные газоанализатора). Теплота сгорания газового топлива при нормальных условиях:

$$Q_{н}^{р} = 35{,}07 \text{ кДж/м}^3 \ (8350 \text{ ккал/м}^3).$$

Решение. Коэффициент β для природного газа β=0,01. Содержание оксида углерода при RO_2=12,3% и O_2=7% по Приложению XVI: CO=2,4%. Количество тепла, расходуемого на образование оксида углерода:

при $Q_{н}^{р}$, выраженном в кДж:

$$Q = 35\,070 \cdot 2{,}4/100 = 841{,}68 \text{ кДж};$$

при $Q_{н}^{р}$, выраженном в ккал:

$$Q = 8350 \cdot 2{,}4 = 200{,}4 \text{ ккал}.$$

Объем оксида углерода при $Q_{н}^{р}$, выраженном в кДж:

$$V_{г\,CO} = 841{,}68/12\,675 = 0{,}066 \text{ м}^3;$$

при $Q_{н}^{р}$, выраженном в ккал:

$$V_{г\,CO} = 200{,}4/3018 = 0{,}066 \text{ м}^3.$$

Количество оксида углерода:

$$G_{CO} = V_{г\,CO}\rho = 0{,}066 \cdot 1.25 \approx 82{,}5 \text{ г/м}^3.$$

3.2.4. Расчет выбросов диоксида азота

Концентрация оксидов азота быстро возрастает с повышением температуры и достигает существенных значений при температуре выше 1750 °С При этом наибольшую концентрацию имеет низший оксид NO, в то время как

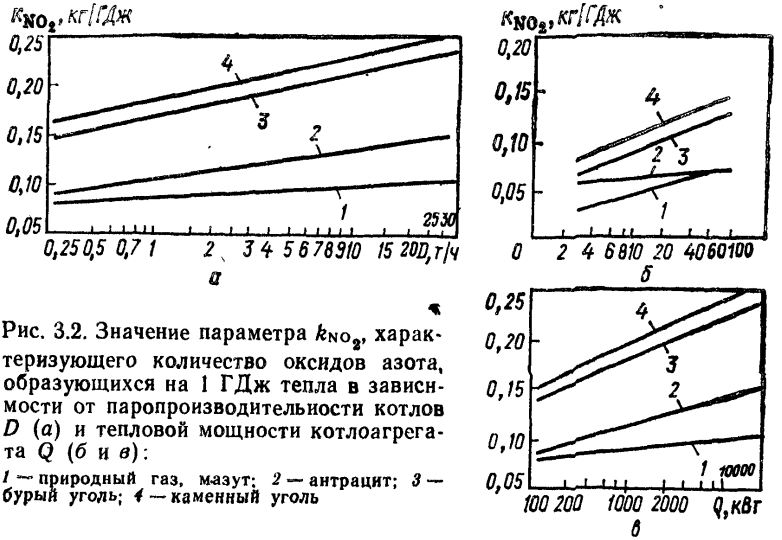


Рис. 3.2. Значение параметра k_{NO_2}, характеризующего количество оксидов азота, образующихся на 1 ГДж тепла в зависимости от паропроизводительности котлов D (*а*) и тепловой мощности котлоагрегата Q (*б* и *в*):

1 — природный газ, мазут; *2* — антрацит; *3* — бурый уголь; *4* — каменный уголь

содержание высших оксидов NO_2 и N_2O_4 является незначительным. Окисление азота можно представить следующим образом:

$$N_2 + {}^1/_2O_2 = NO + N; \qquad (3.27)$$

$$N + O_2 = NO + {}^1/_2O_2. \qquad (3.28)$$

Образовавшийся в ядре горения топочной камеры NO практически не может быть окислен кислородом дымовых газов за то короткое время, измеряемое секундами, в течение которого газы движутся в пределах парогенератора внешних газоходов и дымовой трубы. Таким образом, в атмосферу выбрасывается в основном оксид NO, который постепенно может окисляться до NO_2 при движении в атмосферном воздухе.

Ниже приводятся методы расчета содержания оксидов азота в дымовых газах.

1. Количество оксидов азота (в пересчете на NO_2), выбрасываемых в единицу времени (т/год, г/с), рассчитывают по формуле:

$$M_{NO_2} = 0{,}001BQ^{\text{р}}_{\text{н}}k_{NO_2}(1-\beta), \qquad (3.29)$$

где B — расход топлива за рассматриваемый период времени, т/год, тыс. м³/год, м³/с, г/с; $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$ — теплота сгорания топлива, мДж/кг, мДж/м³; k_{NO_2} — параметр, характеризующий количество оксидов азота, образующихся на 1 гДж тепла, кг/гДж; β — коэффициент, учитывающий степень снижения выбросов оксидов азота в результате реализации технических решений. Значение k_{NO_2} определяется по рис. 3.2 для различных видов топлива в зависимости от номинальной нагрузки котлоагрегатов. При нагрузке котла, отличающейся от номинальной, k_{NO_2} следует умножить на $(Q_\Phi/Q_\text{н})^{0,25}$ или на $(D_\Phi/D_\text{н})^{0,25}$, где Q_Φ, $Q_\text{н}$ — соответственно фактическая и номинальная теплопроизводительность, кВт; D_Φ, $D_\text{н}$ — соответственно фактическая и номинальная паропроизводительность, т/ч.

2. Если имеются данные о содержании оксидов азота в дымовых газах (%), то выброс вычисляют по формуле, кг/год:

$$G_{NO_x} = 20{,}4C_{NO_x}VB(1-q_4/100), \qquad (3.30)$$

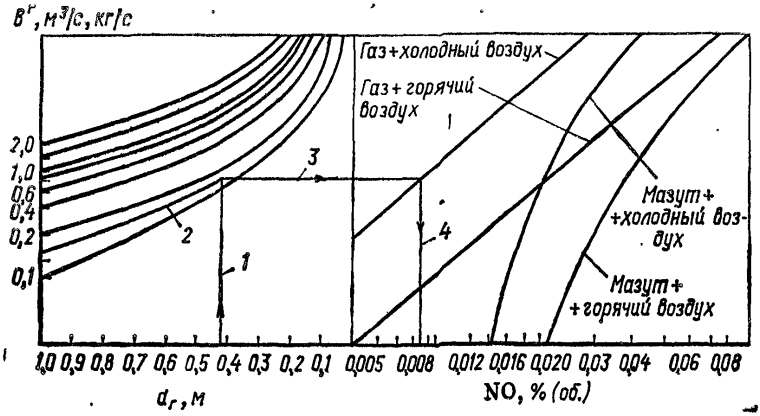


Рис. 3.3. График для определения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания

где C_{NO_x} — известное содержание оксидов азота в дымовых газах, %; V — объем продуктов сгорания топлива при $\alpha_{ух}$, м³/кг;

$$V = V_г^0 \alpha_{ух}; \qquad (3.31)$$

значения $V_г^0$ для некоторых топлив даны в табл. 3.23; для газообразного топлива $V_г^0$ определяется по данным табл. 3.24, B — расход топлива, т/год, тыс. м³/год.

3. Для расчета содержания оксидов азота при сжигании мазута и газа рекомендуется на стадии проектных разработок следующий метод. В качестве исходных данных служат: расход топлива на горелку $B^г$, кг/с — для мазута, м³/с — для газа); если расход известен в т/ч или в 1000 м³/ч, то величину $B^г$ делят на 3,6; $d_г$ — диаметр амбразуры горелки (свободное сечение), м; $\alpha_т$ — коэффициент избытка воздуха в горелке; информация о наличии или отсутствии подогрева воздуха, подаваемого на горение.

Содержание оксидов азота в дымовых газах рассчитывают в следующем порядке:

1) на шкале $d_г$ диаграммы (рис. 3.3) отмечают точку, соответствующую диаметру амбразуры горелки, и из нее проводят вертикальную линию *1*;

2) на шкале $B^г$ (расход газа или мазута на горелку) берут точку, соответствующую расходу топлива на горелку (в кг/с — для мазута или в м³/с — для газа) и проводят кривую, параллельную имеющимся на диаграмме, до пересечения с прямой *1*, т. е. проводят кривую, показанную стрелкой *2*;

3) из точки пересечения линий *1* и *2* проводят горизонтальную прямую *3* до пересечения с той кривой, которая соответствует имеющимся условиям. Возможны варианты: сжигание газа в смеси с холодным воздухом, сжигание газа с подогревом воздуха, сжигание мазута с подачей холодного воздуха, сжигание мазута с подачей подогретого воздуха. На рис. 3.3 линия *3* проведена до пересечения с прямой, соответствующей сжиганию газа с подачей холодного воздуха. Из точки пересечения прямой *3* с кривой проводят вертикальную прямую *4* до пересечения со шкалой NO, % (концентрация оксидов азота при α=1).

Если коэффициент избытка воздуха в горелках $\alpha \neq 1$, то полученную концентрацию оксида азота пересчитывают по формуле:

$$NO_x' = (NO_x) k_\alpha, \qquad (3.32)$$

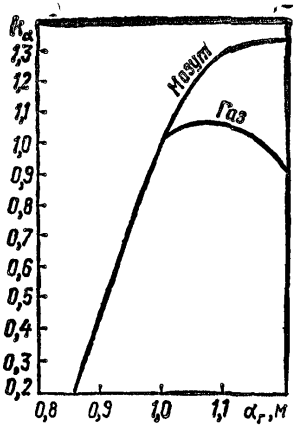


Рис. 3.4. Значение коэффициента k_α, характеризующего образование оксидов азота

где $(NO_x)'$ — концентрация оксидов азота при $\alpha_г \neq 1$, %; (NO_x) – концентрация оксидов азота при $\alpha_г = 1$, %; k_α — поправочный коэффициент, характеризующий образование оксидов азота, определяется по рис. 3.4.

Концентрацию NO_x в дымовых газах и параметр, характеризующий количество оксидов азота, приходящихся на 1 гДж тепла k_{NO_2}, можно пересчитать соответственно в г/м³ и кг/гДж по формулам:

$$C_{NO_2} = 20{,}4NO'_x; \qquad (3.33)$$

$$k_{NO_2} = 20{,}4NO'_x \frac{V}{Q^p_i}, \qquad (3.34)$$

где V — объем продуктов сгорания единицы топлива при имеющихся условиях $\alpha_г$, м³/кг.

Количество образующихся токсичных веществ при сгорании топлива в отопительных котлах мощностью до 85 кВт приведено в табл. 3.26.

Пример 3.9. Расчет концентрации оксидов азота в дымовых газах котла ДКВР-10-13, работающего на природном газе.

Исходные данные. Топливо — природный газ. Расход топлива на горелку $B=0{,}17$ м³/с. Объем продуктов сгорания при $\alpha_г=1$ равен $V^г=10{,}73$ м³/кг. Диаметр горелки $d_г=0{,}42$ м. Коэффициент избытка воздуха в горелке $\alpha_г=1{,}05$. Подогрев воздуха отсутствует. Определение концентрации диоксидов азота в продуктах сгорания газа показано на рис. 3.3, именно для этого случая; NO=0,0085%. По рис. 3.4 определяем соответствующий $\alpha_г=1{,}05$ коэффициент $k_\alpha=1{,}07$. Тогда концентрация диоксидов азота:

$$C_{NO_2} = 0{,}0085\ 1{,}07 \cdot 20{,}4 = 0{,}185 \text{ г/м}^3.$$

Учитывая, что котел имеет две горелки, получаем количество дымовых газов:

$$10{,}73 \cdot 2 \cdot 0{,}17 \cdot 3600 = 13\,700 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Общий выброс диоксидов азота составит:

$$13\,700 \cdot 0{,}185 = 2{,}54 \text{ кг/ч}.$$

Для котлоагрегатов производительностью более 30 т/ч количество оксидов азота в пересчете на NO_2, выбрасываемых с дымовыми газами, можно определять по следующим формулам, кг/ч:

при $Q_н^р$, выраженном в кДж/кг или кДж/м³:

$$G = 3{,}4 \cdot 10^{-5} k B Q_н^р (1 - q_4/100)\beta_1(1 - \beta_{2г})\beta_3, \qquad (3.35)$$

при $Q_н^р$, выраженном в ккал/кг или ккал/м³:

$$G = 0{,}143 \cdot 10^{-3} k B Q_н^р (1 - q_4/100)\beta_1(1 - \beta_{2г})\beta_3, \qquad (3.36)$$

где k — коэффициент, характеризующий выход диоксидов азота, кг на 1 т условного топлива; B — расход твердого, жидкого или газообразного топлива, т/ч или 1000 м³/ч; q_4 — потери тепла от механической неполноты сгорания, %; β_1 — поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества

Таблица 3.26. Количество токсичных веществ, образующихся при сгорании топлива в отопительных котлах мощностью до 85 кВт

Тип котла	Топливо	Режим горения	Количество образующегося вещества			
			$C_{20}H_{12}$, мкг/100 м³	NO_2, мг/м³	NO, мг/м³	CO, %
КС-2	Каменный уголь	Начало выгорания	8,97	5	205	—
	То же	Основной период горения	33,55	25	180	—
КЧМ-3 (7 секций)	Антрацит	Розжиг дров	111,2	6—8	110	—
	»	Догорание дров	346,1	30—40	70—80	—
		Начало погрузки угля	13,6	10	120	0,11
	»	Конец погрузки угля	53,6	20	110	0,28
	»	Основной период горения угля	30,6	30	100	0,08
КС-2	Дрова	Разгорание дров	97,4	8—10	90—110	—
	»	Догорание дров	214,6	25—45	60—80	—
КЧМ-3 (7 секций)	Природный газ	1,20	10	25	140	0,008
	То же	1,40	0	35	150	0
	»	1,80	0	50	150	0
	»	2,20	0	60	160	0
КС-3 (7 секций)	»	2,8	0	80	180	0,065
	ТПБ	1,25	60	25	250	0,07
	Легкое жидкое, *В*-5 кг/ч	1,40	350	80	140	0,02

сжигаемого топлива (содержание азота N_2 и способы шлакоудаления) на выход оксидов азота; β_2 — коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов на выход оксидов азота в зависимости от условий подачи их в топку. Значения коэффициента β_2 принимаются следующими:

При сжигании газа и мазута и вводе газа рециркуляции в подтопочное пространство (при расположении горелок на вертикальных экранах)	0,002
При вводе через шлицы под горелками	0,015
» » по наружному каналу горелки	0,020
» » в воздушном дутье	0,025
» » в рассечку двух воздушных потоков	0,030
При высококачественном сжигании твердого топлива и вводе газа рециркуляции:	
в первичную аэросмесь	0,010
во вторичный воздух	0,005

r — степень рециркуляции дымовых газов, %; β_3 — коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых горелок $\beta_3=1$, для прямоточных горелок $\beta_3=0{,}85$).

Коэффициент k для котлоагрегатов паропроизводительностью более 70 т/ч при сжигании газа и мазута во всем интервале нагрузок, а также при высокотемпературном сжигании твердого топлива с нагрузками выше 75% номинальной определяется по формуле:

$$k = 12D_ф/(200 + D_н), \qquad (3.37)$$

где $D_ф$ и $D_н$ — фактическая и номинальная производительность котла, т/ч.

Таблица 3.27 Значения коэффициента β_1 при сжигании твердого топлива

Угли	Содержание азота, %	При твердом шлакоудалении	При жидком шлакоудалении
Онгренский Б2, березовский Б2, назаровский Б2, ирша-бородинский, харанорский Д1, реттихорский Б1, чихефский Б1, нерюнгринский СС, донецкий АШ, башкирский В1, бадаевский, канско-ачинский, ургальский; сланцы	$<1{,}0$	0,55	0,8
Веселовский, богословский, черемховский, сучанский, нижне-аркагалинский, донецкий Т, ПАШ, карагандинский ПрП, подмосковный Б2, львовско-волынский Г, егоршинский ПА, гусиноозерский, хольбольджинский, райчихинский, кручекинский СС	1—1,4	0,7	1,0
Донецкий Д, Г, ГСШ, Пр., экибастузский СС, печорский (воркутинский М), бикинский Б2, азейский Б3, кузнецкий Г, Р, ОК, южно-сахалинский	1,4—20	1,0	1,4
Кузнецкий Д, Г, 1СС, интинский Д, печорский, томусинский, фрезерный торф	$>2{,}0$	1,4	2,0

Для котлоагрегатов паропроизводительностью менее 70 т/ч

$$k = D_{\Phi}/20. \tag{3.38}$$

Для водогрейных котлов k определяется по формуле:

$$k = \frac{2{,}9 \cdot 10^3 Q_{\Phi}}{20 + 1160 Q_{\text{н}}}, \tag{3.39}$$

если Q_{Φ} и $Q_{\text{н}}$ выражены в кВт, Q_{Φ} и $Q_{\text{н}}$ — фактическая и номинальная тепловая производительность котла

$$k = 25 Q_{\Phi}/(20 + Q_{\text{н}}) \tag{3.40}$$

при Q_{Φ} и $Q_{\text{н}}$, выраженных в Гкал.

При высокотемпературном сжигании твердого топлива с нагрузками котла ниже 75% номинальной в формулы для определения k вместо D_{Φ} и Q_{Φ} подставляются значения $0{,}75D$ и $0{,}75Q$. При низкотемпературном сжигании твердого топлива в формулы для определения k всегда подставляют значения $D_{\text{н}}$ и $Q_{\text{н}}$. Значения β_1 для энергетических котлов, в которых сжигается твердое топливо, принимают по табл. 3.27. Если используется топливо, не указанное в табл. 3.27, то значение коэффициента β_1 следует принимать по группе углей с соответствующим содержанием N_2. При сжигании в энергетических котлах жидкого и газообразного топлив значения коэффициента β_1 принимаются следующими:

Природный газ	0,85
Мазут при коэффициенте избытка воздуха в топочной камере:	
$\alpha_{\text{г}} \geqslant 1{,}05$	0,8
$\alpha_{\text{г}} < 1{,}05$	0,7

Если в энергетических котлах одновременно используется топливо двух видов с расходом одного из них менее 10% по получаемой теплоте, то зна-

чение коэффициента β_1 должно приниматься по превалирующему виду топлива. В остальных случаях коэффициент β_1 определяют по формуле:

$$\beta_1 = \frac{\beta'_1 B_1 + \beta''_1 B_2}{B_1 + B_2}, \qquad (3.41)$$

где β_1', β_1'' — коэффициенты, соответствующие каждому виду топлива; B_1, B_2 — расходы каждого вида топлива.

Пример 3.10. Определить количество диоксидов азота, поступающих в атмосферу с дымовыми газами котлоагрегата при сжигании в нем природного газа.

Исходные данные. Расход топлива 3000 м³/ч; $Q_н^р$=35 910 кДж (8550 ккал/м³). Горелки вихревые. В котлоагрегате отсутствует рециркуляция дымовых газов. Паропроизводительность котла 46 т/ч.

Решение. Коэффициент, характеризующий выход оксидов азота, кг на 1 т условного топлива:

$$k = D_ф/20 = 23/20 = 1{,}15.$$

Потери тепла (в %) от механической неполноты сгорания (согласно Нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов) q_4=0. Коэффициент β_1 для газообразного топлива β_1=0,85. Коэффициент β_3 для вихревых горелок β_3=1. Количество оксидов азота при нормальных условиях в пересчете на NO_2:

при $Q_н^р$, выраженном в кДж/м³:

$$G = 3{,}4 \cdot 10^{-5} k B Q_н^р (1 - q_4/100)\beta_1(1 - \beta_2 r)\beta_3 =$$
$$= 3{,}4 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}15 \cdot 3{,}0 \cdot 35\,910 \cdot 0{,}85 \cdot 1 = 3{,}6 \text{ кг/ч, или } 1 \text{ г/с};$$

При $Q_н^р$, выраженном в ккал/м³:

$$G = 0{,}143 \cdot 10^{-3} k B Q_н^р (1 - q_4/100)\beta_1(1 - \beta_2 r)\beta_3 =$$
$$= 0{,}143 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}15 \cdot 3{,}0 \cdot 8550 \cdot 0{,}85 \cdot 1 = 3{,}6 \text{ кг/ч, или } 1{,}0 \text{ г/с}.$$

Чтобы определить количество оксидов, поступающих в атмосферу в течение суток или года, в формулы нужно подставить значения расходов за сутки или за год.

3.2.5. Расчет выбросов оксидов ванадия

Количество оксидов ванадия в пересчете на пятиоксид ванадия (т/год, г/с), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами котлов в единицу времени, вычисляют по формуле:

$$G_{V_2O_5} = 10^{-6} q_{V_2O_5} B (1 - \eta_{oc})(1 - \eta_y), \qquad (3.42)$$

где $q_{V_2O_5}$ — содержание оксидов ванадия в жидком топливе в пересчете на V_2O_5, г/т; η_{oc} — коэффициент оседания оксидов ванадия на поверхностях нагрева котлов; для котлов с промежуточными пароперегревателями, поверхности нагрева которых очищают в остановленном состоянии, η_{oc}=0,07, для котлов без промежуточных пароперегревателей при тех же условиях очистки η_{oc}=0,05, для остальных случаев η_{oc}=0; η_y — доля твердых частиц продуктов сгорания жидкого топлива, улавливаемых в устройствах для очистки газов мазутных котлов. Значение η_y оценивают для средних условий работы улавливаемых устройств за год.

В отсутствие результатов анализа топлива содержание оксидов ванадия $q_{V_2O_5}$ в сжигаемом топливе ориентировочно определяют по формуле:

$$q_{V_2O_5} = 95{,}4S^р - 31{,}6, \qquad (3.43)$$

где $S^р$ — содержание серы в мазуте на рабочую массу, %.

Формула (3.43) справедлива для мазута с $S^p > 0{,}4\%$. Для определения максимальных выбросов оксидов ванадия (г/с) значенне расхода топлива (г/с) принимают для реальной наибольшей нагрузки котлоагрегата.

Пример 3.11. Определить количество выбросов пятиоксида ванадия при сжигании мазута сернистостью 2,0% в котлоагрегате без промежуточных пароперегревателей.

Исходные данные. Производительность котлоагрегата 46 т/ч. Устройства для очистки дымовых газов отсутствуют. Расход сжигаемого мазута 3 т/ч и за год 13 600 т/год.

Решение. Содержание оксидов ванадия $q_{V_2O_5}$ в сжигаемом топливе:

$$q_{V_2O_5} = 95{,}4S^p - 31{,}6 = 95{,}4 \cdot 2 - 31{,}6 = 159{,}2 \text{ г/т}.$$

Коэффициент оседания оксидов ванадия на поверхности котла без промежуточных пароперегревателей: $\eta_{oc} = 0{,}05$.

Количество оксидов, выбрасываемых с дымовыми газами:

$$\text{за 1 с: } G_{V_2O_5} = \frac{159{,}2 \cdot 3}{3600}(1 - 0{,}05) = 0{,}126 \text{ г};$$

$$\text{за 1 год: } G_{V_2O_5} = 10^{-6} q_{V_2O_5} B (1 - \eta_{oc})(1 - \eta_y) =$$

$$= 10^{-6} \cdot 159{,}2 \cdot 13\,600(1 - 0{,}05) = 2{,}057 \text{ т/год}.$$

3.3. РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ОТ АВТОТРАНСПОРТА

В отличие от промышленных источников загрязнения, привязанных к определенным площадкам и отделенных от жилой застройки санитарно-защитными зонами, автомобиль является движущимся (нестационарным) источником загрязнения, широко встречающимся в жилых районах и местах отдыха. Автомобильные газы представляют собой чрезвычайно сложную, недостаточно изученную смесь токсичных компонентов, основными из которых являются азот, кислород, пары воды, диоксиды углерода и азота, углеводороды, альдегиды и др.

Механизм образования наиболее многочисленной группы веществ — углеводородов — можно свести к следующим стадиям. На первой стадии сложные углеводороды, из которых состоит топливо, под воздействием термических процессов разлагаются на ряд простых углеводородов и свободных радикалов. На второй стадии в условиях недостатка кислорода атомы водорода отщепляются от образовавшихся продуктов. Полученные соединения объединяются между собой во все более сложные циклические, а затем и полициклические структуры. Таким образом, на данном этапе возникает ряд полициклических ароматических углеводородов, в том числе и бенз(а)пирен. Состав выхлопных газов автомобиля колеблется в значительной степени и зависит от ряда факторов: типа двигателя (карбюраторный, дизельный), режима его работы и нагрузки, технического состояния, качества топлива, квалификации и опытности водителя.

В табл. 3.28 приведен примерный состав выхлопных газов карбюраторных и дизельных двигателей.

Из табл. 3.29 видно, что основными вредностями являются оксид углерода, диоксид азота и углеводороды.

Для оценки загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта установлены удельные значения газовых выбросов. Так, для одноэтажных гаражей, где характерным является режим холостого хода, величины выбросов рассчитывают по формуле:

$$G = gNkc, \tag{3.44}$$

где g — удельное количество вредных веществ, отнесенное к одному выезду из помещения и условной мощности двигателя в одну лошадиную силу,

Таблица 3.28. Примерный состав выхлопных газов карбюраторных и дизельных двигателей, % (об.)

Компонент	Карбюраторные двигатели	Дизельные двигатели
Азот	74—77	76—78
Кислород	0,3—8,0	2—18
Пары воды	3,0—5,5	0,5—4,0
Диоксид углерода	5,0—12,0	1,0—10,0
Оксид углерода	0,5—12,0	0,01—0,5
Оксиды азота	0,0—0,8	0,0002—0,5
Углеводороды неканцерогенные	0,2—3,0	0,009—0,5
Альдегиды	0,0—0,2	0,001—0,009
Сажа	0,0—0,4*	0,01—1,1*
Бенз(а)пирен	До 10—20**	До 10**

* В г/м³
** В мкг/м³

Таблица 3.29. Удельные количества вредных веществ, выделяющихся при одном выезде автомобиля из помещения, г/(л. с.· выезд)

Наименование помещений	Легковые автомобили		Грузовые автомобили и автобусы	
	оксид углерода	оксиды азота	оксид углерода	оксиды азота
Хранение автомобилей	1,2	0,02	1,7 / 0,5	0,03 / 0,2
Пост технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей	0,8	0,016	1,0 / 0,4	0,024 / 0,16
Пост мойки и уборки автомобилей	0,27	0,006	0,3 / 0,12	0,01 / 0,07

Примечание В числителе указаны удельные количества вредных веществ для грузовых автомобилей и автобусов с карбюраторными двигателями, в знаменателе — с дизельными двигателями

Таблица 3.30. Коэффициент с для учета интенсивности движения автомобилей

Наименование помещений	Число выездов в течение 1 ч	Коэффициент *с*
Пост технического обслуживания и ремонта	1	0,5
	2	0,6
	3	0,7
	4	0,8
	> 4	1
Поточные линии обслуживания автомобилей с перемещением на конвейере	На все число выездов	0,3
Хранение автомобилей	То же	1

Таблица 3 31 Влияние среднего возраста парка и уровня технического состояния автотранспорта на выброс вредных веществ

Группа автомобилей	Выброс оксида углерода		Выброс углеводородов		Выброс оксидов азота	
	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
Грузовые и специальные с бензиновыми ДВС	1,33	1,69	1,2	1,86	1	0,8
Грузовые и специальные грузовые дизельные	1,33	1,80	1,2	2,0	1	1,0
Автобусы с бензиновым ДВС	1,32	1,62	1,2	1,86	1	0,8
Автобусы дизельные	1,27	1,80	1,17	2,0	1	1,0
Легковые служебные и специальные	1,28	1,63	1,17	1,83	1	0,85
Легковые индивидуального пользования	1,28	1,62	1,17	1,78	1	0,9

Таблица 3 32 Удельные выбросы для различных групп автомобилей на 1990 г, г/км

Группа автомобилей	CO	CH	NO_x
Грузовые и специальные грузовые с бензиновыми ДВС и работающие на сжиженном нефтяном газе (пропан, бутан)	55,5	12,0	6,8
Грузовые и специальные грузовые дизельные	15,0	6,4	8,5
Грузовые и специальные грузовые, работающие на сжатом природном газе	25,0	7,5	7,5
Автобусы с бензиновыми ДВС	51,5	9,6	6,4
Автобусы дизельные	15,0	6,4	8,5
Легковые служебные и специальные	16,5	1,6	2,23
Легковые индивидуального пользования	16,1	1,6	2,19

т. е. в г/л. с. на 1 выезд (принимается по табл. 3.29); N — мощность двигателя автомобиля, л. с.; k — число выездов автомобилей из помещения в течение 1 ч, выезд/ч; c — коэффициент для учета интенсивности движения автомобилей (принимается по табл. 3.30).

В многоэтажных гаражах с выездом автомобилей через нижерасположенные этажи (или вышерасположенные ярусы в подземных гаражах) количество вредных веществ, выделяющихся в каждом этаже (ярусе), определяется по формуле:

$$G = gNk_1(1 + 0{,}07n), \qquad (3.45)$$

где k_1 — число выездов в течение 1 ч для данного этажа (яруса), выезд/ч; n — число вышерасположенных этажей (нижерасположенных ярусов).

При смешанном парке карбюраторных и дизельных автомобилей количество одноименных вредных веществ суммируют

В методических указаниях по расчету выброса вредных веществ автомобильным транспортом при его движении основой является средний удельный выброс по автомобилям отдельных групп (грузовые, автобусы, легковые). При этом выброс вредных веществ корректируется в зависимости от технического состояния автомобилей, их среднего возраста, влияния природно-климатических условий на количество выбросов. Коэффициент влияния природно-климатических условий принимается равным 1 (в дальнейшем подлежит уточнению).

Для автомобилей парка рассматриваемого города (района) масса выброшенного за расчетный период τ вредного j-го вещества M_j^{τ} при наличии в группе автомобилей с различными типами ДВС (бензиновыми, дизельными, газовыми и др.) определяется следующим образом:

$$M^{\tau}_j = \sum^{i} \sum^{k} m_{jik} z_{ik} k_1 k_2, \qquad (3.46)$$

где i — число групп автомобилей; m_{jik} — удельный выброс j-го вредного вещества автомобилем i-й группы с двигателем k-го типа на расчетный период (включая пробеговый выброс с учетом картерных выбросов и испарений топлива), г/км; z_{ik} — пробег автомобилей i-й группы с двигателем k-го типа за расчетный период, млн. км, $k_1 k_2$ — произведение коэффициентов влияния технического состояния и среднего возраста автомобилей на выброс j-го вредного вещества автомобилями i-й группы с двигателем k-го типа в рассматриваемом районе (табл. 3.31).

Удельные выбросы (г/км) оксида углерода, углеводородов, оксидов азота *для всех групп автомобилей в зависимости* от расчетного года приняты постоянными и приведены в табл. 3.32.

Для грузовых специальных автомашин, работающих без значительного перемещения (автокраны, бульдозеры и др.), количество выбрасываемых веществ должно рассчитываться по условному эквивалентному пробегу аналогичных двигателей (бензиновых или дизельных и удельному расходу топлива на 1 км.

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПОМЕЩЕНИИ

4.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИИ

При турбулентном течении в вихрях воздушного потока могут быть отдельные точки, в которых направление движения воздуха противоположно направлению основного потока (рис. 4.1). Возможность образования вихрей, движущихся по всему фронту или в отдельных точках навстречу основному потоку, обусловливает распространение вредных веществ как в направлении потока, так и против него.

Параметром, характеризующим интенсивность движения газового потока (ламинарного или турбулентного), а следовательно, характеризующим интенсивность образования вихрей, является коэффициент турбулентного обмена A. В случае ламинарного течения потока и молекулярного процесса переноса коэффициент A соизмерим (одного порядка) с коэффициентом диффузии. При турбулентном течении потока и турбулентном переносе ко-

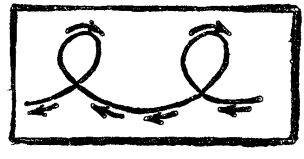


Рис 4 1 Возможная траектория частицы в турбулентном потоке газовой струи

эффициент A пропорционален диссипируемой энергии и определяющему размеру рассматриваемого источника:

$$A \infty \varepsilon^{1/3} l^{4/3}, \tag{4.1}$$

где ε — кинетическая энергия воздушных потоков в помещении; l — определяющий размер объекта, м; для круглого отверстия местного отсоса $l=d$; для прямоугольных отверстий и сечений неправильной формы $l=\sqrt{F}$.

Для вентилируемого помещения энергия, вносимая в окружающую среду потоком воздуха и затухающая в ней, слагается *из энергии приточных* и тепловых струй, энергии движущихся по помещению предметов за минусом энергии вытяжных струй. Ввиду малой энергии вытяжных струй этой величиной можно пренебречь. Кинетическая энергия воздушных потоков помещения определяется по формуле, м²/с:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{п.с}} + \varepsilon_{\text{т.с}} + \varepsilon_{\text{д.п}} - \varepsilon_{\text{в.с}}, \tag{4.2}$$

где $\varepsilon_{\text{п.с}}$ — энергия приточных струй; $\varepsilon_{\text{т.с}}$ — энергия тепловых струй, $\varepsilon_{\text{д.п}}$ — энергия движущихся предметов; $\varepsilon_{\text{в.с}}$ — энергия вытяжных струй.

Энергия приточных струй, отнесенная к единице массы воздуха помещения и к единице времени, составляет, м²/с:

$$\varepsilon_{\text{п.с}} = G\xi v^2/2G_{\text{п}}, \tag{4.3}$$

где G — масса воздуха, подаваемого в помещения за 1 с, кг/с;

$$G = L\rho; \tag{4.4}$$

L — количество подаваемого воздуха, м³/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; ξ — поправочный коэффициент на скоростное давление, т. е. коэффициент местного сопротивления на выходе из воздухораспределителя (в табл. 4.1 приведены наиболее распространенные типы воздухораспределителей и значения коэффициентов местного сопротивления *для них*); v — средняя скорость выхода воздуха из приточных отверстий, м/с; $G_{\text{п}}$ — масса воздуха в объеме помещения, кг;

$$G_{\text{п}} = V\rho; \tag{4.5}$$

V — объем помещения, м³.

Учитывая, что кратность воздухообмена

$$Kp = L/V, \tag{4.6}$$

формулу (4.3) можно преобразовать к виду:

$$\varepsilon_{\text{п. с}} = \frac{L\rho\xi v^2}{2V\rho} = Kp\frac{\xi v^2}{2}. \tag{4.7}$$

Количество энергии, вносимой в воздух помещения тепловыми струями $E_{\text{т.с}}$ и затухающей в единице массы воздуха в единицу времени $\varepsilon_{\text{т.с}}$, можно определить по формуле (4.8) или (4.9), м²/с:

$$\varepsilon_{\text{т. с}} = \frac{E_{\text{т. с}}}{G_{\text{п}}} = \frac{g\overline{Q}z}{c_{\text{р}}T_0\rho}\cdot\frac{1+n}{4} \tag{4.8}$$

$$\varepsilon_{\text{т. с}} = C\frac{\overline{Q}}{\rho}z; \tag{4.9}$$

где $\overline{Q}$ — теплонапряженность объема, Вт/м³;

$$\overline{Q} = Q/V; \tag{4.10}$$

Таблица 4.1. Значения коэффициентов местного сопротивления для наиболее распространенных типов воздухораспределителей

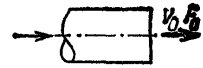
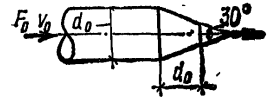
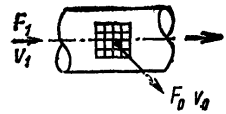
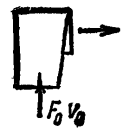
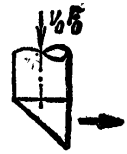
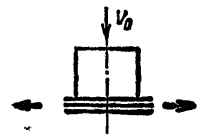
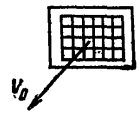
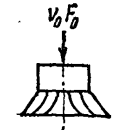
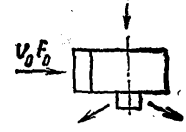
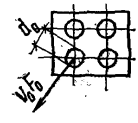
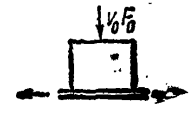
Воздухораспределитель	Эскиз	Поправочный коэффициент на скоростное давление (коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости v_0)
Цилиндрическая труба		1,1
Цилиндрическая труба с конфузором		4,5
Среднее отверстие		См. прим. 2
ВГК (серия 4.904-68) для подачи воздуха компактной струей		1,9
ВЭС (серия 1.494-17) эжекционный для сосредоточенной подачи воздуха		5,2
Патрубок поворотный душирующий типа ППД (серия 4.904-22)		4,0
ВПП (серия 4.904-59) пристенный панельный		См. прим. 3
ВЭ[illegible] (серия 1.494-3) пристенный эжекционный		4,0
Решетки, сетки, перфорация, отверстия с направляющими параллельными лопатками		1,8

Таблица 4.1 (продолжение)

Воздухораспределитель	Эскиз	Поправочный коэффициент на скоростное давление (коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости v_0)
Решетка щелевая типа Р (серия 1.494-10)		2,0
Решетка воздухоприточная регулируемая типа РР исп. АБ (серия 1.494-8)		2,2
Решетка воздухоприточная типа РР исп. АВ (серия 1.494-8)		3,3
ВЭЦ (серия 1.494-15) эжекционный		2,5
ВДШ (серия 1.494-29) двухструйный шестидиффузорный		1,3
ВЦ (серия 4.904-52)		6,2 с диском 5,8 без диска
ВПЭП (серия 1.494-18) пристенный эжекционный панельный		25 $F_0 = \frac{\Pi d_0^2}{4}$ где $d_0 = 75$ мм
ВЭПв (серия 1.494-20) эжекционный потолочный		4,2

Примечания. 1. v_0 v_1 — скорости в сечении F_0 и F_1, м/с;

2. v_0 v_1 ...	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
ξ ...	1,8	1,7	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3	2,6	3,0
3. Тип ВПП ...		51	81		82	52	101	53	
ξ ...		2,3	2,2		2,1	2,0	1,9	1,8	

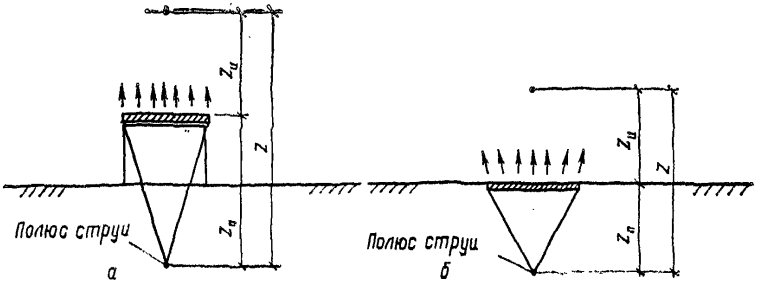


Рис. 4.2. Тепловой источник расположен на основании (*а*) и заподлицо с плоскостью (*б*)

Q — теплопоступление в помещение, Вт; g — ускорение свободного падения; z — расстояние от полюса до рассматриваемой точки, м;

$$z = z_п + z_и;$$

$z_п$ — расстояние от источника до полюса струи, м; для нагретой пластины, заделанной заподлицо с плоскостью, $z_п = d$; для нагретой пластины, установленной на основание, $z_п = 1{,}7d$; $z_и$ — расстояние от источника до рассматриваемой точки, м (рис. 4.2); n — экспериментальная константа, равная 0,8; c_p — теплоемкость воздуха в удалении от источника, Дж/(кг·К); T_0 — температура в удалении от источника К; C — коэффициент пропорциональности, равный $18{,}3 \cdot 10^{-6}$ для нагретой пластины, заделанной заподлицо с плоскостью (при обозначении потока тепла и мощности кинетической энергии тепловой струи в Вт) и $3 \cdot 10^6$ — для нагретой пластины, расположенной на основании.

Энергию, вносимую в помещение движущимися предметами в единицу времени (в Вт), можно определить по формуле, м²/с:

$$\varepsilon_{д.п} = \frac{\xi F_п v_п^3 \rho}{2G_п} \cdot \frac{\tau}{3600}, \qquad (4.11)$$

где ξ — коэффициент аэродинамического сопротивления движущегося предмета, принимается по справочнику; $F_п$ — площадь поперечного сечения движущегося предмета, м²; $v_п$ — скорость движущегося предмета, м/с; τ — средняя продолжительность движения предмета с данной скоростью в течение 1 ч, с.

Таким образом, зная величину энергии, поступающей в помещение, и определяющий размер рассматриваемого источника, можно определить коэффициент турбулентного обмена A, который для вентилируемых помещений равен, м²/с:

$$A_п = 0{,}25\varepsilon^{1/3} l_п^{4/3}. \qquad (4.12)$$

Коэффициент турбулентного обмена вытяжного отверстия определяется по формуле:

$$A_0 = 0{,}25\varepsilon^{1/3} l_0^{4/3}. \qquad (4.13)$$

Коэффициент турбулентного обмена A можно определить также по рис. 4.3. Для определения коэффициента турбулентного обмена среды на некотором расстоянии от местного отсоса следует учитывать спектр распределения скоростей вблизи этого отсоса. При падении скорости в спектре всасывания местного отсоса до величины подвижности воздуха в помещении коэффициент турбулентного обмена следует определять по формуле (4.15), принимая за определяющий размер сечение помещения, перпендикулярное основному воздушному потоку.

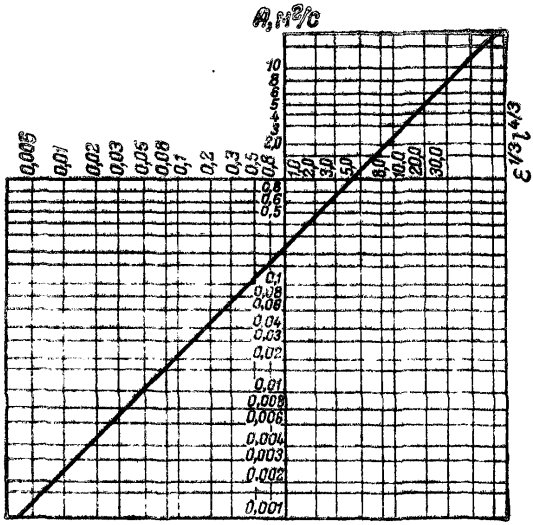


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента A от диссипируемой энергии ε и определяющего размера l

Изменение коэффициента турбулентного обмена от величины, найденной для помещения, до величины для рассматриваемого местного отсоса следует принимать по формуле:

$$\Delta A \approx \Delta v \tag{4.14}$$

или по формуле:

$$A_x = \frac{A_{\text{п}} v_{(x_{\text{п}}-x)}}{v_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{A_{\text{п}} v_{\text{п}}}{A_0 v_0} - 1\right)(x_{\text{п}} - x)/x_{\text{п}} + 1}, \tag{4.15}$$

где v_x — скорость воздушного потока, создаваемого местным отсосом на расстоянии x от него, м/с; $v_{\text{п}}$ — подвижность воздушного потока в производственном помещении, м/с; $A_{\text{п}}$ — коэффициент турбулентного обмена помещения, м²/с; v_0 — скорость воздушного потока во всасывающем отверстии местного отсоса, м/с; $v_{(x_{\text{п}}-x)}$ — скорость воздушного потока, создаваемого местным отсосом на расстоянии $x_{\text{п}}-x$ от него; $x_{\text{п}}$ — расстояние от местного отсоса до границы действия спектра его всасывания, м.

Формула (4.15) применима для расстояний: от кромки всасывания местного отсоса до границы действия спектра его всасывания, т. е. где $v_x \leqslant v_{\text{п}}$. Графическое изображение изменения скорости воздушного потока и коэффициента турбулентного обмена на различных расстояниях от местного отсоса приведено на рис. 4.4.

Пример 4.1. Определить коэффициенты турбулентного обмена около местного отсоса (без фланца) размером 300×100 мм и в помещении.

Исходные данные. В помещении имеется приточно-вытяжная система вентиляции и установлены решетки типа РР исполнения АБ. Скорость выхода воздуха из приточных решеток равна 3 м/с. Кратность воздухообмена в помещении $Kp=8$. Объем отсасываемого воздуха через местный отсос 3000 м³/ч. Объем помещения 800 м³. Размеры помещения, перпендикулярные основному потоку в нем, 12·4,5 м.

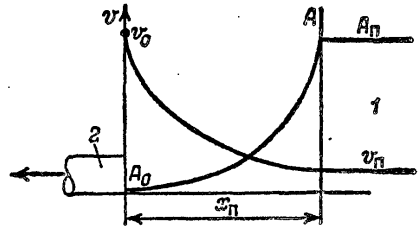


Рис. 4.4. Изменение скорости воздушного потока и коэффициента турбулентного обмена на различных расстояниях от местного отсоса:
1 — помещение; 2 — местный отсос

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточной решетки типа РР исполнения АБ принимаем по табл. 4.1: $\xi=2,2$.

Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{п.с} = Kp\frac{\xi v_2}{2} = 8,0\frac{2,2\cdot 3^2}{2\cdot 3600} = 0,022 \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (4.16)$$

Энергия тепловых струй и движущихся предметов: $\varepsilon_{т.с}=\varepsilon_{д.п}=0$. Кинетическая энергия воздушных потоков помещения

$$\varepsilon = \varepsilon_{п.с} + \varepsilon_{т.с} + \varepsilon_{д.п} = 0,022 \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (4.17)$$

Определяющие размеры рассматриваемого объекта: $l=\sqrt{F}$; для местного отсоса $l_0=\sqrt{0,1\cdot 0,3}=0,17$ м, для помещения $l_п=\sqrt{12\cdot 4,5}=7,35$ м.

Коэффициент турбулентного обмена A:

$$A = 0,25\varepsilon^{1/3}l^{4/3};$$

для местного отсоса $A_0=0,25\cdot 0,022^{1/3}\cdot 0,17^{4/3}=0,006627$ м^2/с;
для помещения $A_п=0,25\cdot 0,022^{1/3}\cdot 7,35^{4/3}=1,0052$ м^2/с.

Пример 4.2. Определить коэффициент турбулентного обмена помещения и местного отсоса, выполненного в виде зонта.

Исходные данные. Диаметр зонта $d=1$ м. Угол раскрытия зонта $\alpha=90°$. Диаметр отводящего воздуховода $d_0=0,3$ м; высота зонта 0,35 м. Помещение снабжено приточно-вытяжной системой вентиляции. Кратность воздухообмена в помещении Кр=10. Приточная система имеет воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из воздухораспределителей $v=2,5$ м/с. Температура воздуха в помещении $t=26$ °С. В помещении имеется источник тепловыделений, установленный на специальном основании. Диаметр источника тепловыделения 1 м. Количество тепла, поступающего в помещение, $Q=29\,000$ Вт. Объем помещения $V=450$ м^3. Местный отсос находится на расстоянии 300 мм (по вертикали) от источника тепловыделения. Объем отсасываемого воздуха через местный отсос $L=4500$ м^3/ч. Размеры помещения, перпендикулярные основному потоку, 12·4,5 м.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 берем из табл. 4.1: $\xi=2,0$.

Энергия приточных струй

$$\varepsilon_{п.с} = Kp\frac{\xi v^2}{2} = 10,0\frac{2\cdot 2,5^2}{2\cdot 3600} = 0,0174 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Теплонапряженность объема

$$\overline{Q} = Q/V = 29000/450 = 64,5 \text{ Вт/м}^3.$$

Плотность воздуха при $t=26$ °С: $\rho=1,155$ кг/м^3.

Расстояние от источника до полюса струи: $z_п=1,7d=1,7\cdot 1=1,7$ м. Расстояние от источника до рассматриваемой точки: $z_и=0,3$ м. Расстояние от полюса струи до рассматриваемой точки:

$$z = z_п + z_и = 1,7 + 0,3 = 2,0 \text{ м}.$$

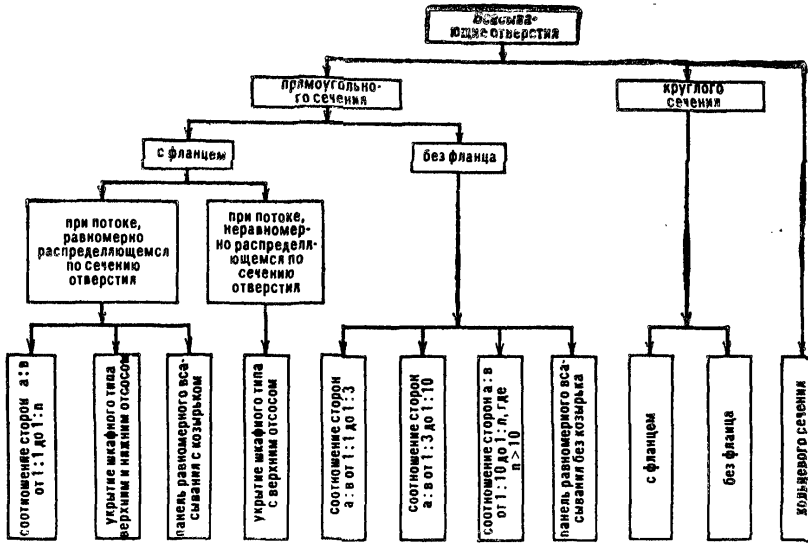


Рис. 4.5. Классификация типов всасывающих отверстий вытяжной системы вентиляции

Коэффициент пропорциональности C для пластины, установленной на основании: $C=34{,}3\cdot10^{-6}$.
Количество энергии, вносимой в воздух тепловыми струями:

$$\varepsilon_{т.с}=C\frac{\overline{Q}}{\rho}z=\frac{34\cdot10^{-6}\cdot64{,}5}{1{,}155}2=0{,}0038\ \text{м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия движущихся предметов: $\varepsilon_{д.п}=0$.
Кинетическая энергия воздушных потоков помещения:

$$\varepsilon=\varepsilon_{п.с}+\varepsilon_{т.с}+\varepsilon_{д.п}=0{,}0174+0{,}0038=0{,}0212\ \text{м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер рассматриваемого объекта $l=\sqrt{F}$: для местного отсоса $l_0=\sqrt{0{,}785\cdot1^2}=0{,}887$ м; для помещения $l_п=\sqrt{12\cdot4{,}5}=7{,}35$ м.

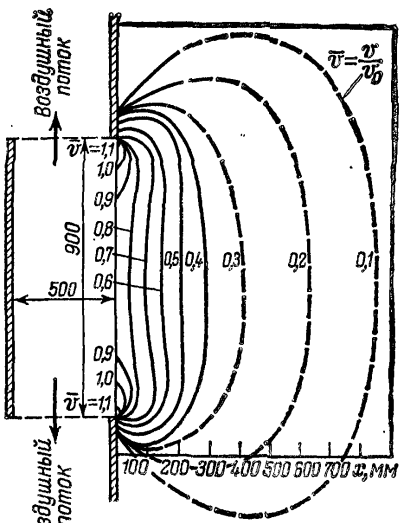
Коэффициент турбулентного обмена:
для местного отсоса $A_0=0{,}25\cdot0{,}0212^{1/3}\cdot0{,}887^{4/3}=0{,}0587$ м²/с;
для помещения $A_п=0{,}25\cdot0{,}0212^{1/3}\cdot7{,}35^{4/3}=0{,}987$ м²/с.

4.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ, ВБЛИЗИ ВСАСЫВАЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Для расчетов спектров всасывания местными отсосами целесообразно их классифицировать по типам всасывающих отверстий (рис. 4.5).

4.2.1. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия прямоугольного сечения (отсос с фланцем или в стене)

Закон затухания скоростей в зоне всасывающего отверстия для расстояний, больших меньшей стороны всасывающего отверстия ($x\geqslant b$), описывается



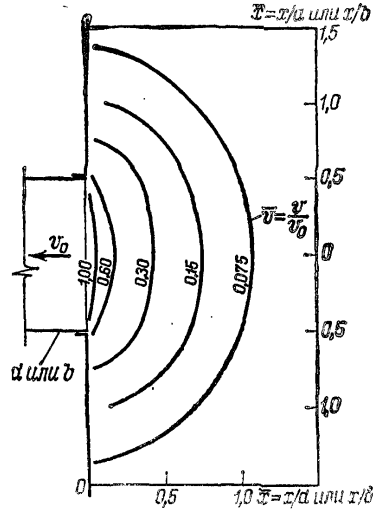


Рис. 4.6. Спектр скоростей всасывания воздушного потока вблизи рабочего окна укрытия шкафного типа (сечение 800×900 мм) при потоке, равномерно распределенном по сечению

Рис. 4.7. Спектр скоростей всасывания воздушного потока вблизи круглого и прямоугольного отверстий в стене (d — диаметр; b — меньшая сторона прямоугольника)

формулой:

$$v_x = \frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\left[\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right], \qquad (4.18)$$

где $\bar{v}_x = v_x/v_0$; v_x — скорость воздуха по оси факела на рассчитываемом расстоянии, м/с; v_0 — средняя скорость воздуха во всасывающем отверстии, м/с; $\bar{x}$ — относительное расстояние от местного отсоса до расчетной точки;

$$\bar{x} = x/b; \qquad (4.19)$$

x — расстояние по оси факела от рассчитываемой точки до всасывающего отверстия, м; a — размер бо́льшей стороны всасывающего отверстия, м; b — размер меньшей стороны всасывающего отверстия, м.

Для квадратного всасывающего отверстия формула упрощается до вида:

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\left(\bar{x}\sqrt{2+\bar{x}^2}\right). \qquad (4.20)$$

При определении скоростей воздушных потоков вблизи всасывающего отверстия ($x \leqslant b$) следует пользоваться спектрами скоростей всасывания, полученными из эксперимента.

Для эффективного действия местных отсосов важное значение имеет равномерное распределение скоростей в сечении отверстия. На рис. 4.6 и 4.7 показано распределение скоростей всасывания воздушного потока на расстоянии $x < b$ для местных отсосов с равномерным распределением скоростей в сечении всасывающего отверстия.

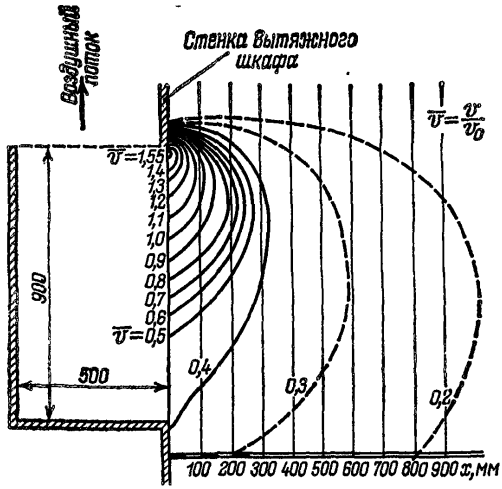


Рис. 4.8. Спектр скоростей всасывания воздушного поля вблизи рабочего окна укрытия шкафного типа (сечение 800×900 мм) при потоке, неравномерно распределенном по сечению

На рис. 4.8 и 4.9 показано распределение скоростей всасывания вблизи рабочего окна укрытия шкафного типа при потоке, неравномерно распределенном по сечению.

Пример 4.3. Определить скорость воздуха по оси потока на расстоянии 0,1 и 0,5 м от всасывающего отверстия местного отсоса.

Исходные данные. Всасывающее отверстие прямоугольного сечения; местный отсос с фланцем. Размер отверстия 300×100 мм. Скорость воздуха во всасывающем отверстии $v_0=5$ м/с.

Решение. Относительные расстояния.

$$\bar{x}=x/b; \qquad \bar{x}_1=100/100=1; \qquad \bar{x}_2=500/100=5.$$

Относительную скорость воздуха на расстоянии 100 мм от отсоса берем по рис. 4.7: $\bar{v}_{x_1}=0,1$; на расстоянии 500 мм — рассчитываем по формуле:

$$\bar{v}_x=\frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\left[\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right];$$

$$\bar{v}_{x_2}=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left[5,0\sqrt{1+\frac{0,1^2}{0,3^2}(1+5,0^2)}\right]=\frac{2}{180}\cdot 5,75=0,064;$$

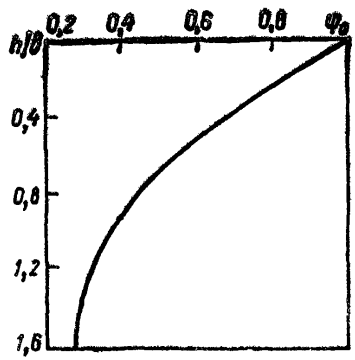
Скорость воздуха на расстоянии x: $v_x=\bar{v}_x v_0$; $v_{x_1}=\bar{v}_x v_0=0,1\cdot 5,0=0,5$ м/с; $v_{x_2}=\bar{v}_x v_0=0,064\cdot 5=0,32$ м/с.

4.2.2. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия прямоугольного сечения (отсос без фланца)

Закономерность расчета затухания скоростей вблизи всасывающего отверстия с острыми кромками при отношении $x>b$ аналогична расчету затухания скоростей для отверстия при отсосе с фланцем [формула (4.17)].

При определении скоростей воздушных потоков вблизи всасывающего отверстия ($x\leqslant b$) следует пользоваться спектрами скоростей всасывания, полученными в эксперименте (рис. 4.10—4.13).

Пример 4.4. Определить скорость воздуха в точке, находящейся на расстоянии $x=0,1$ м от входа в патрубок по оси потока и смещенной на $y=0,1$ м по его узкой стороне.



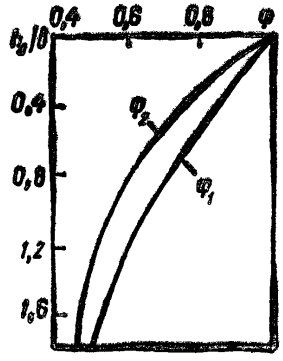


Рис 4.9. График определения скорости всасывания воздушного потока в рабочем окне укрытия шкафного типа ($\varphi_0=v/v_0$; $\varphi_1=v_{ср}/v_0$; $\varphi_2=v_н/v_{ср}$)

Исходные данные. Всасывающий патрубок имеет прямоугольную форму; размер сечения 300×100 мм; фланец отсутствует. Скорость воздуха во всасывающем патрубке $v_0=5$ м/с.

Решение. Относительное расстояние x: $\bar{x}=x/b=0{,}1/0{,}1=1$, где x — расстояние по оси потока. Относительное расстояние $\bar{y}$: $\bar{y}=y/b=0{,}1/0{,}1=1$, где y — смещение точки, в которой нужно определить скорость воздуха, от оси потока по узкой стороне патрубка. Относительная скорость воздуха (по рис. 4.11) $\bar{v}=0{,}1$ м/с. Скорость воздуха в заданной точке: $v=\bar{v}v_0=0{,}1\cdot5{,}0=0{,}5$ м/с.

Пример 4.5. Определить скорость газового потока в зоне дыхания работающего у фасовочного стола.

Исходные данные. Стол снабжен наклонной панелью без козырька. Расстояние от панели до работающего по оси потока $x=0{,}6$ м. Высота наклонной панели $h=0{,}645$ м. Скорость воздуха во всасывающем отверстии панели $v_0=0{,}9$ м/с.

Решение. Относительное расстояние от плоскости всасывания наклонной панели до работающего:

$$\bar{h}=x/h=0{,}6/0{,}645=0{,}93.$$

Относительная скорость воздуха $\bar{v}$ (по рис. 4.13): $v=0{,}08$. Скорость воздуха в заданной точке:

$$v=v_0\bar{v}=0{,}9\cdot0{,}08=0{,}072 \text{ м/с}.$$

4.2.3. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия круглого сечения (отсос с фланцем)

Закон затухания скоростей в зоне всасывающего отверстия для расстояний $x>b$ описывается формулой:

$$\bar{v}_x=1-\bar{x}/\sqrt{1+\bar{x}^2}, \qquad (4.21)$$

где

$$\bar{x}=x/r; \qquad (4.22)$$

x — расстояние по оси факела от рассчитываемой точки до всасывающего отверстия, м; r — радиус всасывающего отверстия, м.

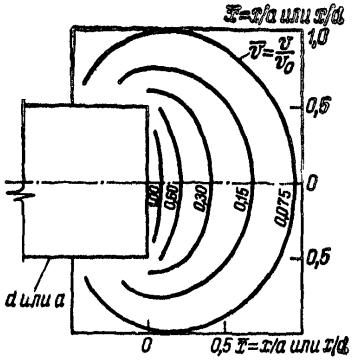


Рис. 4.10. Спектр скоростей всасывания воздушного потока для круглого и квадратного отверстий при отсосе без фланца (d — диаметр, a — сторона квадрата)

При определении скоростей воздушных потоков вблизи всасывающего отверстия ($x \leqslant d$) следует пользоваться спектрами скоростей всасывания, полученными из эксперимента. Спектр скоростей всасывания в зоне действия круглого отверстия представлен на рис. 4.7.

Пример 4.6. Определить скорость воздуха по оси потока на расстояниях 0,3 и 1,0 м от всасывающего отверстия при отсосе с фланцем.

Исходные данные. Диаметр всасывающего отверстия $d=315$ мм. Скорость воздуха во всасывающем отверстии $v_0=6$ м/с.

Решение. Отношения $x_1/d=0{,}3/0{,}315=0{,}95$; $x_2/d=1{,}0/0{,}315=3{,}17$.

Относительная скорость воздуха $\bar{v}_x$ при $x/d<1$, т. е. при $x/d=0{,}95$ составит $\bar{v}_{x_1}=0{,}11$ (см. рис. 4.7). Скорость воздуха на расстоянии 0,3 м:

$$v_{x_1} \approx v_0 \bar{v}_{x_1} = 6{,}0 \cdot 0{,}11 = 0{,}66 \text{ м/с}.$$

Относительное расстояние $\bar{x}$ при $x_2=1$ м:

$$\bar{x}_2 = x_2/r = 1{,}0/0{,}157 = 6{,}37,$$

где

$$0{,}157 = d/2 = 0{,}315/2.$$

Относительная скорость на расстоянии $x_2=1$ м:

$$\bar{v}_{x_2} = 1 - \frac{\bar{x}_2}{\sqrt{1+\bar{x}_2^2}} = 1 - \frac{6{,}37}{\sqrt{1+6{,}37^2}} = 0{,}012.$$

Скорость воздуха на расстоянии x_2:

$$v_{x_2} \approx \bar{v}_{x_2} v_0 = 0{,}012 \cdot 6{,}0 = 0{,}072 \text{ м/с}.$$

4.2.4. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия круглого сечения (отсос без фланца)

Расчет затухания скоростей вблизи всасывающего отверстия круглого сечения без фланца при отношении $x>d$ аналогичен расчету затухания скоростей для круглого отверстия при отсосе с фланцем.

При определении скоростей в воздушных потоках вблизи всасывающего отверстия ($x \leqslant d$) следует пользоваться спектрами скоростей всасывания, полученными из эксперимента (спектрами скоростей всасывания вблизи круглого отверстия).

Пример 4.7. Определить скорость всасывания по оси потока на расстоянии 0,8 м от всасывающего отверстия зонта диаметром 600 мм.

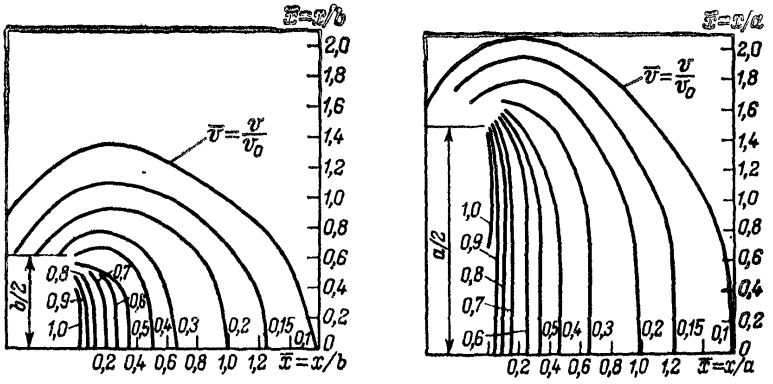


Рис. 4.11. Спектр скоростей всасывания воздушного потока для прямоугольного отверстия с соотношением сторон 1 : 3 при отсосе без фланца

Исходные данные. Средняя скорость воздуха во всасывающем отверстии $v_0=1{,}0$.

Решение. Отношение $\bar{x}=x/d=0{,}8/0{,}60=1{,}33$. Относительное расстояние $\bar{x}$: $\bar{x}=x/r=0{,}8/0{,}3=2{,}66$. Относительная скорость

$$\bar{v}_x=1-\bar{x}/\sqrt{1+\bar{x}^2}=1-\frac{2{,}66}{\sqrt{1+2{,}66^2}}=0{,}07.$$

Скорость воздуха на расстоянии x:

$$v_x=\bar{v}_x v_0=0{,}07\cdot 1=0{,}07 \text{ м/с}.$$

4.2.5. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия кольцевого сечения

Закон затухания в зоне всасывающего отверстия описывается формулой:

$$\bar{v}_x=\frac{\bar{x}_в}{\sqrt{1+\bar{x}^2_в}}-\frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1+\bar{x}^2_н}}, \qquad (4.23)$$

где $\bar{x}_в$ — относительное расстояние для меньшего радиуса кольцевого отверстия:

$$\bar{x}_в=x/r_в; \qquad (4.24)$$

x — расстояние по оси факела от рассчитываемой точки до всасывающего отверстия; $r_в$ — радиус внутреннего кольцевого отверстия, м; $\bar{x}_н$ — относительное расстояние для бо́льшего радиуса кольцевого отверстия:

$$\bar{x}_н=x/r_н; \qquad (4.25)$$

$r_н$ — радиус наружного кольцевого отверстия.

Пример 4.8. Определить скорость воздуха по оси потока на расстоянии 0,4 м от кольцевого всасывающего отверстия.

Исходные данные. Радиус внутреннего кольцевого всасывающего отверстия $r_в=0{,}5$ м. Радиус наружного кольцевого всасывающего отверстия $r_н=0{,}6$ м. Средняя скорость воздуха во всасывающем отверстии $v_0=4{,}0$ м/с.

Решение. Относительное расстояние $\bar{x}_в$:

$$\bar{x}_в=x/r_в=0{,}4/0{,}5=0{,}8.$$

Относительное расстояние $\bar{x}_н=x/r_н=0{,}4/0{,}6=0{,}667$.

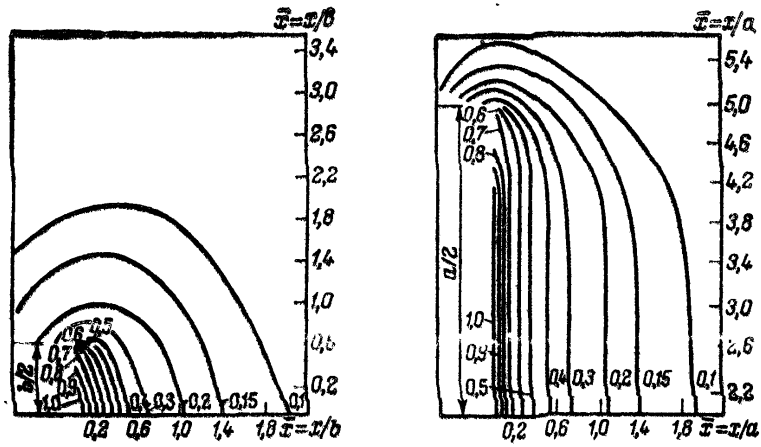


Рис. 4.12. Спектр скоростей всасывания воздушного потока для прямоугольного отверстия с соотношением сторон 1 : 10 при отсосе без фланца

Относительная скорость $\bar{v}_x$:

$$\bar{v}_x = \bar{x}_в/\sqrt{1+\bar{x}^2_в} - \bar{x}_н/\sqrt{1+\bar{x}^2_н} =$$

$$= \bar{v}_x = 0{,}8/\sqrt{1+0{,}8^2} - 0{,}667/\sqrt{1+0{,}667^2} = 0{,}075.$$

Скорость воздуха на расстоянии $x=0{,}4$ м:

$$v_x = \bar{v}_x v_0 = 0{,}075\ 4{,}0 = 0{,}3 \text{ м/с}.$$

4.2.6. Распределение скоростей воздушного потока вблизи всасывающего отверстия зонта

Зонты целесообразно применять тогда, когда подвижность воздуха в помещении незначительна и выделяющиеся вредные вещества легче окружающего воздуха. Для улучшения работы зонты снабжают свесами, откидными или подъемными козырьками (рис. 4.14).

Аэродинамическая характеристика зонта имеет следующие особенности:

1) скорости по осям, перпендикулярным плоскости всасывания, быстро затухают, вследствие того что скорости воздушного потока и подвижность воздуха в помещении примерно одинаковы;

2) изменение скоростей по оси зонта зависит от угла его раскрытия: чем больше угол раскрытия, тем больше осевая скорость по сравнению со средней скоростью:

$$v_{ср} = L/F; \qquad (4.26)$$

3) для зонтов с малым углом раскрытия (60° и меньше) скорость по всему сечению зонта практически одинакова.

Кривая зависимости центральной скорости воздушного потока (в центре зонта) от угла раскрытия зонта приведена на рис. 4.15.

Скорость воздуха в заданной точке рассчитывают по эмпирической формуле, выведенной на основании экспериментов, проведенных в Институте охраны труда:

$$v_{xy} = v_0\left(\bar{v}_x - 0{,}1\frac{\bar{y}^2}{b^3(\bar{x}+0{,}27)\sqrt{\bar{H}}}\right). \qquad (4.27)$$

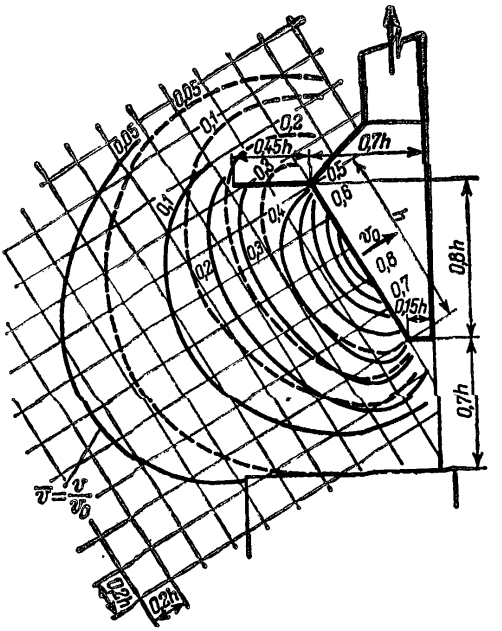


Рис. 4.13. Спектры скоростей всасывания воздушиого потока для наклонной панели с высотой всасывающего отверстия h (сплошные лиинии — спектр скоростей всасывания для панели с козырьком, штриховые — без козырька)

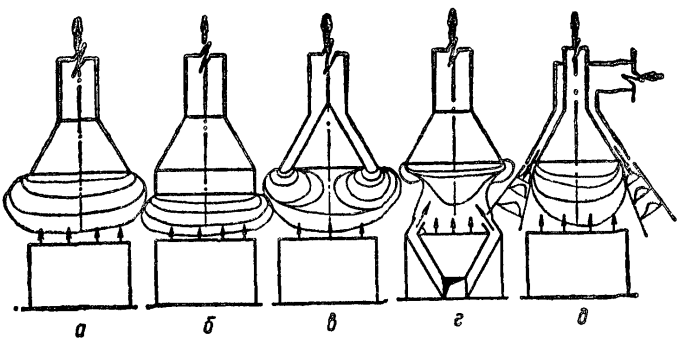


Рис. 4.14. Зоиты различных видов:

а — простой зонт; *б* — зонт с вертикальным бортом; *в* — активный зонт с щелями по периметру; *г* — зонт с поддувом (для уменьшения влияния подвижности воздуха в помещении на работу зонта; α=45—50 °С, чтобы не было налипания струи на поверхность); *д* — модулированный зонт над кухонной плитой

где $v_ц$ — скорость воздушного потока в центре зонта, м/с;

$$v_ц = v_{ср}\eta; \tag{4.28}$$

η — коэффициент, зависящий от угла раскрытия зоита α (см. рис. 4.15);

$\bar{v}_x$ — относительная скорость на расстоянии x от центра зонта;

$$\bar{v}_x = v_x/v_ц; \tag{4.29}$$

значение относительной скорости $\bar{v}_x$ приведено на рис. 4.16 в зависимости от относительного расстояния $\bar{x}$ и эквивалентного диаметра зонта (в м),

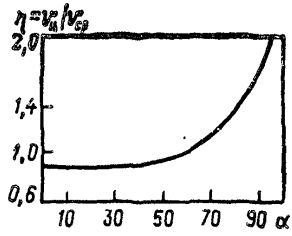


Рис. 4.15. Зависимость центральной скорости воздушного потока от угла раскрытия зонта

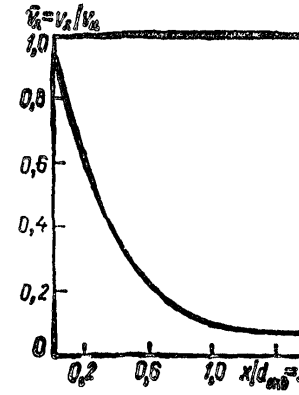


Рис. 4.16. Зависимость относительной скорости $\bar{v}_x$ по оси зонта от относительного расстояния $\bar{x}$

определяемого для прямоугольного сечения по формуле:

$$d_{экв} = 2ab/(a + b); \qquad (4.30)$$

a и b — стороны всасывающего отверстия зонта (в м); $\bar{y}$ — относительное расстояние от центра зонта до определяемой точки по оси y (рис. 4.17); $\bar{b}$ — относительная величина одной из сторон зонта:

$$\bar{b} = b/d_{экв}; \qquad (4.31)$$

$\bar{x}$ — относительное расстояние от центра зонта до определяемой точки по оси x;

$$\bar{x} = x/d_{экв}; \qquad (4.32)$$

$\bar{H}$ — относительная величина высоты зонта;

$$\bar{H} = H/d_{экв}. \qquad (4.33)$$

Пример 4.9. Определить скорость воздуха в расчетной точке A, отстоящей от зонта по оси x на расстоянии 0,4 м и по оси y на расстоянии 0,2 м.

Исходные данные. Размер зонта 0,5×0,5 м. Объем отсасываемого воздуха L=4000 м³/ч. Угол раскрытия зонта α=70°. Зонт обычный (простой).

Решение. Эквивалентный диаметр

$$d_{экв} = 2ab/(a + b) = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}5/(0{,}5 + 0{,}5) = 0{,}5 \text{ м}.$$

Относительное расстояние от центра зонта до определяемой точки по оси x:

$$\bar{x} = x/d_{экв} = 0{,}4/0{,}5 = 0{,}8.$$

Относительная скорость $\bar{v}_x$ по оси зонта. Из рис. 4.16 находим $\bar{v}_x$ при x=0,8: $\bar{v}_x$=0,125.

Средняя скорость в зонте

$$v_{ср} = \frac{L}{F} = \frac{4000}{3600 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}5} = 4{,}45 \text{ м/с}.$$

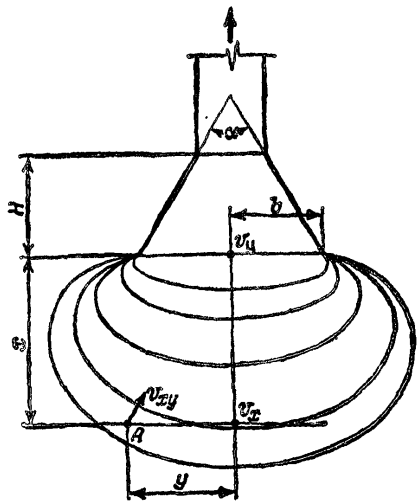


Рис. 4.17. Расчетная схема зонта (*A* — расчетная точка)

Из рис. 4.15 находим коэффициент η при угле раскрытия зонта $\alpha=70°$, который составит $\eta=1{,}15$. Скорость воздуха в центре зонта:

$$v_ц = \eta v_{ср} = 1{,}15 \cdot 4{,}45 = 5{,}12 \text{ м/с}.$$

Скорость воздуха на расстоянии 0,4 м по оси x от центра зонта:

$$v_x = \bar{v}_x v_ц = 0{,}125 \cdot 5{,}12 = 0{,}64 \text{ м/с}.$$

Относительное расстояние $\bar{y}$:

$$\bar{y} = y/d_{экв} = 0{,}2/0{,}5 = 0{,}4.$$

Относительная величина $\bar{b}$:

$$\bar{b} = b/d_{экв} = 0{,}25/0{,}5 = 0{,}5.$$

Относительная величина $\bar{H}$:

$$\bar{H} = H/d_{экв} = 0{,}2/0{,}5 = 0{,}4,$$

где $H=0{,}2$ — высота зонта.
Скорость воздуха в расчетной точке A (в м/с):

$$v_{xy} = v_ц \left(\bar{v}_x - 0{,}1 \frac{\bar{y}^2}{\bar{b}^2 (\bar{x} + 0{,}27) \sqrt{\bar{H}}} \right) =$$

$$= 5{,}12 \left(0{,}125 - 0{,}1 \frac{0{,}4^2}{0{,}5^2 (0{,}8 + 0{,}27) \sqrt{0{,}4}} \right) = 0{,}514 \text{ м/с}.$$

Следует отметить, что формула (4.27) дает возможность рассчитывать скорость воздушного потока для расстояний $x<b$, а также для отклонения по оси $y<b/2$.

4.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ВБЛИЗИ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Причиной возникновения свободной конвекции вблизи теплового источника является неустойчивое распределение плотностей воздуха, обусловленное неравномерностью его нагрева. При этом температурный напор определяет

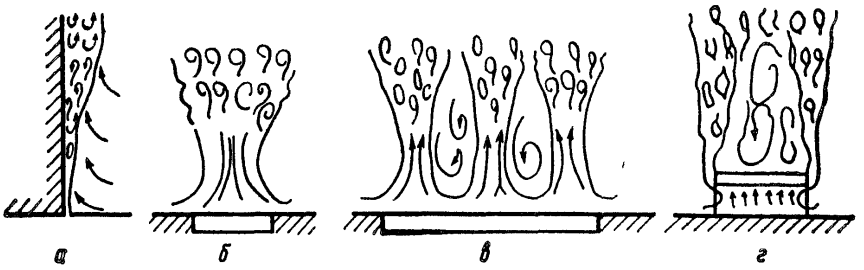


Рис. 4.18. Характер течения среды вблизи тепловых источников в условиях свободной конвекции

разность плотностей и величину подъемной силы, а размер поверхности — зону распространения конвекции.

На рис. 4.18 показаны типовые картины свободного движения нагретого воздуха. Движение нагретого воздуха вдоль вертикальной стенки показано на рис. 4.18, *а*. Около нижней ее части движение имеет ламинарный характер; с повышением температурного напора движение принимает своеобразную локонообразную форму, затем эта переходная форма сменяется развитым турбулентным движением, которое и сохраняется далее на всем протяжении течения воздуха вдоль вертикальной стенки. На рис. 4.18, *б, в, г* показан характер движения воздуха около горизонтальных плоских стенок и плит, обращенных нагретой поверхностью вверх. При большей поверхности (согласно данным В. М. Эльтермана) пластин со сторонами >4 м нагреваемая среда имеет местные восходящие и нисходящие потоки, а при малой поверхности устанавливается один восходящий поток.

Для тех же плит, обращенных нагретой поверхностью вниз, движение воздуха происходит и в тонком слое под поверхностью (рис. 4.18, *г*).

М. А. Михеев, обобщив результаты экспериментов по теплообмену в свободном потоке, подобрал общую зависимость между критериями подобия в форме следующего уравнения, которое можно использовать для инженерных расчетов:

$$\mathrm{Nu} = C(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})^n, \qquad (4.34)$$

Числовые значения констант C и n даны ниже:

Gr Pr	C	n
10^{-3}—$5\cdot10^2$	1,18	0,125
$5\cdot10^2$—$2\cdot10^7$	0,54	0,25
$2\cdot10^7$—10^{13}	0,135	0,33

Применяя уравнение (4.34), нужно иметь в виду следующее:

1) наилучшее совпадение теории с опытом дают численные значения

$$\mathrm{Pr} \geqslant 0{,}7;$$

2) все физические константы (γ, λ, β), входящие в состав критериев, отнесены к температуре t_m, которая представляет собой среднюю арифметическую между температурами поверхности тела и среды;

3) в качестве определяющего размера в критериях принимается: для труб и шаров — их диаметр; для вертикальных поверхностей — их высота; для горизонтальных плит — их диаметр или меньшая сторона. Если теплоотдающая поверхность обращена вверх, то значение коэффициента теплоотдачи, полученное из формулы (4.34), увеличивают на 30%, если же теплоотдающая поверхность обращена вниз, то уменьшают на 30%;

4) в области значений аргумента $(Gr \cdot Pr) < 10^{-3}$ критерий Nu практически сохраняет постоянное значение, равное примерно 0,5, т. е.

$$\alpha = 0{,}5\frac{\lambda}{d}. \tag{4.35}$$

Последнее свидетельствует о том что в этих условиях процесс теплообмена полностью обусловлен явлениями теплопроводности, а следовательно, носит диффузионный характер;

5) три значения показателя степени n=0,125; 0,25 и 0,33 соответствуют трем режимам движения теплоносителя: ламинарному (n=0,125), локонообразному (n=0,25) и турбулентному (n=0,33).

При расчетах эффективности улавливания тепла местными отсосами можно воспользоваться следующими формулами для определения количества конвективного тепла, поступающего в помещение при естественной вытяжке

от горизонтальной поверхности

$$Q_г = 1{,}3F_г k \sqrt[3]{(t_п - t_в)^4}; \tag{4.36}$$

от вертикальной поверхности:

$$Q_в = kF_в \sqrt[3]{(t_п - t_в)^4}, \tag{4.37}$$

где k — коэффициент, принимаемый в зависимости от температуры:

t, °С	50	100	200	300	400	500	1000
k	1,63	1,58	1,53	1,45	1,4	1,35	1,18

$F_г$ и $F_в$ — площадь горизонтальной и вертикальной теплоотдающих поверхностей, м²; $t_п$ — температура нагретой поверхности, °С, $t_в$ — температура воздуха в помещении, °С.

При наличии горизонтальной и вертикальной теплоотдающей поверхностей общее теплопоступление определяется как их сумма:

$$Q = Q_г + Q_в \tag{4.38}$$

При расчете тепловыделения при испарении (при вынужденной конвекции воздуха), а также при наличии тепла, поступающего от химической реакции, расчеты следует проводить в соответствии с закономерностями, присущими данным процессам.

Ниже более подробно рассмотрен характер тепловых струй над горизонтальными тепловыми источниками, имеющими местные отсосы для локализации тепла, поступающего от них в производственные помещения. Условно горизонтальные тепловые источники можно подразделить на источники, заделанные заподлицо с плоскостью (рис. 4.18, *б* и *в*), и источники, установленные на основании (рис. 4.18, *г*).

На рис. 4.19 показаны схемы тепловых струй над горизонтальными тепловыми источниками. Условно тепловая струя разделена на участки.

Пограничный слой состоит из ламинарного подслоя, расположенного вблизи нагретой пластины, и основного пограничного слоя. В пограничном ламинарном подслое движение происходит вдоль горизонтальной плоскости (для источника, заделанного заподлицо с плоскостью) и вдоль вертикальной плоскости для источника, установленного на основании источника. Тепло от источника в этом подслое передается теплопроводностью. Толщина пограничного слоя для круглого источника:

$$l_1 = 0{,}2d; \tag{4.39}$$

для прямоугольного источника со сторонами a и b при $b < a$

$$l_1 = 0{,}2b. \tag{4.40}$$

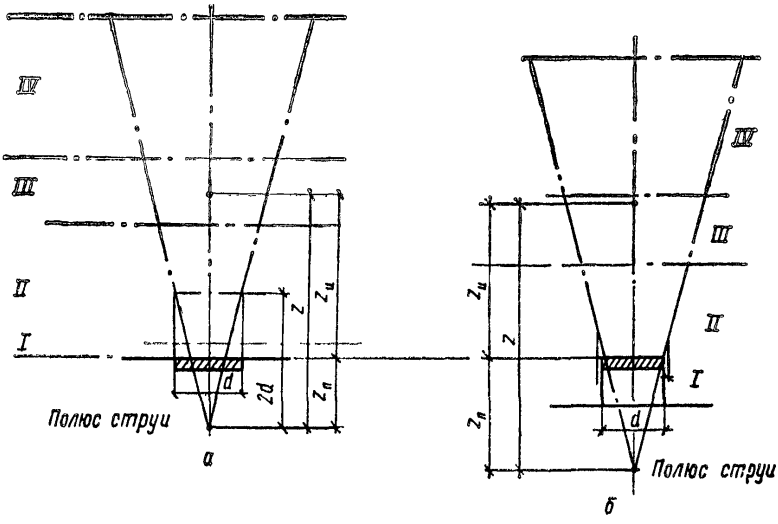


Рис. 4.19 Схемы тепловых струй над горизонтальными тепловыми источниками:

а — тепловой источник установлен заподлицо с плоскостью; *б* — то же, на основании; *I* — пограничный слой; *II* — участок разгона; *III* — переходный участок; *IV* — основной участок

По приближенным данным американских инженеров начальный объем воздуха L_0 в тепловой струе, поднимающейся над источником, составляет м³/с:

$$L_0 = 0{,}405 \sqrt[3]{QF^2H}, \qquad (4.41)$$

где Q — количество тепла, выделяющегося от источника (конвективного), кДж/с; F — горизонтальная проекция источника выделения тепла, м²; H — расстояние от источника до рассматриваемой точки в пределах пограничного слоя, м.

Согласно результатам проведенных в СССР опытов (В. М. Эльтерман) количество воздуха, подтекающего в пределах пограничного слоя к круглой пластине, заделанной заподлицо с плоскостью, составляет, м³/ч:

$$L_0 = 6{,}7d^{5/3}Q^{1/3}, \qquad (4.42)$$

где d — диаметр пластины, м; Q — конвективное тепло, выделяемое пластиной, кДж/ч.

Интенсивность подтекания воздуха (расход его на единицу длины струи) в пределах пограничного слоя больше, чем в вышележащей части тепловой струи.

Над пограничным слоем находится разгонный участок *II* (или участок формирования), являющийся первым участком тепловой струи.

Пределы разгонного участка:

$$1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2, \qquad (4.43)$$

где z — расстояние от полюса струи теплового источника до рассматриваемой точки, м;

$$z = z_п + z_и; \qquad (4.44)$$

$z_п$ — расстояние от полюса струи до теплового источника, м;

для теплового источника, заделанного заподлицо,

$$z_н = d; \tag{4.45}$$

для теплового источника, установленного на основании,

$$z_н = 1{,}7d; \tag{4.46}$$

$z_н$ — расстояние от источника до рассматриваемой точки, м.

На разгонном участке скорость струи пропорциональна корню квадратному из действующей подъемной силы, которая в свою очередь пропорциональна избыточной температуре Δt. Поэтому в любой точке поперечного сечения тепловой струи на разгонном участке скорость

$$v \infty \sqrt{\Delta t}. \tag{4.47}$$

Согласно результатам исследований, проведенных В. Н. Посохиным, осевая скорость тепловой струи определяется:

для осесимметричной струи, образующейся над источниками компактной формы (при круглом источнике или прямоугольном с соотношением сторон не более чем 1 : 2),

$$v_m = 0{,}0425(Q/r)^{1/3}(x/r)^{1/3}, \tag{4.48}$$

или

$$v_m = 0{,}0622(Qx/F)^{1/3}; \tag{4.49}$$

для плоской струи, образующейся над вытянутым тепловым источником,

$$v_m = 0{,}03Q^{1/3}(x/b)^{0{,}38},$$

где Q — количество конвективного тепла, выделяющегося от источника, Вт; r — радиус источника выделения тепла, м; для прямоугольного источника $r = r_{экв}$ (эквивалентный по площади радиус);

$$r_{экв} = 0{,}564\sqrt{ab};$$

a и b — стороны прямоугольного источника выделения тепла (b — меньшая сторона); x — расстояние от источника до рассматриваемой точки, м.

Скорость теплового потока в любой точке струи определяется из выражения:

$$v = v_m(\Delta t/\Delta t_m)^n, \tag{4.50}$$

где Δt — избыточная температура в любой точке струи, °С; Δt_m — избыточная температура на оси струи, °С; n — показатель степени;

$$n = 1/\mathrm{Pr}; \tag{4.51}$$

Pr — критерий Прандтля.

На разгонном участке наблюдается некоторая поджатость струи на расстоянии x, равном $1{,}5d$ источника, где осевая скорость достигает своего максимума. Начиная с этого сечения, скорость постепенно убывает.

Для инженерных расчетов эффективности местных отсосов, расположенных в зоне разгонного участка, можно считать, что скорость в любой точке струи в пределах ее границ является величиной постоянной:

$$v = v_m = \mathrm{const}. \tag{4.52}$$

Количество воздуха в тепловой струе на ее разгонном участке определяется по формуле:

$$L_x = 1{,}16[89(z/d)^{2/3} - 72]d^{5/3}Q^{1/3}. \tag{4.53}$$

По другим данным (работы И. А. Шепелева и В. М. Эльтермана) расход воздуха в осесимметричной конвективной струе, образующейся над ис-

Таблица 4.2. Формулы для расчета основного участка тепловой струи

Определяемая величина	Формула	Коэффициенты пропорциональности для нагретой пластины		Размерность коэффициентов пропорциональности
		заделанной заподлицо с плоскостью	установленной на основании	
Расстояние от нагретой пластины до полюса струи, м	$z_п = \Pi d$	$\Pi = 1$	$\Pi = 1{,}7$	—
Скорость на оси струи, м/с	$v_m = Cd^{1/3}\Delta t_п (z/d)^{1/3}$;	$C = 0{,}136$	—	$м^{2/3} \cdot с \cdot К^{4/9}$
	$v_m = C_1 Q^{1/3} z^{-1/3}$	$C_1 = 0{,}13$	$C_1 = 0{,}168$	$м^{4/3} \cdot с \cdot Вт^{1/3}$
Максимальная скорость на оси струи, м/с	$v_{m\max} C_2 d^{1/3} \Delta t^{4/9}$	$C_2 = 0{,}095$	—	$м^{2/3} \cdot с \cdot К^{4/9}$
	$v_{m\max} C_3 Q^{1/3} d^{-1/3}$	$C_3 = 0{,}093$	$C_3 = 0{,}115$	$м^{4/3} \cdot с \cdot Вт^{1/3}$
Избыточная температура на оси струи, К	$\Delta t_m = B\Delta t^{8/9}\left(\frac{z}{d}\right)^{-5/3} d^{-4/3}$	$B = 0{,}55$	—	$м^{1/3} \cdot К^{1/9}$
	$\Delta t_m = B_1 Q^{2/3} z^{-5/3}$	$B_1 = 0{,}53$	$B_1 = 0{,}415$	$К \cdot м^{5/3}/Вт^{2/3}$
Скорость в любой точке струи, м/с	$v = v_m e^{-m(y/z)^2}$	$m = 81$	$m = 90$	—
Избыточная температура в любой точке струи, К	$\Delta t = \Delta t_m e^{-p(y/z)^2}$	$p = 105$	$p = 100$	—
Расход воздуха в струе, $м^3/ч$	$L = C_4 d^{7/3} \Delta t_п^{4/9} \left(\frac{z}{d}\right)^{5/3}$	$C_4 = 19$	—	$м^{2/3}/(К^{4/9} \cdot ч)$
Мощность кинетической энергии тепловой струи, Вт	$L = C_5 Q^{1/3} z^{5/3}$	$C_5 = 18{,}4$	$C_5 = 21{,}2$	$м^{4/3}/(Вт^{1/3} \cdot ч)$
	$E = C_6 d^2 \Delta t_п^{4/3} z$	$C_6 = 19{,}6 \cdot 10^{-6}$	—	$Вт/(м^3 \cdot К^{4/3})$
		$C_6 = 2 \cdot 10^{-6}$		$кгс/(м^2 \cdot с \cdot К^{4/3})$
	$E = C_7 Q z$	$C_7 = 18{,}3 \cdot 10^{-6}$	$C_7 = 34{,}3 \cdot 10^{-6}$	$1/м$

Примечание. В таблице приведены значения коэффициентов пропорциональности C и B в системе СИ (поток тепла и мощность кинетической энергии тепловой струи — в Вт). Все линейные размеры в формулах даны в метрах.

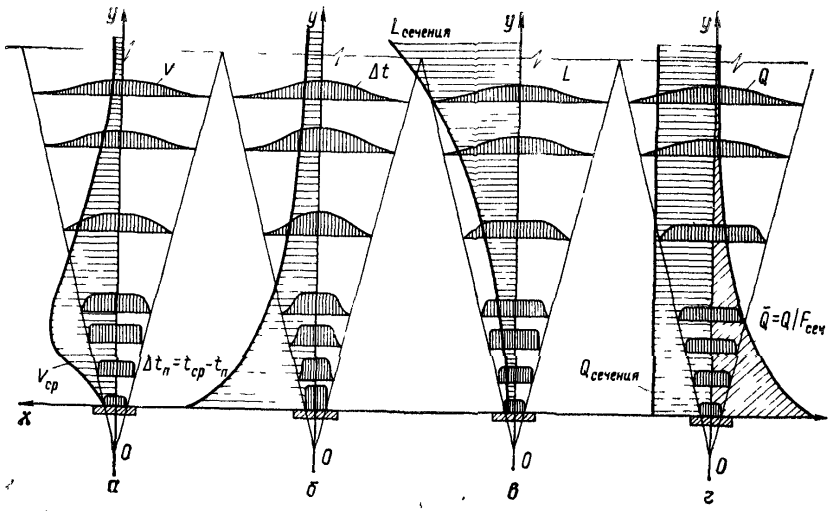


Рис. 4.20. Изменение параметров в различных сечениях тепловой струи.
а — изменение скорости *v*; *б* — температуры *t*; *в* — расхода воздуха *L*; *г* — количества тепла *Q*

точником тепловыделений, можно определить по формуле, м³/ч:

$$L_x = 13{,}6\sqrt[3]{Qx^5}\,, \tag{4.54}$$

а скорость на оси конвективной струи — по формуле:

$$v_m = 0{,}10\sqrt[3]{Q/x}, \tag{4.55}$$

где Q — количество конвективного тепла, выделяемого источником, кДж/ч; x — расстояние от верха нагретой поверхности источника до рассматриваемого сечения струи, м.

Следующий за разгонным идет переходный участок *III* (см. рис. 4.19), характеризуемый изменением профиля скоростей избыточных температур. Пределы переходного участка:

$$3{,}2 < z/d \leqslant 7. \tag{4.56}$$

Изменение скорости, а следовательно, и расхода воздуха на данном участке объясняется значительным изменением турбулентности, характеризуемым в формуле (4.50) показателем степени n, который изменяется в пределах участка от 0,5 до 1,66. При показателе, равном 1,66, можно считать, что начался основной участок *IV*, для которого

$$z/d > 7. \tag{4.57}$$

В табл. 4.2 приведены формулы для расчетов тепловых струй, распространяющихся в наружном воздухе при $\rho = 1{,}2$ кг/м³. Для инженерных расчетов можно считать, что секундное количество тепла в каждом сечении остается постоянным и равняется, кДж/ч

$$Q = L\rho_{ср}c_{ср}(t_{ср} - t_{окр}), \tag{4.58}$$

где L — объем воздуха, проходящего через рассматриваемое сечение, м³/ч; $\rho_{ср}$ — плотность газов в сечении, кг/м³; $c_{ср}$ — средняя теплоемкость газов в

сечении, кДж/(кг·К); $t_{ср}$ — средняя температура по сечению, °С; $t_{окр}$ — температура окружающей среды, °С.

Расход воздуха в конвективной струе, образующейся около нагретой вертикальной поверхности, на единицу ширины поверхности определяется по формуле, м³/ч:

$$L_x = 7{,}6\sqrt[3]{Qx^4}, \tag{4.59}$$

а максимальная скорость в такой струе

$$v_m = 0{,}053\sqrt[3]{Qx}, \tag{4.60}$$

где Q — количество тепла, отдаваемого конвекцией единицей площади поверхности, кДж/м² ч; x — расстояние от низа греющей поверхности до рассматриваемого поперечного сечения струи, м.

Исходя из рассмотренных зависимостей, на рис. 4.20 представлены графики изменения температуры, скорости, расхода и количества тепла в различных сечениях тепловой струи.

Представленные выше закономерности распространения тепловых струй и их характеристики позволяют подойти к рассмотрению вопроса их локализации и удаления из рабочей зоны производственных помещений.

Глава 5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИИ

В последние десятилетия изучению распределения вредных веществ в атмосферном воздухе уделялось большое внимание. В основном изучались закономерности распространения вредных веществ в наружном атмосферном воздухе от низких и высоких источников газовых выбросов. Целью таких работ является расчет загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха газообразными и пылевыми промышленными выбросами и из сравнения полученных результатов расчета с предельно допустимыми концентрациями населённых мест ($ПДВ_{н.м.}$) — определение предельно допустимых выбросов для промышленных предприятий (ПДВ), а также мероприятий по их соблюдению.

Не менее важными, а можно сказать даже более важными, так как они являются исходными для определения загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха промышленными газовыми и пылевыми выбросами, являются задачи расчета количеств выделяющихся вредных веществ из технологического оборудования, а также распределение вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений вблизи мест их выделения. Изучение распределения вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений связано с необходимостью решения важнейших задач техники безопасности — обеспечение требуемых санитарно-гигиенических условий на рабочих местах (соблюдение предельно допустимых концентраций в рабочей зоне $ПДК_{р.з}$) и охрана окружающей среды (соблюдение предельно допустимых концентраций в населенных местах $ПДК_{н.м.}$, установление предельно допустимых выбросов для промышленных предприятий ПДВ и мероприятий по их соблюдению)

При изучении распределения вредных веществ в воздухе производственных помещений возможны два направления: экспериментальное и аналитическое. Цель экспериментальных работ — определение полей концентраций газообразных или пылевых вредных веществ, полей температур, оптимального объема удаляемого воздуха общеобменной или местной системой вентиляции, конструкции и схемы установки местных отсосов с учетом характеристик и взаимного расположения технологического оборудования, а также с учетом теплонапряженности, подвижности воздуха в производственном помещении и класса опасности вредного вещества (в соответствии с ГОСТ 12.1—007—76).

Экспериментальное направление является наиболее достоверным, но оно требует проведения большого числа измерений различных параметров по источникам выделений вредных веществ и теплопоступлений, по общеобменным и местным системам вентиляции, а также по геометрическим характеристикам производственного помещения. Данное направление наиболее приемлемо для решения практических задач в существующих производственных помещениях.

Для вновь проектируемых производств распределение вредных веществ в производственном помещении может быть получено моделированием размещения технологического оборудования, систем вентиляции, источников поступления вредных веществ и проведением испытаний на данной модели при различных технологических режимах работы (нормальный режим, аварийная ситуация, режим в период неблагоприятных метеорологических условий). Следует, однако, отметить сложность, длительность и дороговизну разработки макета технологического производства, режимов его работы, систем вентиляции и сложность обобщения и переноса экспериментальных данных на реальную обстановку.

Аналитическое решение, так же как и экспериментальное, не является простым, поскольку необходимо учитывать большое число взаимозависимых параметров, относящихся к технологическому оборудованию, системам вентиляции и помещению, но дает возможность определять распределение вредных веществ для вновь проектируемых или реконструируемых производств.

Распределение вредных веществ и полей температуры зависит от расположения приточных и вытяжных отверстий, источников газо-, влаго- и тепловыделений, характера их работы и т. д.

Общее представление о характере движения воздуха в случае изотермического режима (температура приточного воздуха равна температуре помещения — источники нагрева и охлаждения в помещении отсутствуют) дает рис. 5.1 (результаты опытов В. В. Батурина и В. И. Ханжонкова). Как видно из рис. 5.2, потоки воздуха, образующиеся при вентиляции помещения, характеризуются высокой степенью турбулентности, влияние которой на распределение концентраций примесей нельзя не учитывать. Поэтому ниже рассматриваются такие вопросы, как турбулентность воздушных потоков помещений, распределение скоростей на входе во всасывающие отверстия местных отсосов вентиляции, распределение вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений, поля концентраций вредных веществ вблизи источников их выделения.

Аналитический метод расчета полей концентраций вредных веществ дает возможность решать следующие задачи:

определение количеств вредных веществ, выделяющихся из технологического оборудования и поступающих в производственное помещение и за его пределы — в окружающую среду;

определение эффективности работы технологических и вентиляционных местных отсосов;

определение объемов удаляемого воздуха общеобменной системой вентиляции;

определение применимости того или иного технологического оборудования, места его установки, исходя из его герметичности;

определение оптимальной конструкции схемы установки и объема удаляемого воздуха технологическим или вентиляционным местным отсосом;

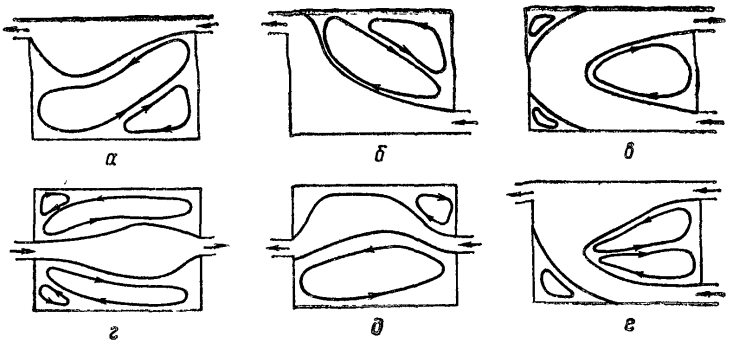


Рис. 5.1. Движение воздушных потоков при различных способах размещения приточных и вытяжных отверстий:

а — поток сверху вверх (или снизу вниз); *б* — поток снизу вверх при размещении приточного и вытяжного отверстий в противоположных сторонах помещения; *в* — то же, но в одной стороне помещения; *г* — при симметрии газовых потоков; *д* — при несимметричных газовых потоках; *е* — при наличии двух приточных струй

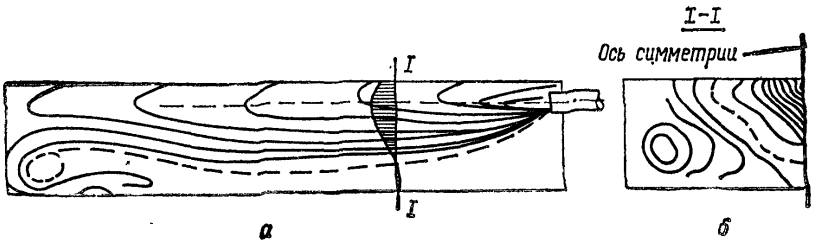


Рис. 5.2. Эпюра распространения скоростей воздушного потока в помещении с приточным отверстием:

а — разрез по продольной оси помещения; *б* — поперечное сечение *I—I*

определение концентрации вредных веществ на рабочем месте в производственном помещении.

Решение этих задач позволит выбрать мероприятия для соблюдения предельно допустимых концентраций на рабочих местах и в населенном пункте, установить оптимальные объемы воздуха, удаляемого общеобменной и местной системами вентиляции, а следовательно, и рационально использовать топливно-энергетические ресурсы страны.

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Классификация методов расчета распределения вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений с учетом наиболее характерных особенностей источников поступления вредных веществ и типов технологических или вентиляционных местных отсосов представлена на рис. 5.3. В последующих разделах этой главы даны некоторые методы расчета эффективности работы местных отсосов в соответствии с приведенной классификацией.

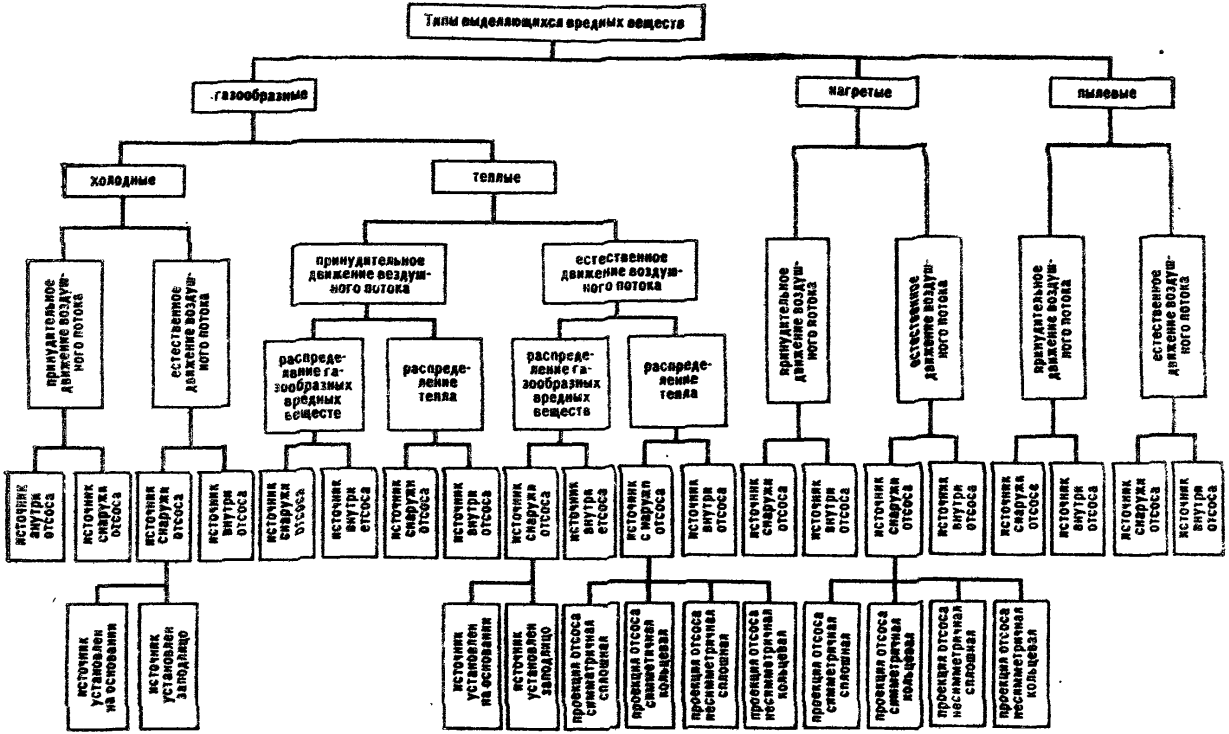


Рис. 5.3. Классификация методов расчета распределения вредных веществ в атмосферном воздухе производственных помещений

5.2. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ХОЛОДНОГО ЗАГРЯЗНЕННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Расчет эффективности местных отсосов основан на решении уравнений распространения вредных веществ во встречном потоке воздуха диффузией. С достаточной для практических расчетов точностью можно считать, что в среде, в которой происходит выделение вредных веществ (в помещении), наблюдаются беспорядочные потоки воздуха, вызванные движущимися предметами, приточными и тепловыми струями.

Беспорядочные потоки воздуха в помещении характеризуются коэффициентом турбулентного обмена A (см. гл. 4). Концентрация вредных веществ во встречном потоке воздуха на некотором расстоянии x от источника их выделения определяется по формуле, мг/м³:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x}, \tag{5.1}$$

где k — коэффициент пропорциональности, учитывающий диффузионную способность вещества:

$$k = \sqrt{M_1/M_2}; \tag{5.2}$$

M_2 — молярная масса рассматриваемого вещества; M_1 — молярная масса воздуха; x — расстояние от центра источника выделения вредных веществ до места поступления воздуха в местный отсос, м; v — скорость воздушного потока во всасывающем отверстии местного отсоса, м/с; C_0 — средняя массовая концентрация вредного вещества над центром источника выделения, мг/м³;

$$C_0 = G_0/L; \tag{5.3}$$

G_0 — количество выделяющегося вредного вещества, мг/ч; L — объем воздуха, проходящего через всасывающее отверстие местного отсоса, м³/ч; A_x — коэффициент турбулентного обмена в месте поступления вредного вещества в помещение (во всасывающем отверстии местного отсоса), м²/с; величина e^{vx/A_x} в зависимости от vx/A_x приведена в Приложении II.

Следует отметить, что формула (5.1) учитывает распределение концентраций вредных веществ во встречном потоке воздуха и дает меньшую погрешность, когда приточные струи не направлены непосредственно в отверстия местных отсосов; подвижность воздуха в помещении значительно (в 5—10 раз) меньше скоростей во всасывающем отверстии и фоновые концентрации $C_ф$ меньше концентраций вредных веществ, образующихся непосредственно над источником выделения.

Для определения эффективности работы местного отсоса с источником выделения вредных веществ, расположенным снаружи местного отсоса, и скорости воздушного потока, превышающей на дальнем конце источника подвижность воздуха в помещении ($v \geqslant v_п$), в формулу (5.1) подставляют следующие величины (рис. 5.4, *а*): x — расстояние от центра источника выделения до дальнего его конца, м; v — скорость воздушного потока на дальнем конце источника выделения вредных веществ, м/с; C_0 — средняя массовая концентрация вредного вещества над центром источника выделения, мг/м³; G_0 — количество выделяющегося вредного вещества, мг/ч; L — объем воздуха, проходящего через центр источника выделения, м³/ч:

$$L = Fv_1 \cdot 3600; \tag{5.4}$$

F — площадь всасывающего отверстия местного отсоса, м²; v_1 — скорость воздушного потока над центром источника выделения вредных веществ, м/с; A_x — коэффициент турбулентного обмена на дальнем конце источника выделения вредных веществ, м²/с. При $v < v_п$ в формулу (5.1) подставляют

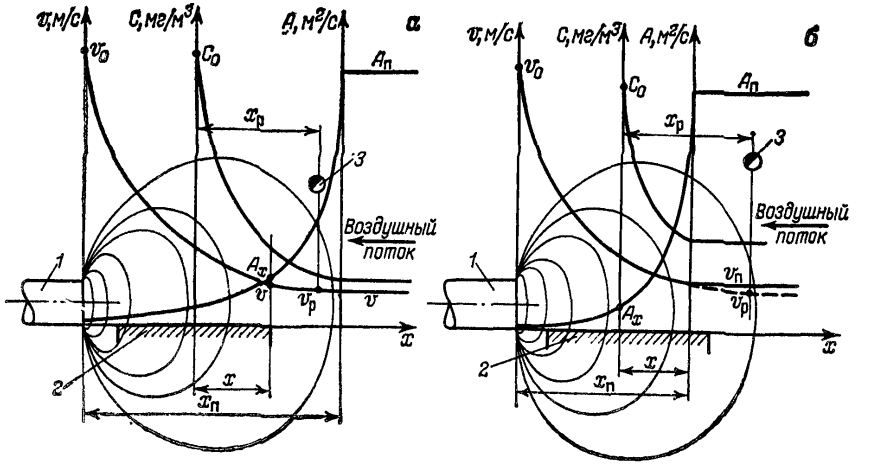


Рис. 5.4. Распределение основных характеристик воздушного потока вблизи источника выделения вредных веществ, расположенного снаружи местного отсоса:

а — при больших объемах отсасываемого воздуха; *б* — при малых объемах; *1* — местный отсос; *2* — источник выделения вредных веществ; *3* — рабочее место

несколько иные величины (рис. 5.4, *б*): x — расстояние от центра до дальнего конца источника выделения вредных веществ, попадающего в зону действия местного отсоса, м; v — скорость воздушного потока в конце зоны действия отсоса, т. е. где $v=v_п$, м/с; C_0 — средняя массовая концентрация вредного вещества, мг/м³:

$$C_0 = G/L;$$

G — количество выделяющегося вредного вещества с части источника выделения и попадающего в зону действия местного отсоса, мг/ч; L — объем воздуха, проходящего через центр части источника выделения вредных веществ и попадающего в зону действия местного отсоса, м/ч:

$$L = Fv_2 \cdot 3600;$$

v_2 — скорость воздушного потока в центре части источника выделения вредных веществ, попадающей в зону действия местного отсоса, м/с; A_x — коэффициент турбулентного обмена над центром части источника выделения вредных веществ, попадающей в зону действия местного отсоса, м²/с.

Для источника выделения вредных веществ при скорости воздушного потока на его дальнем конце, большей, чем подвижность воздуха в помещении, $v \geqslant v_п$ в формулу (5.1) при расчете концентрации вредных веществ на рабочем месте подставляют $x=x_р$ — расстояние от центра источника выделения вредных веществ до рабочего места (см. рис. 5.4, *а*) и $v=v_р$ — расчетную скорость воздушного потока на рабочем месте, м/с.

Для источника выделения вредных веществ при скорости воздушного потока на его дальнем конце, меньшей подвижности воздуха в помещении, $v<v_п$ при концентрации вредных веществ на рабочем месте в формулу (5.1) подставляют $x=x_р$ — расстояние от центра части источника, попадающей в зону действия местного отсоса, до рабочего места, м (см. рис. 5.4, *б*) и $v=v_р$ — расчетную скорость воздушного потока на рабочем месте, м/с.

Расход вещества, движущегося навстречу потоку воздуха, направляю-

щегося к местному отсосу, определяют по формулам (5.5)—(5.7) в зависимости от относительной скорости $\bar{v}$, равной

$$\bar{v} = v/v_{\text{п}}.$$

При значении относительной скорости $\bar{v} \geqslant 2$ расход вещества определяют ю формуле (5.5), г/ч:

$$G_1 = \frac{L(C_x - C_\Phi)}{\left(1 - e^{-vx/A_x}\right) 1000}, \qquad (5.5)$$

где L — расход воздуха в центре источника выделения вредных веществ, м³/ч; C_Φ — фоновая концентрация определяемого вредного вещества, мг/м. Если относительная скорость $1{,}2 < \bar{v} < 2{,}0$, то расход вещества находят по формуле (5.6), г/ч:

$$G_2 = \frac{L(C_x - C_\Phi)}{1000}. \qquad (5.6)$$

Если относительная скорость $\bar{v} \leqslant 1{,}2$, то расход вещества определяют по формуле (5.7), г/ч:

$$G_1 = \frac{2L(C_x - C_\Phi)\left(1 - e^{-vx/A_x}\right)}{\left(2 - e^{-vx/A_x}\right) 1000}. \qquad (5.7)$$

При скорости воздушного потока над частью источника выделения вредных веществ, меньшей подвижности воздуха в помещении, расход вещества, движущегося в противоположную сторону от источника, равен сумме расходов вещества — расходу от части источника, попадающего в зону действия местного отсоса, и расходу вещества, не попадающего в зону действия местного отсоса.

Эффективность работы местного отсоса определяется по формуле:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100, \qquad (5.8)$$

где G_0 — количество выделяющегося вредного вещества, г/ч; G — количество вредного вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса, г/ч.

Схемы распределения концентраций вредных веществ, скоростей воздушного потока и коэффициент турбулентного обмена на различных расстояниях от местного отсоса приведены на рис. 5.4 для источника, расположенного снаружи местного отсоса, и на рис. 5.5 для источника, расположенного внутри местного отсоса.

При расчете эффективности работы новых проектируемых местных отсосов первоначально расход воздуха принимают, исходя из рекомендуемых скоростей воздуха в рабочем проеме местного отсоса.

Рекомендуемые скорости принимают по таблицам справочника «Вентиляция и кондиционирование воздуха». Исходя из рекомендуемых скоростей рассчитывают расход воздуха $L = Fv$, где F — площадь живого сечения местного отсоса.

Расход воздуха, удаляемого одно- и двухбортовыми отсосами без поддува от ванн, рассчитывают по формуле, м³/ч:

$$L = 1400(0{,}53ba/(b + a) + H_{\text{р}})^{1/3} b a k_1 k_{\Delta t} k_t, \qquad (5.9)$$

где b — ширина ванны, м; a — длина ванны, м; $H_{\text{р}}$ — расчетное расстояние от зеркала испарения вредных веществ до оси щели бортового отсоса, м; k_1 — коэффициент, учитывающий конструкцию бортового отсоса; для двух

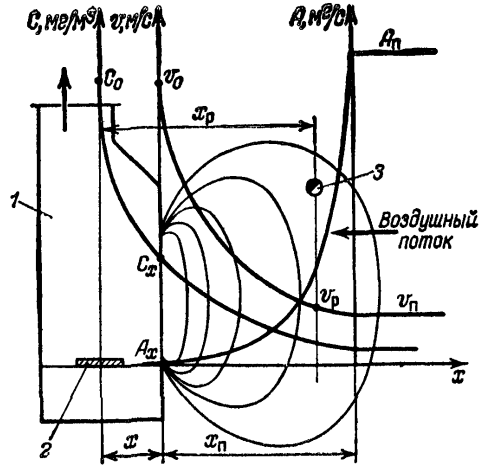


Рис. 5.5. Распределение основных характеристик воздушного потока вблизи источника выделения вредных веществ, расположенного внутри местного отсоса:

1 — укрытие шкафного типа; *2* — источник выделения вредных веществ; *3* — рабочее место

бортового отсоса $k_1=1$; для однобортового отсоса $k_1=0{,}8$; k_t — коэффициент, учитывающий токсичность выделяющихся с поверхности раствора в ванне вредных веществ (см. гл. 2); $k_{\Delta t}$ — коэффициент, учитывающий разность температур Δt раствора и помещения:

Δt, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$k_{\Delta t}$:									
двухбортовой отсос	1	1,16	1,31	1,47	1,63	1,79	1,94	2,1	2,26
однобортовой отсос	1	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24

Пример 5.1. Определить расход воздуха, отсасываемого двухбортовым и однобортовым отсосами без поддува от ванны хромирования.

Исходные данные. Концентрация хромовой кислоты 40 г/л; сила тока $I=500$ *А*. Длина ванны 1,1 м, ширина 0,6 м. Расстояние от зеркала жидкости до оси щели бортового отсоса $H_р=0{,}2$ м. Температура воздуха помещения $t_в=26$ °С. Температура жидкости 56 °С.

Решение. Для двухбортового отсоса $k_1=1{,}0$; для однобортового отсоса $k_1=0{,}8$. Разность температур жидкости и помещения $\Delta t=56-26=30$ °С.

Коэффициент учета разности температур раствора и помещения (см. выше) $k_{\Delta t}=1{,}47$. Коэффициент учета токсичности выделяющихся с поверхности раствора в ванне вредных веществ (см. гл. 2) $k_t=1{,}25$. Расход воздуха, удаляемого отсосом без поддува через однобортовой отсос, определяем по формуле (5.9):

$$L = 1400\left(0{,}53\frac{1{,}1\cdot 0{,}6}{1{,}1+0{,}6}+0{,}2\right)^{1/3} 1{,}1\cdot 0{,}6\cdot 0{,}8\cdot 1{,}47\cdot 1{,}25 = 1000 \text{ м}^3/\text{ч};$$

через двухбортовой отсос

$$L = 1400\left(0{,}53\frac{1{,}1\ 0{,}6}{1{,}1+0{,}6}+0{,}2\right)^{1/3} 1{,}1\cdot 0{,}6\ 1\cdot 1{,}47\cdot 1{,}25 = 1250 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Пример 5.2. Определить эффективность работы местного отсоса в виде приближенного раструба без фланца.

Исходные данные. Размер раструба $ab=200\cdot 200$ мм. Объем удаляемого воздуха через местный отсос $L=630$ м³/ч. Тип источника выделения — линейный (люк). Диаметр люка 250 мм. Количество выделяющейся вредности (хлористого водорода) из люка $G_0=100$ г/ч. Схемы расположения местного отсоса и движения воздушных потоков в помещении приведены на рис. 5.6

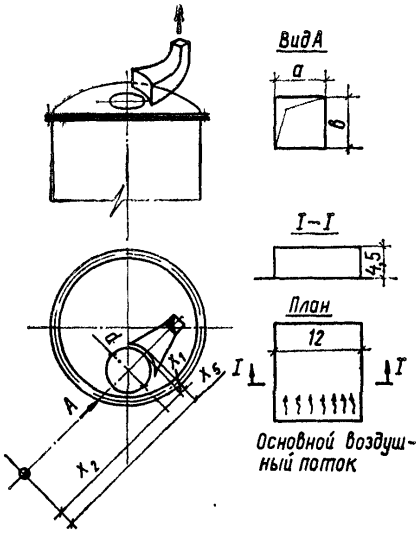


Рис. 5.6. Местный отсос и направление движения основного воздушного потока в помещении

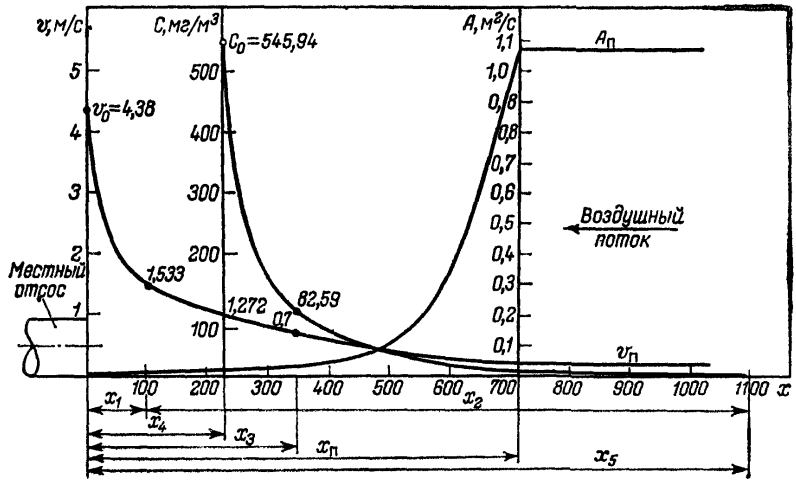


Рис. 5.7. Распределение скоростей воздушного потока, коэффициента турбулентного обмена и концентраций вредных веществ на входе во всасывающее отверстие местного отсоса

и 5.7. Кратность воздухообмена в помещении Кр=10. Приточный воздух подается в помещение через пристенные панельные воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток v=3,0 м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п$=0,2 м/с Объем помещения 1000 м³.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 находим по табл. 4.1; ξ=2,0.

Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{\text{п. с}} = Kp\frac{\xi V^2}{2} = 10\frac{2\cdot 3^2}{2\cdot 3600} = 0{,}025 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия тепловых потоков движущихся предметов:

$$\varepsilon_{\text{т.с}} = \varepsilon_{\text{д.п}} = 0.$$

Скорость входа воздуха в вытяжное отверстие:

$$v_0 = \frac{L}{F} = \frac{630}{0{,}2\cdot 0{,}2\cdot 3600} = 4{,}375 \approx 4{,}38 \text{ м/с}.$$

Кинетическая энергия воздушных потоков помещения:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{п.с}} + \varepsilon_{\text{т.с}} + \varepsilon_{\text{д.п}} = 0{,}025 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер рассматриваемого объекта $l=\sqrt{F}$:
местного отсоса: $l_0=\sqrt{0{,}2\cdot 0{,}2}=0{,}2$ м;
помещения: $l_{\text{п}}=\sqrt{12\cdot 4{,}5}=7{,}35$ м.
Коэффициент турбулентного обмена, м²/с: $A=0{,}25\varepsilon^{1/3}l^{4/3}$:
местного отсоса: $A_0=0{,}25\cdot 0{,}025^{1/3}\cdot 0{,}2^{4/3}=0{,}0085$;
помещения: $A_{\text{п}}=0{,}25\cdot 0{,}025^{1/3}\cdot 7{,}35^{4/3}=1{,}041$.

Расстояние от отсоса до ближайшего края люка: $x_1=0{,}1$ м;

Расстояние от ближайшего к откосу края люка до рабочего места $x_2=1{,}0$ м от отсоса до дальнейшего края люка:

$$x_3 = x_1 + d = 0{,}1 + 0{,}25 = 0{,}35 \text{ м};$$

расстояние от местного отсоса до центра люка:

$$x_4 = x_1 + d/2 = 0{,}1 + 0{,}25/2 = 0{,}225 \text{ м};$$

от отсоса до рабочего места:

$$x_5 = x_1 + x_2 = 0{,}1 + 1{,}0 = 1{,}1 \text{ м}.$$

Относительные расстояния:

$$\bar{x} = x/b;$$

$$\bar{x}_1 = x_1/b = 0{,}1/0{,}2 = 0{,}5;$$

$$\bar{x}_3 = x_3/b = 0{,}35/0{,}2 = 1{,}75;$$

$$\bar{x}_4 = x_4/b = 0{,}225/0{,}2 = 1{,}125;$$

$$\bar{x}_5 = x_5/b = 1{,}1/0{,}2 = 5{,}5.$$

Относительная скорость воздуха: на расстоянии $x \leqslant b$ по рис. 4.10: $\bar{v}_{x_1}=0{,}35$; на расстоянии $x>b$:

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\left[\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right];$$

$$\bar{v}_{x_3} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left[1{,}75\sqrt{1+1\,(1+1{,}75^2)}\right] = 0{,}16;$$

$$\bar{v}_{x_4} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left[1{,}125\sqrt{1+1\,(1+1{,}125^2)}\right] = 0{,}29;$$

$$\bar{v}_{x_5} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left[5{,}5\sqrt{1+1\,(1+5{,}5^2)}\right] = 0{,}02.$$

Скорость воздуха на расстоянии x, м/с:

$$v_x = v_0 \bar{v}_x;$$

$$v_{x_1} = 4,38 \cdot 0,35 = 1,533;$$

$$v_{x_3} = 4,38 \cdot 0,16 = 0,7;$$

$$v_{x_4} = 4,38 \cdot 0,29 = 1,272;$$

$$v_{x_5} = 4,38 \cdot 0,02 = 0,0876.$$

Поскольку скорость на расстоянии x_5 меньше подвижности воздуха в помещении, определяем расстояние, где скорость вблизи всасывающего отверстия равна подвижности воздуха в помещении: $v_x = v_п$, но $\bar{v}_x = v_x/v_0$; подставляя $v_x = v_п$, получим:

$$\bar{v}_x = \frac{v_п}{v_0} = \frac{0,2}{4,38}.$$

В то же время

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi} \operatorname{arcctg}\left[\bar{x}\sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right].$$

Подставляя в данное уравнение $\bar{v}_x$, рассчитанное выше, получим равенство, из которого и определим относительное расстояние $\bar{x}$, где $v_x = v_п$:

$$\bar{v}_x = \frac{0,2}{4,38} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arcctg}\left[\bar{x}\sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right];$$

$$0,0457 = \frac{2}{180} \operatorname{arcctg} y,$$

где $$y = \bar{x}\sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}; \quad \operatorname{arcctg} y = 4,096; \; y = 13,7;$$

$$\bar{x}\sqrt{1 + 1(1+\bar{x}^2)} = 13,7; \qquad \bar{x}^2(2+\bar{x}^2) = 187,69;$$

$$2\bar{x}^2 + \bar{x}^4 = 187,69; \qquad \bar{x}^2 = z;$$

$$z^2 + 2z - 187,69 = 0; \qquad z = 12,736; \qquad \bar{x} = 3,57;$$

$$\bar{x} = x/b; \quad x = x_п = \bar{x}b; \quad x_п = 3,57 \cdot 0,2 = 0,714 \text{ м}.$$

Расстояние от границы, где $v = v_п$, до дальнего края люка:

$$x' = x_п - x_э; \qquad x' = 0,714 - 0,35 = 0,364 \text{ м}.$$

Относительное расстояние:

$$\bar{x}' = x'/b = 0,364/0,2 = 1,82.$$

Относительная скорость воздуха на расстоянии x':

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi} \operatorname{arcctg}\left[\bar{x}\sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right];$$

$$\bar{v}_{x'} = \frac{2}{180} \operatorname{arcctg}\left[1,82\sqrt{1 + 1(1 + 1,82^2)}\right] = 0,149.$$

Скорость воздуха на расстоянии x':

$$v_{x'} = \bar{v}_{x'} v_0;$$

$$v_{x'} = 4,38 \cdot 0,149 = 0,652 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии x:

$$A_x = \frac{A_п v_{(x_п - x)}}{v_0} \cdot \frac{1}{\frac{(A_п v_п / A_0 v_0 - 1)(x_п - x)}{x_п} + 1};$$

$$A_x = \frac{1{,}041 \cdot 0{,}652}{4{,}38} \cdot \frac{1}{\frac{\left(\frac{1{,}04 \cdot 0{,}2}{0{,}0085 \cdot 4{,}38} - 1\right)(0{,}714 - 0{,}35)}{0{,}714} + 1} = 0{,}0463 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расход воздуха в параллельном сечении ко всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x_4 (от местного отсоса до центра люка):

$$L_4 = Fv_4 = 0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 1{,}272 \cdot 3600 = 183{,}17 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Концентрация вредного вещества над центром линейного источника (над люком):

$$C_0 = G/L_4 = 100\,000/183{,}17 = 545{,}94 \text{ мг/м}^3.$$

Концентрация вредного вещества на краю линейного источника:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x},$$

где v — скорость воздуха на наибольшем расстоянии линейного источника от местного отсоса, т. е. в нашем случае $v = v_{x_3} = 0{,}7$ м/с; A_x — коэффициент турбулентного обмена на наибольшем расстоянии от линейного источника до местного отсоса, т. е. $x = x_3$; $A_x = 0{,}0463$ м²/с; k — коэффициент пропорциональности;

$$k = \sqrt{M_1/M_2} = \sqrt{29/36{,}46} = 0{,}892;$$

x — расстояние от центра линейного источника (от центра люка) до дальнего края источника, м;

$$x = d/2 = 0{,}25/2 = 0{,}125 \text{ м}; \qquad C_x = 0{,}892 \cdot 545{,}94 e^{\frac{-0{,}7 \cdot 0{,}125}{0{,}0463}} = 73{,}67 \text{ мг/м}^3.$$

Расход вещества, движущегося в противоположную сторону от местного отсоса при $v/v_п = 0{,}7/0{,}2 = 3{,}5 > 2{,}00$, составит:

$$G = \frac{Fv(c_x - c_ф)\,3{,}6}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}7(73{,}67 - 0) \cdot 3{,}6}{1 - e^{\frac{-0{,}7 \cdot 0{,}125}{0{,}0463}}} = 8{,}747 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100 = \frac{100 - 8{,}747}{100} 100 = 91{,}25 \approx 91\ \%.$$

Зависимость эффективности работы местного отсоса типа «приближенный раструб» от объема отсасываемого воздуха показана на рис. 5.8.

Пример 5.3. Сравнить эффективность работы одно- и двухбортового отсосов от ванны травления размером 600×1100 мм.

Исходные данные. Высота щели бортового отсоса $b = 70$ мм. Объем удаляемого воздуха через местные отсосы $L = 1000$ м³/ч. Количество выделяющегося вещества (хлористого водорода) в обоих случаях $G_0 = 2{,}4$ г/ч. Схема расположения местных отсосов от ванны, а также схема движения воздушных потоков в помещении приведены на рис. 5.9. Кратность воздухообмена в помещении Кр=10. Приточный воздух подается в помещение через при-

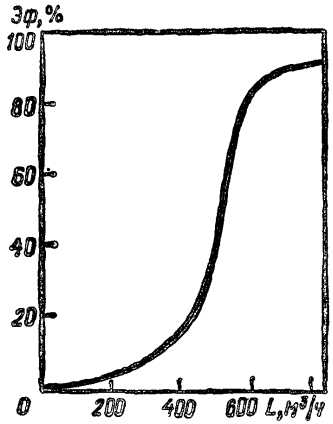


Рис. 5.8. Характер изменения эффективности местного отсоса типа «приближенный раструб» от объема отсасываемого воздуха

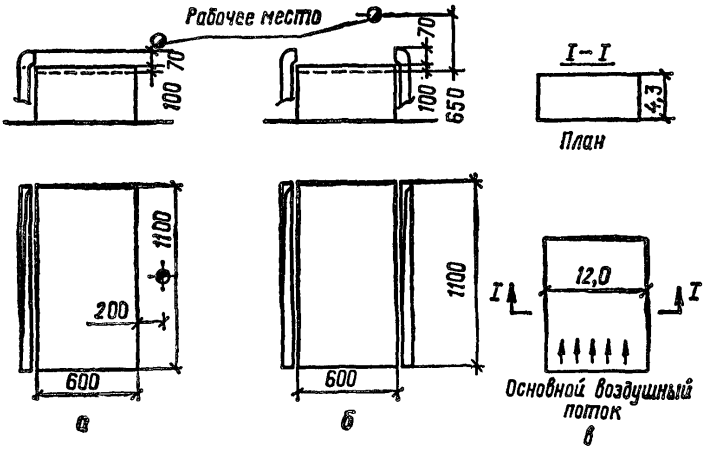


Рис. 5.9. Схемы расположения местных отсосов ванны и движения основных воздушных потоков помещения:

а — однобортовой отсос; *б* — двухбортовой отсос; *в* — план помещения

стенные воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток v_0=2,5 м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п$=0,16 м/с. В помещении имеется источник тепла, установленный на основании. Тепловыделение от источника Q=29 000 Вт. Местный отсос устаиовлен на расстоянии 0,65 м от источника тепловыделения по вертикали. Объем помещения V=450 м³. Фоновая концентрация хлористого водорода в помещении равна нулю: $C_ф$=0.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 по табл. 4.1 ξ=2,0. Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{п.с} = Kp\frac{\xi v^2}{2} = 10\cdot\frac{2\cdot 2{,}5^2}{2\cdot 3600} = 0{,}0174 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Теплонапряженность объема

$$\overline{Q} = Q/V = 29000/450 = 64{,}5 \text{ Вт/м}^3.$$

Плотность воздуха при t=26 °С:

$$\rho = 1{,}155 \text{ кг/м}^3.$$

Расстояние от источника до полюса струи:

$$z_п = 1{,}7d,$$

где d — определяющий размер для теплового источника; принят равным наибольшей стороны ванны d=1,1 м;

$$z_п = 1{,}7 \cdot 1{,}1 = 1{,}87 \text{ м}.$$

Расстояние от источника до рассматриваемой точки: $z_н$=0,65 м.
Расстояние от полюса струи до рассматриваемой точки:

$$z = z_п + z_н = 1{,}87 + 0{,}65 = 2{,}52 \text{ м}.$$

Коэффициент пропорциональности C для пластины, установленной на основании:

$$C = 34{,}3 \cdot 10^{-6}.$$

Количество энергии, вносимой в воздух тепловыми струями:

$$e_{т.с} = C \frac{\overline{Q}}{\rho} z = 34{,}3 \cdot 10^{-6} \frac{64{,}5 \cdot 2{,}52}{1{,}155} = 0{,}00467 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия движущихся предметов $e_{д.п}$=0.

Площадь проема в плоскости кромок двухбортового отсоса с учетом боковых сторон:

$$F = 1{,}1 \cdot 0{,}6 + 0{,}07 \cdot 0{,}6 \cdot 2 = 0{,}744 \text{ м}^2.$$

Скорость воздуха в плоскости верхних кромок двухбортового отсоса:

$$v_0 = L/F = 1000/(0{,}744 \cdot 3600) = 0{,}373 \text{ м/с}.$$

Скорость воздуха во всасывающем отверстии однобортового отсоса:

$$v_0 = 1000/(0{,}07 \cdot 1{,}1 \cdot 3600) = 3{,}6 \text{ м/с}.$$

Энергия воздушных потоков помещения:

$$e = e_{п.с} + e_{т.с} + e_{д.п} = 0{,}0174 + 0{,}00467 =$$
$$= 0{,}02207 \text{ м}^2/\text{с}^3 \text{ (см. рис. 5.9, } б).$$

Расчет эффективности работы двухбортового отсоса. Определяющий размер рассматриваемого объекта:

$$l = \sqrt{F} = \sqrt{1{,}1 \cdot 0{,}07 \cdot 2} = 0{,}38;$$

произведение:

$$e^{1/3} l^{4/3} = 0{,}022^{1/3} \cdot 0{,}38^{4/3} = 0{,}077.$$

Коэффициент турбулентного обмена двухбортового отсоса:

$$A = 0{,}25 \cdot 0{,}077 = 0{,}0193 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расстояние от плоскости испарения вредного вещества до плоскости верхних кромок двухбортового отсоса x_1=0,1 м. Концентрация вредного вещества в воздушном потоке над ванной:

$$c_0 = 2400/1000 = 2{,}4 \text{ мг/м}^3.$$

Коэффициент пропорциональности $k=0{,}892$.

Концентрация вредного вещества в плоскости верхних кромок двухбортового отсоса:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x} = 0{,}892 \cdot 2{,}4 e^{-0{,}373 \cdot 0{,}14/0{,}0193} = 0{,}079 \text{ мг/м}^3.$$

Расход вредного вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

при $v/v_n = 0{,}373/0{,}16 = 2{,}33 > 2{,}00$

$$G = Fv\,(C_x - C_\Phi)\,3{,}6/(1 - e^{-vx/A_x}) =$$

$$= \frac{0{,}744 \cdot 0{,}373\,(0{,}079 - 0) \cdot 3{,}6}{1 - e^{-0{,}373\ 0{,}14/0{,}0193}} = 0{,}153 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100 = \frac{2{,}4 - 0{,}153}{2{,}4} 100 = 93{,}62 \approx 94\ \%.$$

Концентрация вредного вещества на рабочем месте:

$$C_x = C_0 e^{-vx/A_x} = 0{,}892 \cdot 2{,}4 e^{-0{,}373 \cdot 0{,}65/0{,}0193} = 0{,}00001 \text{ мг/м}^3.$$

Распределение скоростей воздушных потоков, коэффициента турбулентного обмена и концентраций вредных веществ на входе во всасывающие отверстия двухбортового отсоса приведено на рис. 5.10. Зависимость эффективности работы двухбортового отсоса ванны от объема отсасываемого воздуха приведена на рис. 5.11.

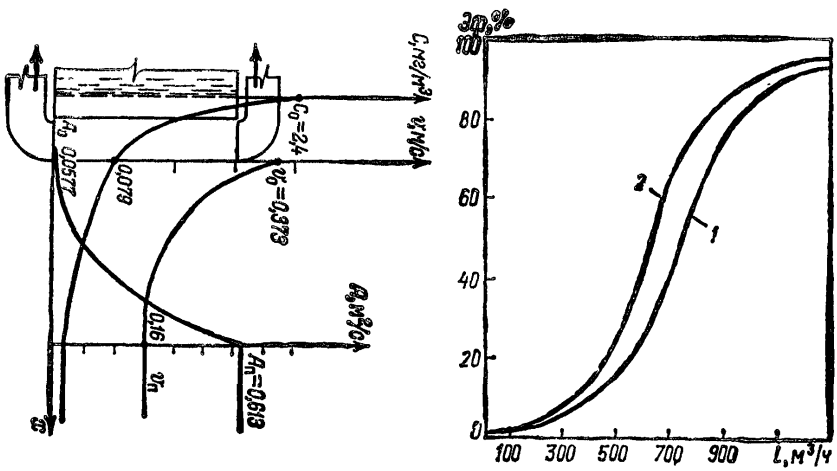


Рис. 5.10. Распределение скоростей воздушных потоков, коэффициента турбулентного обмена и концентраций вредных веществ на входе во всасывающее отверстие двухбортового местного отсоса гальванической ванны

Рис. 5.11. Характер изменения эффективности работы однобортового *1* и двухбортового *2* местного отсоса гальванической ванны в зависимости от объема отсасываемого воздуха

Расчет эффективности работы однобортового отсоса (см. рис. 5.9, *а*). Определяющий размер: рассматриваемого объекта: $l=\sqrt{F}$; помещения: $l_п=\sqrt{6\cdot 4{,}3}=5{,}08$ м; бортового отсоса: $l_0=\sqrt{0{,}07\cdot 1{,}1}=0{,}278$ м.

Произведение $\varepsilon^{1/3}\cdot l^{4/3}$:

однобортового местного отсоса: $0{,}022^{1/3}\cdot 0{,}278^{4/3}=0{,}051$;

помещения: $0{,}022^{1/3}\cdot 5{,}08^{4/3}=2{,}455$.

Коэффициент турбулентного обмена $A=0{,}25\varepsilon^{1/3}l^{4/3}$:

однобортового местного отсоса: $A_0=0{,}25\cdot 0{,}051=0{,}0127$ м²/с;

помещения: $A_п=0{,}25\cdot 2{,}455=0{,}613$ м²/с.

Расстояние от щели бортового отсоса до дальнего края ванны $x_1=0{,}6$ м (рис. 5.12).

Расстояние от дальнего края ванны до рабочего места $x_2=0{,}2$ м.

Расстояние от щели бортового отсоса до рабочего места:

$$x_3 = x_1 + x_2 = 0{,}6 + 0{,}2 = 0{,}8 \text{ м}.$$

Расстояние от бортового отсоса до центра ванны: $x_4=0{,}3$ м.

Относительные расстояния:

$$\bar{x} = x/b; \qquad \bar{x}_1 = 0{,}6/0{,}07 = 8{,}57; \qquad \bar{x}_3 = 0{,}8/0{,}07 = 11{,}43;$$

$$\bar{x}_4 = 0{,}3/0{,}07 = 4{,}285.$$

Относительные скорости воздуха на расстоянии x:

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\left(\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right);$$

$$\bar{v}_{x_1} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left(8{,}57\sqrt{1+\frac{0{,}07^2}{1{,}1^2}(1+8{,}57^2)}\right) = 0{,}064;$$

$$\bar{v}_{x_3} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left(11{,}43\sqrt{1+\frac{0{,}07^2}{1{,}1^2}(1+11{,}43^2)}\right) = 0{,}045;$$

$$\bar{v}_{x_4} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left(4{,}285\sqrt{1+\frac{0{,}07^2}{1{,}1^2}(1+4{,}285^2)}\right) = 0{,}139.$$

Скорость воздушного потока на расстоянии x, м/с:

$$v_x = \bar{v}_x v_0; \qquad v_1 = 3{,}6\cdot 0{,}064 = 0{,}23;$$

$$v_3 = 3{,}6\cdot 0{,}045 = 0{,}162; \qquad v_4 = 3{,}6\cdot 0{,}139 = 0{,}5.$$

Определяем расстояние, где скорость воздушного потока от местного отсоса равна подвижности воздуха в помещении:

$$v_x = v_п,$$

где $v_п$ — подвижность воздуха в помещении, м/с.

Поскольку $\bar{v}_x=v_x/v_0$, подставляя $v_x=v_п$, получим:

$$\bar{v}_x = v_п/v_0 = 0{,}16/0{,}3;$$

В то же время

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\left(\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right),$$

подставляя в данное уравнение рассчитанное выше $\bar{v}_x$, получим равенство, из которого и определим относительное расстояние $\bar{x}$:

$$\frac{0{,}16}{0{,}3} = \frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\left(\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right).$$

Решение данного уравнения (см. пример 5.2) дает $\bar{x}=11{,}4$ м;

$$x = x_{\text{п}} = \bar{x}b,$$

$$x_{\text{п}} = 0{,}07 \cdot 11{,}4 = 0{,}79 \text{ м}.$$

Расстояние от границы, где $v=v_{\text{п}}$, до центра источника выделения (ванны) $x'=x_{\text{п}}-x$, где x — расстояние от местного отсоса до центра источника выделения; $x=0{,}3$ м; $x'=0{,}79-0{,}3=0{,}49$ м.
Относительное расстояние $\bar{x}'=x'/b=0{,}49/0{,}07=7{,}0$.
Относительная скорость воздуха на расстоянии x'

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi} \operatorname{arcctg}\left(x\sqrt{1+\frac{\bar{b}^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}\right);$$

$$\bar{v}_{x'} = \frac{2}{180} \operatorname{arcctg}\left(7{,}0\sqrt{1+\frac{0{,}07^2}{1{,}1^2}(1+7^2)}\right) = 0{,}08.$$

Скорость воздуха на расстоянии x':

$$v_{x'} = \bar{v}_{x'} v_0 = 0{,}08 \cdot 3{,}6 = 0{,}288 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на дальнем краю ванны от местного отсоса

$$A_x = \frac{A_{\text{п}} v_{(x_{\text{п}}-x)}}{v_0} \cdot \frac{1}{\dfrac{A_{\text{п}} v_{\text{п}}/(A_0 v_0 - 1)\,(x_{\text{п}}-x)}{x_{\text{п}}} + 1};$$

$$A_x = \frac{0{,}613 \cdot 0{,}288}{3{,}6} \cdot \frac{1}{\dfrac{(0{,}613 \cdot 0{,}16/0{,}0127 \cdot 3{,}6 - 1)\,(0{,}79-0{,}3)}{0{,}79} + 1} =$$

$$= 0{,}0287 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расход воздуха в сечении, параллельном всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x_4 от местного отсоса до центра ванны:

$$L_4 = F v_4 = 0{,}07 \cdot 1{,}1 \cdot 3600 \cdot 0{,}5 = 138{,}6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Концентрация вредного вещества над центром источника (над ванной):

$$C_0 = G/L_4 = 2400/138{,}6 = 17{,}32 \text{ мг/м}^3.$$

Коэффициент пропорциональности $k=0{,}892$.
Концентрация вредного вещества на расстоянии x:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x};$$

на рабочем месте $C_x = 0{,}892 \cdot 17{,}32 e^{-0{,}23\,0{,}5/0{,}0287} = 0{,}282$ мг/м³; на краю ванны $C_x = 0{,}892\ 17{,}32 e^{-0{,}23 \cdot 0{,}3/0{,}0287} = 1{,}402$ мг/м³.

Расход вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса при $v/v_{\text{п}} = 0{,}23/0{,}16 = 1{,}43 > 1{,}2$:

$$G = L(C_x - C_{\Phi})/1000 = 138{,}6(1{,}402 - 0)/1000 = 0{,}194 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100 = \frac{2{,}4 - 0{,}194}{2{,}4} 100 \approx 92\ \%.$$

Распределение скоростей воздушного потока коэффициента турбулентного обмена и концентраций вредных веществ на входе во всасывающее

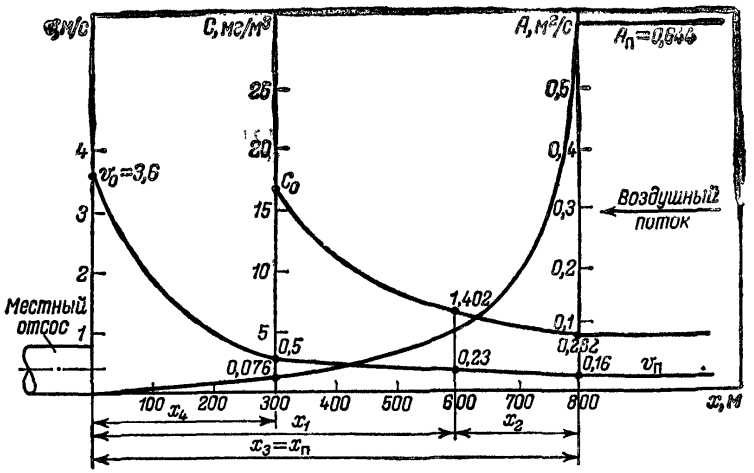


Рис. 5.12. Распределение скоростей воздушного потока, коэффициента турбулентного обмена и концентраций вредных веществ на входе во всасывающее отверстие местного отсоса типа однобортового отсоса гальванической ванны

отверстие местного отсоса типа однобортового отсоса гальванической ванны приведено на рис. 5.12.

Пример 5.4. Сравнить эффективность работы местных отсосов двух типов укрытия шкафного вида и панели Черноберезского без фланца при одинаковых объемах удаляемого воздуха $L=2480$ м³/ч.

Исходные данные. Количество выделяющейся вредности (ацетона) в обоих случаях $G_0=50$ г/ч. План помещения и схемы местных отсосов приведены на рис. 5.13. Кратность воздухообмена в помещении $Kp=8$. Приточный воздух подается через потолочный воздухораспределитель типа ВДШ Скорость выхода воздуха из воздухораспределителя $v=3{,}0$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}1$ м/с. Скорость воздушного потока в сечении панели Черноберезского $v_0=4{,}0$ м/с. Объем помещения 500 м³.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление приточного воздухораспределителя типа ВДШ $\xi=1{,}3$.

Энергия приточных струй.

$$e_{п.с}=Kp\frac{\xi v^2}{2}=8\,\frac{1{,}3\cdot 3^2}{2\cdot 3600}=0{,}013\ \text{м}^2/\text{с}^2.$$

Энергия тепловых струй, движущихся предметов: $e_{т.с}=e_{д.п}=0$. Скорость воздушного потока во всасывающем сечении укрытия шкафного типа:

$$v_0=L/F=2480/1{,}2\cdot 0{,}9\cdot 3600=0{,}64\ \text{м/с}.$$

Площадь открытого проема панели Черноберезского (фронт и боковые стороны):

$$F=1{,}085\cdot 1{,}2+2\cdot 0{,}47=2{,}3\ \text{м}^2.$$

Расчет эффективности работы укрытия шкафного типа (рис 5.13, *а*). Определяющий размер местного отсоса:

$$l=\sqrt{F}=l\sqrt{1{,}2\cdot 0{,}9}=1{,}04\ \text{м}.$$

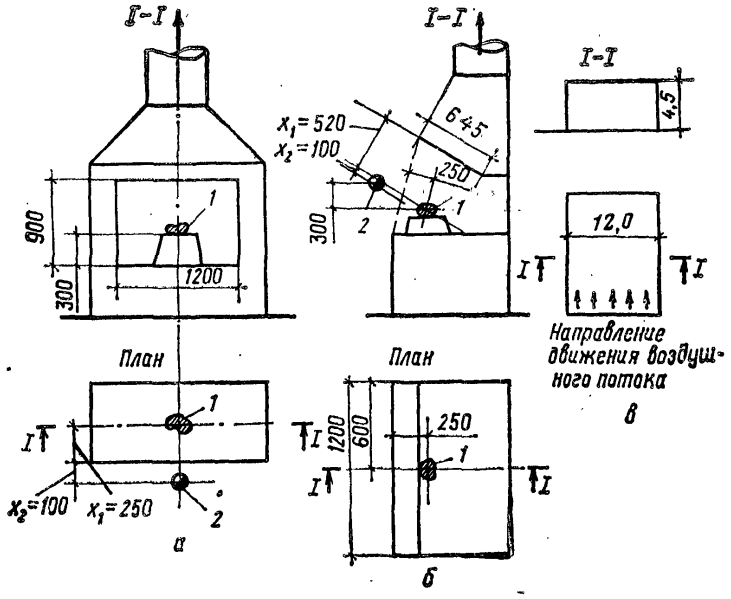


Рис. 5.13. Схемы расположения местных отсосов и движения основных воздушных потоков в помещении:

а — укрытие шкафного типа; *б* — панель Чернобережского; *в* — план помещения; *1* — источник выделения вредных веществ; *2* — рабочее место

Коэффициент турбулентного обмена местного отсоса:

$$A_0 = 0{,}25e^{1/3}l^{4/3};$$

$$A_0 = 0{,}25 \cdot 0{,}013^{1/3} \cdot 1{,}04^{4/3} = 0{,}1148 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Относительная скорость в сечении открытого проема по рис. 4.8 (на высоте H=0,3 м): $\bar{v}_1$=0,55; на расстоянии 100 мм от шкафа $\bar{v}_2$=0,45. Скорость воздуха на расстоянии x

$$v_x = \bar{v}_x v_0; \qquad v_{x_1} = 0{,}64 \cdot 0{,}55 = 0{,}35 \text{ м/с};$$

$$v_{x_2} = 0{,}64 \cdot 0{,}55 = 0{,}29 \text{ м/с}.$$

Концентрация вредного вещества в воздушном потоке над источником выделения:

$$C_0 = G/L = 50\,000/2480 = 20{,}16 \text{ мг/м}^3.$$

Коэффициент пропорциональности:

$$k = \sqrt{29/58{,}08} = 0{,}707.$$

Концентрация вредного вещества в проеме шкафа:

$$C_x = C_0 \cdot e^{-vx/A_x} = 0{,}707 \cdot 20{,}16e^{-0{,}64 \cdot 0{,}25/0{,}1148} = 3{,}254 \text{ мг/м}^3,$$

Концентрация вредного вещества в воздушном потоке на рабочем месте:

$$C = 0{,}707 \cdot 20{,}16e^{-0{,}64 \cdot 0{,}35/0{,}1148} = 1{,}803 \text{ мг/м}^3,$$

Расход вредного вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$\text{при } v/v_п = 0{,}64/0{,}1 = 6{,}4 > 2{,}00$$

$$G = \frac{Fv\,(C_x - C_ф)\cdot 3{,}6}{1 - e^{-vx/A_x}} =$$

$$= \frac{1{,}2\cdot 0{,}9\cdot 0{,}64\,(3{,}254 - 0)\cdot 3{,}6}{1 - e^{-0{,}64\cdot 0{,}25/0{,}1148}} = 10{,}79 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы укрытия шкафного типа:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G}\,100 = \frac{50 - 10{,}79}{50}\,100 = 78{,}42 \approx 78\,\%.$$

Расчет эффективности работы панели Чернобережского (рис. 5.13, *б*). Определяющий размер $l = \sqrt{F} = \sqrt{2{,}3} = 1{,}52$ м.
Коэффициент турбулентного обмена местного отсоса:

$$A_0 = 0{,}25\varepsilon^{1/3} l^{4/3} = 0{,}25\cdot 0{,}013^{1/3}\cdot 1{,}52^{4/3} = 0{,}103 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Относительные скорости воздушного потока в сечении открытого проема и на рабочем месте по рис. 4.13: $\bar{v}_{x_1} = 0{,}07$; $\bar{v}_{x_2} = 0{,}05$. Скорость воздушного потока в сечении открытого проема и на рабочем месте: $v_x = \bar{v}_x v_0$;

$$v_{x_1} = 0{,}07\cdot 4{,}0 = 0{,}28 \text{ м/с}; \qquad v_{x_2} = 0{,}05\cdot 4{,}0 = 0{,}2 \text{ м/с}.$$

Концентрация вредного вещества над источником выделения вредных веществ:

$$C_0 = G/L = 50\,000/2480 = 20{,}16 \text{ мг/м}^3.$$

Среднее расстояние от источника выделения вредных веществ до открытого сечения проема панели Чернобережского:

$$x_{ср} = (0{,}25 + 0{,}6)/2 = 0{,}425 \text{ м}.$$

Концентрация вредного вещества в сечении открытого проема панели Чернобережского:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x} = 0{,}707\cdot 20{,}16 e^{-0{,}3\cdot 0{,}425/0{,}103} = 4{,}426 \text{ мг/м}^3.$$

Концентрация вредного вещества на рабочем месте

$$C = 0{,}707\cdot 20{,}16 e^{-0{,}3\cdot 0{,}35/0{,}103} = 5{,}440 \text{ мг/м}^3.$$

Расход вредного вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$\text{при } v/v_п = 0{,}3/0{,}1 = 3{,}0 > 2{,}00$$

$$G = \frac{Fv\,(C_x - C_ф)\,3{,}6}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{2{,}3\cdot 0{,}3\,(4{,}426 - 0)\,3{,}6}{1 - e^{-0{,}3\cdot 0{,}425/0{,}103}} = 15{,}93 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы панели Чернобережского

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G}\,100 = \frac{50 - 15{,}93}{50}\cdot 100 = 68{,}14 \approx 68\,\%.$$

Пример 5.5. Определить эффективность работы местного отсоса типа приближенный раструб без фланца при малых объемах отсасываемого воздуха.

Исходные данные. Размер раструба $a \times b = 200 \times 200$ мм. Объем удаляемого воздуха через местный отсос $L = 250$ м³/ч. Тип источника выделения — линейный (люк). Диаметр люка 250 мм. Количество выделяющегося вредного вещества (хлористого водорода) из люка $G_0 = 100$ г/ч. Схема расположения местного отсоса и схема движения воздушных потоков в помещении приведены на рис 5.6. Кратность воздухообмена в помещении $Kp = 10$. Приточный воздух подается через пристенные панельные воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток $v = 3{,}0$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п = 0{,}2$ м/с Объем помещения 1000 м³.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 из таблицы 4.1 $\xi = 2{,}0$. Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{п.с} = Kp \frac{\xi v^2}{2} = 10 \cdot \frac{2\ 3^2}{2 \cdot 3600} = 0\ 025 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия тепловых потоков движущихся предметов:

$$\varepsilon_{т\,п} = \varepsilon_{д\,п} = 0.$$

Скорость воздуха во всасывающем отверстии местного отсоса:

$$v_0 = \frac{L}{F} = \frac{250}{0{,}2 \cdot 0{,}2\ 3600} = 1{,}736 \text{ м/с}.$$

Коэффициент местного сопротивления вытяжного отверстия из табл. 4.1 $\xi_{в\,о} = 0{,}94$.

Энергия воздушных потоков помещения:

$$\varepsilon = \varepsilon_{п.с} + \varepsilon_{т\,п} + \varepsilon_{д\,и} = 0{,}025 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер рассматриваемого объекта $l = \sqrt{F}$: местного отсоса $l = \sqrt{0{,}2 \cdot 0{,}2} = 0{,}2$ м; помещения $l = \sqrt{12 \cdot 4{,}5} = 7{,}35$ м. Коэффициент турбулентного обмена $A = 0{,}25 \varepsilon^{1/3} l^{4/3}$: местного отсоса: $A_0 = 0{,}25 \cdot 0{,}025^{1/3} \cdot 0{,}2^{4/3} = 0{,}0347$ м²/с; помещения: $A_п = 0{,}25 \cdot 0{,}025^{1/3} \cdot 7{,}35^{4/3} = 1{,}041$ м²/с. Расстояние от местного отсоса до ближайшего края люка: $x_1 = 0{,}1$ м (рис. 5.14). Расстояние от местного отсоса до дальнего края люка

$$x_2 = x_1 + d = 0{,}1 + 0{,}25 = 0{,}35 \text{ м};$$

Расстояние от местного отсоса до центра люка

$$x_3 = x_1 + d/2 = 0{,}1 + 0{,}25/2 = 0{,}225 \text{ м}.$$

Расстояние от местного отсоса до рабочего места:

$$x_5 = x_1 + x_2 = 0{,}1 + 1{,}0 = 1{,}1 \text{ м}.$$

Относительные расстояния: $\bar{x} = x/b$:

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1}{b} = \frac{0{,}1}{0{,}2} = 0{,}5; \quad \bar{x}_5 = \frac{x_5}{b} = \frac{1{,}1}{0{,}2} = 5{,}5.$$

Относительные скорости воздуха (по рис. 4.10): на расстоянии $x \leqslant b$ $\bar{v}_{x_1} = 0{,}25$; на расстоянии $x = b$ $\bar{v}_x = 0{,}07$; на расстоянии $x > b$ относительная скорость воздуха определяется по формуле:

$$\bar{v}_x = \frac{2}{\pi} \operatorname{arcctg}\left[\bar{x} \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}(1 + \bar{x}^2)}\right];$$

$$\bar{v}_{x_5} = \frac{2}{180} \operatorname{arcctg} 5{,}5 \sqrt{1 + 1\,(1 + 5{,}5^2)} = 0{,}02.$$

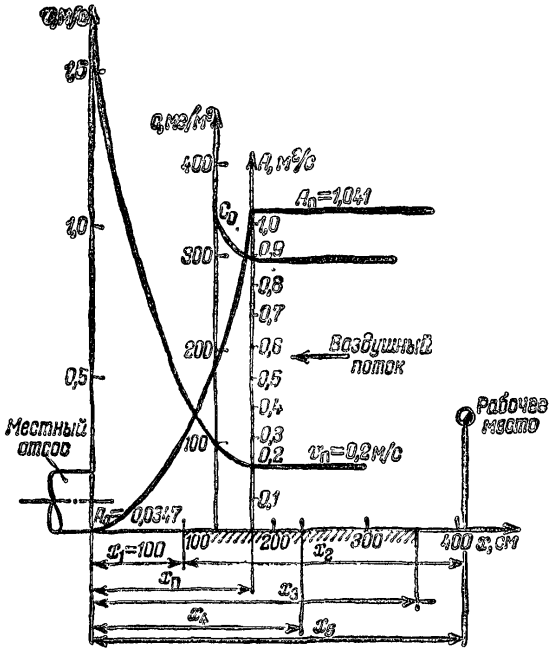


Рис 5.14. Распределение скоростей воздушного потока, коэффициента турбулентного обмена и концентраций вредных веществ на входе во всасывающее отверстие местного отсоса типа «приближенный раструб» при малых объемах отсасываемого воздуха

Скорость воздуха на расстоянии x определяется по формуле

$$v_x = v_0\bar{v}_x; \qquad v_{x_1} = 1,736 \cdot 0,25 = 0,434;$$

$$v_{(x=b)} = 1,736 \cdot 0,07 = 0,121; \qquad v_{x_5} = 1,736 \cdot 0,02 = 0,0347.$$

Из рис. 5.14 видно, что расстояние, где скорость воздушного потока равна подвижности воздуха в помещении, составляет $x_0 = 0,15$ м

Отношение площади, не попадающей под действие местного отсоса, к общей площади выделения вредных веществ в атмосферный воздух:

$$F_1/F_2 = 0,042/0,049 = 0,857.$$

Количество вредных веществ, находящихся вне зоны действия местного отсоса:

$$G_1 = G_0F_1/F_2 = 100 \cdot 0,857 = 85,7 \text{ г/ч}.$$

Количество вредных веществ, находящихся в зоне действия местного отсоса:

$$G = 100 - 85,7 = 14,3 \text{ г/ч}.$$

Расстояние от местного отсоса до центра источника, выделяющего вредные вещества, попадающего в зону его действия. $x = 0,125$ м.

Относительное расстояние $\bar{x}$:

$$\bar{x} = x/b = 0,125/0,2 = 0,625;$$

при $x \leqslant b$ по рис. 4.10 находим $v_x = 0,17$.

Скорость воздушного потока над центром части источника, попадающего в зону действия местного отсоса: $v_x = \bar{v}_x v_0 = 0{,}17 \cdot 1{,}736 = 0{,}295$ м/с.

Расход воздуха в сечении, параллельном всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x: $L = Fv = 0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}295 \cdot 3600 = 42{,}48$ м³/ч.

Концентрация вредного вещества над центром части линейного источника, находящегося в зоне действия местного отсоса:

$$C_0 = G/L = 14\,300/42{,}48 = 336{,}6 \text{ мг/м}^3.$$

Скорость воздушного потока на расстоянии x':

$$x' = x_п - x,$$

где $x_п$ — расстояние, на котором скорость воздушного потока от местного отсоса равна подвижности воздуха в помещении; $x_п = 0{,}15$ м; x — расстояние от местного отсоса до центра части источника, находящегося в зоне действия местного отсоса; $x = 0{,}125$ м; $x' = 0{,}15 - 0{,}125 = 0{,}025$ м.

Относительное расстояние $\bar{x}' = 0{,}025/0{,}2 = 0{,}125$.

При $x \leqslant b$ по рис. 4.10 находим $\bar{v}_x = 0{,}8$.

Скорость воздушного потока на расстоянии x':

$$v'_x = \bar{v}_x v_0 = 0{,}8 \cdot 1{,}736 = 1{,}388 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии $x = 0{,}125$:

$$A_x = \frac{A_п v_{x_п - x}}{v_0} \cdot \frac{1}{\dfrac{[A_п v_п/(A_0 v_0) - 1](x_п - x)}{x_п} + 1} =$$

$$= \frac{1{,}0516 \cdot 1{,}388}{1{,}736} \cdot \frac{1}{\dfrac{[1{,}0516 \cdot 0{,}2/(0{,}0346 \cdot 1{,}736) - 1](0{,}15 - 0{,}125)}{0{,}15} + 1} =$$

$$= 0{,}593 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент пропорциональности $k = \sqrt{29/36{,}46} = 0{,}892$.

Концентрация вредного вещества на конце части источника, находящегося в зоне действия местного отсоса:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x} = 0{,}892 \cdot 336{,}6 e^{-0{,}2 \cdot 0{,}025/0{,}593} = 288{,}696 \text{ мг/м}^3.$$

Расход вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса от части источника, попадающего в зону его действия:

при $v/v_п = 0{,}2/0{,}2 = 1$

$$G_2 = \frac{L(C_x - C_ф)\left(1 - e^{-vx/A_x}\right) \cdot 2}{\left(2 - e^{-vx/A_x}\right) 1000};$$

$$G_2 = \frac{42{,}48\,(288{,}69 - 0)\left(1 - e^{-0{,}2 \cdot 0{,}025/0{,}593}\right) \cdot 2}{\left(2 - e^{-0{,}2 \cdot 0{,}025/0{,}593}\right) \cdot 1000} = 6{,}378 \text{ г/ч}.$$

Общий расход вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$G = G_1 + G_2 = 85{,}7 + 6{,}378 = 92{,}08 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100 = \frac{100 - 92{,}08}{100} 100 = 7{,}92 \approx 8\ \%.$$

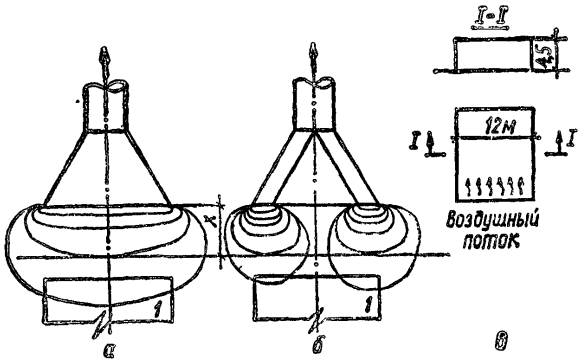


Рис. 5.15. Схемы расположения местных отсосов (зонтов) и движения основного воздушного потока в помещении:

а — зонт без вставки; *б* — зонт со вставкой; *в* — план помещения; *1* — источник выделения вредных веществ

Пример 5.6. Сравнить эффективность работы двух вытяжных зонтов (без конической вставки и со вставкой) при одинаковой производительности $L=8000$ м³/ч.

Исходные данные. Количество выделяющегося вредного вещества (хлористого водорода) $G_0=100$ г/ч. Схемы расположения местных отсосов и движения воздушных потоков в помещении приведены на рис. 5.15. Кратность воздухообмена в помещении $Kp=10$. Приточный воздух подается через пристенные панельные воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток $v=3{,}0$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}2$ м/с. Наружный радиус зонтов $r_н=0{,}50$ м. Внутренний радиус зонта с конической вставкой $r_в=0{,}2$ м. Расстояние от источника выделения до зонта $x=0{,}4$ м. Фоновая концентрация хлористого водорода $C_ф=0$.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 из табл. 4.1: $\xi=2{,}0$.

Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{п.с}=Kp\frac{\xi v^2}{2}=10\frac{2\cdot 3^2}{2\cdot 3600}=0{,}025 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия тепловых потоков и движущихся предметов: $\varepsilon_{т.с}=\varepsilon_{д.п}=0$.

Скорость воздуха во всасывающем отверстии местного отсоса: $v_0=L/F$:

зонт без конической вставки:

$$v_0=8000/0{,}785\cdot 1^2\cdot 3600=2{,}83 \text{ м/с};$$

зонт с конической вставкой:

$$v_0=8000/0{,}785(1^2-0{,}8^2)\cdot 3600=7{,}863 \text{ м/с}.$$

Коэффициент местного сопротивления вытяжных зонтов $\xi=0{,}1$.

Энергия воздушных потоков помещения: $\varepsilon=\varepsilon_{т.с}+\varepsilon_{п.с}=\varepsilon_{д.п}=0{,}025$ м²/с³.

Расчет эффективности работы местного отсоса — зонта без конической вставки. Определяющий размер объекта $l=\sqrt{F}$: местного отсоса $l=a$; $l=1{,}0$ м, помещения: $l=\sqrt{12\cdot 4{,}5}=7{,}35$ м.

Коэффициент турбулентного обмена: $A=0{,}25\,\varepsilon^{1/3}l^{4/3}$: местного отсоса $A_0=0{,}25\cdot 0{,}025^{1/3}\cdot 1^{4/3}=0{,}0735$ м²/с; помещения $A_п=0{,}25\cdot 0{,}025^{1/3}\cdot 7{,}35^{4/3}=1{,}0507$ м²/с.

Расстояние от местного отсоса до источника выделения вредного вещества: $x=0{,}4$ м. Расстояние от края местного отсоса до дальнего края источника выделения вредного вещества: $x=0{,}4$ м.

Относительное расстояние $\bar{x}=x/d=0{,}4/1{,}0=0{,}4$.

Относительная скорость воздуха на расстоянии x: при $\bar{x}<d$ величина $\bar{v}_x=0{,}33$. Скорость воздуха на расстоянии x: $v_x=v_0\bar{v}_x=0{,}33\cdot 2{,}83=0{,}934$ м/с.

Определяем расстояние, где скорость вблизи всасывающего отверстия равна подвижности воздуха в помещении $v_x=v_п$:

$$\bar{v}_x=v_п/v_0=0{,}2/2{,}83.$$

В то же время

$$\bar{v}_x=1-\frac{\bar{x}}{\sqrt{1+\bar{x}^2}},$$

где $\bar{x}=x/r$ или $\bar{x}=x/0{,}5$.

Подставляя в данное уравнение $\bar{v}_x$, определяем относительное расстояние x, где $v_x=v_п$:

$$\frac{0{,}2}{2{,}83}=1-\frac{x/0{,}5}{\sqrt{1+(x/0{,}5)^2}};$$

$$0{,}929=\frac{x/0{,}5}{\sqrt{1+x^2/0{,}25}};$$

$$x=x_п=1{,}255 \text{ м}.$$

Расстояние x'

$$x'=x_п-x=1{,}255-0{,}4=0{,}855 \text{ м}.$$

Относительное расстояние

$$\bar{x}'=x'/d=0{,}855/1{,}0=0{,}855.$$

Относительная скорость воздуха на расстоянии x' при $x<d$ из рис. 4.10: $\bar{v}_{x'}=0{,}11$.

Скорость воздуха на расстоянии x': $v_x=\bar{v}_xv_0$:

$$v_{x'}=0{,}11\cdot 2{,}83=0{,}312 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии x (на дальнем краю источника выделения):

$$A_x=\frac{A_п v_{x_п-x}}{v_0}\cdot\frac{1}{\dfrac{[A_п v_п/(A_0v_0)-1](x_п-x)}{x_п}+1};$$

$$A_x=\frac{1{,}0507\cdot 0{,}312}{2{,}83}\cdot\frac{1}{\dfrac{\left[\dfrac{1{,}0507\cdot 0{,}2}{(0{,}0735\cdot 2{,}83)}-1\right](1{,}255-0{,}4)}{1{,}255}+1}=0{,}1086 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расход воздуха в сечении, параллельном всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x:

$$L=Fv=0{,}785\cdot 1^2\cdot 0{,}934\cdot 3600=2640 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Концентрация вредного вещества в месте его выделения:

$$C_0=G/L=100\,000/2640=37{,}88 \text{ мг/м}^3.$$

Коэффициент пропорциональности $k=0{,}892$.
Концентрация вредного вещества на некотором расстоянии x (в противоположную сторону от направления движения воздуха):

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x} = 0{,}892 \cdot 37{,}88 e^{-0{,}934 \cdot 0{,}25/0{,}1086} = 3{,}925 \text{ мг/м}^3.$$

Расход вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$\text{при } v/v_п = 0{,}934/0{,}2 = 4{,}67 > 2{,}00$$

$$C = \frac{Fv(C_x - C_ф)\,3{,}6}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{0{,}785 \cdot 1^2 \cdot 0{,}934\,(3{,}925 - 0)\,3{,}6}{1 - e^{-0{,}934 \cdot 0{,}25/0{,}1086}} = 11{,}77 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100 = \frac{100 - 11{,}77}{100} 100 = 88{,}23 \approx 88\ \%.$$

Концентрация вредного вещества на рабочем месте:

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x} = 0{,}892 \cdot 37{,}88 e^{-0{,}934 \cdot 0{,}45/0{,}1086} = 0{,}684 \text{ мг/м}^3.$$

Расчет эффективности работы местного отсоса — зонта с конической вставкой. Определяющий размер $l=\sqrt{F}$: местного отсоса: $l=\sqrt{0{,}785(1^2-0{,}8^2)}=0{,}532$ м; помещения: $l=\sqrt{12 \cdot 4{,}5}=7{,}35$ м.
Коэффициент турбулентного обмена A:

$$A = 0{,}25 e^{1/3} l^{4/3};$$

местного отсоса: $A_0=0{,}25 \cdot 0{,}025^{1/3} \cdot 0{,}532^{4/3}=0{,}0317$ м²/с; помещения: $A_п=0{,}25 \cdot 0{,}025^{1/3} \cdot 7{,}35^{4/3}=1{,}0507$ м²/с.
Относительное расстояние для меньшего радиуса кольцевого отверстия:

$$\bar{x}_в = x/r_в,$$

где x — расстояние по оси факела от рассчитываемой точки до всасывающего отверстия; $x=0{,}4$ м; $\bar{x}_в=0{,}4/0{,}4=1$. Относительное расстояние для большего радиуса кольцевого отверстия.

$$\bar{x}_н = x/r_н = 0{,}4/0{,}5 = 0{,}8.$$

Относительная скорость воздуха на расстоянии x от кольцевого отверстия:

$$\bar{v}_x = \frac{\bar{x}_в}{\sqrt{1 + \bar{x}^2_в}} - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 + \bar{x}^2_н}} = \frac{1{,}0}{\sqrt{1 + 1^2}} - \frac{0{,}8}{\sqrt{1 + 0{,}8^2}} = 0{,}082.$$

Скорость воздуха на расстоянии x:

$$v_x = \bar{v}_x v_0 = 7{,}863 \cdot 0{,}082 = 0{,}645 \text{ м/с}.$$

Определяем расстояние, где скорость на входе во всасывающее отверстие равна подвижности воздуха в помещении:

$$v_x = v_п;$$

$$\bar{v}_x = v_п/v_0 = 0{,}2/7{,}863$$

в то же время

$$\bar{v}_x = \frac{\bar{x}_в}{\sqrt{1 + \bar{x}^2_в}} - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 + \bar{x}^2_н}};$$

$$\bar{x}_в = x/r_в = x/0{,}4; \qquad \bar{x}_н = x/r_н = x/0{,}5;$$

подставляя в данное уравнение $\bar{v}_x$, определяем расстояние x при $v_x = v_п$:

$$\frac{0,2}{7,863} = \frac{x/0,4}{\sqrt{1+(x/0,4)^2}} - \frac{x/0,5}{\sqrt{1+(x/0,5)^2}},$$

откуда $$x = x_п = 1,2 \text{ м}.$$

Расстояние $x' = x_п - x = 1,2 - 0,4 = 0,8$ м.
Относительные расстояния

$$\bar{x}'_в = x'/r_в = 0,8/0,4 = 2,0;$$

$$\bar{x}'_н = x'/r_н = 0,8/0,5 = 1,6.$$

Относительная скорость воздуха на расстоянии x':

$$\bar{v}_x = \frac{\bar{x}_в}{\sqrt{1+\bar{x}^2_в}} - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1+\bar{x}^2_н}} = \frac{2}{\sqrt{1+2^2}} - \frac{1,6}{\sqrt{1+1,6^2}} = 0,045.$$

Скорость воздуха на расстоянии x:

$$v_x = \bar{v}_x v_0;$$

$$v_{x'} = 7,863 \cdot 0,045 = 0,354 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии x:

$$A_x = \frac{A_п v_{x_п - x}}{v_0} \cdot \frac{1}{\frac{[A_п v_п/(A_0 v_0) - 1](x_п - x)}{x_п} + 1} =$$

$$= \frac{1,0507 \cdot 0,354}{7,863} \cdot \frac{1}{\frac{[1,0507 \cdot 0,2/(0,0317 \cdot 7,863) - 1](1,2 - 0,4)}{1,2} + 1} =$$

$$= 0,0428 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расход воздуха в сечении, параллельном всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x:

$$L = Fv = 0,785(1^2 - 0,8^2) \cdot 3600 \cdot 0,645 = 656,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Концентрация вредного вещества в месте его выделения:

$$C_0 = G/L = 100\,000/656,2 = 152,39 \text{ мг/м}^3.$$

Концентрация вредного вещества на некотором расстоянии x (в противоположную сторону от направления движения воздуха):

$$C_x = kC_0 e^{-vx/A_x} = 0,892 \cdot 152,39 e^{-0,25 \cdot 0,645/0,0428} = 3,20 \text{ мг/м}^3.$$

Расход вещества, направленного в противоположную сторону от местного отсоса при $v/v_п = 0,645/0,2 = 3,22 > 2,00$

$$G = \frac{Fv(C_x - C_ф)13,6}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{0,785(1^2 - 0,8^2)0,645(3,20 - 0)3,6}{1 - e^{-0,645 \cdot 0,25/0,0428}} = 2,15 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} 100 = \frac{100 - 2,15}{100} 100 = 97,85 \approx 98\,\%.$$

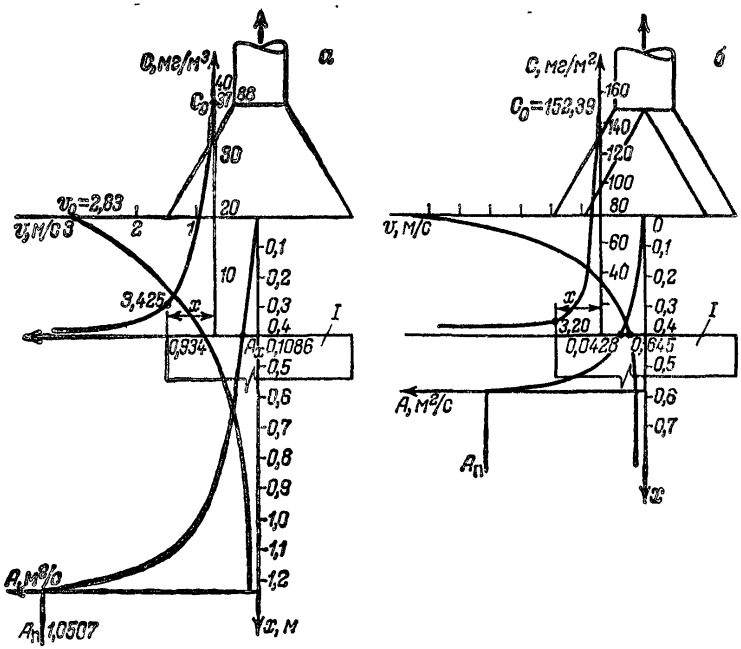


Рис. 5.16. Распределение скоростей воздушного потока, коэффициента турбулентного обмена местных отсосов и концентраций вредных веществ на входе во всасывающее отверстие зонта без конической вставки (*а*) и с конической вставкой (*б*)

Распределение скоростей воздушных потоков, концентраций вредных веществ и коэффициента турбулентного обмена местных отсосов приведено на рис. 5.16.

Концентрация вредного вещества на рабочем месте:

$$C_x = kC_0e^{-vx/A_x} = 0,892 \cdot 152,39e^{-0,645 \cdot 0,45/0,0428} = 0,295 \text{ мг/м}^3.$$

Сравнивая эффективность работы двух вытяжных зонтов (без конической вставки и с нею) при одинаковой производительности, можно записать следующее равенство:

$$L_1 = L_2, \tag{5.10}$$

где L_1 и L_2 — объемы отсасываемого воздуха через местный отсос. Объем отсасываемого воздуха через зонт без конической вставки:

$$L_1 = \pi r_н^2 v_{01}, \tag{5.11}$$

где $r_н$ — наружный диаметр зонта, м; v_{01} — скорость воздушного потока в сечении с наружным диаметром зонта, м/с. Объем отсасываемого воздуха через зонт с конической вставкой:

$$L_2 = \pi (r_н^2 - r_в^2) v_{02}, \tag{5.12}$$

где $r_в$ — внутренний диаметр кольцевого сечения зонта с конической вставкой, м; v_{02} — скорость воздушного потока в кольцевом сечении зонта с конической вставкой, м/с. Приравниваем уравнения (5.11) и (5.12):

$$\pi r_н^2 v_{01} = \pi (r_н^2 - r_в^2) v_{02}; \tag{5.13}$$

преобразуем уравнение

$$v_{01}/v_{02} = (r_н^2 - r_в^2)/r_н^2 = 1 - (r_в/r_н)^2; \quad (5.14)$$

обозначим отношение $r_в/r_н = k$, тогда

$$1 - k^2 = v_{01}/v_{02}. \quad (5.15)$$

Скорость воздушного потока на любом расстоянии x от всасывающего отверстия круглого сечения равна.

$$v_{x_1} = \bar{v}_{x_1} v_{01}, \quad (5.16)$$

где $\bar{v}_{x_1}$ — относительная скорость воздушного потока; вычисляется по формуле:

$$\bar{v}_{x_1} = 1 - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 + \bar{x}^2_н}}, \quad (5.17)$$

где $\bar{x}_н = x/r_н$. (5.18)

Скорость воздушного потока на любом расстоянии x от всасывающего отверстия кольцевого сечения равна (в м/с):

$$v_{x_2} = \bar{v}_{x_2} v_{02}, \quad (5.19)$$

где $\bar{v}_{x_2}$ — относительная скорость воздушного потока, вычисляется по формуле.

$$\bar{v}_{x_2} = \frac{\bar{x}_в}{\sqrt{1 - \bar{x}^2_в}} - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 - \bar{x}^2_н}}. \quad (5.20)$$

Приравниваем уравнения (5.16) к (5.19) для нахождения такого расстояния, на котором скорости воздушных потоков для круглого и кольцевого сечений будут равны.

$$\bar{v}_{x_1} = v_{x_2}; \quad (5.21)$$

$$\bar{v}_{x_1} v_{01} = \bar{v}_{x_2} v_{02}; \quad (5.22)$$

$$\bar{v}_{x_1} \cdot \frac{v_{01}}{v_{02}} = \bar{v}_{x_2}. \quad (5.23)$$

Подставляя в уравнение 5.23 $v_{01}/v_{02} = 1 - k^2$, получим:

$$(1 - k^2)\left(1 - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 + \bar{x}^2_н}}\right) = \frac{\bar{x}_в}{\sqrt{1 - \bar{x}^2_в}} - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 - \bar{x}^2_н}}, \quad (5.24)$$

где $\bar{x}_в = x/r_в$; $\bar{x}_н = x/r_н$; $x = \bar{x}_в r_в$; $x = \bar{x}_н r_н$,

или $\bar{x}_в r_в = \bar{x}_н r_н$; $\bar{x}_в = \bar{x}_н r_н$.

Так как $r_в/r_н = k$, $\bar{x}_в = x_н/k$. (5.25)

Уравнение (5.24) преобразуется к следующему виду:

$$(1 - k^2)\left(1 - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 + x^2_н}}\right) \quad \frac{\bar{x}_н}{k\sqrt{1 - (x_н/k)^2}} - \frac{\bar{x}_н}{\sqrt{1 - \bar{x}^2_н}}. \quad (5.26)$$

Подставляя в полученное уравнение различные значения величины $k = r_в/r_н$, получим те расстояния, при превышении которых эффективность ко

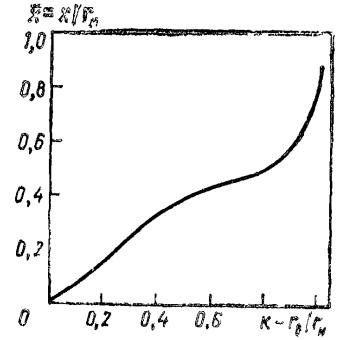


Рис 5 17 Характер изменения границы эффективности зонта с конической вставкой

нической вставки не улучшает работу местного отсоса, а, наоборот, ухудшает. На рис 5 17 представлен характер изменения границы эффективности работы зонта с конической вставкой

5.3. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ДВИЖЕНИИ ХОЛОДНОГО ЗАГРЯЗНЕННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

При естественном движении холодного воздушного потока (см рис 5 3), загрязненного вредными веществами, интенсивность диффузионного переноса характеризуется коэффициентом диффузии $D_т$ Число молей вещества A, диффундирующего в двух направлениях через единицу поперечного сечения в единицу времени, определяется по формуле:

$$N_A = -D_{AB}\frac{dC_A}{dx}, \qquad (5.27)$$

или

$$d_{nA} = -D_{AB}F\frac{dC_A}{dx}\,d\tau, \qquad (5.28)$$

где C_A — концентрация диффундирующего вещества, мг/м³; x — расстояние в направлении диффузии, м;
dC_A/dx — градиент концентрации компонента A; стоящий обычно перед градиентом знак минус показывает, что концентрация C_A уменьшается в направлении диффузии; градиент тем больше, чем больше сопротивление диффузии молекул вещества A, F — площадь сечения, через которое идет диффузия, м²; D_{AB} — кинематический коэффициент диффузии в системе газ A — воздух B. Для источника, установленного на основании, площадь сечения F равна поверхности шара.

$$F = 4\pi R^2 \qquad (5.29)$$

Если область распространения вредного вещества ограничена твердыми стенками то и площадь диффузии равна свободной площади

$$F = F_{ст}. \qquad (5\,30)$$

Для источника, заделанного заподлицо с плоскостью пола (стены)

$$F = 2\pi R^2 \qquad (5.31)$$

Согласно исследованиям Ибрагима и Кулоора коэффициент диффузии газов в воздухе рассчитывают по формуле

$$D_{AB} = \frac{100pV_м}{0{,}122M = 1{,}3}, \qquad (5\ 32)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости газа A; $V_м$ — мольный объем газа A; M — молярная масса газа A.

Коэффициент диффузии в зависимости от изменения температуры описывается формулой:

$$D_{t_2} = D_{t_1} (T_2/T_1)^{3/2}, \tag{5.33}$$

где D_{t_1} и D_{t_2} — коэффициенты диффузии при температурах T_1 и T_2. Рассмотрим, как изменяется концентрация газообразного вредного вещества вблизи источника его выделения. Очевидно, что поток вредного вещества через сферическую поверхность радиуса R, в середине которой находится точечный источник (для источника, установленного на основании), будет равен:

$$G = \frac{4}{3} \pi R^3 C_0; \tag{5.34}$$

для источника, заделанного заподлицо с плоскостью пола (стены):

$$G = \frac{2}{3} \pi R^3 C_0. \tag{5.35}$$

Для источников прямоугольной или неправильной формы с некоторым приближением вместо R может быть принято $R_{экв}$. В формулах (5.34) и (5.35) под концентрацией C_0 понимают объемную концентрацию вредного вещества вблизи источника его выделения, мг/м^3, найденную из баланса вещества в элементарном объеме.

Исходя из неравномерности распределения вещества в объеме, где расположен источник его выделения (особенно вблизи него), можно записать:

$$C_x = kc_0 e^{-\bar{x}}, \tag{5.36}$$

где k — коэффициент пропорциональности, учитывающий диффузионную способность вещества;

$$k = D_2/D_1 = \sqrt{M_1/M_2}; \tag{5.37}$$

D_1 и M_1 — коэффициент диффузии и молярная масса рассматриваемого вещества; D_2 и M_2 — коэффициент диффузии и молярная масса среды, в которую диффундирует рассматриваемое вещество (воздух); $\bar{x}$ — относительное расстояние;

$$\bar{x} = x/R; \tag{5.38}$$

x — расстояние в направлении диффузии (наименьшее расстояние от источника выделения вреднего вещества до рассматриваемой точки). Формулу (5.36) можно записать и в следующем виде:

$$C_x = kC_0 e^{-(x/R)}. \tag{5.39}$$

Количество вредного вещества, проходящего через сферическую поверхиость на иекотором расстоянии $x > B$, определяется по формуле:

$$G_x = \frac{4}{3} \pi R^3 C_x, \tag{5.40}$$

$$\text{или} \quad G_x = \frac{4}{3} \pi R^3 k C_0 e^{-(x/R)}; \tag{5.41}$$

для источника, установленного заподлицо с плоскостью пола (стены):

$$C_x = \frac{2}{3}\pi R^3 C_{x_1}, \qquad (5.42)$$

или $$G_x = \frac{2}{3}\pi R^3 k C_0 e^{-(x/R)}. \qquad (5.43)$$

Количество вредного вещества, попадающего в местный отсос с естественным движением воздуха, пропорционально площади, перекрываемой данным местным отсосом; для источника, заделанного заподлицо с плоскостью, оно составит:

$$G_0 = G_x = \frac{R^2_0}{2x^2}; \qquad (5.44)$$

для источника, установленного на основании:

$$G_0 = G_x \frac{R^2_0}{4x^2}, \qquad (5.45)$$

где R_0 — радиус патрубка местного отсоса, м.

Отношение величин $R_0^2/2x^2$ или $R_0^2/4x^2$ может быть равно или меньше 1 При отношении, равном или больше единицы:

$$G_0 = G_x. \qquad (5.46)$$

Пример 5.7. Определить эффективность работы местного отсоса — зонта диаметром 1 м, установленного на расстоянии 0,6 м от источника выделения вредного вещества (хлористого водорода).

Исходные данные. Количество выделяющегося хлористого водорода составляет 10 г/ч. Температура воздуха в помещении 20 °С. В помещении естественное движение воздушного потока. Определить концентрацию хлористого водорода на рабочем месте. Схемы расположения отсоса и рабочего места показаны на рис. 5.18, *а*. Источник установлен на основании.

Решение. Коэффициент пропорциональности, учитывающий диффузионную способность вещества:

$$k = \sqrt{M_1/M_2} = \sqrt{28{,}96/36{,}46} = 0{,}892,$$

где 28,96 — молярная масса воздуха; 36,46 — молярная масса хлористого водорода. Объемная концентрация хлористого водорода вблизи источника выделения:

$$C_0 = \frac{G}{(4/3)\,\pi R^3} = \frac{10000}{(4/3)\,3{,}14 \cdot 0{,}45^3} = 26100 \text{ мг/м}^3, \quad \text{или} \quad 26{,}1 \text{ г/м}^3.$$

Концентрация хлористого водорода на входе в патрубок местного отсоса:

$$C_x = kC_0 e^{-(x/R)} = 26\,100 \cdot 0{,}892 \cdot e^{-(0{,}6/0{,}15)} = 6172 \text{ мг/м}^3.$$

Расстояние от источника выделения до рабочего места (x_2):

$$x_2 = \sqrt{0{,}7^2 + 0{,}45^2} = 0{,}83 \text{ м}.$$

Концентрация хлористого водорода на рабочем месте:

$$C_{x_2} = 0{,}892 \cdot 26100 e^{-0{,}83/0{,}45} = 3695 \text{ мг/м}^3.$$

Количество вредного вещества, проходящего через сферическую поверхность радиусом R:

$$G_x = \frac{4}{3}\pi R^3 C_x = \frac{4}{3} \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}45^3 \cdot 6172 = 2349 \text{ мг/ч}.$$

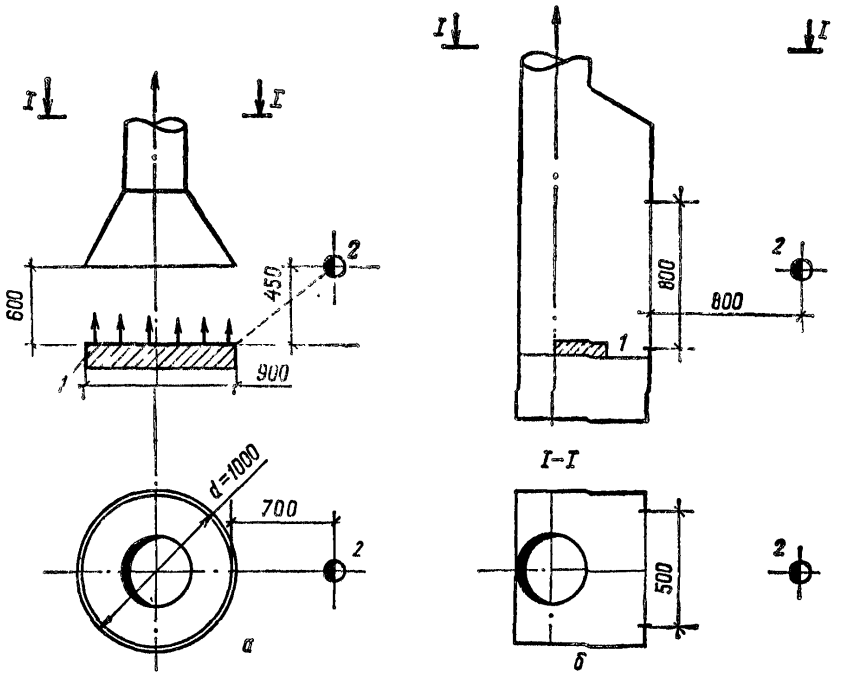


Рис. 5.18. Схемы взаимного расположения источника выделения вредных веществ, местного отсоса и рабочего места:

а — зонта; *б* — вытяжного шкафа; *1* — источник выделения вредного вещества; *2* — рабочее место

Количество хлористого водорода, попадающего в местный отсос:

$$G_0 = G_x \frac{R^2_0}{4x^2_1} = 2349 \cdot \frac{0{,}5^2}{4 \cdot 0{,}6^2} \approx 406 \text{ мг/м}^3.$$

Количество хлористого водорода, проходящего мимо местного отсоса:

$$G_п = 10\,000 - 406 = 9594 \text{ мг/ч}.$$

Эффективность улавливания хлористого водорода местным отсосом.

$$Эф = (G - G_п)/G; \qquad Эф = \frac{10000 - 9594}{10000} 100 \approx 4{,}1\ \%.$$

Пример 5.8. Определить эффективность работы местного отсоса — шкафа при выключенной механической вентиляции.

Исходные данные. Размер открытого проема шкафа 0,5×0,8 м. Количество выделяющегося хлористого водорода 10 г/ч. Температура источника и воздуха в помещении 20 °С; в помещении естественное движение воздушного потока. Диаметр патрубка, через который удаляется воздух от шкафа, d = =0,4 м. Определить концентрацию хлористого водорода на рабочем месте. Схемы расположения местного отсоса и рабочего места даны на рис. 5.18, *б*.

Решение. Площадь проема вытяжного шкафа:

$$F_1 = 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 0{,}4 \text{ м}^2,$$

Площадь патрубка для удаления воздуха из шкафа:

$$F_2 = 0{,}785 \cdot 0{,}4^2 = 0{,}125 \text{ м}^2.$$

Количество хлористого водорода, удаляемого местным отсосом:

$$G_0 = \frac{10 \cdot 0{,}125}{0{,}525} = 2{,}38 \text{ г/ч}.$$

Количество хлористого водорода, поступающего в помещение:

$$G_п = 7{,}62 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{10 - 7{,}62}{10} 100 = 23{,}8\ \%.$$

Эквивалентный диаметр (открытого проема) вытяжного шкафа, из которого вредное вещество поступает в помещение:

$$D_э = \frac{2ab}{a + b} = \frac{2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8}{0{,}5 + 0{,}8} = 0{,}615 \text{ м}.$$

Радиус открытого проема вытяжного шкафа $R = 0{,}307$ м
Расстояние от открытого проема вытяжного шкафа до рабочего места $x = 0{,}8$ м.
Коэффициент пропорциональности, учитывающий диффузионную способность вещества:

$$k = \sqrt{M_1/M_2} = \sqrt{\frac{28{,}96}{36{,}46}} = 0{,}892.$$

Объемная концентрация хлористого водорода вблизи источника выделения:

$$C_0 = \frac{G}{2/3\pi R^3} = \frac{7620}{2/3 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}307} = 126000 \text{ мг/м}^3.$$

Концентрация хлористого водорода на рабочем месте:

$$C_x = kC_0 e^{-(x/R-1)} = 0{,}892 \cdot 126\,000 e^{-(0{,}8/0{,}307-1)} = 8362 \text{ мг/м}^3.$$

5.4. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ НАГРЕТОГО ЗАГРЯЗНЕННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Порядок расчета показан на рис. 5.3. Определение эффективности работы местных отсосов для нагретого воздушного потока см. в разделе 5.5. Отличительная особенность расчета состоит в том, что учитывается влияние скорости воздушного потока определяемой избыточной над окружающей средой температурой теплового источника на распространение вредных веществ. Определение скорости воздушного потока над тепловым источником приведено в гл. 4.

Пример 5.9. Определить эффективность работы вытяжного зонта диаметром $D = 1{,}0$ м, установленного над тепловым источником выделения вредных веществ.

Исходные данные. Диаметр теплового источника вредных веществ 0,8 м. Объем удаляемого воздуха от зонта $L = 8000$ м³/ч. Источник установлен на основании. Количество выделяющегося конвективного тепла $Q_0 = 6000$ Вт. Количество выделяющихся вредностей: оксида углерода 100 г/ч, диоксида азота 20 г/ч. *Кратность воздухообмена в помещении* $Кр = 10$. *Приточный* воздух подается через пристенные панельные воздухораспределители типа

ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток $v=3{,}0$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_{\text{п}}=0{,}2$ м/с. Объем помещения $V_{\text{п}}=800$ м³. Температура внутри помещения $t=24$ °С. Тепловая напряженность помещения $\bar{Q}_{\text{ф}}=2{,}0$ Вт/м³ (без учета рассматриваемого теплового источника). Фоновые концентрации оксида углерода и диоксида азота равны нулю.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 из табл. 4.1: $\xi=2{,}0$.

Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{\text{п. с}} = Kp\frac{\xi v^2}{2} = 10\cdot\frac{2\cdot 3^2}{2\cdot 3600} = 0{,}025 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия движущихся предметов: $\varepsilon_{\text{д.п}}=0$.

Коэффициент пропорциональности для источника, установленного на основании:

$$C = 34{,}3\cdot 10^{-6}.$$

Плотность воздуха при температуре, равной температуре помещения, $\rho=1{,}189$ кг/м³.

Теплонапряженность теплового источника:

$$\bar{Q}_{\text{ист}} = Q_{\text{ист}}/V_{\text{п}} = 6000/800 = 7{,}5 \text{ Вт/м}^3.$$

Теплонапряженность объема помещения:

$$\bar{Q} = \bar{Q}_{\text{ист}} + \bar{Q}_{\text{ф}} = 7{,}5 + 2{,}0 = 9{,}5 \text{ Вт/м}^3.$$

Расстояние от источника до полюса струи: $z_{\text{п}}=1{,}7\,d$, где d — определяющий размер для теплового источника, равный диаметру источника или меньшей стороне при прямоугольном источнике:

$$z_{\text{п}} = 1{,}7\cdot 0{,}8 = 1{,}36 \text{ м}.$$

Расстояние от источника до рассматриваемой точки:

$$z_{\text{и}} = x = 0{,}4 \text{ м}.$$

Расстояние от полюса струи до рассматриваемой точки:

$$z = z_{\text{п}} + z_{\text{и}} = 1{,}36 + 0{,}4 = 1{,}76 \text{ м}.$$

Энергия тепловой струи:

$$\varepsilon_{\text{т. с}} = C\frac{\bar{Q}}{\rho}z = 34{,}3\cdot 10^{-6}\cdot\frac{9{,}5\cdot 1{,}76}{1{,}189} = 0{,}0048 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия воздушных потоков помещения:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{п.с}} + \varepsilon_{\text{т.с}} + \varepsilon_{\text{д.п}} = 0{,}025 + 0{,}0048 = 0{,}0298 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер l: местного отсоса: $l=d=1$ м; помещения:

$$l = \sqrt{F} = \sqrt{12\cdot 4{,}5} = 7{,}35 \text{ м}.$$

Коэффициент турбулентного обмена A:

$$A = 0{,}25\varepsilon^{1/3}l^{4/3}:$$

местного отсоса: $A_0=0{,}25\cdot 0{,}0298^{1/3}\cdot 1^{4/3}=0{,}0775$ м²/с; помещения: $A_{\text{п}}=0{,}25\cdot 0{,}0298^{1/3}\cdot 7{,}35^{4/3}=1{,}105$ м²/с.

Расстояние от местного отсоса до источника тепловыделения $x=0{,}4$.

Относительное расстояние

$$\bar{x} = x/d = 0{,}4/1{,}0 = 0{,}4.$$

Относительная скорость воздуха при механической системе вентиляции на расстоянии x:
при $\bar{x}<d$ по рис. 4.10: $\bar{v}_x=0{,}33$.
Скорость воздуха во всасывающем отверстии:

$$v_0 = \frac{8000}{0{,}785 \cdot 1{,}0 \cdot 3600} \approx 2{,}83 \text{ м/с}.$$

Скорость воздуха на расстоянии x (на выходе из источника тепловыделения):

$$v_x = \bar{v}_x v_0 = 0{,}33 \cdot 2{,}83 = 0{,}934 \text{ м/с}.$$

Проверяем, на каком участке тепловой струи установлен местный отсос. Пределы разгонного участка:

$$1{,}2 < z/d < 3{,}2.$$

Отношение $z/d = 1{,}76/0{,}8 = 2{,}2$ м; следовательно, зонт установлен на разгонном участке тепловой струи. Скорость теплового потока над тепловым источником на расстоянии $x=0{,}4$ м:

$$v_м = 0{,}0425\left(\frac{Q_1 x}{r^2}\right)^{1/3} = 0{,}0425\left(\frac{6000 \cdot 0{,}4}{0{,}4^2}\right)^{1/3} = 1{,}04 \text{ м/с}.$$

Скорость воздушного потока во всасывающем отверстии местного отсоса, обусловленная механической системой вентиляции (без теплового источника):

$$v = v_0 - v_м = 2{,}83 - 1{,}04 = 1{,}79 \text{ м/с}.$$

Расход воздуха в сечении, параллельном местному отсосу на расстоянии x:

$$L_x = Fv = 0{,}785 \cdot 1^2 \cdot 0{,}934 \cdot 3600 = 2640 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расстояние, где скорость воздуха на входе во всасывающее отверстие местного отсоса равна подвижности воздуха в помещении, определяется из условия, что в данной точке $v_x = v_п$. В то же время

$$v_x = \bar{v}_x v_0;$$

$$\bar{v}_x = v_x/v_0 = v_п/v_0 = 0{,}2/1{,}79;$$

$$\bar{v} = 1 - \frac{\bar{x}}{\sqrt{1+\bar{x}^2}},$$

где $\bar{x} = x/r$, или $\bar{x} = x/0{,}5$;

$$\bar{v}_x = 1 - \frac{x/0{,}5}{\sqrt{1+(x/0{,}5)^2}};$$

приравниваем уравнения для v_x

$$\frac{0{,}2}{1{,}79} = 1 - \frac{\bar{x}}{0{,}5\sqrt{1+\bar{x}^2/0{,}25}},$$

откуда $x = x_п = 1{,}4$ м.
Расстояние

$$x' = x_п - x = 1{,}4 - 0{,}4 = 1{,}0 \text{ м}.$$

Относительное расстояние

$$\bar{x}' = x'/r = 1{,}0/0{,}5 = 2{,}0.$$

Относительная скорость $\bar{v}_x$ для расстояния x':

$$\bar{v}_{x'} = 1 - \frac{\bar{x}}{\sqrt{1+\bar{x}^2}} = 1 - \frac{2,0}{\sqrt{1+2,0^2}} = 0,114.$$

Скорость воздуха на расстоянии x':

$$v_{x'} = \bar{v}_{x'} v_0 = 0,114 \cdot 1,79 = 0,204 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии x (на дальнем краю источника тепловыделения):

$$A_x = \frac{A_{\text{п}} v_{\text{п}} - x}{v_0} \cdot \frac{1}{\dfrac{[A_{\text{п}} v_{\text{п}}/(A_0 v_0) - 1](x_{\text{п}} - x)}{x_{\text{п}}} + 1} =$$

$$= \frac{1,105 \cdot 0,204}{1,79} \cdot \frac{1}{\dfrac{[1,105 \cdot 0,2/(0,0775 \cdot 1,79) - 1](1,4 - 0,4)}{1,4} + 1} = 0,0885 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Концентрация вредных веществ над центром теплового источника:

$$C_0 = G/L;$$

$$C_{0\text{CO}} = 100000/2640 = 379 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{0\text{NO}_2} = 20000/2640 = 75,7 \text{ мг/м}^3.$$

Молярные массы оксида углерода и диоксида азота: $M_{CO}=28$; $M_{NO_2}=44$; $M_{\text{в}}=29$.

Коэффициенты пропорциональности, учитывающие диффузионную способность вещества:

$$k = \sqrt{M_1/M_2}; \qquad k_{\text{CO}} = \sqrt{29/28} = 1,02; \qquad k_{\text{NO}_2} = \sqrt{29/44} = 0,815.$$

Концентрация вредных веществ на краю источника газовыделений:

$$C_{x\text{CO}} = 1,02 \cdot 379 e^{-0,934 \cdot 0,15/0,0885} = 79,7 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{x_{\text{NO}_2}} = 0,815 \cdot 75,7 e^{-0,934 \cdot 0,15/0,0885} = 12,7 \text{ мг/м}^3;$$

$$v/v_{\text{п}} = 0,934/0,2 = 4,67.$$

При $v/v_{\text{п}} > 2$ количество вредных веществ, направленных в противоположную сторону от местного отсоса, определяется по формуле:

$$G_x = \frac{L_x C_x}{1 - e^{-vx/A_x}};$$

$$G_{\text{CO}} = \frac{2640 \cdot 79,7}{1 - e^{-0,934 \cdot 0,15/0,0885}} = 26500 \text{ мг/ч}, \quad \text{или} \quad 26,5 \text{ г/ч};$$

$$G_{\text{NO}_2} = \frac{2640 \cdot 12,7}{1 - e^{-0,934 \cdot 0,15/0,0885}} = 4220 \text{ мг/ч}, \quad \text{или} \quad 4,22 \text{ г/ч}.$$

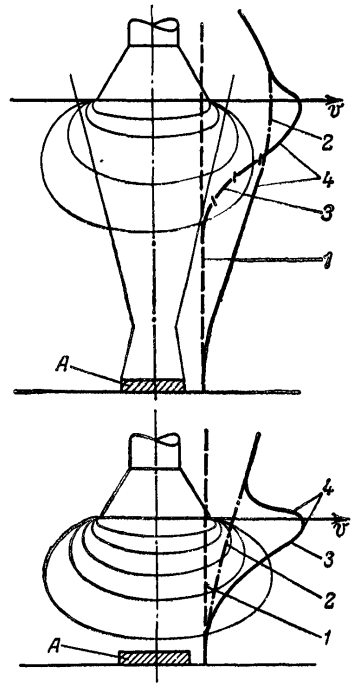


Рис. 5.19. Распределение скоростей всасывания на входе в местный отсос над тепловым источником A при принудительной системе вентиляции:

1 — подвижность воздуха в помещении, *2* — скорость воздушного потока, обусловленная тепловым источником; *3* — скорость воздушного потока, обусловленная принудительной системой вентиляции на входе в местный отсос; *4* — суммарная скорость всасывания

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G - G_x}{G} 100;$$

по оксиду углерода:

$$Эф = \frac{100 - 26{,}5}{100} = 73{,}5\%;$$

по диоксиду азота:

$$Эф = \frac{20 - 4{,}22}{20} 100 = 77{,}8\%.$$

5.5. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ДВИЖЕНИИ НАГРЕТОГО ЗАГРЯЗНЕННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Распределение вредных газообразных веществ над тепловым источником может быть представлено как совокупность двух различных по характеру схем: распределение, относящееся к зоне распространения тепловой струи, и распределение вне ее зоны действия. На рис. 5.19 показано распределение скоростей всасывания на входе в местный отсос над тепловым источником A при принудительной системе вентиляции.

Количество вредных газообразных веществ, распределяющихся между рассматриваемыми зонами:

$$G = G_1 + G_2, \tag{5.47}$$

где G_1 — количество вредных веществ, поступающих в помещение в результате диффузионного переноса из пограничной зоны тепловой струи; G_2 — количество вредных веществ, поступающих с тепловой струей.

Количество вредных веществ, поступающих из пограничной зоны тепловой струи:

$$G_1 = q_{уд.с} F_c, \tag{5.48}$$

где $q_{уд.с}$ — удельное количество вредных веществ, теряемое с единицы поверхности тепловой струи;

$$q_{уд.с} = G/F,$$

F — общая поверхность тепловой струи, м^2; расчет поверхностей тепловой струи приведен в разделе 5.7; F_c — поверхность свободной тепловой струи,

принимается для вертикально расположенного местного отсоса — до нижней его кромки; для горизонтального и наклонно расположенных местных отсосов — до его оси симметрии.

Количество вредных веществ, поступающих из пограничной зоны тепловой струи:

для источника, установленного на основании:

$$G_1 = \frac{4}{3}\pi R^3 C_0; \tag{5.49}$$

для источника, заделанного заподлицо с плоскостью:

$$G_1 = \frac{2}{3}\pi R^3 C_0. \tag{5.50}$$

Для источников прямоугольной или неправильной формы с некоторым приближением вместо R можно принять $R_э$ (эквивалентное). По формулам (5.49) и (5.50) можно определить также объемную концентрацию вредного вещества C_0:

для источника, установленного на основаиии:

$$C_0 = \frac{3}{4}\frac{GF_c}{F\pi R^3}; \tag{5.51}$$

для источника, заделанного заподлицо с плоскостью

$$C_0 = \frac{2}{3}\frac{GF_c}{F\pi R^3}. \tag{5.52}$$

Изменение концентрацни газообразных веществ на некотором расстоянии x от тепловой струи можно записать в следующем виде:

$$C_x = kC_0 e^{-\bar{x}}, \tag{5.53}$$

где k — коэффицнент пропорциональности, учитывающий диффузионную способность вещества;

$$k = \sqrt{M_1/M_2}; \tag{5.54}$$

M_2, M_1 — молярные массы рассматриваемых веществ (выделяющегося вещества и среды, в которую оно диффундирует); $\bar{x}$ — относнтельное расстояиие;

$$\bar{x} = x/R; \tag{5.55}$$

x — расстояние в направлении диффузии (наименьшее расстояние от границы тепловой струи до рассматриваемой точки), м; R — расстояние от теплового источника до рассматриваемой точки тепловой струи, м.

Количество вредного вещества, проходящего через сферическую поверхность на некотором расстоянии x от тепловой струи, как для источника, установленного на основании, так и для источника, заделанного заподлицо с плоскостью, определяется по формуле:

$$G_x = k\frac{F_c}{F}Ge^{-\bar{x}}. \tag{5.56}$$

Количество вредного вещества, поступающего в местный отсос, в рассматриваемой зоне пропорционально площади, перекрываемой местным отсосом;

для источника, установленного на основании:

$$G_{\text{отс}} = G_x \frac{R^2_0}{4R^2}; \tag{5.57}$$

для источника, заделанного заподлицо с плоскостью:

$$G_{\text{отс}} = G_x \frac{R^2_0}{2R^2}, \tag{5.58}$$

где R_0 — радиус патрубка местного отсоса, м.

Отношение $R_0^2/2R^2$ или $R_0^2/4R^2$ может быть равно или меньше единицы.

Количество вредных веществ, поступающих с тепловой струей G_2:

$$G_2 = G - G_1. \tag{5.59}$$

Удельное количество вредных веществ, приходящееся на единицу объема проходящего воздушного потока через рассматриваемое сечение:

$$q_2 = G_2/L = G_2/3600\pi r^2 v_{\text{ср}} = \frac{G_2 y}{3600\pi r^2 \int_0^y Б e^{-\frac{m}{z^2}y^2} dy}, \tag{5.60}$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость воздушного потока в тепловой струе, м/с; L — объем воздушного потока в рассматриваемом сечении тепловой струи, м³/ч; r — радиус тепловой струи в рассматриваемом сечении, м; y — расстояние от оси тепловой струи до рассматриваемой точки по горизонтали, м; z — то же, по вертикали м; m и $Б$ — параметры теплового потока. Расчет данных параметров приведен в гл. 4.

Интегрируя уравнение (5.60) и преобразуя его, получаем:

$$q_2 = \frac{G_2}{\pi y^2 Б \left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right) 3600}. \tag{5.61}$$

Количество вредных веществ, проходящих через рассматриваемое сечение:

$$G_x = q_2 L_x, \tag{5.62}$$

где L_x — количество воздуха, проходящего через рассматриваемое сечение;

$$L_x = F_x v_{\text{ср}\,x}; \tag{5.63}$$

для круглого сечения радиусом y, расположенного симметрично относительно оси теплового потока,

$$F_x = \pi y_1^2; \tag{5.64}$$

$$v_{\text{ср.}\,x} = Б \left(1 - \frac{y^2_1}{3} + \frac{y^4_1}{10} - \frac{y^6_1}{42}\right). \tag{5.65}$$

Подставляя выражения $v_{\text{ср.}x}$, F_x в уравнение (5.62), получим:

$$G_x = \frac{G_2 \left(1 - \frac{y^2_1}{3} + \frac{y^4_1}{10} - \frac{y^6_1}{42}\right) y^2_1}{y^2 \left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right)}. \tag{5.66}$$

При упрощенных расчетах для круглого сечения:

$$G_x = \frac{G_2\left(1 - \frac{y_1^2}{3}\right)y_1^2}{y^2\left(1 - \frac{y^2}{3}\right)}; \qquad (5.67)$$

для рассматриваемого кольцевого сечения:

$$G_x = \frac{G_2 y_2 (y_2^2 - y_1^2)\left[\left(1 - \frac{y_2^2}{3}\right) - \left(1 - \frac{y_1^2}{3}\right)\right]}{y^2 (y_2 - y_1)\left(1 - \frac{y^2}{3}\right)}. \qquad (5.68)$$

Пример 5.10. Определить эффективность работы вытяжных зонтов, расположенных на высоте 0,4 и 1,8 м над тепловым источником, установленным заподлицо с основанием.

Исходные данные. Количество конвективного тепла, отходящего от источника, $Q_0 = 2000$ Вт. Количество выделяющегося оксида углерода от теплового источника $G_0 = 100$ г/ч. Зонт круглый, $D = 1{,}0$ м, расположен симметрично оси тепловой струи. Подвижность воздуха в помещении $v_п = 0{,}2$ м/с. Теплонапряженность помещения $\bar{Q}_ф < 23$ Вт/м^3. Определить концентрацию вредного вещества на высоте 0,4 м над рабочим местом, расположенном на уровне зонта, расстояние от зонта до рабочего места 0,3 м.

Решение. **Зонт расположен на высоте 0,4 м.** Тепловая струя имеет форму усеченного конуса с основаниями, равными диаметру источника d выделения вредных веществ и диаметру шейки струи, равному $0{,}766d$:

$$F_1 = 3{,}9d^2 = 3{,}9 \cdot 0{,}8^2 = 2{,}496 \text{ м}^2.$$

Температурный градиент помещения при теплонапряженности $\bar{Q} < 23$ Вт/м^3 $\Delta t = 3$ °С; в то же время

$$\Delta t = \frac{B_1 Q^{2/3}}{z^{5/3}},$$

где B_1 — параметр, характеризующий движение тепловой струи около источника (см. гл. 4), откуда высота z, на которой $\Delta t = 3$ °С

$$z^{5/3} = \frac{B_1 Q^{2/3}}{\Delta t} = \frac{0{,}53\sqrt[3]{2000^2}}{3} = 28{,}05;$$

$$z = 7{,}38 \text{ м}.$$

Диаметр тепловой струи на высоте $z = 7{,}38$ м.

$$D = 0{,}45z^{0{,}88} = 0{,}45 \cdot 7{,}38^{0{,}88} = 2{,}6 \text{ м}.$$

Расстояние от источника до шейки струи:

$$h_1 = 1{,}4d = 1{,}4 \cdot 0{,}8 = 1{,}12 \text{ м}.$$

Расстояние от полюса струи до шейки струи для источника, установленного заподлицо с плоскостью:

$$h_1 = z_п + d_1 = 0{,}8 + 1{,}12 = 1{,}92 \text{ м}.$$

Расстояние от шейки струи до высоты, на которой Δt по оси равно 3 °С:

$$h_2 = z - h_1 = 5{,}6 - 1{,}92 = 3{,}68 \text{ м}.$$

Поверхность усеченного конуса с основаниями, равными диаметру шейки тепловой струи d и диаметру тепловой струи D, на которой температура равна температурному градиенту:

$$F_2 = \frac{\pi}{2}(0{,}766d + D)\sqrt{\left(\frac{D - 0{,}766d}{2}\right)^2 + (5{,}6d - П)^2},$$

где П — параметр воздушной струи вблизи теплового источника (см. гл. 4);

$$F_2 = \frac{3{,}14}{2}(0{,}766 \cdot 0{,}8 + 2{,}6)\sqrt{\left(\frac{2{,}6 - 0{,}766 \cdot 0{,}8}{2}\right)^2 + (5{,}6 \cdot 0{,}8 - 0{,}8)^2} =$$

$$= 19{,}3 \text{ м}^2.$$

Поверхность конуса тепловой струи с основанием, равным D, на высоте $h = 7{,}0d$ и высотой равной h_3:

$$h_3 = z - 7{,}0d = 7{,}38 - 7 \cdot 0{,}8 = 1{,}78 \text{ м};$$

$$F_3 = \frac{\pi D}{2}\sqrt{(z - 7d)^2 + (D/2)^2} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot 2{,}6}{2}\sqrt{(7{,}38 - 7 \cdot 0{,}8)^2 + \left(\frac{2{,}6}{2}\right)^2} = 9{,}0 \text{ м}^2.$$

Общая поверхность тепловой струи:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = 2{,}496 + 19{,}3 + 9{,}0 = 30{,}796 \approx 30{,}8 \text{ м}^2.$$

Удельное количество вредных веществ, теряемых с единицы поверхности тепловой струи:

$$q_{уд} = G/F = \frac{100}{30{,}8} = 3{,}25 \text{ г/м}^2.$$

Поверхность тепловой струи от источника до зонта, расположенного на высоте $h = 0{,}4$ м:

$$F_c = 1{,}0 \text{ м}^2.$$

Количество вредных веществ, поступающих в помещение из пограничной зоны тепловой струи:

$$G_1 = q_{уд}F_c = 3{,}25 \cdot 1 = 3{,}25 \text{ г/ч}.$$

Диаметр тепловой струи на высоте 0,4 м меньше диаметра зонта. Следовательно, количество вредных веществ, теряемых с поверхности тепловой струи, равно нулю: $G_2 = 0$;

Общая потеря вредных веществ:

$$G_1 + G_2 = 3{,}25 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G_{пот}}{G_0}100 = \frac{100 - 3{,}25}{100} \cdot 100 \approx 97\ \%.$$

Концентрация вредного вещества на границе тепловой струи:

$$C_0 = \frac{2}{3}\frac{GF_c}{F\pi R^3} = \frac{2}{3}\frac{100 \cdot 1{,}0}{30{,}8 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}4^3} = 16{,}15 \text{ мг/м}^3.$$

Коэффициент пропорциональности, учитывающий диффузионную способность вещества:

$$k = \sqrt{M_1/M_2} = \sqrt{29/28} = 1{,}02,$$

где M_1 — молярная масса воздуха; M_2 — молярная масса оксида углерода. Относительное расстояние:

$$\bar{x} = x/R = 0{,}3/0{,}4 = 0{,}75.$$

Концентрация вредных веществ на рабочем месте:

$$C_x = kc_0e^{-\bar{x}} = 1{,}02 \cdot 16{,}15e^{-0{,}75} = 7{,}77 \text{ мг/м}^3.$$

Зонт расположен на высоте 1,8 м. Поверхность тепловой струи от источника до ее шейки:

$$F_1 = 3{,}9d^2 = 3{,}9 \cdot 0{,}8^2 = 2{,}496 \text{ м}^2.$$

Диаметр тепловой струи на высоте 1,8 м:

$$D = 0{,}45z^{0{,}88} = 0{,}45 \cdot 2{,}6^{0{,}88} = 1{,}05 \text{ м}.$$

Высота усеченного конуса с диаметрами оснований тепловой струи, равными $0{,}766d$ и 1,05 м:

$$h_2 = 1{,}8 - 1{,}12 = 0{,}68 \text{ м}.$$

Поверхность усеченного конуса от шейки тепловой струи до зонта:

$$F_2 = \frac{\pi}{2}(0{,}766 + D)\sqrt{\left(\frac{D - 0{,}766d}{2}\right)^2 + h_2^2} =$$

$$= \frac{3{,}14}{2}(0{,}766 \cdot 0{,}8 + 1{,}05)\sqrt{\left(\frac{1{,}05 - 0{,}766 \cdot 0{,}8}{2}\right)^2 + 0{,}68^2} = 1{,}88 \text{ м}^2.$$

Общая поверхность тепловой струи от источника до зонта на высоте 1,8 м:

$$F_c = F_1 + F_2 = 2{,}496 + 1{,}88 = 4{,}376 \text{ м}^2.$$

Количество вредных веществ, поступающих в помещение из пограничной зоны тепловой струи:

$$G_1 = q_{уд}F_c = 3{,}25 \cdot 4{,}376 = 14{,}2 \text{ г/ч}.$$

Расстояние от теплового источника до верхней границы разгонного участка составляет

$$h_0 = h_2 + h_1 = 1{,}12 + 3{,}68 = 4{,}8 \text{ м}.$$

Поскольку расстояние от теплового источника до зонта меньше расстояния от теплового источника до верхней границы разгонного участка: $h < h_0 = 1{,}8 \text{ м} < 4{,}8 \text{ м}$, можно воспользоваться закономерностями распределения скоростей на переходном и основном участках.

Количество вредного вещества, проходящего через поперечное сечение теплового потока на высоте зонта, составляет:

$$G = G_0 - G_1 = 100 - 14{,}2 = 85{,}8 \text{ г/ч}.$$

Колличество вредных веществ, проходящих через зонт:

$$G_x = \frac{G\left(1 - \frac{y_1^2}{3}\right)y_1^2}{y^2\left(1 - \frac{y^2}{3}\right)} = \frac{85{,}8\left(1 - \frac{0{,}5^2}{3}\right)0{,}5^2}{0{,}525^2\left(1 - \frac{0{,}525^2}{3}\right)} = 79{,}0 \text{ г/ч}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G_{пот}}{G_0} 100 = \frac{100 - 21{,}0}{100} \cdot 100 = 79{,}0\ \%.$$

Параметр $Б$ находим из выражения:

$$Б = \frac{C_1 \sqrt[3]{Q}}{\sqrt[3]{z}} = \frac{0{,}13 \sqrt[3]{1716}}{\sqrt[3]{2{,}6}} = 1{,}13.$$

Средняя скорость в сечении зонта:

$$v_{ср\,x} = Б\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right) =$$

$$= 1{,}13\left(1 - \frac{0{,}5^2}{3} + \frac{0{,}5^4}{10} - \frac{0{,}5^6}{42}\right) = 1{,}036\ м/с.$$

Необходимый объем воздуха, проходящего через зонт при естественной вытяжке:

$$L_x = F_з v_{ср\,x} = 3{,}14 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}036 \cdot 3600 = 2928 \approx 2930\ м^3/ч.$$

5.6. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ВБЛИЗИ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Тепловая напряженность конвективного потока на некотором расстоянии x от источника выделения тепла во встречном потоке воздуха определяется по формуле Вт/м³:

$$q_x = q_0 e^{-vx/A_x}. \qquad (5.69)$$

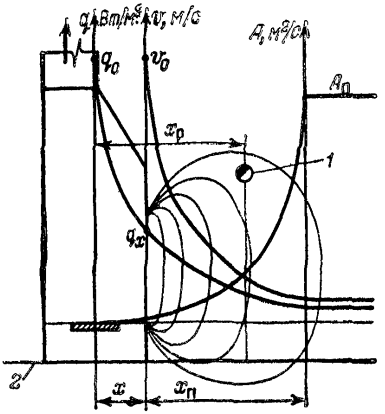
Распределение температур, обусловленное изменением конвективного потока, пропорционально изменению тепловой напряженности газового потока вблизи источника его выделения и выражается формулой:

$$t_x = t_0 e^{-vx/A_x}, \qquad (5.70)$$

где q_0 — средняя теплонапряженность воздушного потока над центром источника выделения, Вт/м³;

$$q_0 = Q_0/L; \qquad (5.71)$$

Q_0 — количество выделяющегося конвективного тепла, Вт; L — объем воздуха, проходящего через всасывающее отверстие местного отсоса, м³/ч; t_0 — температура над центром теплового источника; x — расстояние, м: для теплового источника, расположенного внутри местного отсоса (укрытие шкафного типа), от центра источника выделения тепла до места поступления воздуха в местный отсос; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, при скорости воздушного потока на дальнем конце источника, превышающей подвижность воздуха в помещении ($v > v_п$), расстояние от центра источника поступления тепла до дальнего его конца, м; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, и при скорости воздушного потока на дальнем конце источника, меньшей или равной подвижности воздуха в помещении ($v \leqslant v_п$), расстояние от центра части теплового источника, попадающего в зону действия местного отсоса, до границы зоны его действия; v — скорость воздушного потока, м/с: для теплового источника, расположенного внутри местного отсоса — во всасывающем отверстии местного отсоса; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, при ско-



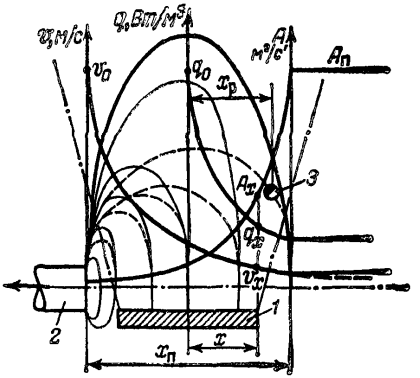


Рис. 5.20. Характер изменения основных характеристик воздушного потока вблизи теплового источника, расположенного внутри местного отсоса — вытяжного шкафа:

1 — рабочее место; *2* — тепловой источник

Рис. 5.21. Характер изменения основных характеристик воздушного потока вблизи теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, при $v > v_п$ на дальнем конце источника:

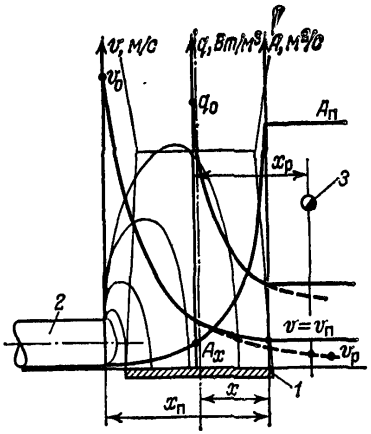
1 — источник выделения тепла; *2* — местный отсос; *3* — рабочее место

рости на дальнем конце источника, превышающей подвижность воздуха в помещении ($v > v_п$), берется скорость на дальнем конце источника, выделяющего тепло; для теплового источника, *расположенного снаружи местного отсоса* при скорости воздушного потока на дальнем конце источника, меньшей или равной подвижности воздуха в помещении ($v \leqslant v_п$), скорость равна расчетной скорости воздуха от местного отсоса

Распределение скоростей воздушных потоков на входе во всасывающие отверстия местных отсосов при принудительной системе вентиляции, а также над тепловым источником при естественной вентиляции рассмотрено в гл. 4. Значение скоростей воздушного потока в любой заданной точке над тепловым источником при принудительной системе вентиляции равно векторной сумме скоростей от теплового источника при естественной конвекции воздушного потока от местного отсоса и при принудительной системе вентиляции. В формуле (5.70) величина A_x — коэффициент турбулентного обмена воздушного потока, м²/с: для теплового источника, расположенного внутри местного отсоса, принимается для всасывающего отверстия местного отсоса; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, при скорости воздушного потока на дальнем его конце, превышающей подвижность воздуха в помещении ($v > v_п$), принимается для дальнего его конца; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, при скорости воздушного потока на дальнем его конце, меньшей или равной подвижности воздуха в помещении ($v \leqslant v_п$), принимается равным коэффициенту турбулентного обмена воздушных потоков помещения:

$$A_x = A_п.$$

Величина $e^{\frac{vx}{A_x}}$ в зависимости от произведения приведена в Приложении II.



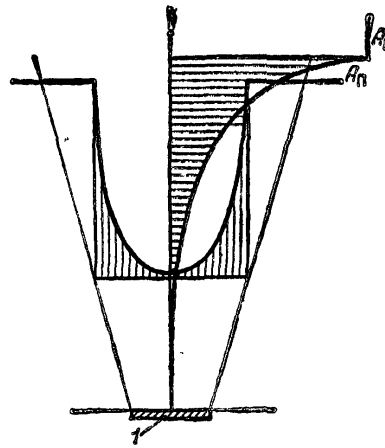


Рис. 5.22. Характер изменения основных характеристик воздушного потока вблизи теплового источника, *расположенного снаружи местного отсоса; при* $v \leqslant v_п$ на дальнем конце источника:

1 — источник выделения тепла; *2* — местный отсос; *3* — рабочее место

Рис. 5.23. Характер изменения коэффициента турбулентного обмена вблизи теплового источника (*1* — тепловой источник)

Следует помнить, что формулы распределения тепловой напряженности и температур теплового потока во встречном потоке воздуха справедливы тогда, когда приточные струи не направлены непосредственно на конвективную струю источника и местный отсос и когда тепловое напряжение помещения значительно меньше теплового напряжения потока струи.

Характер изменения основных характеристик воздушного потока вблизи теплового источника, расположенного внутри местного отсоса, показан на рис. 5.20; снаружи местного отсоса при скорости воздушного потока на дальнем краю источника, превышающей подвижность воздуха в помещении ($v > v_п$), — на рис. 5.21; снаружи местного отсоса при скорости воздушного потока на дальнем конце источника, меньшей или равной подвижности воздуха в помещении ($v \leqslant v_п$) — на рис. 5.22. Характер изменения коэффициента турбулентного обмена вблизи теплового источника показан на рис. 5.23.

Количество тепла, направленное навстречу потоку воздуха, движущемуся к местному отсосу, при скорости воздушного потока на дальнем конце источника, превышающей подвижность воздуха в помещении ($v \geqslant v_п$), определяется: для теплового источника, расположенного внутри местного отсоса, исходя из скорости воздушного потока в месте выделения конвективного тепла в помещение; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, исходя из скорости воздушного потока на дальнем краю его при $\bar{v} \geqslant 2{,}0$ ($\bar{v} = v/v_п$):

$$Q_1 = \frac{L_x q_x}{1 - e^{-vx/A_x}}, \qquad (5.72)$$

где L_x — расход воздуха в рассматриваемом сечении, м³/ч.

При $1{,}2 < \bar{v} \leqslant 2{,}0$, где $\bar{v} = v/v_п$, количество тепла Q_1 определяется по формуле, Вт:

$$Q_1 = L_x q_x. \qquad (5.73)$$

При $\bar{v} \leqslant 1{,}2$ расход тепла можно определить из выражения Вт:

$$Q_1 = \frac{2L_x q_x \left(1 - e^{-vx/A_x}\right)}{\left(2 - e^{-vx/A_x}\right)}. \qquad (5.74)$$

При скорости воздушного потока над частью теплового источника, меньшей подвижности воздуха в помещении, расход тепла, направленный в противоположную сторону от источника, равен суммарному количеству тепла от части источника, попадающего в зону действия местного отсоса Q_1, и тепла, не попадающего в зону действия местного отсоса Q_2.

Эффективность работы местного отсоса определяется по формуле:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \cdot 100, \qquad (5.75)$$

где Q_0 — количество конвективного тепла, выделяющегося от теплового источника; Q — количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$Q = Q_1 + Q_2. \qquad (5.76)$$

Перед проведением поверочного расчета эффективности работы местного отсоса ориентировочно принимают расход воздуха, проходящего через него, исходя из рекомендуемых скоростей в рабочем проеме местного отсоса.

Пример 5.11. Определить эффективность работы вытяжного шкафа с верхним отсосом воздуха.

Исходные данные. В вытяжном шкафу установлен тепловой источник мощностью 3000 Вт на расстоянии 0,2 м от вытяжного отверстия. Размер вытяжного отверстия 1,2×0,9 м. Объем воздуха, удаляемого через вытяжной шкаф, 2840 м³/ч. Объем помещения 500 м³. Кратность воздухообмена в помещении $Kp=8$. Приточный воздух подается через потолочный воздухораспределитель типа ВДШ. Скорость выхода воздуха из воздухораспределителя $v=3$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}1$ м/с. Температура над центром теплового источника $t_0=300$ °С. Определить температуру на рабочем месте, расположенном на расстоянии 0,2 м от вытяжного шкафа.
Распределение основных характеристик воздушного потока приведено на рис. 5.24.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного воздухораспределителя типа ВДШ $\xi=1{,}3$ (по табл. 4.1).

Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{п.с} = Kp \frac{\xi v^2}{2} = 8 \frac{1{,}3 \cdot 3^2}{2 \cdot 3600} = 0{,}013 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия тепловых струй $\varepsilon_{т.с}=0$. Энергия движущихся предметов $\varepsilon_{д.п}=0$. Полная энергия воздушных потоков в помещении:

$$\varepsilon = \varepsilon_{п.с} + \varepsilon_{т.с} + \varepsilon_{д.п} = 0{,}013 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер местного отсоса:

$$l = \sqrt{F} = \sqrt{1{,}2 \cdot 0{,}9} = 1{,}04 \text{ м}.$$

Коэффициент турбулентного обмена местного отсоса:

$$A_0 = 0{,}25\varepsilon^{1/3} l^{4/3} = A_0 = 0{,}25 \cdot 0{,}013^{1/3} \cdot 1{,}04^{4/3} = 0{,}0617 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Скорость воздушного потока во всасывающем отверстии местного отсоса:

$$v_0 = L/F = 2480/(1{,}2 \cdot 0{,}9 \cdot 3600) = 0{,}64 \text{ м/с},$$

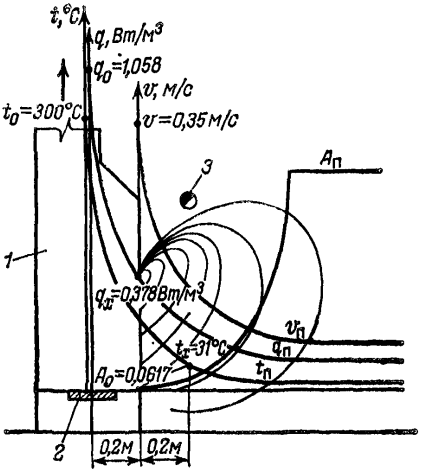


Рис. 5.24. Распределение основных характеристик воздушного потока при тепловом источнике, расположенном внутри вытяжного шкафа:

1 — вытяжной шкаф; *2* — тепловой источник; *3* — рабочее место

Относительная скорость в сечении открытого проема на уровне $H=0{,}3$ м (высота установки теплового источника) $\bar{v}=0{,}55$. Скорость воздушного потока на высоте установки теплового источника:

$$v = v_0\bar{v} = v = 0{,}64 \cdot 0{,}55 = 0{,}35 \text{ м/с}.$$

Средняя тепловая напряженность газового потока над центром источника выделения $q_0=3000/2840=1{,}058$ Вт/м³.

Тепловая напряженность конвективного потока во всасывающем отверстии вытяжного шкафа:

$$q_x = q_0 e^{-vx/A_x} = 1{,}058e^{-0{,}35 \cdot 0{,}2/0{,}0617} = 0{,}378 \text{ Вт/м}^3.$$

Отношение $v/v_п=0{,}35/0{,}1=3{,}5$.

При $v/v_п>2{,}0$ количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса, определяется по формуле:

$$Q_1 = \frac{L_x q_x}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{2840 \cdot 0{,}378}{1 - e^{-0{,}35 \cdot 0{,}2/0{,}0617}} = 1670 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{Q - Q_1}{Q} 100 = \frac{3000 - 1670}{3000} \cdot 100 = 44{,}3\ \%.$$

Температура воздушного потока на рабочем месте:

$$t_x = t_0 e^{-vx/A_x},$$

где x — расстояние от центра источника до рабочего места;

$$x = 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}4 \text{ м};$$

$$t_x = 300e^{-0{,}35 \cdot 0{,}4/0{,}0617} = 31\ °\text{C}.$$

Пример 5.12. Определить эффективность работы местного отсоса типа приближенный раструб без фланца.

Исходные данные. Размер раструба $ab=200\times200$ мм. Объем удаляемого воздуха через местный отсос $L_0=630$ м³/ч. Тип источника выделения — линей-

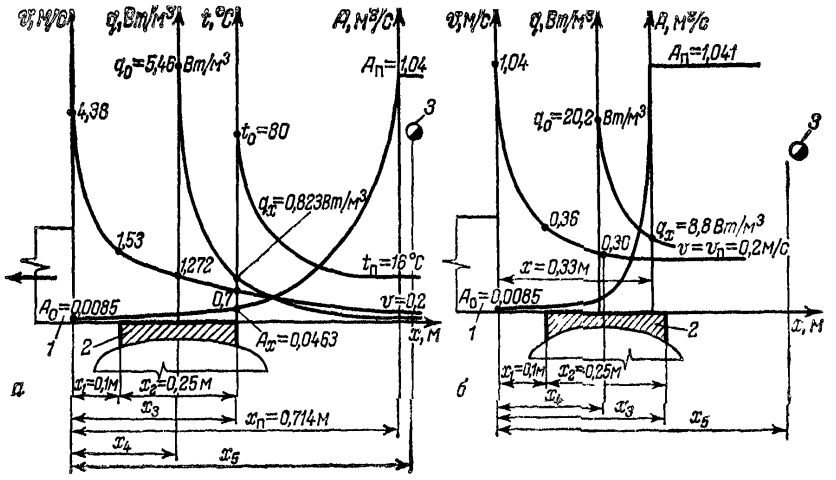


Рис. 5.25. Распределение основных характеристик воздушного потока вблизи теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса (приближенного раструба), при больших объемах отсасываемого воздуха (*а*) и малых объемах (*б*):

1 — местный отсос; *2* — тепловой источник; *3* — рабочее место

ный (люк). Диаметр люка 250 мм. Количество тепла, поступающего из люка, $Q_0=1000$ Вт/ч. Температура теплового источника $t=80$ °С.

Схемы расположения местного отсоса и движения воздушных потоков в помещении приведены на рис. 5.6. Кратность воздухообмена в помещении $Kp=10$. Приточный воздух подается через пристенные панельные воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток $v=3{,}0$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}2$ м/с. Объем помещения 1000 м³. Тепловая напряженность помещения $\bar{Q}=0$. Температура в помещении $t_п=16$ °С.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 (из табл. 4.1) $\xi=2{,}0$.

Энергия приточных струй:

$$\varepsilon_{п.с}=Kp\frac{\xi v^2}{2}=10\frac{2\cdot 3^2}{2\cdot 3600}=0{,}025\ \text{м}^2/\text{с}^3.$$

Энергия тепловых потоков и движущихся предметов:

$$\varepsilon_{т.с}=\varepsilon_{д.п}=0.$$

Кинетическая энергия воздушных потоков помещения:

$$\varepsilon=\varepsilon_{п.с}+\varepsilon_{т.с}+\varepsilon_{д.п}=0{,}025\ \text{м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер рассматриваемого объекта $l=\sqrt{F}$: местного отсоса: $l_0=\sqrt{0{,}2\cdot 0{,}2}=0{,}2$ м; помещения: $l_п=\sqrt{12\cdot 4{,}5}=7{,}35$ м.

Коэффициент турбулентного обмена:

$$A=0{,}25\varepsilon^{1/3}l^{4/3}:$$

местного отсоса: $A_0=0{,}25\cdot 0{,}025^{1/3}\cdot 0{,}2^{4/3}=0{,}0085$ м²/с; помещения: $A=0{,}25\cdot 0{,}025^{1/3}\cdot 7{,}35^{4/3}=1{,}041$ м²/с.

Расстояние от отсоса до ближайшего края люка $x_1=0{,}1$ м; расстояние от отсоса до дальнего края люка (рис. 5.25, *а*): $x_3=0{,}1+0{,}25=0{,}35$ м; расстояние от местного отсоса до центра люка: $x_4=0{,}1+0{,}25/2=0{,}225$ м; расстояние от отсоса до рабочего места: $x_5=0{,}1+1=1{,}1$ м.

Относительные расстояния: $\bar{x}=x/b$: $x_1=0{,}1/0{,}2=0{,}5$; $x_3=0{,}35/0{,}2=1{,}75$; $x_4=0{,}225/0{,}2=1{,}125$; $x_5=1{,}1/0{,}2=5{,}5$.

Относительные скорости воздуха:

на расстоянии $x\leqslant b$ по рис. 4.10: $\bar{v}=0{,}35$; на расстоянии $x\geqslant b$ по формуле

$$\bar{v}_x=\frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)};$$

$$\bar{v}_{x_3}=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}1{,}75\sqrt{1+(1+1{,}75^2)}=0{,}16;$$

$$\bar{v}_{x_4}=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}1{,}125\sqrt{1+(1+1{,}125^2)}=0{,}29;$$

$$\bar{v}_{x_5}=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}5{,}5\sqrt{1+(1+5{,}5^2)}=0{,}02.$$

Скорость воздуха на входе в вытяжное отверстие:

$$v_0=L/F=630/(0{,}2\cdot0{,}2\cdot3600)=4{,}375\text{ м/с}\approx4{,}38\text{ м/с}.$$

Скорость воздуха на расстоянии x, м/с:

$$v_x=v_0\bar{v}_x;\qquad v_{x_1}=4{,}38\cdot0{,}35=1{,}533;$$

$$v_{x_3}=4{,}38\cdot0{,}16=0{,}7;\qquad v_{x_4}=4{,}38\cdot0{,}29=1{,}272;$$

$$v_{x_5}=4{,}38\cdot0{,}02=0{,}0876.$$

Поскольку скорость на расстоянии x_5 меньше подвижности воздуха в помещении, определяем расстояние, на котором скорость на входе во всасывающее отверстие равна подвижности воздуха в помещении: $v_x=v_п$. Так как $\bar{v}_x=v_x/v_0$, то подставляя $v_x=v_п$, получим $\bar{v}_x=0{,}2/4{,}38$;

$$\bar{v}_x=\frac{2}{\pi}\operatorname{arcctg}\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)}=\frac{0{,}2}{4{,}38}=$$

$$=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\bar{x}\sqrt{1+1(1+\bar{x}^2)};$$

$$0{,}0457=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}y,$$

где $y=\bar{x}\sqrt{1+(1+\bar{x}^2)}$; $\operatorname{arcctg}y=4{,}096$; $y=13{,}7$; $\bar{x}\sqrt{1+(1+\bar{x}^2)}=13{,}7$; $\bar{x}^2(2+\bar{x})=187{,}69$; $\bar{x}^2=z$; $z^2+2z-187{,}69=0$; $z=\dfrac{-2\pm\sqrt{4+4\cdot187{,}69}}{2}=12{,}736$; $\bar{x}=3{,}57$; $\bar{x}=x/b$; $x_п=x=\bar{x}b=3{,}57\cdot0{,}2=0{,}714$ м.

Расстояние от границы, где $v=v_п$, до дальнего края люка:

$$x'=x_п-x_3=0{,}714-0{,}35=0{,}364\text{ м}.$$

Относительное расстояние $\bar{x}'=x'/b=0{,}364/0{,}2=1{,}82$.

Относительная скорость воздуха на расстоянии x':

$$\bar{v}_{x'}=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}1{,}82\sqrt{1+1(1+1{,}82^2)}=0{,}149.$$

Скорость воздуха на расстоянии x':

$$v_{x'} = \bar{v}_{x'} v_0 = 0{,}149 \cdot 4{,}38 = 0{,}652 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии x_3:

$$A_x = \frac{A_\text{п} v_{x_\text{п}-x}}{v_0} \cdot \frac{1}{\frac{[A_\text{п} v_\text{п}/(A_0 v_0) - 1](x_\text{п} - x)}{x_\text{п}} + 1};$$

$$A_x = \frac{1{,}04 \cdot 0{,}652}{4{,}38} \frac{1}{\frac{[1{,}04 \cdot 0{,}2/(0{,}0085 \cdot 4{,}38) - 1](0{,}714 - 0{,}35)}{0{,}714} + 1} =$$

$$= 0{,}0463 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расход воздуха в сечении, параллельном всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x_4 (от местного отсоса до центра люка):

$$L_4 = F v_4 = 0{,}2 \cdot 0{,}2 \cdot 1{,}272 \cdot 3600 = 183{,}17 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тепловая напряженность воздушного потока над центром источника выделения

$$q_0 = Q/L = 1000/183{,}17 = 5{,}46 \text{ Вт/м}^3.$$

Тепловая напряженность воздушного потока на краю линейного источника, Вт/м^3

$$q_x = q_0 e^{-vx/A_x},$$

где v — скорость воздуха на дальнем краю линейного источника, т. е. в нашем случае $v = v_{x_3} = 0{,}7$ м/с; A_x — коэффициент турбулентного обмена на дальнем краю линнейного источника, т. е. на расстоянии $x = x_3$; $A_x = 0{,}0463$ м^2/с; x — расстояние от центра линейного источника (от центра люка) до дальнего края источника, м;

$$x = d/2 = 0{,}250/2 = 0{,}125 \text{ м};$$

$$q_x = 5{,}46 e^{-0{,}7 \cdot 0{,}125/0{,}0465} = 0{,}823 \text{ Вт/м}^3.$$

Отношение $v/v_\text{п} = 0{,}7/0{,}2 = 3{,}5$.
При $v/v_\text{п} > 2{,}0$ количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса, определяется по формуле:

$$Q_1 = \frac{L_x q_x}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{183{,}17 \cdot 0{,}823}{1 - e^{-0{,}7 \cdot 0{,}125/0{,}0463}} = 178 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} \cdot 100 = \frac{1000 - 178}{1000} \cdot 100 = 82{,}2\ \%.$$

Температура воздушного потока на рабочем месте:

$$t_x = t_0 e^{-vx/A_x},$$

где x — расстояние от центра источника до $x = x_\text{п}$;

$$t_x = 80 e^{-0{,}7 \cdot 0{,}489/0{,}0463} = 0{,}05\ ^\circ\text{C}.$$

Поскольку $t_x < t_\text{п}$, тепловой источник не влияет на изменение температуры на рабочем месте. Распределение основных характеристик воздушного потока

вблизи теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса (приближенного раструба), показано рис. 5.25, *а*.

Пример 5.13. Определить эффективность работы местного отсоса типа приближенный раструб без фланца при исходных данных, заданных в примере 5.12. Объем удаляемого воздуха через местный отсос $L_0=150$ м³/ч.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 $\xi=2,0$.
Энергия приточных струй: $\varepsilon_{п.с}=0,025$ м²/с³. Кинетическая энергия воздушных потоков помещения: $\varepsilon=\varepsilon_{п.с}=0,025$ м²/с³.

Определяющий размер рассматриваемого объекта местного отсоса: $l_0=0,2$ м, помещения: $l_п=7,35$ м. Коэффициент турбулентного обмена местного отсоса: $A_0=0,0085$ м²/с, помещения: $A_п=1,041$ м²/с. Расстояния (рис. 5.25, *б*) м: $x_1=0,1$; $x_3=0,35$; $x_4=0,225$; $x_5=1,1$ м.
Относительные расстояния и скорости:

$$\bar{x}_1=0,5; \quad \bar{v}_{x_1}=0,35; \quad \bar{x}_3=1,75; \quad \bar{v}_{x_3}=0,16;$$

$$\bar{x}_4=1,125; \quad \bar{v}_{x_4}=0,29; \quad \bar{x}_5=5,5; \quad \bar{v}_{x_5}=0,02.$$

Скорость воздуха во всасывающем отверстии местного отсоса

$$v_0=L/F=150/0,2\cdot0,2\cdot3600=1,04 \text{ м/с}.$$

Скорость воздуха на расстоянии x, м/с:

$$v_x=\bar{v}_x v_0;$$

$$v_{x_1}=0,35\cdot1,04=0,36; \quad v_{x_4}=0,29\cdot1,04=0,30;$$

$$v_{x_3}=0,16\cdot1,04=0,166; \quad v_{x_5}=0,02\cdot1,04=0,02.$$

Из рис. 5.24, *б* видно, что расстояние, на котором скорость воздушного потока равна подвижности воздуха в помещении, составляет 0,33 м. Отношение площади, не попадающей под действие местного отсоса, к общей площади выделения вредных веществ в атмосферный воздух: $F_1/F_2=0,07$.
Количество тепла, находящегося вне зоны действия местного отсоса:

$$Q_1=Q_0\frac{F_1}{F_2}=1000\cdot0,07=70 \text{ Вт}.$$

Количество тепла, находящегося в зоне действия местного отсоса:

$$Q=1000-70=930 \text{ Вт}.$$

Расстояние от местного отсоса до центра части источника выделения тепла, попадающего в зону его действия, $x=0,215$ м. Относительное расстояние $\bar{x}=x/b=0,215/0,2=1,07$.
Относительная скорость воздуха на расстоянии $x=0,2$ м:

$$\bar{v}_x=\frac{2}{180}\operatorname{arcctg}\bar{x}\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}(1+\bar{x}^2)};$$

Скорость воздуха на расстоянии $x=0,2$ м:

$$\bar{v}_x=0,31; \quad v=0,31\cdot1,04=0,32 \text{ м/с}.$$

Расход воздуха в сечении, параллельном всасывающему отверстию местного отсоса на расстоянии x:

$$L=Fv=0,2\cdot0,2\cdot0,32\cdot3600=46,0 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тепловая напряженность воздушного потока над центром источника выделения:

$$q_0=Q/L=930/46,0=20,2 \text{ Вт/м}^3$$

Скорость воздушного потока на расстоянии $x' = x_п - x = 0{,}33 - 0{,}215 = 0{,}115$.
Относительное расстояние $\bar{x}' = x'/b = 0{,}115/0{,}2 = 0{,}575$.
При $x \leqslant b$ по рис. 4.10 находим $\bar{v}_{x'} = 0{,}23$.
Скорость воздушного потока на расстоянии x':

$$v_{x'} = \bar{v}_{x'} v_0 = 0{,}23 \cdot 1{,}04 = 0{,}24 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии $x = 0{,}215$ м: м²/с

$$A_x = \frac{A_п v_{x_п - x}}{v_0} \cdot \frac{1}{\dfrac{[A_п v_п/(A_0 v_0) - 1](x_п - x)}{x_п} + 1};$$

$$A_x = \frac{1{,}041 \cdot 0{,}24}{1{,}04} \cdot \frac{1}{\dfrac{[0{,}041 \cdot 0{,}2/(0{,}0085 \cdot 1{,}04) - 1](0{,}33 - 0{,}215)}{0{,}33} + 1} =$$

$$= 0{,}0275 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тепловая напряженность воздушного потока на краю источника тепловыделения, находящегося в зоне действия местного отсоса:

$$q_x = q_0 e^{-vx/A_x} = 20{,}2 e^{-0{,}2 \cdot 0{,}115/0{,}0275} = 8{,}8 \text{ Вт/м}^2.$$

Отношение $v/v_п = 0{,}166/0{,}2 = 0{,}83$. При $v/v_п \leqslant 1{,}2$ количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$Q_2 = \frac{2 L_x q_x \left(1 - e^{-vx/A_x}\right)}{2 - e^{-vx/A_x}} = \frac{2 \cdot 46 \cdot 8{,}8 \left(1 - e^{-0{,}2 \cdot 0{,}115/0{,}0275}\right)}{\left(2 - e^{-0{,}2 \cdot 0{,}115/0{,}0275}\right)} = 293 \text{ Вт}.$$

Общее количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 70 + 293 = 363 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} 100 = \frac{1000 - 363}{1000} 100 = 63{,}7\ \%.$$

Пример 5.14. Определить эффективность работы вытяжного зонта диаметром $d = 1{,}0$ м, установленного над источником выделения тепла диаметром $d = 0{,}8$ м.

Исходные данные. Объем удаляемого воздуха от зонта $L = 8000$ м³/ч. Источник установлен на основании. Количество выделяющегося конвективного тепла $Q_0 = 6000$ Вт. Кратность воздухообмена в помещении $Kp = 10$. Приточный воздух подается в помещение через пристенные панельные воздухораспределители типа ВПП-52. Скорость выхода воздуха из решеток $v = 3{,}0$ м/с. Подвижность воздуха в помещении $v_п = 0{,}2$ м/с. Объем помещения $V_п = 800$ м³. Температура внутри помещения $t = 24$ °С. Тепловая напряженность помещения $\bar{Q} = 2{,}0$ Вт/м³ (без учета рассматриваемого теплового источника). Распределение основных характеристик воздушного потока показано на рис. 5.26.

Решение. Поправочный коэффициент на скоростное давление для приточного панельного воздухораспределителя типа ВПП-52 (см. табл. 4.1) $\xi = 2{,}0$.
Энергия приточных струй:

$$e_{п,\,с} = Kp \frac{\xi v^2}{2} = 10 \frac{2 \cdot 3^2}{2 \cdot 3600} = 0{,}025 \text{ м}^3/\text{с}^3.$$

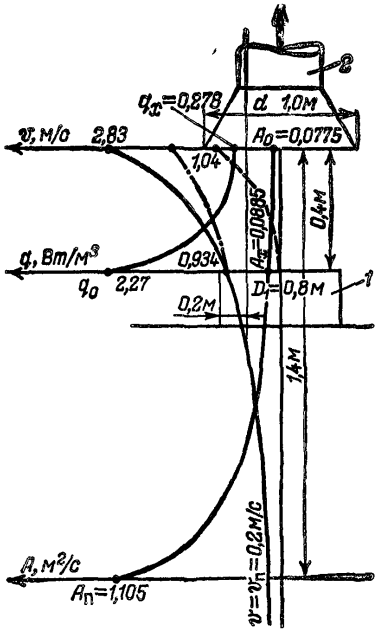


Рис. 5.26. Распределение основных характеристик воздушного потока вблизи зонта:
1 — источнник; *2* — зонт

Энергия движущихся предметов $\varepsilon_{д.п}=0$. Энергия тепловой струи:

$$\varepsilon_{т.с}=C\frac{\overline{Q}}{\rho}z,$$

где C — коэффициент пропорциональности для источника, установленного на основании $C=34{,}3\cdot10^{-6}$; ρ — плотность воздуха при температуре, равной температуре помещения $\rho=1{,}189$ кг/м³; $\overline{Q}$ — теплонапряженность объема помещения;

$$\overline{Q}=\overline{Q}_{ист}+\overline{Q}_{ф};$$

$\overline{Q}_{ист}$ — теплонапряженность источника;

$$\overline{Q}_{ист}=Q_{ист}/V_п=6000/800=7{,}5\ \text{Вт/м}^3;$$

$$\overline{Q}=7{,}5+2{,}0=9{,}5\ \text{Вт/м}^3.$$

Расстояние от источника до полюса струи:

$$z_п=1{,}7\ d,$$

где d — определяющий размер для теплового источника, равный диаметру источника или меньшей стороне, если источник прямоугольной формы

$$z_п=1{,}7\cdot0{,}8=1{,}36\ \text{м}.$$

Расстояние от источника до рассматриваемой точки:

$$z_м=x=0{,}4.$$

Расстояние от полюса струи до рассматриваемой точки:

$$z = z_п + z_н = 1{,}36 + 0{,}4 = 1{,}76 \text{ м};$$

Энергия тепловой струи

$$e_{т,\,с} = 34{,}3 \cdot 10^{-6} \frac{9{,}5 \cdot 1{,}76}{1{,}189} = 0{,}0048 \text{ м}^2/\text{с}^3;$$

Кинетическая энергия воздушных потоков помещения

$$e = e_{п\,с} + e_{т\,с} + e_{д\,п} = e = 0{,}025 + 0{,}0048 + 0 = 0{,}0298 \text{ м}^2/\text{с}^3.$$

Определяющий размер l: местного отсоса: $l = d = 1$ м; помещения: $l = \sqrt{F} = \sqrt{12 \cdot 4{,}5} = 7{,}35$ м.

Коэффициент турбулентного обмена $A = 0{,}25 e^{1/3} l^{4/3}$: местного отсоса: $A_0 = 0{,}25 \cdot 0{,}0298^{1/3} \cdot 1^{4/3} = 0{,}0775$ м²/с; помещения: $A_п = 0{,}25 \cdot 0{,}0298^{1/3} \cdot 7{,}35^{4/3} = 1{,}105$ м²/с.

Расстояние от местного отсоса до источника тепловыделения $x = 0{,}4$ м. Относительное расстояние

$$\bar{x} = x/d = 0{,}4/1{,}0 = 0{,}4.$$

Относительная скорость воздуха при механической системе вентиляции на расстоянии x:

при $\bar{x} \ll d$ по рис. 4.10: $\bar{v}_x = 0{,}33$.

Скорость воздуха во всасывающем отверстии:

$$v_0 = 8000/0{,}785 \cdot 1 \cdot 3600 = 2{,}83 \text{ м/с}.$$

Скорость воздуха на расстоянии x (около источника тепловыделения):

$$v_x = \bar{v}_x v_0 = 0{,}33 \cdot 2{,}83 = 0{,}934 \text{ м/с}.$$

Проверяем, на каком участке тепловой струи установлен местный отсос. Пределы разгонного участка $1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2$.

Отношение $z/d = 176/0{,}8 = 2{,}2$, следовательно, зонт установлен на разгонном участке тепловой струи. Скорость теплового потока над тепловым источником на расстоянии $x = 0{,}4$ м

$$v_м = 0{,}0425 \left(\frac{Q_x}{r^2}\right)^{1/3} = 0{,}0425 \left(\frac{6000 \cdot 0{,}4}{0{,}4^2}\right)^{1/3} = 1{,}04 \text{ м/с}.$$

Скорость воздушного потока во всасывающем отверстии местного отсоса, обусловленная механической системой вентиляции (без теплового источника):

$$v = v_0 - v_м = 2{,}83 - 1{,}04 = 1{,}79 \text{ м/с},$$

Расход воздуха в сечении, параллельном местному отсосу на расстоянии x:

$$L_x = Fv = 0{,}785 \cdot 1^2 \cdot 0{,}934 \cdot 3600 = 2640 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расстояние, на котором скорость воздуха на входе во всасывающее отверстие местного отсоса равна подвижности воздуха в помещении, определяется из условия

$$v_x = v_п;$$

$$v_x = \bar{v}_x v_0; \qquad \bar{v}_x = v_x/v_0 = v_п/v_0 = 0{,}2/1{,}79;$$

в то же время

$$\bar{v}_x = 1 - \bar{x}/\sqrt{1 + \bar{x}^2},$$

где $\bar{x}=x/r$, или $\bar{x}=x/0{,}5$;

$$\bar{v}_x = 1 - \frac{x/0{,}5}{\sqrt{1+(x/0{,}5)^2}}.$$

Тогда

$$\frac{0{,}2}{1{,}79} = 1 - \frac{x}{0{,}5\sqrt{1+x^2/0{,}25}},$$

откуда $x=x_п=1{,}40$ м.
Расстояние

$$x' = x_п - x = 1{,}4 - 0{,}4 = 1{,}0 \text{ м}.$$

Относительное расстояние

$$\bar{x}' = x'/r = 1{,}0/0{,}5 = 2{,}0.$$

Относительная скорость $\bar{v}_x$ для расстояния x':

$$\bar{v}_{x'} = 1 - \frac{\bar{x}}{\sqrt{1+\bar{x}^2}} = 1 - \frac{2{,}0}{\sqrt{1+2{,}0^2}} = 0{,}114.$$

Скорость воздуха на расстоянии x:

$$v_x = \bar{v}_{x'} v_0 = 0{,}114 \cdot 1{,}79 = 0{,}204 \text{ м/с}.$$

Коэффициент турбулентного обмена на расстоянии x (на дальнем краю источника тепловыделения)

$$A_x = \frac{A_п v_{x_п - x}}{v_0} \cdot \frac{1}{\dfrac{[A_п v_п/(A_0 v_0) - 1](x_п - x)}{x_п} + 1} =$$

$$= \frac{1{,}105 \cdot 0{,}204}{1{,}79} \cdot \frac{1}{\dfrac{[1{,}105 \cdot 0{,}2/(0{,}0775 \cdot 1{,}79) - 1](1{,}4 - 0{,}4)}{1{,}4} + 1} =$$

$$= 0{,}0885 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тепловая напряженность воздушного потока в центре теплового источника:

$$q_0 = Q/L_x = 6000/2640 = 2{,}27 \text{ Вт/м}^3.$$

Тепловая напряженность конвективного потока на краю источника тепловыделения:

$$q_x = q_0 e^{-vx/A_x} = 2{,}27 e^{-0{,}934 \cdot 0{,}2/0{,}0885} = 0{,}278 \text{ Вт/м}^3.$$

Отношение

$$v/v_п = 0{,}934/0{,}2 = 4{,}67.$$

При $v/v_п > 2{,}0$ количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса:

$$Q_п = \frac{L_x q_x}{1 - e^{-vx/A_x}} = \frac{2640 \cdot 0{,}228}{1 - e^{-0{,}934 \cdot 0{,}2/0{,}0885}} = 840 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса

$$Эф = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} \cdot 100 = \frac{6000 - 840}{6000} \cdot 100 = 86{,}0\ \%.$$

5.7. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНОГО ОТСОСА НАД ТЕПЛОВЫМ ИСТОЧНИКОМ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА (ПО УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ СТРУИ)

Эффективность работы местного отсоса рассчитывают по формуле:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \cdot 100, \qquad (5.77)$$

где Q_0 — количество конвективного тепла, выделяющегося от теплового источника, Вт; Q — количество тепла, направленного в противоположную сторону от местного отсоса, Вт;

$$Q = Q_1 + Q_2; \qquad (5.78)$$

Q_1 — количество тепла, поступающего в помещение в результате диффузионного переиоса из пограничной зоны тепловой струи источника;

$$Q_1 = q_{уд} F_c; \qquad (5.79)$$

F_c — поверхность свободной тепловой струи м²; для вертикально расположенных местных отсосов принимается от теплового источника до нижней кромки местного отсоса; для горизонтально и наклонно расположенных местных отсосов — от теплового источника до центра всасывающего отверстия местного отсоса; $q_{уд}$ — удельное количество тепла, теряемого с единицы поверхности тепловой струи;

$$q_{уд} = Q/F; \qquad (5.80)$$

F — общая поверхность тепловой струи, м²; прн зоне действия теплового источника $z > 7d$ общая поверхность тепловой струи

$$F = F_1 + F_2 + F_3; \qquad (5.81)$$

F_1, F_2, F_3 — поверхности частей тепловой струи с равными избыточными температурами $t + \Delta t$; для помещений с теплонапряженностью $\overline{Q} \geqslant 23$ Вт/м³ Δt принимается 5 °С; для помещений с теплонапряженностью $\overline{Q} < 23$ Вт/м³ $\Delta t = 3$ °С; F_1 — поверхность усеченного конуса тепловой струи иа участке ее поджатия; диаметр большего основания конуса равен диаметру источника d, диаметр меньшего основания равен диаметру шейки струи и составляет $0{,}766d$. Высота усеченного конуса струи равна, согласно экспериментальным данным

$$h_1 = 1{,}4d; \qquad (5.82)$$

$$F_1 = \pi(d/2 + 0{,}766d/2)\,1{,}41d = \pi d^2 1{,}41\,(0{,}5 + 0{,}383) = 3{,}9d^2; \qquad (5.83)$$

F_2 — поверхность усеченного конуса тепловой струи, диаметр бо́льшего основания которого равен диаметру струи D, диаметр меньшего основания равен диаметру шейки струи и составляет $0{,}766d$; высота усеченного конуса струи равна $h_2 = 5{,}6d - П$; $П$ — расстояние от полюса струи до теплового источника, м;

$$F_2 = \frac{\pi}{2}(0{,}766d + D)\sqrt{\left(\frac{D - 0{,}766d}{2}\right)^2 + (5{,}6d - П)^2}; \qquad (5.84)$$

Диаметр тепловой струи D (на высоте $5{,}6\,d$—П) находится из соотношения:

$$D = 0{,}45z^{0{,}88}; \tag{5.85}$$

F_3 — поверхность конуса тепловой струи, диаметр основания которого равен D, а высота h_3;

$$F_3 = \frac{\pi D}{2}\sqrt{(z-7{,}0d)^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2}; \tag{5.86}$$

h_3 — высота конуса тепловой струи:

$$h_3 = z - 7{,}0d; \tag{5.87}$$

z — общая высота тепловой струи, определяемая из следующего уравнения:

$$\Delta t = B_1 Q^{2/3} z^{-5/3}; \tag{5.88}$$

$$z^{5/3} = B_1 Q^{2/3}/\Delta t; \tag{5.89}$$

Значение параметра B_1 приведено в гл. 4.

Общая поверхность тепловой струи:

$$F = 3{,}9d^2 + \frac{\pi}{2}(0{,}766d + D)\sqrt{\left(\frac{D-0{,}766d}{2}\right)^2+(5{,}6d-\text{П})^2} + \\ + \frac{\pi D}{2}\sqrt{(D-7{,}0d)^2+\left(\frac{D}{2}\right)^2}. \tag{5.90}$$

При общей высоте тепловой струи $z \leqslant 7d$ общая поверхность тепловой струи равна:

$$F = \frac{\pi}{2}(d+D)\sqrt{(z-\text{П})^2+\left(\frac{D-d}{2}\right)^2}, \tag{5.91}$$

Количество тепла, поступающего в местный отсос с тепловым потоком, определяется из выражения:

$$Q_2 = \frac{(Q_0 - Q_1)F_{\text{пр}}}{F_{\text{стр}}}, \tag{5.92}$$

где Q_0 — общее количество тепла, поступающего от теплового источника, Вт; Q_1 — количество тепла, теряемого из пограничной зоны тепловой струи, Вт; $F_{\text{пр}}$ — общая площадь проекций тепловой струи и местного отсоса, м^2; $F_{\text{стр}}$ — площадь сечения тепловой струи на высоте верхней кромки открытого вытяжного проема: для теплового источника, расположенного внутри местного отсоса, для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, $F_{\text{стр}}$ — площадь горизонтальной проекции сечения тепловой струи: на высоте нижней кромки горизонтально расположенного местного отсоса; для теплового источника, расположенного снаружи местного отсоса, $F_{\text{стр}}$ — площадь горизонтальной проекции сечения тепловой струи на высоте центра всасывающего отверстия горизонтально и наклонно расположенных местных отсосов.

Возможные варианты расположения местных отсосов и их проекций на тепловой источник приведены на рис. 5.27—5.29.

Тепловой поток, попадающий в местный отсос, можно определить по следующей формуле:

$$Q_2 = L_{\text{отс}} c_{\text{ср.в}} \Delta t_{\text{ср.отс}} \rho_{\text{ср.в}}, \tag{5.93}$$

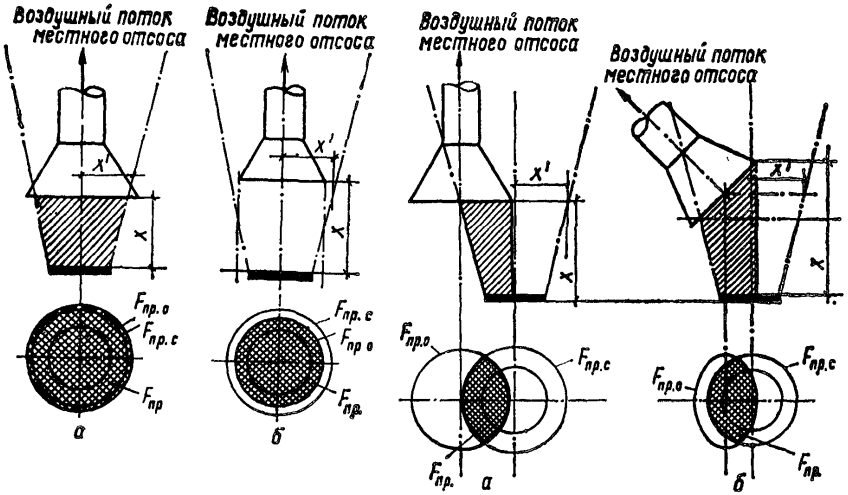


Рис. 5.27. Распределение тепловых струй и их проекций на источник для симметрично расположенных местных отсосов:

а — зонт перекрывает тепловую струю; *б* — зонт не перекрывает тепловую струю; $F_{пр.о}$, $F_{пр.с}$ и $F_{пр}$ — площади проекций отсоса, струи и общая (струи и отсоса)

Рис. 5.28. Распределение тепловых струй и их проекций на источник для асимметричных местных отсосов:

а — зонт, перпендикулярно расположенный над тепловым источником; *б* — зонт, наклонно расположенный над тепловым источником; $F_{пр.о}$; $F_{пр.с}$; $F_{пр}$ — площади проекций отсоса, струи и общая (струи и отсоса)

где $\rho_{ср.в}$ — средняя плотность газового потока, попадающего в местный отсос, кг/м³; $C_{ср.в}$ — средняя теплоемкость газового потока, попадающего в местный отсос, кДж/(кг·К); $L_{отс}$ — расход воздуха в сечении местного отсоса;

$$L_{отс} = F_{пр.о} v_{ср.отс} \cdot 3600; \qquad (5.94)$$

$F_{пр.о}$ — площадь горизонтальной проекции местного отсоса на горизонтальную проекцию тепловой струи рассматриваемого сечения, м²;

$v_{ср.отс}$ — средняя скорость воздушного потока тепловой струи в пределах горизонтальной проекции местного отсоса на горизонтальную проекцию тепловой струи рассматриваемого сечения, м/с; определяется из соотношений:

$$v_{ср.\,отс} = v_м e^{-m\,(y/z)^2}, \qquad (5.95)$$

$$v_{ср.\,отс} = C_1 Q^{1/3} z^{-1/3} e^{-m\,(y/z)^2}; \qquad (5.96)$$

или

$$v_{ср.отс} = Б / e^{m(y/z)^2}; \qquad (5.97)$$

$v_м$ — скорость воздушного потока по оси тепловой струи в рассматриваемом сечении на высоте z, м/с; y — расстояние от оси теплового потока до рассматриваемой точки, м. Значения параметров m, C_1 приведены в гл. 4 в зависимости от типа теплового источника.

Параметр $Б$

$$\frac{C_1 \sqrt[3]{Q}}{\sqrt[3]{z}} = Б \qquad (5.98)$$

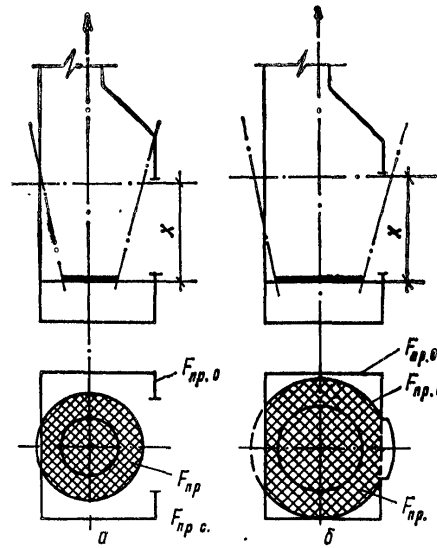


Рис. 5.29. Распространение тепловых струй при источнике, расположенном внутри вытяжного шкафа:

а — граница тепловой струи внутри местного отсоса; *б* — граница тепловой струи выходит за пределы местного отсоса; $F_{пр.о}$; $F_{пр.с}$; $F_{пр}$ — площади проекций отсоса, струи и общая (струи и отсоса)

тогда средняя скорость в рассматриваемом сечении будет равна: при сплошной горизонтальной проекции местного отсоса:

$$v_{ср.\,отс} = \frac{\int_0^{y_1} Be^{\frac{-m}{z^2}y^2}\,dy}{y_1}; \qquad (5.99)$$

где y_1 — расстояние по горизонтали от оси тепловой струи до границы действия тепловой струи, м;
при кольцевой горизонтальной проекции местного отсоса

$$v_{ср.\,отс} = \frac{\int_{y_1}^{y_2} Be^{\frac{-m}{z^2}y^2}\,dy}{y_2 - y_1}, \qquad (5.100)$$

где y_2 — расстояние по горизонтали от оси тепловой струи до наружной границы действия тепловой струи, м; y_1 — расстояние по горизонтали от оси тепловой струи до внутренней границы действия тепловой струи, м. Расход воздуха в местном отсосе при симметрично расположенной горизонтальной проекции местного отсоса по отношению к оси тепловой струи, м³/ч

$$L_{отс} = v_{ср.отс}F_{1пр.с}\cdot 3600; \qquad (5.101)$$

при несимметрично расположенной горизонтальной проекции местного отсоса по отношению к оси тепловой струи:

$$L_{отс} = (v_{ср.отс1}F_{пр.с1} + v_{ср.отс.2}F_{пр.с.2})3600, \qquad (5.102)$$

где $F_{пр.с.1}$ и $F_{пр.с.2}$ — площади горизонтальной проекции местных отсосов, расположенных по разные стороны оси симметрии тепловой струи, м².

Средняя избыточная температура в местном отсосе $\Delta t_{ср.отс}$ определяется из соотношений:

$$\Delta t = \Delta t_м e^{-p\,(y/z)^2}; \qquad (5.103)$$

$$\Delta t = B_1 Q^{2/3} z^{-5/3} e^{-p\,(y/z)^2}, \qquad (5.104)$$

Обозначим

$$\frac{B_1\sqrt[3]{Q_2}}{z\sqrt[3]{z^2}} = \Gamma, \tag{5.105}$$

тогда средняя температура в рассматриваемом сечении будет равна:

при горизонтальной проекции местного отсоса по отношению к оси тепловой струи:

$$\Delta t_{\text{ср. отс}} = \frac{\int_0^y \Gamma e^{-p(y/z)^2}\,dy}{y}; \tag{5.106}$$

при кольцевой горизонтальной проекции местного отсоса:

$$\Delta t_{\text{ср. отс}} = \frac{\int_{y_1}^{y_2} \Gamma e^{-p(y/z)^2}\,dy}{(y_2 - y_1)}. \tag{5.107}$$

Среднюю избыточную температуру с достаточной степенью точности для несимметрично расположенной горизонтальной проекции местного отсоса по отношению к оси тепловой струи (по обе стороны от нее) можно определить по формуле:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{L_{\text{отс. 1}}\Delta t_{\text{ср. отс. 1}} + L_{\text{отс. 2}}\Delta t_{\text{ср. отс. 2}}}{L_{\text{отс. 1}} + L_{\text{отс. 2}}}. \tag{5.108}$$

Количество тепла в любом поперечном сечении конвективного потока (на переходном и основном участках) с учетом стока тепла от источника до рассматриваемого сечения можно определить как

$$Q_z = Q_0 - Q_{\text{п}}, \tag{5.109}$$

где $Q_{\text{п}}$ — потери тепла от источника до рассматриваемого сечения.

Количество тепла, приходящееся на единицу объема проходящего воздушного потока через рассматриваемое сечение:

$$q_z = \frac{Q_z}{L_z} = \frac{Q_z}{\pi r^2 v_{\text{ср}} \cdot 3600} = \frac{Q_z y}{3600\pi r^2 \int_0^y B e^{\frac{-m}{z^2}y^2}\,dy}, \tag{5.110}$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость воздушного потока в рассматриваемом сечении.

Для расчетов эффективности работы местных отсосов достаточно воспользоваться приближенным значением экспоненты:

$$e^{\frac{-m}{z^2}y^2} = 1 - \frac{y}{1!} + \frac{y^3}{2!} - \frac{y^5}{3!}, \tag{5.111}$$

тогда

$$\int_0^y \left(1 - \frac{y}{1!} + \frac{y^3}{2!} - \frac{y^5}{3!}\right) dy = y - \frac{y^3}{3} + \frac{y^5}{10} - \frac{y^7}{42}. \tag{5.112}$$

Средние скорости в рассматриваемом сечении можно представить соответст-

венно для сплошной и кольцевой горизонтальной проекций в следующем виде:

$$v_{\text{ср. отс}} = Б\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right); \tag{5.113}$$

$$v_{\text{ср. отс}} = \frac{Б\left[\left(1 - \frac{y_2^2}{3} + \frac{y_2^4}{10} - \frac{y_2^6}{42}\right) - \left(1 - \frac{y_1^2}{3} + \frac{y_1^4}{10} - \frac{y_1^6}{42}\right)\right] y_2}{y_2 - y_1}. \tag{5.114}$$

Средние разности температур в рассматриваемом сечении соответственно для сплошной и кольцевой горизонтальной проекции определяются по формулам:

$$\Delta t_{\text{ср. отс}} = Г\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right); \tag{5.115}$$

$$\Delta t_{\text{ср. отс}} = \frac{Г\left[\left(1 - \frac{y_2^2}{3} + \frac{y_2^4}{10} - \frac{y_2^6}{42}\right) - \left(1 - \frac{y_1^2}{3} + \frac{y_1^4}{10} - \frac{y_1^6}{42}\right)\right] y_2}{y_2 - y_1}. \tag{5.116}$$

Удельное количество тепла, приходящееся на единицу объема воздушного потока, проходящего через рассматриваемое сечение:

$$q_z = \frac{Q_x}{\pi y^2 Б\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right) 3600}. \tag{5.117}$$

Количество тепла, проходящего через рассматриваемое сечение:

$$Q_x = q_z L_x, \tag{5.118}$$

где L_x — количество воздуха, проходящего через рассматриваемое сечение;

$$L_x = F_x v_{\text{ср } x}. \tag{5.119}$$

Для симметрично расположенного относительно оси теплового потока сечения радиусом r:

$$F_x = \pi y_1^2; \tag{5.120}$$

$$v_{\text{ср. } x} = Б\left(1 - \frac{y_1^2}{3} - \frac{y_1^4}{10} + \frac{y_1^6}{42}\right); \tag{5.121}$$

$$Q_x = \frac{Q_z\left(1 - \frac{y_1^2}{3} + \frac{y_1^4}{10} - \frac{y_1^6}{42}\right) y_1^2}{r^2\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right)}. \tag{5.122}$$

Для упрощенных расчетов формулу (5.122) можно представить в виде:

$$Q_x = \frac{Q_z\left(1 - \frac{y_1^2}{3}\right) y_1^2}{y^2\left(1 - \frac{y^2}{3}\right)}. \tag{5.123}$$

Количество тепла, проходящего через кольцевое сечение:

$$Q_x = \frac{Q_z\,(y^2_2 - y^2_1)\left[\left(1 - \frac{y^2_2}{3} + \frac{y^4_2}{10} - \frac{y^6_2}{42}\right) - \left(1 - \frac{y^2_1}{3} + \frac{y^4_1}{10} - \frac{y^6_1}{42}\right)\right] y_2}{y^2\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right)(y_2 - y_1)}. \tag{5.124}$$

Для упрощенных расчетов:

$$Q_x = \frac{Q_z y_2\,(y^2_2 - y^2_1)\left[\left(1 - \frac{y^2_2}{3}\right) - \left(1 - \frac{y^2_1}{3}\right)\right]}{y^2\,(y_2 - y_1)\left(1 - \frac{y^2_1}{3}\right)}. \tag{5.125}$$

Ниже рассмотрены примеры расчета эффективности работы местных отсосов вблизи тепловых источников при естественной вытяжке. Необходимо помнить, что такие местные отсосы обеспечивают требуемый объем воздуха при условии:

$$\Delta p_{\text{сети}} < \Delta p'; \tag{5.126}$$

$$\Sigma(Rl + z) < \Delta p', \tag{5.127}$$

где $(\Sigma Rl + z)$ — сумма местных сопротивлений; $\Delta p'$ — давление сети над тепловым источником, создаваемое естественной тягой воздушного потока, обусловленной разностью плотностей воздуха снаружи и внутри помещения.

$$\Delta p_{\text{располаг}} = H(\rho_x - \rho_2), \tag{5.128}$$

где H — высота от нижней кромки местного отсоса до верхней кромки выброса, м; ρ_x — плотность наружного воздуха, кг/м³; ρ_2 — плотность теплого воздуха у нижней кромки местного отсоса, кг/м³.

Пример 5.15. *Определить эффективность работы вытяжных зонтов, расположенных на высоте 0,4 и 1,8 м над тепловым источником.*

Исходные данные. Тепловой источник установлен заподлицо с основанием. Диаметр теплового источника $d = 0{,}8$ м. Количество конвективного тепла, отходящего от источника, $Q = 2000$ Вт. Диаметр зонта $D = 1{,}0$ м. Зонт расположен симметрично по отношению к оси тепловой струи. Подвижность воздуха в помещении $v_п = 0{,}2$ м/с. Теплонапряженность помещения $\overline{Q} < 23$ Вт/м³. Температура внутри помещения $t_в = 20$ °С. Схема расположения зонтов над тепловым источником представлена на рис. 5.30.

Решение. **Зонт расположен на высоте 0,4 м.** Поверхность усеченного конуса тепловой струи на участке ее поджатия при диаметре источника d и диаметре шейки $0{,}766d$:

$$F_1 = 3{,}9d^2 = 3{,}9 \cdot 0{,}8^2 = 2{,}496 \text{ м}^2.$$

Температурный градиент помещения при теплонапряженности $\overline{Q} < 23$ Вт/м³ принят $\Delta t = 3$ °С.

В то же время

$$\Delta t = B_1 Q^{2/3}/z^{5/3},$$

откуда высота z равна

$$z^{5/3} = \frac{B_1 Q^{2/3}}{\Delta t} = \frac{0{,}53\sqrt[3]{2000^2}}{3} = 28{,}05; \qquad z = 7{,}38.$$

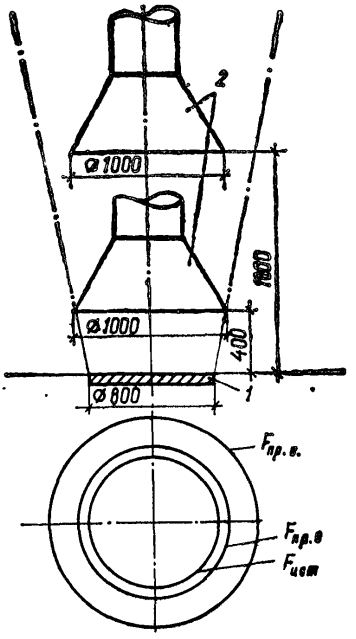


Рис. 5.30. Схема расположения осесимметричного зонта над тепловым источником:
1 — тепловой источник; *2* — зонт

Диаметр тепловой струи D_c на высоте z:

$$D_c = 0{,}45z^{0{,}88};$$

$$z^{0{,}88} = 7{,}38^{0{,}88};$$

$$N = 7{,}38^{0{,}88};$$

$$\lg N = 0{,}88 \cdot 0{,}868 = 0{,}763; \quad N = 5{,}8.$$

$$D_c = 0{,}45 \cdot 5{,}8 = 2{,}6 \text{ м}.$$

Расстояние от источника до шейки струи:

$$h_1 = 1{,}4d = 1{,}4 \cdot 0{,}8 = 1{,}12 \text{ м};$$

расстояние от полюса струи до шейки струи для источника, установленного заподлицо с плоскостью:

$$h = z_п + d_1 = 0{,}8 + 1{,}12 = 1{,}92 \text{ м}.$$

Расстояние от шейки струи до высоты, где Δt на оси равно 3 °С:

$$h_2 = z - h_1 = 5{,}6 - 1{,}92 = 3{,}68 \text{ м}.$$

Поверхность усеченного конуса с основаниями, равными диаметру шейки тепловой струи и диаметру основания струй, где температура равна температурному градиенту:

$$F_2 = \frac{\pi}{2}(0{,}766d + D)\sqrt{\left(\frac{D - 0{,}766d}{2}\right)^2 + (5{,}6d - П)^2} =$$

$$= \frac{3{,}14}{2}(0{,}766 \cdot 0{,}8 + 2{,}6)\sqrt{\left(\frac{2{,}6 - 0{,}766 \cdot 0{,}8}{2}\right)^2 + (5{,}6 \cdot 0{,}8 - 0{,}8)^2} =$$

$$= 19{,}3 \text{ м}^2.$$

Поверхность конуса тепловой струи с основанием, равным D_c на высоте $7{,}0\,d$ и высотой h_3

$$h_3 = z - 7{,}0d = 7{,}38 - 7 \cdot 0{,}8 = 1{,}78 \text{ м};$$

$$F_3 = \frac{\pi D_c}{2}\sqrt{(z - 7d) + (D/2)^2} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot 2{,}6}{2}\sqrt{(7{,}38 - 7 \cdot 0{,}8) + \frac{(2{,}6)^2}{2}} = 9{,}0 \text{ м}^2.$$

Общая поверхность тепловой струи:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = 2{,}496 + 19{,}3 + 9{,}0 = 30{,}796 \approx 30{,}8 \text{ м}^2.$$

Удельное количество тепла, теряемого с единицы поверхности тепловой струи:

$$q_{уд} = Q_0/F = 2000/30{,}80 = 65 \text{ Вт/м}^2.$$

Поверхность тепловой струи от источника до зонта, расположенного на высоте 0,4 м:

$$F_{пов} = 1{,}0 \text{ м}^2.$$

Количество тепла, поступающего в помещение из пограничной зоны тепловой струи:

$$Q_1 = q_{уд} F_{пов} = 65 \cdot 1{,}0 = 65 \text{ Вт}.$$

Диаметр тепловой струи на высоте 0,4 м меньше диаметра зонта, следовательно, количества тепла, теряемого с тепловой струи, равно нулю: $Q_2 = 0$.
Общая потеря тепла:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 65 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \cdot 100 = \frac{2000 - 65}{2000} \cdot 100 \approx 97\ \%.$$

Скорость воздушного потока тепловой струи на высоте $h = 0{,}4$ м:

$$v_м = C_1 Q^{1/3} z^{-1/3},$$

где $z = 0{,}4$ м; C_1 — коэффициент пропорциональности для Q, выраженного в Вт; для теплового источника, заделанного заподлицо с плоскостью, $C_1 = 0{,}13$; $v_м = 0{,}13 (2000 - 65{,}0)^{1/3} 0{,}4^{-1/3} = 2{,}20$ м/с.
Объем удаляемого воздуха через зонт:

$$L = Fv \cdot 3600 = 0{,}785 \cdot 1^2 \cdot 2{,}20 \cdot 3600 = 6150{,}0 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Зонт расположен на высоте 1,8 м. Поверхность тепловой струи от источника до ее шейки:

$$F_1 = 3{,}9 d^2 = 3{,}9 \cdot 0{,}8 = 2{,}496 \text{ м}^2.$$

Диаметр тепловой струи на высоте 1,8 м или $z = 2{,}6$ м

$$D_c = 0{,}45 z^{0{,}88} = 0{,}45 \cdot 2{,}6^{0{,}88} = 1{,}05 \text{ м}.$$

Высота усеченного конуса с основаниями $0{,}766d$ и 1,05 м:

$$h_2 = 1{,}8 \text{ м} - 1{,}12 = 0{,}68 \text{ м}.$$

Поверхность усеченного конуса от шейки тепловой струи до зонта:

$$F_2 = \frac{\pi}{2} (0{,}766d + D_c) \sqrt{\left(\frac{D_c - 0{,}766d}{2}\right)^2 + h_2^2} =$$

$$= \frac{3{,}14}{2} (0{,}766 \cdot 0{,}8 + 1{,}05) \sqrt{\left(\frac{1{,}05 - 0{,}766 \cdot 0{,}8}{2}\right)^2 + 0{,}68^2} = 1{,}88 \text{ м}^2.$$

Общая поверхность тепловой струи от источника до шейки тепловой струи:

$$F = F_1 + F_2 = 2{,}496 + 1{,}88 = 4{,}376 \text{ м}^2$$

Количество тепла, отступающего в помещение из пограничной зоны тепловой струи:

$$Q_1 = q_{уд} F_{пов} = 65 \cdot 4{,}376 = 284 \text{ Вт}.$$

Высота разгонного участка тепловой струи из соотношения

$$z/d = 3{,}2, \quad z_{разг} = 3{,}2 \cdot 0{,}8 = 2{,}56 \text{ м}.$$

Высота разгонного участка от теплового источника до его верхней границы:

$$h_р = 2{,}56 - 0{,}8 = 1{,}76 \text{ м}.$$

Поскольку зонт расположен на высоте, превышающей высоту верхней границы разгонного участка, к нему применимы закономерности распределения скоростей и температур переходного и основного участков:

$$h > h_{разг};\quad 1{,}8 > 1{,}76 \text{ м}.$$

Количество тепла, проходящего через поперечное сечение теплового потока на высоте зонта, составляет

$$Q = 2000 - 284 = 1716 \text{ Вт}.$$

Количество тепла, проходящего через зонт

$$Q_x = \frac{Q_z\left(1 - \frac{y_1^2}{3}\right)y_1^2}{y^2\left(1 - \frac{y^3}{3}\right)} = \frac{1716\left(1 - \frac{0{,}5^2}{3}\right)0{,}5^2}{0{,}525\left(1 - \frac{0{,}525^2}{3}\right)} = 1575 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса на высоте $h = 1{,}8$ м:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q_x}{Q_0}\,100 = \frac{2000 - 425}{2000}\cdot 100 = 78{,}7\ \%.$$

Параметр

$$Б = \frac{C_1\sqrt[3]{Q}}{\sqrt[3]{z}} = \frac{0{,}13\sqrt[3]{1716}}{\sqrt{2{,}6}} = 1{,}13.$$

Средняя скорость в сечении зонта:

$$v_{ср.\,x} Б\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right) = 1{,}13\left(1 - \frac{0{,}5^2}{3} + \frac{0{,}5^4}{10} - \frac{0{,}5^6}{42}\right) = 1{,}036 \text{ м/с}.$$

Необходимый объем воздуха, проходящего через зонт (при естественной вытяжке):

$$L = 3{,}14\cdot 0{,}5^2\cdot 1{,}036\cdot 3600 = 2928 \approx 2930 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Параметр

$$Г = \frac{B_1\sqrt[3]{Q^2}}{z\sqrt[3]{z^2}},$$

где B_1 — коэффициент пропорциональности для теплового источника, заделанного заподлицо с плоскостью;

$$B_1 = 0{,}53;\qquad Г = \frac{0{,}53\sqrt[3]{1716^2}}{2{,}6\sqrt[3]{2{,}6^2}} = 15{,}40.$$

Средняя избыточная температура в местном отсосе:

$$\Delta t_{ср.\,отс} = Г\left(1 - \frac{y_1^2}{3} + \frac{y_1^4}{10} - \frac{y_1^6}{42}\right) = 15{,}4\times$$

$$\times\left(1 - \frac{0{,}5^2}{3} + \frac{0{,}5^4}{10} - \frac{0{,}5^6}{42}\right) = 14{,}1\ ^\circ\text{C}.$$

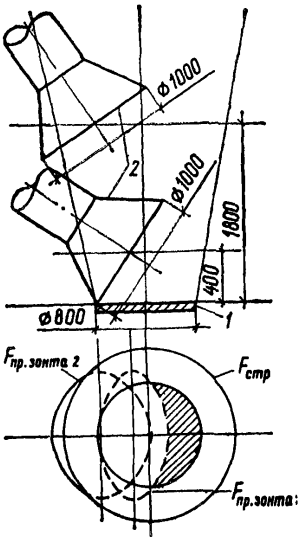


Рис. 5.31. Схема расположения наклонного зонта над тепловым источником:
1 — тепловой источник; *2* — зонт

Средняя температура удаляемого воздуха через местный отсос:

$$t = 20 + 14{,}1 = 34{,}1\ °C.$$

Пример 5.16. Определить эффективность работы вытяжных зонтов, расположенных наклонно на высоте 0,4 и 1,8 м над тепловым источником.

Исходные данные приведены в примере 5.15. Схема расположения зонтов над тепловым источником представлена на рис. 5.31.

Решение. **Зонт расположен на высоте 0,4 м.** Поверхность тепловой струи от источника до зонта $F_{пов}=1{,}0$ м^2. Колнчество тепла, поступающего в помещение из пограничной зоны тепловой струи:

$$Q_1 = q_{уд}F_{пов} = 65{,}00 \cdot 1{,}0 = 65{,}00\ Вт.$$

Скорость воздушиого потока над тепловым источником на высоте 0,4 м составит $v_м=2{,}20$ м. Отношение общей площади проекций зонта к площади струи источника (участок поджатия струи):

$$\frac{F_{пр.\ зонта}}{F_{ист}} = \frac{0{,}36}{0{,}785 \cdot 0{,}8^2} = \frac{0{,}36}{0{,}502} = 0{,}72.$$

Количество тепла, попадающего в местный отсос с естественным тепловым потоком:

$$Q_3 = (Q_0 - Q_1)0{,}72 = (2000 - 65{,}00)0{,}72 = 1395\ Вт.$$

Количество тепла, поступающего в помещение:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 2000 - 1395 = 605\ Вт.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \cdot 100 = \frac{2000 - 605}{2000} \cdot 100 = 69{,}7\ \% \approx 70\ \%.$$

Объем воздуха, удаляемого местным отсосом:

$$L = F_{пр.зонта}v \cdot 3600 = 0{,}36 \cdot 2{,}20 \cdot 3600 = 2860\ м^3/ч.$$

Зонт расположен на высоте 1,8 м. Поверхность тепловой струи от источника до зонта $F_{пов}=4{,}376$ м². Количество тепла, поступающего в помещение из пограничной зоны тепловой струи:

$$Q_1 = 65{,}00 \cdot 4{,}376 = 284{,}0 \text{ Вт}.$$

Количество тепла, проходящего через центральное сечение зонта:

$$Q_x = 2000 - 284 = 1716 \text{ Вт}.$$

Удельное количество тепла, проходящего через рассматриваемое сечение:

$$q_z = \frac{Q_x}{3600\pi y^2 Б\left(1 - \frac{y^2}{3} + \frac{y^4}{10} - \frac{y^6}{42}\right)};$$

$$q_z = \frac{1716}{3600 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}525^2 \cdot 1{,}13\left(1 - \frac{0{,}525^2}{3} + \frac{0{,}525^4}{10} - \frac{0{,}525^6}{42}\right)} = 0{,}54.$$

Средняя скорость воздушного потока по одну сторону оси симметрии (для проекции зонта площадью $F_1=0{,}185$ м²):

$$v_{ср.\,отс_1} = Б\left(1 - \frac{y_1^2}{3} + \frac{y_1^4}{10} + \frac{y_1^6}{42}\right) =$$

$$= 1{,}13\left(1 - \frac{0{,}525^2}{3} + \frac{0{,}525^4}{10} - \frac{0{,}525^6}{42}\right) = 1{,}02 \text{ м/с};$$

средняя скорость воздушного потока по другую сторону оси симметрии (для проекции зонта с $F_2=0{,}008$ м²):

$$v_{ср.\,отс.\,2} = 1{,}13\left(1 - \frac{0{,}04^2}{3} + \frac{0{,}04^4}{10} - \frac{0{,}04^6}{42}\right) = 1{,}13 \text{ м/с}.$$

Общий объем воздуха, проходящего через зонт:

$$L = (v_{ср.отс.1}F_1 + v_{ср.отс.2}F_2)3600 =$$

$$= (1{,}02 \cdot 0{,}185 + 1{,}130 \cdot 0{,}008) \cdot 3600 = 719 \approx 720 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество тепла, проходящего через зонт:

$$Q = q_z L = 0{,}54 \cdot 720 = 389 \approx 390 \text{ Вт}.$$

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \cdot 100 = \frac{2000 - 1610}{2000} \cdot 100 = 19{,}5 \approx 19\,\%.$$

Средняя разность температур по одну сторону оси симметрии воздушного потока (для проекции зонта с $F_1=0{,}185$ м²):

$$\Delta t_{ср.\,отс.\,1} = 10{,}4\left(1 - \frac{0{,}5^2}{3} + \frac{0{,}5^4}{10} - \frac{0{,}5^6}{42}\right) = 12{,}9\ ^\circ\text{C};$$

средняя разность температуры по другую сторону оси симметрии воздушного потока (для проекции зонта с $F_2=0{,}008$ м²):

$$\Delta t_{ср.\,отс.\,2} = 15{,}4\left(1 - \frac{0{,}04^2}{3} + \frac{0{,}04^4}{10} + \frac{0{,}04^6}{42}\right) = 15{,}4\ ^\circ\text{C}.$$

Средняя избыточная температура воздушного потока, проходящего через зонт:

$$\Delta t_{ср} = \frac{L_{отс.\,1}\Delta t_{ср.\,отс.\,1} + L_{отс.\,2}\Delta t_{ср.\,отс.\,2}}{L_{отс.\,1} + L_{отс.\,2}} =$$

$$= \frac{1{,}02 \cdot 0{,}185 \cdot 12{,}9 + 0{,}008 \cdot 1{,}130 \cdot 15{,}4}{1{,}02 \cdot 0{,}185 + 0{,}008 \cdot 1{,}130} = 13{,}00\ °C.$$

Средняя температура воздуха, удаляемого через местный отсос:

$$t = 20 + 13{,}0 = 33\ °C.$$

5.8. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ПРИ ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Для эффективного улавливания пылевых выбросов необходимо создать такую скорость во всасывающем отверстии местного отсоса, при которой пылевая частица не будет оседать и будет двигаться вместе с газовым потоком. Скорость газов, при которой частица удерживается во взвешенном состоянии, называется скоростью витания. Скорость витания в значительной степени зависит от критерия Рейнольдса:

$$Re^2\varphi = M_{тв}\rho_г g/\mu_г^2, \qquad (5.129)$$

где Re — критерий Рейнольдса, определяемый по номограмме Приложения XX в зависимости от произведения $Re^2\varphi$; φ — безразмерный коэффициент сопротивления; $M_{тв}$ — масса пылинки в газовой среде, кг;

$$M_{тв} = \pi d_э^3 \rho_ч/6; \qquad (5.130)$$

$d_э$ — эквивалентный диаметр частицы, равный диаметру шара, объем которого равен объему данной частицы, м; $\rho_ч$ — плотность частицы, кг/м^3; g — ускорение свободного падения, м/с^2; $\mu_г$ — динамическая вязкость газовой среды, Па·с. Динамическая вязкость воздуха при давлении $1 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт. ст.) приведена ниже:

Температура воздуха, °С	−20	−10	0	10	
μ^*	1,59 a	1,65 a	1,71 a	1,71 a	
Температура воздуха, °С	20	40	60	80	100
μ^*	1,83 a	1,95 a	2,07 a	2,19 a	2,33 a

* $a = 9{,}8 \cdot 10^{-6}$.

При критерии Рейнольдса (для частиц диаметром до 50—60 мкм)

$$0 < Re < 1 \qquad (5.131)$$

применим закон Стокса; тогда скорость витания можно определить по формуле (в м/с):

$$v_ч = \frac{d_э^2 (\rho_ч - \rho_г)\, q}{18\mu_г}. \qquad (5.132)$$

По этой формуле построена номограмма Приложения XXI. Для более широкого диапазона размеров частиц (при $d_э > 1$) скорость витания определяется по формуле (в м/с):

$$v_ч = \frac{Re\mu_г}{d_э \rho_г} \qquad (5.133)$$

или по номограмме Приложения XXII.

Пример 5.17. Определить скорость витания сферической частицы размером 5 мкм и плотностью 2000 кг/м³.

Исходные данные. Вязкость газа близка к вязкости воздуха; температура воздуха $t=20$ °С. Давление наружной среды $p=1\cdot10^5$ Па.

Решение. Масса пылинки в газовой среде:

$$M_{тв}=\pi d_э^3\rho_ч/6=\frac{3{,}14\cdot(5\cdot10^{-6})^3\cdot2000}{6}=130{,}8\cdot10^{-15}\text{ кг}.$$

Плотность воздуха при $t=20$ °С $\rho_г=1{,}205$ кг/м³. Динамическая вязкость среды при $t=20$ °С $\mu_г=9{,}8\cdot1{,}83\cdot10^{-6}$ Па·с.

Произведение

$$Re^2\varphi=\frac{M_{тв}\rho_г g}{\mu^2_г}=\frac{130{,}8\cdot10^{-15}\cdot9{,}8\cdot1{,}205}{(9{,}8\cdot1{,}83\cdot10^{-6})^2}=4{,}8\cdot10^{-3}.$$

Критерий Рейнольдса берем по номограмме Приложения XX: $Re\to0$.

Скорость витания частиц:

$$v_ч=\frac{d^2_э(\rho_ч-\rho_г)g}{18\mu_г}=\frac{(5\cdot10^{-6})^2(2000-1{,}205)\,9{,}8}{18\cdot9{,}8\cdot1{,}83\cdot10^{-6}}=0{,}0015\text{ м/с}.$$

Пример 5.18. Определить скорость витания сферической частицы размером 400 мкм и плотностью 1200 кг/м³.

Исходные данные. Вязкость газа близка к вязкости воздуха; температура воздуха $t=30$ °С. Давление наружной среды $p=1\cdot10^5$ Па.

Решение. Масса пылинки в газовой среде:

$$M_{тв}=\frac{\pi d_э^3\rho_ч}{6}=\frac{3{,}14\,(400\cdot10^{-6})^3\,1200}{6}=5{,}02\cdot10^{-9}\text{ кг}.$$

Плотность среды (воздуха) при $t=30$ °С составляет $\rho_г=1{,}165$ кг/м³. Динамическая вязкость среды при $t=30$ °С $\mu_г=9{,}8\cdot1{,}89\cdot10^{-6}$ Па·с.

Произведение

$$Re^2\varphi=\frac{M_{тв}\rho_г g}{\mu^2_г}=\frac{5{,}02\cdot10^{-9}\cdot9{,}8\cdot1{,}165}{(9{,}8\cdot1{,}89\cdot10^{-6})^2}=167.$$

Критерий Рейнольдса по номограмме Приложения XX: $Re=45$. Скорость витания при $Re=45$ и $d_э=400$ мкм по номограмме Приложения XXI составит $v_ч=1{,}95$ м/с.

Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф=\frac{G_0-G}{G_0}\cdot100,\qquad(5.135)$$

где G_0 — общее количество пыли, выделяющейся от технологического оборудования, снабженного местным отсосом г; G — суммарное (по фракциям) количество пыли, поступающей во всасывающее отверстие местного отсоса, г (та часть пыли, скорость витания которой меньше скорости воздушного потока, создаваемого местным отсосом).

Пример 5.19. Сравнить эффективность работы двух местных отсосов около фасовочного стола.

Исходные данные. Первый местный отсос — укрытие шкафного типа, второй — наклонная панель без козырька (см. рис. 5.13). Количество выделяющейся пыли $G_0=100$ г/ч. Дисперсный состав пыли приведен ниже:

Размер частиц, мкм . .	До 2	2—5	5—10	10—20	20—40	40—60	>100
Содержание фракции, % (масс.)	5	7	17	32	18	12	9

Таблица 5.1. Результаты расчета примера 5 19

$d_э$, мкм	$M_{тв}$, кг	$Re^2\varphi$	Re	$v_ч$, м/с
2	$6{,}28 \cdot 10^{-15}$	$0{,}23 \cdot 10^{-3}$	0	0,0002
5	$9{,}8 \cdot 10^{-14}$	$0{,}35 \cdot 10^{-2}$	0	0,001
10	$7{,}85 \cdot 10^{-13}$	$0{,}28 \cdot 10^{-1}$	0,005	0,005*
20	$6{,}28 \cdot 10^{-12}$	0,23	0,008	0,018*
40	$5{,}0 \cdot 10^{-11}$	1,8	0,15	0,07*
60	$1{,}7 \cdot 10^{-10}$	6,23	0,6	0,18*
100	$7{,}85 \cdot 10^{-10}$	28,8	2,0	0,28**

* Скорость витания определяем по Приложению XXI
** Для частиц размером 100 мкм и более скорость витания определяем по Приложению XXII

Плотность пыли 1500 кг/м³. Вязкость газа близка к вязкости воздуха; температура воздуха $t=20$ °С. Давление наружной среды $p=1 \cdot 10^5$ Па. Объем удаляемого воздуха для обоих отсосов $L=2480$ м³/ч. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}1$ м/с.

Решение Плотность среды (воздуха) при $t=20$ °С составит $\rho_г=1{,}205$ кг/м³. Динамическая вязкость среды (воздуха) при $t=20$ °С (см. пример 5 18):

$$\mu_г = 9{,}8 \cdot 1{,}83 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Масса пылинок в газовой среде:

$$M_{тв} = \pi d_э^3 \rho_ч / 6.$$

Результаты расчета $M_{тв}$ приведены в табл. 5.1.

Рассчитываем произведение

$$Re^2 \varphi = M_{тв} \rho_г g / \mu_г^2$$

(см. табл. 5.1).

По Приложению XX находим критерий Re (см. табл. 5.1). Скорость витания частиц:

$$v_ч = d_э^2 (\rho_ч - \rho_г) g / 18 \mu_г$$

(см. табл. 5.1).

Определяем эффективность работы местного отсоса типа шкафного укрытия. Скорость воздуха во всасывающем отверстии:

$$v_0 = L/F = 2480/(1{,}2 \cdot 0{,}9 \cdot 3600) = 0{,}64 \text{ м/с}.$$

Относительная скорость воздуха в месте выделения пыли в наружную среду (по рис. 4.8): $\bar{v}_x=0{,}55$, тогда скорость воздуха $v_x=\bar{v}_x v_0=0{,}64 \cdot 0{,}55=0{,}352$ м/с.

Сравнивая скорости витания частиц со скоростью воздуха на рабочем столе (в нижней части рабочего проема укрытия шкафного типа при верхнем отсосе), делаем вывод, что количество пыли, поступающей в наружную среду, будет равно нулю. Эффективность работы местного отсоса:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} \cdot 100 = \frac{100 - 0}{100} \cdot 100 = 100\ \%.$$

Определяем эффективность работы местного отсоса наклонного типа (панель Чернобережского). Скорость воздуха во всасывающем отверстии (из условия

задачи) $v_0 = 4{,}0$ м/с. Относительная скорость воздуха в месте поступления пыли в наружную среду (по рис. 4.13): $\bar{v}_x = 0{,}05$, тогда

$$v_x = \bar{v}_x v_0 = 0{,}05 \cdot 4{,}0 = 0{,}2 \text{ м/с}.$$

Сравнивая скорости витания частиц со скоростью воздуха в месте поступления пыли в наружную среду, делаем вывод, что частицы диаметром до 60 мкм включительно (т. е. 91%), имеющие скорости витания меньше 0,2 м/с, будут поступать в местный отсос.

Количество пыли, поступающей в наружную среду, составит 9%, или $G = 100 \cdot 9/100 = 9$ г/ч.

Эффективность работы местного отсоса наклонного типа составит:

$$Эф = \frac{G_0 - G}{G_0} \cdot 100 = \frac{100 - 9}{100} \cdot 100 = 91\ \%.$$

Глава 6

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТРОЙСТВУ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

6.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛА ОТ ИСТОЧНИКА, СНАБЖЕННОГО МЕСТНЫМ ОТСОСОМ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ПОБУЖДЕНИЕМ

Рекомендации для определения объема удаляемого воздуха, с тем чтобы локализовать конвективное тепло от источника, составлены по результатам исследований В. Н. Посохина.

Данные рекомендации позволяют определять предельный объем удаляемого местным отсосом воздуха от теплового источника при установке отсоса в пределах разгонного участка тепловой струи. Рекомендуемые формулы относятся к верхней трети графика зависимости улавливания вредных веществ вблизи теплового источника (рис. 6.1). Однако эти рекомендации имеют следующие недостатки:

не позволяют рассчитывать эффективность при произвольных размерах местного отсоса, а также при произвольном объеме удаляемого воздуха местным отсосом;

расчетный предельный расход удаляемого воздуха относится только к зонту, устанавливаемому на разгонном участке тепловой струи;

относятся только к местным отсосам с естественной вытяжкой;

при расчете предельного объема, удаляемого местным отсосом, не учитываются общая теплонапряженность объема помещения и характер распределения воздушных потоков помещения (предполагается, что в помещении имеется один источник вредных выделений, снабженный отсосом, и работает общеобменный приток);

не дают возможности определять теплонапряженность на рабочем месте вблизи теплового источника и концентрацию вредного вещества;

не распространяются на источники выделения вредных веществ с температурой, близкой к температуре воздуха производственного помещения;

не позволяют рассчитать требуемую производительность, а также эффективность нижних местных отсосов при одностороннем удалении газовоздушной смеси.

Тем не менее этими рекомендациями пользуются при расчетах местных верхних и нижних отсосов.

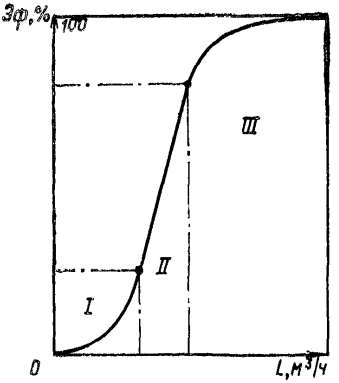


Рис. 6.1. Зависимость эффективности улавливания газообразных вредных веществ от объема воздуха, удаляемого местным отсосом:

I, II, III — области применения расчетных формул эффективности улавливания вредных газообразных веществ местными отсосами

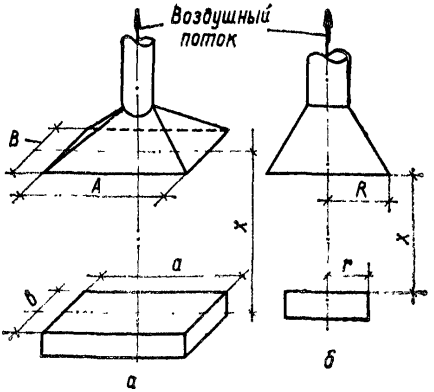


Рис. 6.2. Схема размещения верхних отсосов над тепловыми источниками:

а — прямоугольный зонт; *б* — круглый зонт

Расчет верхних отсосов (рис. 6.2) При симметрично расположенном над тепловым источником отсосе (зонт) сначала определяют разгонный участок для теплового источника из соотношения:

$$1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2; \qquad (6.1)$$

сравнивают расстояние от теплового источника до зонта с длиной разгонного участка и определяют правомерность применения предложенной методики расчета:

длина разгонного участка должна быть больше расстояния от теплового источника до зонта $l_р \geqslant x$.

В зависимости от относительного размера зонта

$$\bar{R} = R/r \quad \text{или} \quad \bar{B} = B/b$$

по рис. 6.3 находят относительную производительность зонта $\bar{L}$. Затем

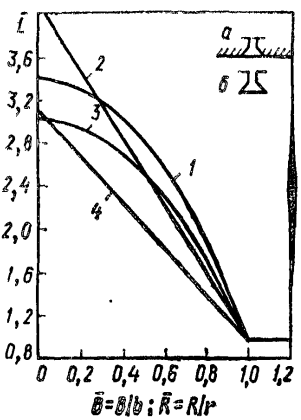


Рис. 6.3. Зависимость относительной производительности зонта от его размеров (см. рис. 6.2):

1 — круглый зонт, устанавливаемый по схеме *а*; *2* — зонт прямоугольной формы, устанавливаемый по схеме *а*; *3* — круглый зонт, устанавливаемый по схеме *б*; *4* — зонт прямоугольной формы, устанавливаемый по схеме *б*

вычисляют осевую скорость конвективной струи на уровне всасывания по формулам:

для компактных струй

$$v_m = 0{,}0425(Q/r)^{1/3}(x/r)^{1/3} \quad \text{или} \quad v_m = 0{,}0622(Qx/F_{\text{ист}})^{1/3}; \tag{6.2}$$

для плоских струй

$$v_m = 0{,}03Q^{1/3}(x/b)^{0{,}38}. \tag{6.3}$$

Вычисляют расход воздуха в конвективной струе на уровне всасывания: для компактных струй

$$L_{\text{в}} = 3780r^2v_m; \tag{6.4}$$

для плоских струй

$$L_{\text{в}} = 1800abv_m. \tag{6.5}$$

Для компактных тепловых конвективных источников прямоугольной формы ($a/b<2$) предварительно находят

$$r_{\text{экв}} = 0{,}564\sqrt{ab}. \tag{6.6}$$

По рис. 6.4 определяют коэффициент $k_{\text{п}}$. Находят предельный расход отсоса, м³/ч:

$$L_{\text{пред}} = L_{\text{в}}\overline{L}k_{\text{п}}. \tag{6.7}$$

Вычисляют предельную избыточную концентрацию примеси в конвективном тепловом потоке, удаляемом отсосом, а также относительную предельную концентрацию:

$$\Delta C_{\text{пред}} = C_{\text{пред}} - C_{\text{ф}} = 3600G_{\text{ист}}/L_{\text{пред}}, \tag{6.8}$$

где $C_{\text{пред}}$ — концентрация примеси в воздухе, удаляемом отсосом при расходе воздуха, равном $L_{\text{пред}}$, мг/м³; $C_{\text{ф}}$ — фоновая концентрация примеси в воздухе помещения, мг/м³; $G_{\text{ист}}$ — количество вредных веществ, выделяющихся от источника, мг/с:

$$\Delta\overline{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}}. \tag{6.9}$$

Определяют значение комплекса M:

$$M = \frac{G_{\text{о. о}}}{G_{\text{ист}}}\overline{C} - \frac{L_{\text{о. о}}}{L_{\text{пред}}}, \tag{6.10}$$

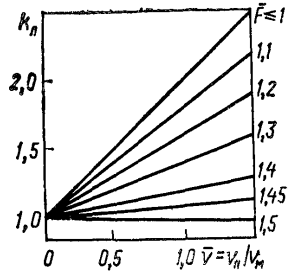
где $G_{\text{о. о}}$ — количество газовой примеси в тепловом источнике, приходящееся на один отсос, мг/с; $L_{\text{о. о}}$ — производительность общеобменной вытяжки, приходящаяся на один отсос, м³/ч.

По рис. 6.5 находят оптимальное значение эффективности улавливания $Эф_{\text{опт}}$ и соответствующее ему значение $k_{\text{эф}}$. Если источник выделяет одновременно и тепло, и газы, то должно соблюдаться условие $k_{\text{эф}} \geqslant 1$. Если источник выделяет только тепло, то следует принимать $k_{\text{эф}} = 1$. Определяют требуемую производительность отсоса:

$$L = L_{\text{пред}}k_{\text{эф}}. \tag{6.11}$$

Пример 6.1. Определить требуемую производительность круглого зонта диаметром 1,44 м, установленного соосно над круглым конвективным источником.

Исходные данные. Источник установлен на основании диаметром 1,2 м, на высоте $x=1$ м от него установлен зонт; мощность теплового источника $Q=4400$ Вт. Подвижность воздуха в помещении $v_{\text{п}}=0{,}3$ м/с.



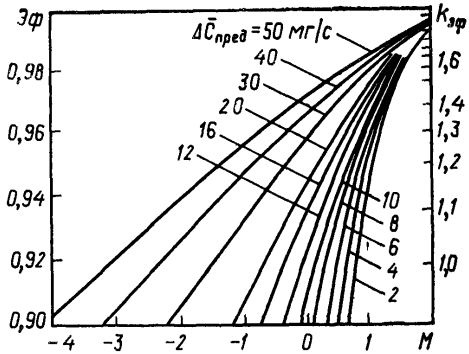


Рис. 6.4. Зависимость коэффициента $k_п$ от относительной скорости $\bar{v}$ и относительной площади $\bar{F}$

Рис. 6.5. Зависимость оптимальной эффективности отсоса от величины M

Решение. Границу разгонного участка находим из соотношения:

$$1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2;$$

$$z \leqslant 3{,}2d \leqslant 3{,}2 \cdot 1{,}2 \leqslant 3{,}84 \approx 3{,}8 \text{ м}; \qquad z = z_п + z_и.$$

Расстояние от полюса струи до источника:

$$z_п = 1{,}7d = 1{,}7 \cdot 1{,}2 = 2{,}04 \text{ м} \approx 2 \text{ м};$$

расстояние от теплового источника до границы разгонного участка:

$$z_и \text{ или } l_р = z - z_п;$$

$$l_р = 3{,}8 - 2 = 1{,}8 \text{ м}.$$

Определяем применимость данных рекомендаций для расчета местного отсоса:

$$l_р \geqslant x; \qquad 1{,}8 > 1{,}0 \text{ м},$$

т. е. рекомендации пригодны для расчета.

Относительный раднус зонта: $\bar{R}=R/r=0{,}72/0{,}6=1{,}2$. По рис. 6.3 находим относительную производительность отсоса: $\bar{L}=1{,}0$.

Осевая скорость конвективной струи на уровне всасывания:

$$v_m = 0{,}0622 \sqrt[3]{Qx/F_{ист}} = 0{,}0622 \sqrt[3]{\frac{4400 \cdot 1}{0{,}785 \cdot 1{,}2^2}} = 0{,}976 \approx 0{,}98 \text{ м/с}.$$

Расход воздуха в конвективной струе на уровне всасывания:

$$L_в = 3780\, r^2 v_m = 3780 \cdot 0{,}6^2 \cdot 0{,}98 = 1333 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Относительная скорость

$$\bar{v} = v_п/v_m = 0{,}3/0{,}98 = 0{,}31.$$

Относительная площадь

$$\bar{F} = F_{зонта}/F_{ист} = (0{,}72/0{,}6)^2 = 1{,}44.$$

По рис. 6.4 определяем коэффициент $k_п=1{,}1$.

Предельный расход воздуха на отсос:

$$L_{\text{пред}} = L_{\text{в}}\bar{L}k_{\text{п}} = 1333 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}1 = 1466 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Требуемая производительность зонта:

$$L = L_{\text{пред}}k_{\text{эф}},$$

где $k_{\text{эф}} = 1$ для источника, выделяющего только тепло;

$$L = 1466 \cdot 1{,}0 = 1466 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Пример 6.2. Условия указаны в примере 6.1.

Исходные данные. Выделяется не только тепло, но и оксид углерода в количестве $G_{\text{ист}} = 80$ мг/с; $\text{ПДК}_{\text{рз}} = 20$ мг/м³. Рассредоточенные источники, выделяющие оксид углерода, и общеобменная вытяжная вентиляция отсутствуют: $G_{\text{о.о}} = 0$; $C_{\text{ф}} = 0$; $M = 0$.

Решение. Предельная производительность зонта равна полученной в примере 6.1: $L_{\text{пред}} = 1466$ м³/ч. Избыточная предельная концентрация примеси:

$$\Delta C_{\text{пред}} = 3600G_{\text{ист}}/L_{\text{пред}} = 3600 \cdot 80/1466 = 195 \text{ мг/м}^3.$$

Относительная предельная концентрация

$$\Delta\bar{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}} = 195/(20 - 0) = 9{,}75.$$

По рис. 6.5 при $M = 0$ и $\Delta\bar{C}_{\text{пред}} = 9{,}75$ находим $k_{\text{эф}} < 1$. Требуемая производительность зонта равна полученной в примере 6.1, т. е. $L = 1466$ м³/ч, так как в этом случае следует принимать $k_{\text{эф}} = 1$.

Пример 6.3. Определить требуемую производительность зонта длиной $A = 1{,}4$ м и шириной $B = 0{,}6$ м.

Исходные данные. Зонт установлен симметрично на высоте $x = 0{,}7$ м над конвективным источником длиной $a = 1{,}7$ м и шириной $b = 0{,}8$ м. Источник установлен заподлицо с основанием. Конвективная теплоотдача источника $Q = 1000$ Вт. Подвижность воздуха в помещении $v_{\text{п}} = 0{,}4$ м/с.

Решение. Отношение сторон прямоугольного теплового источника: $a/b = 1{,}7/0{,}8 = 2{,}12$; $a/b > 2$, следовательно, тепловой источник имеет плоскую струю.

Границу разгонного участка находим из соотношения

$$1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2,$$

где d для прямоугольного источника равно меньшей стороне, т. е. $d = b = 0{,}8$ м;

$$z \leqslant 3{,}2 \cdot 0{,}8 \leqslant 2{,}56;$$

$$z = z_{\text{н}} + z_{\text{р}}.$$

Расстояние от полюса струи до источника $z_{\text{н}} = d = 0{,}8$ м.

Расстояние от теплового источника до границы разгонного участка:

$$z_{\text{р}} \text{ или } l_{\text{р}} = z - z_{\text{н}}; \qquad l_{\text{р}} = 2{,}56 - 0{,}8 = 1{,}76 \text{ м}.$$

Определяем применимость данных рекомендаций для расчета местного отсоса:

$l_{\text{р}} \geqslant x$; $1{,}76 > 0{,}9$, следовательно, рекомендации применимы для расчета. Относительная величина $\bar{B} = B/b = 0{,}6/0{,}8 = 0{,}75$.

По рис. 6.3 находим относительную производительность отсоса: $\bar{L} = 1{,}5$. Осевая скорость конвективной струи на уровне всасывания:

$$v_m = 0{,}03Q^{1/3}(x/b)^{0{,}38} = 0{,}03\sqrt[3]{1000}\,(0{,}9/0{,}8)^{0{,}38} = 0{,}31 \text{ м/с}.$$

Расход воздуха в конвективной струе на уровне всасывания:

$$L_в = 1800abv_m = 1800 \cdot 1{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}31 = 760 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Относительная скорость:

$$\bar{v} = v_п/v_m = 0{,}4/0{,}31 = 1{,}29.$$

Относительная площадь: $F = F_{зонта}/F_{ист} = 1{,}4 \cdot 0{,}6/(1{,}7 \cdot 0{,}8) = 0{,}62$.
По рис. 6.4 определяем коэффициент $k_п = 2{,}3$.

Предельный расход воздуха на отсос:

$$L_{пред} = L_в \bar{L} k_п = 760 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}3 = 2630 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Требуемая производительность зонта $L = L_{пред} k_{эф}$; для источника, выделяющего только тепло, $k_{эф} = 1{,}0$, тогда

$$L = 2630 \cdot 1 = 2630 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Пример 6.4. Условия указаны в примере 6.3.

Исходные данные. Вместе с теплом выделяется диоксид азота в количестве $G_{ист} = 40$ мг/с; $ПДК_{р\,з} = 5$ мг/м³. Имеются рассредоточенные источники, выделяющие диоксид азота в количестве $G_{о.о} = 4$ мг/с. Общеобменная вытяжка составляет $L_{о\,о} = 500$ м³/ч или 0,14 м³/с.

Решение. Предельная производительность отсоса равна полученной в примере 6.3. $L_{пред} = 2630$ м³/ч. Предельная избыточная концентрация примеси:

$$\Delta C_{пред} = 3600 G_{ист}/L_{пред} = 3600 \cdot 40/2630 = 54{,}5 \text{ мг/м}^3.$$

Относительная предельная концентрация $\Delta \bar{C}_{пред} = 54{,}5/5 \approx 11$.
Величина безразмерного комплекса M

$$M = \frac{G_{о.\,о}}{G_{ист}} \Delta \bar{C}_{пред} - \frac{L_{о.\,о}}{L_{пред}} = \frac{4}{40} \cdot 11 - \frac{0{,}14}{0{,}73} = 0{,}908.$$

По рис. 6.5 определяем эффективность улавливания местным отсосом диоксида азота и коэффициент $k_{эф}$: $Эф = 95{,}5\%$; $k_{эф} = 1{,}28$.

Требуемая производительность зонта

$$L = L_{пред} k_{эф} = 2630 \cdot 1{,}28 = 3370 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расчет боковых, угловых и наклонных отсосов. Определяют характерные размеры S и $\bar{R}$:

$$S = \frac{1}{2}(x_0 + y_0 + \sqrt{x_0^2 + y_0^2}); \qquad (6.12)$$

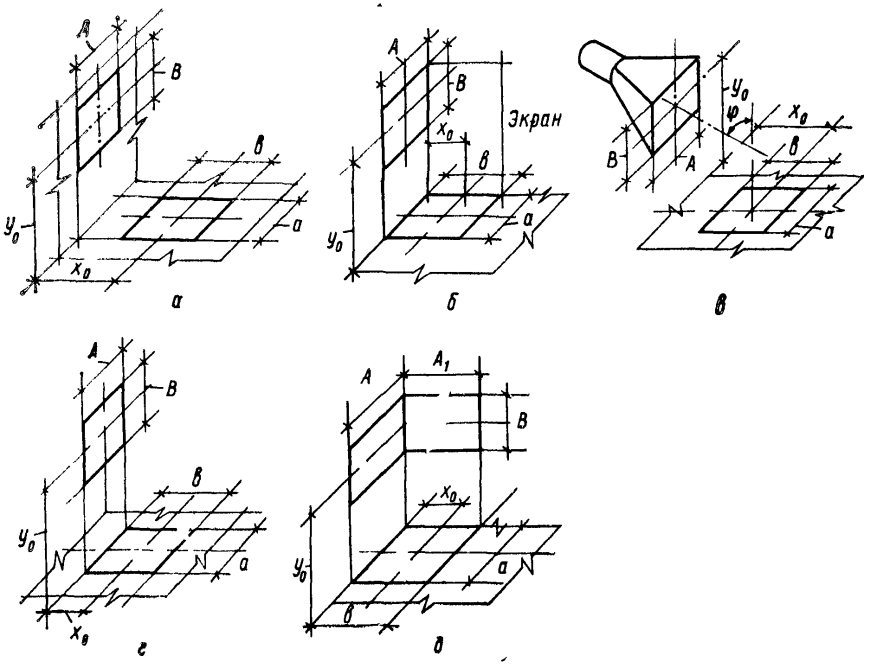
$$\bar{R} = \frac{R}{(S + 2r)\,0{,}24}, \qquad (6.13)$$

где x_0, y_0 — принимаются из схемы расположения отсосов по отношению к источнику теплопоступления (рис. 6.6). Когда отсос и источник имеют прямоугольные формы, вместо R и r подставляют соответственно $R_{экв}$ и $r_{экв}$. Относительный расход удаляемого воздуха вычисляют по формулам: для бокового отсоса в стене или с широким фланцем

$$\bar{L} = 0{,}22\,(1 - 0{,}25\bar{R}^2); \qquad (6.14)$$

для бокового отсоса без фланца

$$\bar{L} = \left[0{,}32 + 0{,}06\sqrt[3]{(B/A)^7}\right](1 - 0{,}25\bar{R}^2); \qquad (6.15)$$



а б в г д

Рис. 6.6. Местные отсосы и их основные конструктивные размеры:
а — боковой отсос в стене (или с фланцем шириной более *B*); *б* — боковой отсос с экраном; *в* — наклонный отсос; *г* — боковой отсос без фланца; *д* — угловой отсос

для бокового отсоса с экраном

$$\bar{L} = \left[0{,}2 + 0{,}025\sqrt[3]{(B/A)^7}\right](1 - 0{,}25\bar{R}^2); \qquad (6.16)$$

для углового отсоса

$$\bar{L} = \left[0{,}21 + 0{,}027\sqrt[3]{(B/A)^8}\right](1 - 0{,}25\bar{R}^2); \qquad (6.17)$$

для наклонного отсоса без фланца

$$\bar{L} = (0{,}15 + 0{,}043\varphi)\left[1 - (1 - 0{,}32\varphi)^2\bar{R}^2\right]1{,}6; \qquad (6.18)$$

для наклонного отсоса с фланцем шириной более $B/2$

$$\bar{L} = (0{,}15 + 0{,}043\varphi)\left[1 - (1 - 0{,}32\varphi)^2\bar{R}^2\right]; \qquad (6.19)$$

для отсосов круглой формы следует принимать $B/A = 1$.
Коэффициент, учитывающий влияние скорости движения воздуха в помещении на требуемую производительность отсоса:

$$k_п = 1 + 33v_п\sqrt[3]{r^2/(y_0 Q)}. \qquad (6.20)$$

Для прямоугольного источника вместо r принимают $r_{экв}$. Предельная избыточная концентрация примеси в воздухе, удаляемом отсосом (мг/м³):

$$\Delta C_{пред} = C_{пред} - C_ф = 3600 G_{ист}/L_{пред}. \qquad (6.21)$$

Относительная предельная концентрация

$$\Delta\bar{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}}. \qquad (6.22)$$

Значение комплекса M:

$$M = \frac{G_{\text{о. о}}}{G_{\text{ист}}}\Delta\bar{C}_{\text{пред}} - \frac{L_{\text{о. о}}}{L_{\text{пред}}}. \qquad (6.23)$$

По рис. 6.5 определяют оптимальное значение эффективности улавливания $Эф_{\text{опт}}$ и соответствующее ему значение $k_{\text{эф}}$. Требуемая производительность отсоса:

$$L = L_{\text{пред}}/k_{\text{эф}}. \qquad (6.24)$$

Пример 6.5. Рассчитать боковой отсос в стене (см. рис. 6.6) для удаления тепла и диоксида серы, выделяющегося от источника раднусом $r = 0{,}5$ м.

Исходные данные. Источник установлен на основании Радиус отсоса $R = 0{,}35$ м. Положение отсоса относительно источника определяется расстояниями $x_0 = 0{,}7$ и $y_0 = 0{,}6$ м. Конвективные тепловыделения с поверхности источника: $Q = 5510$ Вт. Диоксид серы выделяется в количестве $G_{\text{ист}} = 60$ мг/с. Подвижность воздуха в помещении $v_{\text{п}} = 0{,}3$ м/с. Рассредоточенные источнкн вредных выделений и общеобменная вытяжная вентиляция отсутствуют ($M = 0$).

Решение. Границу разгонного участка находим из соотношения:

$$1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2;$$

$$z \leqslant 3{,}2 \cdot 1 \leqslant 3{,}2; \qquad z = z_{\text{п}} + z_{\text{н}}.$$

Расстояние от полюса струи до источника:

$$z_{\text{п}} = 1{,}7d = 1{,}7 \cdot 1 = 1{,}7 \text{ м}.$$

Расстояние от теплового источника до границы разгонного участка:

$$z_{\text{н}} \text{ или } l_{\text{р}} = z - z_{\text{н}} = 3{,}2 - 1{,}7 = 1{,}5 \text{ м}.$$

Определяем применимость данных рекомендаций для расчета местного отсоса $l_{\text{р}} \geqslant x$; $1{,}5 > 0{,}6$, т. е рекомендации пригодны для расчета.

Характерные размеры:

$$S = \frac{1}{2}(x_0 + y_0 + \sqrt{x_0^2 + y_0^2}) = \frac{1}{2}(0{,}7 + 0{,}6 + \sqrt{0{,}7^2 + 0{,}6^2}) = 1{,}11;$$

$$\bar{R} = R/(S + 2r)\,0{,}24 = 0{,}35/(1{,}11 + 2 \cdot 0{,}5)\,0{,}24 = 0{,}693.$$

Относительная производительность отсоса $\bar{L}$:

$$\bar{L} = 0{,}22\,(1 - 0{,}25\bar{R}^2) = 0{,}22\,(1 - 0{,}25 \cdot 0{,}693^2) = 0{,}191.$$

Коэффициент

$$k_{\text{п}} = 1 + 33v_{\text{п}}\sqrt[3]{r^2/(yQ)} = 1 + 33\,0{,}3\sqrt[3]{0{,}5^2/(0{,}6 \cdot 5510)} = 1{,}42.$$

Предельный расход воздуха на отсос.

$$L_{\text{пред}} = 310\sqrt[3]{Q(S + 2r)^5}\,\bar{L}k_{\text{п}} =$$

$$= 310\sqrt[3]{5510\,(1{,}11 + 2\,0{,}5)^5}\,0{,}191\;1{,}42 \quad 5140 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Предельная концентрация примеси.

$$\Delta C_{\text{пред}} = 3600G_{\text{ист}}/L_{\text{пред}} = 3600 \cdot 60/5140 = 42 \text{ мг/м}^3.$$

Относительная предельная концентрация:

$$\Delta\bar{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}} = \frac{42}{10} = 4{,}2.$$

По рис 6.5 при $M=0$ и $\Delta C_{\text{пред}}=4{,}2$ находим коэффициент $k_{\text{эф}}=1{,}00$.

Требуемая производительность зонта:

$$L = L_{\text{пред}} k_{\text{эф}} = 5140 \cdot 1{,}0 = 5140 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Пример 6.6. Рассчитать наклонный отсос, улавливающий загрязненный поток от источника, выделяющего $Q_{\text{ист}}=1600$ Вт конвективного тепла и $G_{\text{ист}}=60$ мг/с оксида углерода.

Исходные данные. Источник установлен заподлицо с поверхностью. Размеры источника $a \times b = 1{,}2 \times 0{,}6$ м. Расстояние от центра источника до центра отсоса: по вертикали $y_0=1{,}0$ м, по горизонтали $x_0=0{,}8$ м. Угол несоосности $\varphi=45°$. Подвижность воздуха в помещении $v_{\text{п}}=0{,}4$ м/с. Рассредоточенные газовыделения в цех составляют $G_{\text{о.о}}=20$ мг/с. Производительность общеобменной вытяжной вентиляции $L_{\text{о.о}}=800$ м^3/ч. Панель с фланцем по периметру имеет размеры $A \times B = 1{,}2 \times 0{,}6$ м Ширина фланца $h_{\text{ф}}=0{,}6$ м.

Решение. Отношение сторон прямоугольного теплового источника: $a/b = 1{,}2/0{,}6 = 2{,}0$. При $a/b \leqslant 2$ источник имеет компактную струю.

Границу разгонного участка находим из соотношения: $1{,}2 \leqslant z/d \leqslant 3{,}2$, где d для прямоугольного источника равен меньшей стороне (или стороне, повернутой к местному отсосу); $d=b=0{,}6$ м; $z \leqslant 3{,}2 \cdot 0{,}6 \leqslant 1{,}92$ м; $z=z_{\text{п}}+z_{\text{и}}$. Расстояние от полюса струи до источника: $z_{\text{п}}=d=0{,}6$ м. Расстояние от теплового источника до границы разгонного участка:

$$z_{\text{и}} \quad \text{или} \quad l_{\text{р}} = z - z_{\text{п}} = 1{,}92 - 0{,}6 = 1{,}32 \text{ м}.$$

Определяем применимость данных рекомендаций для расчета местного отсоса: $l_{\text{р}} \geqslant x$; $1{,}32 > 1{,}0$, следовательно, рекомендации пригодны для расчета.

Эквивалентный радиус

$$r_{\text{экв}} = 0{,}564 \sqrt{ab} = 0{,}564 \sqrt{1{,}2 \cdot 0{,}6} = 0{,}478 \text{ м};$$

$$R_{\text{э}} = 0{,}564 \sqrt{1{,}2 \cdot 0{,}6} = 0{,}478 \text{ м}.$$

Характерные размеры:

$$S = \frac{1}{2}\left(x_0 + y_0 + \sqrt{x_0^2 + y_0^2}\right) = \frac{1}{2}\left(1 + 0{,}8 + \sqrt{1^2 + 0{,}8^2}\right) = 1{,}54;$$

$$\bar{R} = R/[(S + 2r)\,0{,}24] = \frac{0{,}478}{(1{,}54 + 2 \cdot 0{,}478)\,0{,}24} = 0{,}798.$$

Относительный расход $\bar{L}$.

$$\bar{L} = (0{,}15 + 0{,}043\varphi)\,[1 - (1 - 0{,}32\varphi)^2\,\bar{R}^2] =$$

$$= \left(0{,}15 + 0{,}043\,\frac{\pi}{4}\right)\left[1 - \left(1 - 0{,}32\,\frac{\pi}{4}\right)^2 0{,}798^2\right] = 0{,}118.$$

Коэффициент

$$k_{\text{п}} = 1 + 33 v_{\text{п}} \sqrt[3]{r^2/(y_0 Q)} = 1 + 33 \cdot 0{,}4 \sqrt[3]{0{,}478^2/(1 \cdot 1600)} = 1{,}69.$$

Предельный расход

$$L_{\text{пред}} = 310 \sqrt[3]{Q\,(S + 2r)^5}\,\bar{L} k_{\text{п}} =$$

$$= 310 \sqrt[3]{1600\,(1{,}54 + 2 \cdot 0{,}478)^5} \cdot 0{,}118 \cdot 1{,}69 = 3320 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

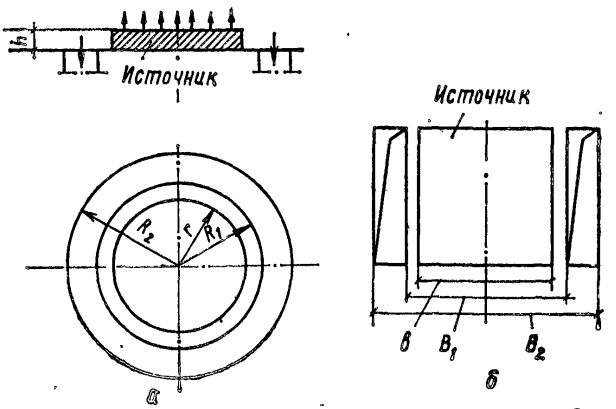


Рис. 6.7 Нижний отсос:
а — кольцевой отсос; *б* — щелевой отсос

Предельная избыточная концентрация

$$\Delta C_{\text{пред}} = 3600 G_{\text{ист}}/L_{\text{пред}} = 3600 \cdot 60/3320 = 65 \text{ мг/м}^3.$$

Относительная избыточная концентрация

$$\Delta \bar{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}} = \frac{65}{20 - 0} = 3{,}25.$$

Значение комплекса M:

$$M = \frac{G_{\text{о. о}}}{G_{\text{ист}}} \Delta \bar{C}_{\text{пред}} - \frac{L_{\text{о. о}}}{L_{\text{пред}}} = \frac{20}{60} \cdot 3{,}25 - \frac{800}{3320} = 0{,}739.$$

По рис. 6.5 определяем: $Эф = 90\%$; $k_{\text{эф}} = 1{,}0$.
Требуемая производительность отсоса:

$$L = L_{\text{пред}} k_{\text{эф}} = 3320 \cdot 1{,}0 = 3320 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расчет нижних отсосов. Вычисляют безразмерные относительные величины для нижнего кольцевого отсоса:

$$\bar{R}_1 = R_1/r; \qquad (6.25)$$

$$\bar{R}_2 = R_2/R_1; \qquad (6.26)$$

$$\bar{h} = h/r; \qquad (6.27)$$

для нижнего щелевого отсоса

$$\bar{B}_1 = \frac{B_1}{b}; \qquad (6.28) \qquad \bar{B}_2 = \frac{B_2}{B_1}. \qquad (6.29)$$

Обозначения принятых величин R_1, R_2, r, h, B_2, B_1 и b приведены на рис. 6 7 Относительный расход удаляемого воздуха для кольцевого и щелевого отсосов представлен на рис. 6.8. Рассчитывают коэффициент $k_{\text{п}}$:

для кольцевого отсоса

$$k_{\text{п}} = 1 + 63{,}2 \sqrt{v_{\text{п}}^3 \frac{r}{Q}}; \qquad (6.30)$$

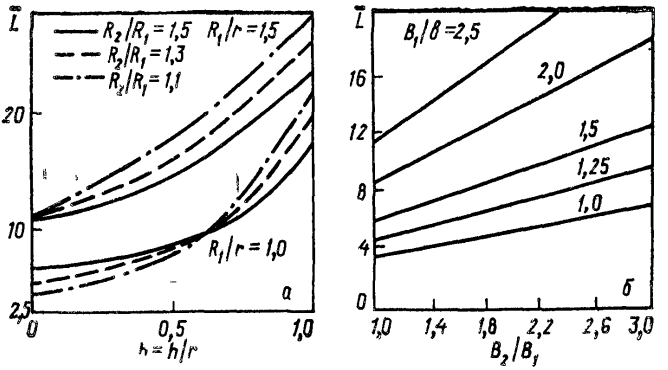


Рис. 6 8. Графики для определения относительной производительности нижних отсосов

а — кольцевой отсос, *б* — щелевой отсос

для щелевого отсоса

$$k_{\text{п}} = 1 + 44{,}7\sqrt{v^3_{\text{п}}\frac{b}{Q}}. \qquad (6.31)$$

Предельный расход удаляемого воздуха:

для кольцевого отсоса

$$L_{\text{пред}} = 360\bar{L}\sqrt[3]{Q}\,r^{1,67}\left(1 - 0{,}06\,\frac{Q_{\text{г}}}{Q_{\text{в}}}\right)k_{\text{п}}\ \text{м}^3/\text{ч}; \qquad (6.32)$$

для щелевого отсоса

$$L_{\text{пред}} = 180\bar{L}\sqrt[3]{Q}\,abk_{\text{п}}\ \text{м}^3/\text{ч}. \qquad (6.33)$$

Формула (6.33) пригодна для расчетов отсоса от источников, высота которых не более $h=b/2$.

Предельная избыточная концентрация примеси и относительная предельная концентрация

$$\Delta C_{\text{пред}} = \frac{3600G_{\text{ист}}}{L_{\text{пред}}} \qquad (6.34)$$

$$\Delta\bar{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}}. \qquad (6.35)$$

Значение комплекса M

$$M = \frac{G_{\text{о. о}}}{G_{\text{ист}}}\Delta C_{\text{пред}} - \frac{L_{\text{о. о}}}{L_{\text{пред}}}. \qquad (6.36)$$

По рис. 6.5 определяют оптимальную эффективность улавливания Эф и соответствующее значение $k_{\text{эф}}$. Требуемый расход удаляемого воздуха:

$$L = L_{\text{пред}}k_{\text{п}}. \qquad (6.37)$$

Пример 6.7. Рассчитать нижний кольцевой отсос от нагретого цилиндрического источника размерами $h=0{,}075$ м и $r=0{,}075$ м.

Исходные данные. Конвективная теплоотдача горизонтальной поверхности $Q_{\text{г}}=100$ Вт, вертикальной — $Q_{\text{в}}=57$ Вт, $Q=100+157$ Вт Наружный

и внутренний радиусы кольцевого отсоса соответственно равны: $R_2=0{,}1$ м и $R_1=0{,}075$ м. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}3$ м/с. Одновременно с конвективным теплом источник выделяет пары фенола в количестве $G_{ист}=0{,}165$ мг/с. $ПДК_{р.з}=0{,}3$ мг/м³. Другие источники выделения фенола в помещении отсутствуют Общеобменная вытяжка $L_{о.о}=720$ м³/ч.

Решение. Относительные размеры

$$\bar{R}_1 = R_1/r = 0{,}075/0{,}075 = 1;$$

$$\bar{R}_2 = R_2/r = 0{,}1/0{,}075 = 1{,}33;$$

$$\bar{h} = h/r = 0{,}075/0{,}075 = 1.$$

Относительный расход удаляемого воздуха находят по рис. 6.8: $\bar{L}=21$. Коэффициент

$$k_п = 1 + 63{,}2\sqrt{v_п^3 \frac{r}{Q}} = 1 + 63{,}2\sqrt{0{,}3^3 \frac{0{,}075}{157}} = 1{,}2.$$

Предельный расход удаляемого воздуха:

$$L_{пред} = 360\,\bar{L}\sqrt[3]{Q}\,r^{1{,}67}\left(1 - 0{,}06\frac{Q_г}{Q_в}\right)k_п =$$

$$= 360 \cdot 21\sqrt[3]{157} \cdot 0{,}075^{1{,}67}\left(1 - 0{,}06\frac{57}{100}\right)1{,}2 = 620 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Предельная избыточная концентрация паров фенола в удаляемом воздухе:

$$\Delta C_{пред} = 3600 G_{ист}/L_{пред} = 3600 \cdot 0{,}165/620 = 0{,}96 \text{ мг/м}^3.$$

Относительная предельная концентрация

$$\Delta\bar{C}_{пред} = \frac{\Delta c_{пред}}{ПДК - C_ф} = \frac{0{,}96}{0{,}3} = 3{,}2.$$

Значение комплекса

$$M = \frac{G_{о.о}}{G_{ист}}\Delta\bar{C}_{пред} - \frac{L_{о.о}}{L_{пред}} = 0 - \frac{720}{620} = -1{,}16.$$

По рис. 6.5 находят коэффициент $k_{эф}=1{,}0$.
Требуемая производительность отсоса:

$$L = L_{пред} k_{эф} = 620 \cdot 1{,}0 = 620 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Пример 6.8. Рассчитать производительность нижнего отсоса от прямоугольного источника размерами $a \times b = 0{,}6 \times 0{,}5$ м; $h=0$.

Исходные данные. Конвективная теплоотдача источника $Q=400$ Вт. Всасывающие щели шириной 0,1 м расположены вдоль длинной стороны источника: $B_1=0{,}6$ м, $B_2=0{,}8$ м. Подвижность воздуха в помещении $v_п=0{,}4$ м/с. Одновременно с конвективным теплом от источника выделяется оксид углерода в количестве $G_{ист}=25$ мг/с; имеются также рассредоточенные выделения оксида углерода: $G_{о.о}=25$ мг/с. Расход воздуха через общеобменную вытяжную вентиляцию составляет $L_{о.о}=1800$ м³/ч.

Решение. Относительные размеры.

$$\bar{B}_2 = B_2/B_1 = 0{,}8/0{,}6 = 1{,}33;$$

$$\bar{B}_1 = B_1/b = 0{,}6/0{,}5 = 1{,}2.$$

Относительный расход удаляемого воздуха находят по рис. 6.8:

$$\bar{L} = 5{,}0.$$

Коэффициент

$$k_{\text{п}} = 1 + 44{,}7\sqrt{v_{\text{п}}^3 \frac{b}{Q}} = 1 + 44{,}7\sqrt{0{,}4^3 \frac{0{,}5}{400}} = 1{,}4.$$

Предельный расход удаляемого воздуха:

$$L_{\text{пред}} = 180\sqrt[3]{L}\sqrt[3]{Q}\ abk_{\text{п}} = 180 \cdot 5\sqrt[3]{400} \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}4 = 2780\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

Предельная избыточная концентрация примеси

$$\Delta C_{\text{пред}} = 3600\ G_{\text{о. о}}/L_{\text{пред}} = 3600 \cdot 25/2780 = 32{,}3\ \text{мг/м}^3.$$

Относительная предельная концентрация

$$\Delta\bar{C}_{\text{пред}} = \frac{\Delta C_{\text{пред}}}{\text{ПДК} - C_{\text{ф}}} = \frac{32{,}3}{20} = 1{,}62.$$

Значение комплекса

$$M = \frac{G_{\text{о. о}}}{G_{\text{ист}}}\Delta\bar{C}_{\text{пред}} - \frac{L_{\text{о. о}}}{L_{\text{пред}}} = \frac{25}{25}1{,}62 - \frac{1800}{2780} = 0{,}973.$$

По рис. 6.5 находят значение коэффициента $k_{\text{эф}} = 1{,}08$ Требуемая производительность отсоса

$$L = L_{\text{пред}}k_{\text{эф}} = 2780 \cdot 1{,}08 = 3000\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

6.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУКТИВНОМУ ОФОРМЛЕНИЮ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ

На основании приведенных ниже рекомендаций осуществляют предварительный выбор конструктивного оформления местных отсосов, а также объема отсасываемого ими воздуха, затем рассчитывают эффективность выбранного местного отсоса при заданных вредных веществах, рассчитывают поля концентраций или температур.

В рассматриваемых рекомендациях по выбору предварительного объема удаляемого воздуха местными отсосами не учитывается степень подвижности воздуха в помещении, вызываемая воздушными потоками приточных струй вентиляции, движением воздуха обусловленным тепловыми источниками, имеющими высокую температуру, а также движением воздуха, возникающим при падении больших количеств сыпучего материала со значительной высоты.

6.2.1. Общие рекомендации

Расчетная скорость в проеме отсоса зависит от многих факторов: степени токсичности выделяющихся вредных веществ, характера технологического процесса, конструкции местного отсоса, характера движения воздушных потоков помещения и др.

Рекомендуемые объемы воздуха для конкретных местных отсосов и отдельного технологического оборудования находят из выражения:

$$L = Fv. \qquad (6.38)$$

Расчетные минимальные скорости воздуха в открытом проеме местного отсоса приведены в табл. 6.1.

Для ряда специфических производственных процессов промышленности величины отсасываемых объемов воздуха и данные для их определения приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.1. Расчетные минимальные скорости воздуха в открытом проеме местного отсоса

Оборудование и технологические операции	Местный отсос	Скорость движения воздуха, м/с
Стол для ручной сварки мелких изделий	Вытяжной шкаф с рабочим проемом 800 × 400 мм	0,5—0,7
	Решетка в плоскости стола с живым сечением 50%	0,5
Стол или стенд с фиксированными местами сварки; сварка в закрытых и полузакрытых пространствах	Панель равномерного всасывания над столом	3,5
	Воронка	6,5
Печи кузнечно-прессового производства:		
нагревательные камерные	Зонт-козырек	0,8
щелевые	Комбинированный зонт	0,7
Пресс кривошипный горячештамповочный	Укрытие	0,5
Электропечи сопротивления в термическом производстве	Козырек над загрузочным отверстием	0,6
Камерные печи с газовым нагревом термического производства	Комбинированный зонт	0,8
Шахтные электропечи азотирования	Кольцевой отсос	6—6,5
Электропечи с контролируемой средой	Зонт-козырек над разгрузочным отверстием	0,6
Агрегат цианирования термического производства	Общее укрытие	1,5
Электропечи в термическом производстве:		
шахтная масляная	Кольцевой отсос	4,5
соляная	Укрытие	0,6
	Бортовой отсос	7
Ванна:		
обезжиривания щелочью	То же	3,5
промасливания	»	5,3
Ванна для закалки в масле	»	10
	Укрытие	0,7
Машина моечная	»	0,8
Стенд аммиачных баллонов	Зонт	0,5
Установка:		
гидрополирования	Укрытие	1,0
закалочная ТВЧ	Кольцевой отсос	3,0
Камера дробеструйная или дробеметная	Укрытие	5,0
Оборудование, выделяющее пыль	»	3—5
Бак для варки сульфитного щелока	Шкаф	0,7
Вагранка:		
выпуск металла	Зонт	1,0
выпуск шлака	»	1,0
Печь дуговая плавильная	Укрытие	1,0
Индукционная печь для плавки стали	Зонт	1,5
Заливка на конвейере	Панель равномерного всасывания	5,0
Охлаждение отливок	Укрытие	4,0
Выбивка решетки	»	5,0
Ванны и агрегаты гальванического производства:		
холодные растворы ($t_р < 50$ °С)	Полные укрытия	0,7
нагретые растворы	То же	1,0

Таблица 6.1 (продолжение)

Оборудование и технологические операции	Местный отсос	Скорость движения воздуха, м/с
Обезжиривание мелких деталей		0,7
Лужение	»	1,0
Растворение кислот, щелочей, солей:		
холодные растворы ($t_р < 50$ °С)	»	0,7
нагретые растворы	»	1,0
Кадмирование цианистое или серебрение	Вытяжной шкаф	
	То же	1—1,5
Свинцевание	»	0,3—0,5
Травление:		
азотной кислотой	Вытяжной шкаф	0,7—1
соляной кислотой	То же	0,5—0,7
Хромирование	»	1—1,5
Цинкование цианистое	»	1—1,5
Пайка свинцом или третником	»	0,5—0,7
Окраска пневматическим распылением лакокрасочных материалов:		
содержащих свинцовые соединения и ароматические углеводороды	Окрасочная камера	1,3
не содержащих свинцовых соединений и ароматических углеводородов	То же	1,0
содержащих диизоцианаты, эпоксидные, полиуретановые и акрилатные соединения	»	1,7
Окраска безвоздушным распылением лакокрасочных материалов:	»	1,7
содержащих свинцовые соединения или ароматические углеводороды	»	0,7
не содержащих свинцовых соединений или ароматических углеводородов	»	0,6
Окраска электроручным распылением	Окрасочная камера	0,4—0,5
Электростатическая окраска лакокрасочными материалами:		
содержащими ксилол	»	0,8
не содержащими ксилол	»	0,6

Место установки отсоса определяется прежде всего условиями технологического процесса. Местный отсос необходимо максимально приблизить к источнику газо-, тепло- или пылевыделений (за исключением тех случаев, когда регламентируются температура процесса, подвижность воздуха, фракционный состав пыли, концентрация вредных газов и др.). Для повышения эффективности отсоса следует ограничить зону подтекания воздуха к всасывающему отверстию, предусматривая вокруг него специальные поверхности (фланцы, козырьки, фартуки, ширмы). Максимальная ширина такой плоскости, позволяющая рассчитать отсос как отверстие в плоской стенке, для круглых и квадратных отверстий равна диаметру или меньшему размеру прямоугольного отверстия:

$$h_ф \geqslant B,$$

где B — меньший размер прямоугольного отверстия, м.

Если всасывающий патрубок выступает из стенки более чем на четверть диаметра при круглом сечении или более чем на четверть меньшей стороны

при прямоугольном сечении, то стенка не оказывает влияния на скорость всасывания.

6.2.2. Вытяжные зонты

Из всех конструктивных решений местных отсосов, используемых при борьбе с тепло- и газовыделениями, наибольшее распространение получили вытяжные зонты, что обусловлено простотой изготовления и монтажа, удобством в эксплуатации. Вытяжные зонты можно устанавливать практически над технологическим оборудованием всех видов. Для крупногабаритных источников тепло- и газовыделений рекомендуются зонты компактной и вытянутой формы высотой, превышающей высоту рабочей зоны (2,0 м), а также при устойчивой конвективной струе (скорость на высоте всасывания должна быть больше подвижности воздуха в помещении: $v_x > v_п$) и для технологических процессов, сопровождающихся ручными операциями, когда по условиям производства применять местные отсосы других типов невозможно. Вытяжные зонты можно устанавливать как при механической вентиляции, так и при естественной, однако в большинстве случаев их эффективность пока еще низка, что объясняется следующими недостатками их конструктивного исполнения и расчета:

скорость в рабочем сечении зонта равна или близка к подвижности воздуха в помещении;

не обоснован объем воздуха, удаляемого через зонт.

Объем удаляемого воздуха через зонт определяют, исходя из рекомендуемой скорости в рабочем проеме (см. табл. 6.1); последняя должна быть не менее подвижности воздуха в помещении.

Зонты над тепловыми источниками. Вытяжные зонты рекомендуется устанавливать на уровне, не превышающем $2d_{экв}$ (или $3B$) при устойчивой конвективной струе и $d_{экв}$ (или $1{,}5B$) — при неустойчивой.

Под устойчивой понимают такую струю, осевые скорости в которой малы и она подвержена воздействию потоков, возникающих при ручных операциях. При локализации конвективных струй рекомендуется на уровне $0{,}1d_{экв}$ от верхней плоскости компактного источника или $0{,}1B$ от плоскости большей длины прямоугольного источника обеспечивать следующие скорости всасывания

$v = 0{,}3$ м/с при размещении источников в рабочей зоне и при процессах требующих ручных операций.

Таблица 6.2. Рекомендуемые скорости и объемы отсасываемого воздуха и скорости его транспортирования

Оборудование	Вентиляция		Скорость транспортирования воздуха, м/с
	тип вытяжного устройства	воздушный поток	
Мешалки *	Полное укрытие	Скорость воздуха 0,5—1,0 м/с в вытяжных отверстиях	13—18
Закрытые *[2] промыватели	Вытяжное устройство	Вытяжка 200 м³/ч на каждые 24 дюйма диаметра промывателя; приток к промывателю 100 м³/ч и приток для разделения смеси 100 м³/ч	15
Центрифуги *[3]	Ограждение	Скорость воздуха 1,3—1,5 м/с в вытяжных отверстиях	8—10

Таблица 6.2 (продолжение)

Оборудование	Вентиляция		Скорость транспортирования воздуха, м/с
	тип вытяжного устройства	воздушный поток	
Молотковые зернодробилки	Местное вытяжное устройство	Вытяжка со скоростью 12 м/с в расчетном сечении, но не менее 85 $м^3/ч$	13—18
Вибрационные аппараты, встряхиватели, смесители *[4]	Вытяжное устройство	Не менее 1370 $м^3/ч$ на 1 $м^2$ площади поверхности	13—18
Котлы и сосуды	Ограждение	Скорость воздуха 1,0—1,25 м/с в расчетном сечении	8—10
Вращающиеся устройства барабанного ящичного и бочоночного типа	»	Скорость воздуха в вытяжных отверстиях 2 м/с или не менее 1370 $м^3/ч$ на 1 $м^2$ площади	18
Грануляторы; закрытое оборудование, при работе которого образуется пыль; упаковочные и загрузочные машины и др.	Укрытие в виде будки	920—2740 $м^3/ч$ на 1 $м^2$ открытой площади;	15
		1370—2740 $м^3/ч$ на 1 $м^2$ пылеобразующей площади	18
Сварочное оборудование	Местная вытяжка	130 мм от дуги — 255 $м^3/ч$ 130—255 мм от дуги — 470 $м^3/ч$ 200—250 мм от дуги — 720 $м^3/ч$ 250—300 мм от дуги — 1020 $м^3/ч$	10—20
	Вытяжка снизу	2750—4570 $м^3/ч$ на 1 $м^2$ площади решетки	10
	Укрытие	0,5 м/с (в расчетном сечении)	10
Горны для ручных кузнечных работ	Зонты	Скорость воздуха в расчетном сечении зонта 1 м/с	8
Выхлопные трубы автомашин:			
в гаражах	Местный отсос над отверстием выхлопной трубы	170 $м^3/ч$ на 3-дюймовый шланг для автомашин с двигателями мощностью менее 200 л. с.;	
в производственном помещении	То же	330 $м^3/ч$ на 4-дюймовый гибкий шланг для тягачей и автомашин с двигателем мощностью более 200 л. с.; 760 $м^3/ч$ — для дизельных двигателей	

* Вытяжка требуется только при загрузке и выгрузке

*[2] Гибкие вытяжные приспособления устраивают внутри промывателей Зонты должны охватывать возможно бо́льшую площадь

*[3] Оснащают кожухом с отверстиями, занимающими 50—75% его площади

*[4] Вытяжное устройство с окнами у каждого смесителя

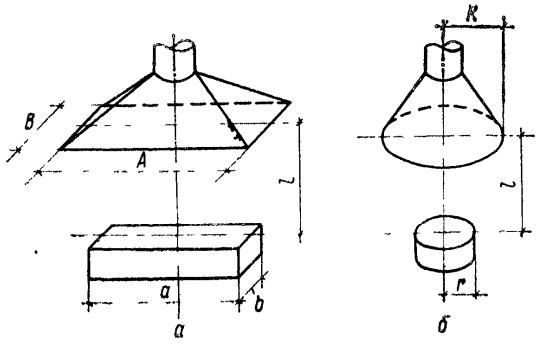


Рис. 6.9. Конструктивные размеры вытяжных зонтов:
а — прямоугольный зонт; *б* — круглый зонт

$v=0{,}2$ м/с — при установке источника в рабочей зоне и при процессах, не требующих ручных операций;

$v=0{,}1$ м/с — при размещении на полу крупногабаритного источника высотой, превышающей рабочую зону.

При этом наиболее рациональны зонты со следующими размерами: над круглыми источниками $R=1{,}2r$;

над прямоугольными источниками следует применять зонты прямоугольной формы (рис. 6.9) со сторонами $A=a+0{,}24l$ и $B=1{,}2b$. Под компактным следует понимать источник, имеющий в плане круглую, квадратную или прямоугольную форму с соотношением сторон $a:b\leqslant 2{,}0$. Размеры зонта в общем случае с учетом подвижности воздуха и температуры помещения следует определять из соотношения $A=a+2x$; $B=b+2x$;

$$x=0{,}594\,(c_{\text{г}}\rho_{\text{г}}T^{2/3}_{\text{п}})\,\frac{v_{\text{п}}\,(0{,}1d_{\text{экв}})^{5/3}}{Q^{2/3}}, \qquad (6.39)$$

где $c_{\text{г}}$ — теплоемкость газовой смеси наружной среды, кДж/(м³·К); $\rho_{\text{г}}$ — плотность газовой смеси наружной среды, кг/м³; Q — количество тепла, поступающего от теплового источника, Вт. Для прямоугольного источника (некомпактного) вместо $d_{\text{экв}}$ подставляют меньший его размер. Расход воздуха, удаляемого зонтом над компактным источником тепла, определяют по формуле, м³/ч:

$$L=125\,\frac{F_{\text{з}}}{F_{\text{и}}}\sqrt[3]{Q_{\text{к}}xF^2_{\text{з}}}, \qquad (6.40)$$

где $F_{\text{з}}$; $F_{\text{и}}$ — площади соответственно зонта и источника тепла, м²; $Q_{\text{к}}$ — конвективная составляющая источника тепла, Вт; x — расстояние от нагретой поверхности до воздухоприемного отверстия зонта, м.

При неустойчивой конвективной струе следует обеспечивать равномерную скорость воздуха в габаритном сечении зонта. При устойчивой конвективной струе целесообразно создавать неравномерную скорость, которая определяется углом раскрытия зонта. Для обеспечения равномерной скорости в габаритном сечении воздухоприемника (с соотношением скорости на оси зонта к средней по сечению $v_{\text{п}}/v_0=1-1{,}1$) следует применять зонты с малыми углами раскрытия: $\alpha=60-70^\circ$ (рис. 6.10).

Необходимо стремиться к расположению зонта над тепловым источником с малым углом несоосности как наиболее целесообразному в отношении расхода удаляемого воздуха. Для обеспечения неравномерной скорости в габаритном сечении воздухоприемника (с соотношением скорости на оси

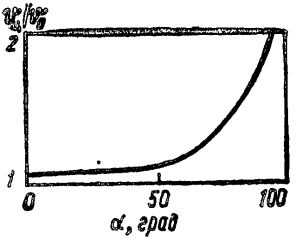


Рис. 6.10. Зависимость отношения скорости воздуха по оси зонта к средней ее величине по сечению от угла раскрытия зонта

зонта к средней скорости по сечению $v_ц/v_0 = 1{,}65$ и более) следует применять зонты с углами раскрытия $\alpha = 90°$ и более.

При размещении зонта над компактными источниками около ограждающих конструкций (стен, перегородок) на высоте $0{,}5d_{экв}$, $1{,}0d_{экв}$, $1{,}5d_{экв}$ и $2d_{экв}$ (или $0{,}75B$, $1{,}5B$, $2{,}25B$ и $3{,}0B$) расчетный расход воздуха (см. гл. 5) можно уменьшить соответственно на 4; 8; 12 и 16%. Если верхний отсос (зонт) установлен в углу на высоте $0{,}5d_{экв}$; 1,0; 1,5 и $2d_{экв}$ или ($0{,}75B$; 1,5; 2,25 и $3{,}0B$), то расход воздуха можно уменьшить соответственно на 6; 10; 15 и 20%. Рекомендуемые объемы удаляемого воздуха зонтом над горном приведены на рис. 6.11.

Зонты-козырьки. Эти устройства устанавливают над входными отверстиями печей, сушил и другого подобного оборудования для отсасывания выбивающихся газов при загрузке и выгрузке материала.

При расчете зонта-козырька (размеры зонта и количество отсасываемого воздуха) следует учитывать вид технологического оборудования. Для пламенных печей и сушил, работающих на твердом или газообразном топливе, основной предпосылкой является то, что печь (сушило) работает с избыточным давлением, под влиянием которого газ выбивается по всей высоте отверстия печи.

Расчет зонтов сводится к определению их размеров и объемов удаляемой смеси продуктов горения (газов) и воздуха. Для определения габаритных размеров зонта-козырька (рис. 6.12) необходимо прежде всего определить количество газов, вырывающихся через печное отверстие из печи, и занимаемую ими площадь при входе в зонт. Во избежание чрезмерного окисления металла в печи (в плоскости пода) избыточное давление поддерживают равным нулю. В этом случае давление на уровне верхней кромки печного козырька составляет

$$p_1 = h(\rho_г' - \rho_г''), \qquad (6.41)$$

где h — высота рабочего отверстия, м; $\rho_г'$ — плотность газовой смеси наружной среды — воздух помещения, кг/м³; $\rho_г''$ — плотность газовой смеси внутренней среды — газов, выходящих из печи, кг/м³.

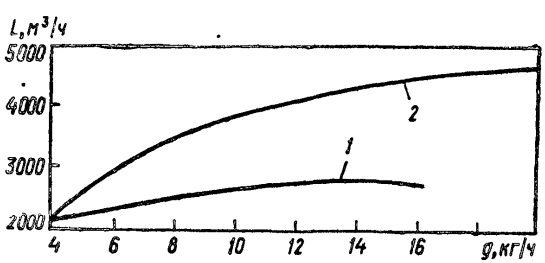


Рис. 6.11. Рекомендуемые объемы воздуха, удаляемого зонтом над горном, в зависимости от количества сжигаемого угля:
1 — горн с одним огнем; *2* — с двумя огнями

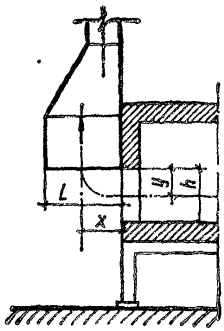


Рис 6.12 Конструктивные размеры зонта козырька

Величина среднего избыточного давления в отверстии печи $\Delta p = p_1/2$.

Средняя скорость выхода горячих газов из печи при открытой дверце определяется по формуле:

$$v_{ср} = \xi \sqrt{2g\Delta p/\rho''_г}, \qquad (6.42)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления, принимаемый в соответствии с данными табл. 6.3 местных сопротивлений при отверстиях различных типов. По скорости, размерам отверстия и температуре в печи определяют критерий Архимеда, характеризующий выходящую из печи струю:

$$Ar = \frac{g d_{экв}}{v^2_{ср}} \cdot \frac{T_г - T_в}{T_в}, \qquad (6.43)$$

где $d_{экв}$ — диаметр равновеликого отверстия,

$$d_{экв} = 4F/П \quad \text{или} \quad 2bh/(b + h);$$

b, h и П — ширина, высота и периметр печного отверстия, м; $T_г$, $T_в$ — абсолютные температуры газов в печи и воздуха в помещении °К.

Под воздействием гравитационных сил поток вырывающихся из печи газов искривляется и ось его пересекает плоскость входного отверстия зонта на расстоянии, определяемом по формулам:

$$x = \sqrt[3]{\frac{ym^2 d^3_{экв}}{0{,}63h\,Ar}} \qquad (6.44)$$

или

$$x = d_{экв} \sqrt[11]{\frac{(y/d_{экв})^4}{[0{,}18Ar^4 a^3 (T_г/T_в)^2]}}, \qquad (6.45)$$

где m — экспериментальный коэффициент, значения которого для прямоугольного отверстия печи с соотношением сторон $h/b = 0{,}5—1$ могут быть приняты соответственно 5 и 4,2; a — коэффициент турбулентной структуры, принимаемый равным 0,1; y — расстояние по вертикали от середины загрузочного отверстия до уровня всасывающего отверстия зонта (при размещении зонта на уровне верхней кромки печного отверстия); $y = h/2$.

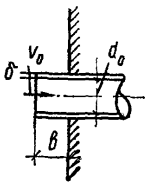
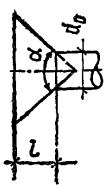
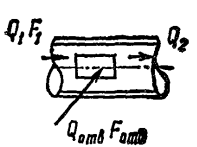
Вылет зонта (расстояние по горизонтали от стенки печи до противоположной стенки зонта) определяется по формуле.

$$l = x + d_x/2, \qquad (6.46)$$

где d_x — ширина струи на расстоянии x от ее выхода из отверстия, м; при $0{,}5 < (h/b) < 2$

$$d_x = d'_{экв} + 0{,}44x. \qquad (6.47)$$

Таблица 6.3. Коэффициенты местного сопротивления для отверстий различных типов

Тип отверстия	Эскиз	Коэффициент местного сопротивления						
Цилиндрическая труба			Значения ξ при b/d_0					
		δ/d_0	0	0,002	0,01	0,05	0,2	0,5	1
		0	0,5	0,57	0,68	0,8	0,92	1	0,94
		0,02 и более	0,5	0,51	0,52	0,65	0,66	0,72	0,72
Зонт			Значения ξ при α						
		l/d_0	0	10	30	60	100	140	180
		0,025	1	0,96	0,9	0,8	0,69	0,59	0,5
		0,05	1	0,93	0,8	0,67	0,58	0,53	0,5
		0,1	1	0,8	0,55	0,41	0,41	0,44	0,5
		0,25	1	0,68	0,3	0,17	0,22	0,34	0,5
		0,6	1	0,46	0,18	0,13	0,21	0,33	0,5
		1 и более	1	0,32	0,14	0,1	0,18	0,3	0,5
Отверстие в воздуховоде			Значения $\xi_{отв}$ при $Q_{отв}/Q_2$						
		$F_{отв}/F_1$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5		
		0,1	0,8	1,3	1,4	1,4	1,4		
		0,2	—1,4	0,9	1,3	1,4	1,4		
		0,4	—9,5	0,2	0,9	1,2	1,3		
		0,6	—21,2	—2,5	0,3	1,0	1,2		

Ширину зонта b обычно принимают на 150—200 мм больше ширины печного отверстия. Объем газов, выходящих из отверстия печи, определяется по формуле:

$$L_п = v_{ср} h b. \tag{6.48}$$

Объем смеси удаляемых газов из печи и воздуха, подсасываемого из помещения, определяется по формуле:

$$L_x = L_п + \left[0{,}085 \frac{x}{d_{экв}} + 0{,}0014 \left(\frac{x}{d_{экв}}\right)^2\right] L_п \sqrt{\frac{T_в}{T_п}}. \tag{6.49}$$

Температуру смеси газов и воздуха, подсасываемого из помещения, можно определить из выражения:

$$t_{см} = \frac{G_п t_п + G_в t_в}{G_п + G_в}. \tag{6.50}$$

Удаляемая через зонт смесь газов и воздуха может выбрасываться в атмосферу системами с естественным побуждением или вентиляторами. При удалении смеси газов и воздуха системами с естественным побуждением температура не должна превышать 300 °С, а при удалении вентиляторами без водяного охлаждения — не выше 80 °С.

Объем подсасываемого под зонт воздуха, м³/ч:

$$L_в = 3600 b_0 (0{,}62 h_0 + 0{,}056) \sqrt{2g\Delta p / \rho_{г.о}}, \tag{6.51}$$

где $\rho_{г.о}$ — плотность газов, прорывающихся через открытое отверстие наружу. Количество газов, прорывающихся через открытое отверстие, определяется по формуле, кг/с:

$$G_г = 0{,}62 f_0 \sqrt{2g\Delta p \rho_{г.о}}, \tag{6.52}$$

где f_0 — площадь загрузочного отверстия, м².

Количество подсасываемого воздуха, кг/с:

$$G_в = L_в \rho_г. \tag{6.53}$$

Объем смеси:

$$\frac{G_в + G_г}{\rho_{г.см}} = \frac{G_{см}}{\rho_{г.см}}, \tag{6.54}$$

где $\rho_г$ — плотность газовой смеси наружной среды, кг/м³; $\rho_{г.см}$ — плотность газовой смеси, состоящей из газов, прорывающихся через открытое отверстие наружу, и газов наружной среды, кг/м³.

В электрических печах сопротивления при открывании отверстия через его нижнюю часть воздух входит в печь, а через верхнюю выбивается наружу. Поэтому рекомендуются следующие размеры зонта-козырька, располагаемого около загрузочных отверстий печей и сушил, обогреваемых электричеством:

вылет (длина) зонта, мм:

$$l = (1{,}2 — 1{,}25) H; \tag{6.55}$$

ширина зонта, мм:

$$b = B + 200, \tag{6.56}$$

где H и B — соответственно высота и ширина загрузочного отверстия, мм.

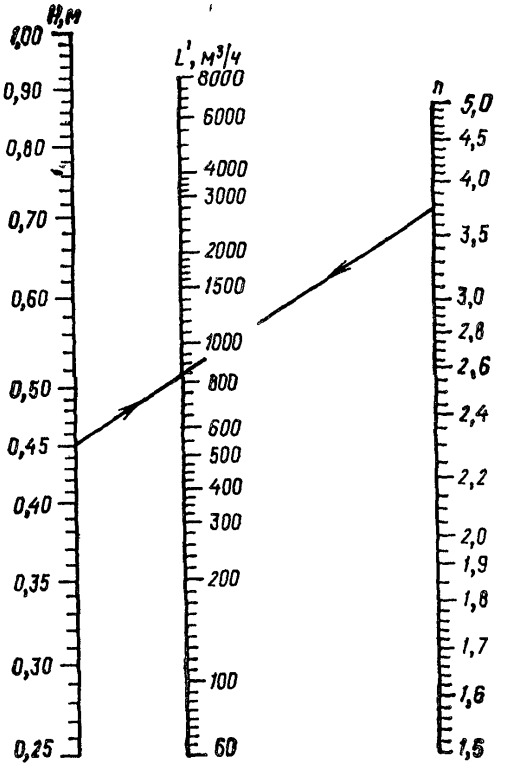


Рис. 6.13. Номограмма для определения объема удаляемого воздуха от зонта-козырька над загрузочными отверстиями печей и сушил

Объем воздуха L, выбиваемого из загрузочного отверстия электропечей, можно рассчитывать по формулам, м³/ч:

$$L = BL'/H; \tag{6.57}$$

$$L' = 7700H^{3/2}\frac{\sqrt[3]{n}}{1+\sqrt[3]{n}}\sqrt{\frac{\sqrt[3]{n}}{1+\sqrt[3]{n}}(n-1)}; \tag{6.58}$$

$$n = T_г/T_в \approx \rho_в/\rho_г, \tag{6.59}$$

где $T_г$ и $T_в$ — абсолютные температуры соответственно выбивающихся газов и воздуха помещения, К; $\rho_г$ и $\rho_в$ — плотность соответственно выбивающихся газов и воздуха помещения, кг/м³. Для расчета величины L' можно пользоваться номограммой (рис. 6.13).

Зонты со вставками. Вставки служат для повышения эффективности работы местных отсосов. Они могут быть глухими, тогда увеличивается скорость в кольцевом сечении зонта, либо коническими, тогда более полно используется энергия восходящих потоков теплового источника.

Предусматривая зонты с глухими вставками, предварительно следует выполнить расчет с тем, чтобы обосновать их целесообразность (см. гл. 5). Ниже приведены две конструкции зонтов с коническими вставками (рис. 6.14, *а* и *б*).

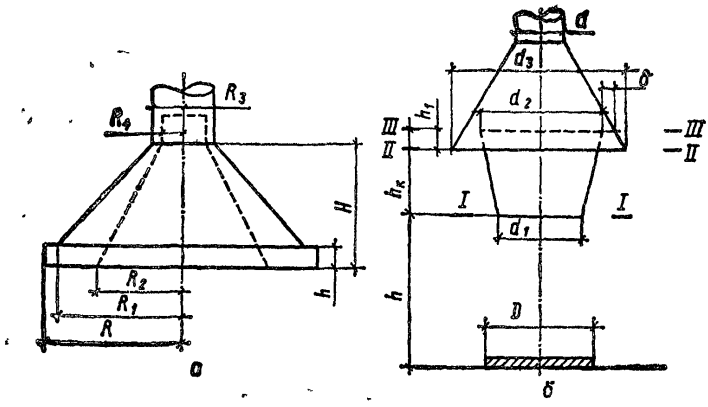


Рис. 6.14. Зонт со вставкой двух типов (*а* и *б*)

Внутри корпуса зонта первого типа (рис. 6.14, *а*) расположен кольцевой уступ. Коническая вставка обеспечивает неравномерность всасывания, соответствующую неравномерности профиля скоростей подтекающей струи. При этом всасывание происходит преимущественно по центру струи, что увеличивает ее устойчивость по отношению к неорганизованным потокам. Кольцевой уступ позволяет при любом угле раскрытия зонта достичь эффективного всасывания практически по всей его площади, вихревые же зоны размещаются в самих уступах. Соотношение размеров зонта должно быть следующим (см. рис. 6.14, *а*):

$$R_1 = (0{,}8 - 0{,}85)R; \qquad R_2 = (0{,}55 - 0{,}6)R; \qquad R_4 = 0{,}7R_3;$$

$$h = (1{,}2 - 1{,}4)(R - R_1).$$

Вытяжной зонт СИОТ (второй тип) наиболее целесообразно устанавливать на переходном и основном участках тепловой струи. Ядро струи под действием теплового потока поступает в рабочее сечение обратного конуса и захватывается рабочим сечением *I—I*, т. е. вершиной обратного конуса, а оставшаяся часть струи, омывающая наружные стенки этого конуса, налипает на них и под воздействием конвективного тепла через сечение *II—II* и кольцевой зазор сечения *III—III* удаляется в систему вентиляции (рис. 6.14, *б*). Габаритные размеры вытяжного зонта следующие:

площадь рабочего сечения *I—I* обратного конуса $F_{I-I} > 0{,}6\ F_и$, где $F_и$ — площадь источника;

площадь сечения кольцевого зазора $F_{III-III}$:

$$0{,}2F_и < F_{III-III} < 0{,}5F_и;$$

площадь сечения корпуса зонта $F_{II-II} < 1{,}2F_и$;

высота обратного конуса $h_к \leqslant 0{,}8D$.

Ширина кольцевого зазора δ определяется из соотношения принятого зазора и высоты заглубления основания обратного конуса в корпус зонта: $h_1 \leqslant 4\delta$.

6.2.3. Вытяжные шкафы

Вытяжные шкафы применяют тогда, когда имеется возможность практически полностью изолировать источник вредных выделений. Различают вытяжные шкафы с верхним, нижним и комбинированным удалением воздуха. Шкафы с верхним отводом воздуха применяют для удаления тепла и легких газов,

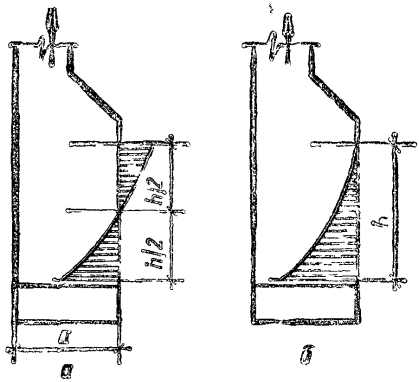


Рис. 6.15. Схемы возможных гравитационных давлений в вытяжном шкафу при наличии в нем теплового источника:

а — недостаточное гравитационное давление, *б* — нормальное гравитационное давление

шкафы с комбинированным удалением воздуха — для пылей, тяжелых газов и тепловыделений. В шкафах с комбинированным удалением газов (из верхней и нижней зон) из нижней зоны удаляют от $^1/_3$ до $^2/_3$ общего объема воздуха, отводимого через вытяжной шкаф, в зависимости от характера выделяющихся вредных веществ.

Предварительный расход воздуха L, м³/ч, удаляемого из шкафа в отсутствие в нем тепловыделений, определяют, исходя из скорости воздуха в его рабочем проеме. Скорости всасывания могут колебаться от 0,3—0,5 до 1,5—2,5 м/с. Для предотвращения возможного выноса вредных веществ из укрытия рекомендуется отверстия в нем оформлять в виде патрубков обтекаемой формы длиной не менее 100 мм. Закругленные кромки исключают вихреобразование и добавочную турбулизацию потоков воздуха, входящего в укрытие.

В лабораторных химических шкафах предусматривают, как правило, комбинированное удаление воздуха. Расход воздуха из таких шкафов определяют с учетом полностью открытого рабочего проема. В том случае, когда размер рабочего проема установить невозможно, расход отсасываемого воздуха принимают, исходя из следующих данных: 1000 м³/ч на 1 м ширины рабочего проема при работе с веществами 3-го и 4-го классов опасности и 2000 м³/ч — при работе с веществами 1-го и 2-го классов опасности.

При проектировании укрытий для пылящего оборудования, окрасочных и дробеметных камер и других аналогичных устройств внутри укрытия или камеры создают разрежение, которое препятствует поступлению воздуха в цех из укрытия через его неплотности и открытые рабочие отверстия. Расчетная скорость всасывания воздуха в укрытие, м/с:

$$v = \sqrt{2g\Delta p/\xi\rho}, \qquad (6.60)$$

где Δp — разрежение внутри укрытия, кг/м²; g — ускорение свободного падения; ξ — коэффициент местного сопротивления отверстий и щелей; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

На рис. 6.15 представлены схемы возможных гравитационных давлений в вытяжном шкафу при наличии в нем теплового источника. Разность плотностей воздуха внутри укрытия и вне его приводит к тому, что через верхнюю часть проема загрязненный воздух выходит в помещение, а через нижнюю его часть в укрытие поступает чистый воздух из помещения. Гравитационное давление будет максимальным у верхней кромки рабочего проема. При отсосе на этом участке должно создаваться одинаковое разрежение, что позволит предотвратить проникновение вредных выделений в помещение. Таким образом, условие благоприятного улавливания формулируется в виде равенства динамических давлений разнонаправленных потоков на верхней кромке проема.

$$\rho_{\text{п.в}} v^2_{h\,\text{гр}} = \rho_{\text{г}} v^2_h, \qquad (6.61)$$

где $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{п.в}}$ — плотность газовой смеси в укрытии и наружной среды (помещения), кг/м³; $v_{h\text{гр}}$; v_h — скорости гравитационного движения и всасывания на верхней кромке проема вытяжного шкафа, м/с.

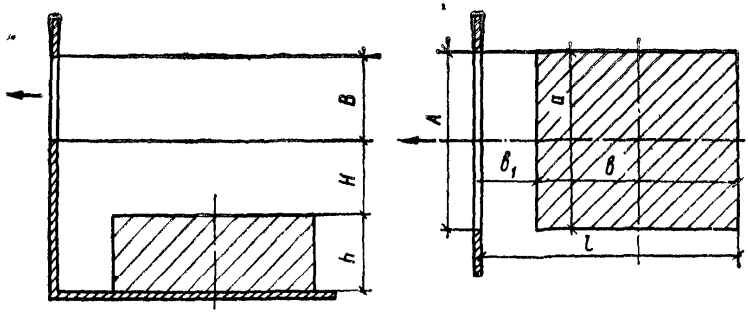


Рис. 6.16. Схема бокового отсоса

Исходя из данной предпосылки, рекомендуемый предварительный объем удаляемого воздуха через вытяжной шкаф составит, м³/с:

$$L = 0{,}034\left(1 - \frac{h}{a}\right)\sqrt[3]{F^2hQ}, \qquad (6.62)$$

где F — площадь рабочего проема, м²; h — высота рабочего проема, м; Q — теплопроизводительность источника, Вт; a — глубина рабочего проема, м.

6.2.4. Боковые отсосы

Боковые отсосы применяют в тех случаях, когда по конструктивным соображениям соосный отсос нельзя расположить достаточно близко над источником, а также когда необходимо отклонять поднимающуюся над источником струю так, чтобы вредные выделения не попадали в зону дыхания работающего (рис. 6.16).

Рекомендаций по объему удаляемого воздуха боковыми отсосами (за исключением бортовых отсосов) очень мало, особенно для холодных технологических процессов, что объясняется большой протяженностью источника газовыделений и значительным расстоянием от него до отсоса. Для приблизительного определения объема воздуха, удаляемого через отверстие отсасывающего патрубка при условии поддержания минимальной расчетной скорости в зоне выделения вредностей (согласно Американскому справочному руководству по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха), можно воспользоваться уравнением:

$$L = v_x(10x^2 + A), \qquad (6.63)$$

где L — отсасываемый объем воздуха, м³/мин; v_x — скорость воздуха на расстоянии x, м, от отверстия отсасывающего патрубка до точки, лежащей на линии, проходящей через центр раструба отсоса, м/мин; A — площадь открытого отверстия отсоса, м².

В табл. 6.4 приведены некоторые данные о количестве отсасываемого воздуха при холодных технологических процессах и вытяжных устройствах, устанавливаемых на некотором расстоянии от места образования вредностей.

Щель. Всасывающее отверстие нередко оформляют в виде щели в боковой стенке вытяжного воздуховода. Эффективность улавливания вредных веществ зависит от равномерности их всасывания по длине щели. Для

Таблица 6.4. Объем отсасываемого воздуха, $м^3/(ч \cdot м^2)$

Расстояние x, мм	Фланцевое или бесфлаицевое вытяжное устройство, устанавливаемое параллельно поверхности, с которой выделяются вредные вещества	Прямоугольное вытяжное отверстие, расположенное перпендикулярно к поверхности, с которой выделяются вредные вещества
50	42—127	42—85
100	85—170	85—127
150	170—340	127—255
200	340—680	255—510
250	510—1020	340—680
300	680—1360	510—1020
380	1020—2040	680—1360
460	1530—2550	1020—1530
530	2040—3060	1190—1700
610	2550—3740	1360—2040
760	4250—5850	2040—3060
916	5100—7650	2550—3740
1070	6800—10 200	3400—5100
1220	8500—11 900	4250—5950

Таблица 6.5. Расход воздуха L в зависимости от высоты распространения вредных веществ, ширины зеркала ванны B и вида отсоса, $м^3/ч$

Отсос	Высота распространения вредностей, мм	B, мм						
		500	600	700	800	900	1000	1100
Обычный односторонний	40	730	1000	1300	—	—	—	—
	80	530	800	1000	—	—	—	—
	160	400	600	800	—	—	—	—
Обычный двухсторонний	40	375	450	525	600	675	750	825
	80	285	350	400	455	520	575	680
	160	220	260	300	350	380	430	480
Опрокинутый односторонний	40	680	900	1100	—	—	—	—
	80	500	700	900	—	—	—	—
	160	400	530	690	—	—	—	—
Опрокинутый двухсторонний	40	400	490	575	670	750	900	940
	80	300	375	455	540	600	680	750
	160	240	300	350	410	470	520	580

каналов постоянного поперечного сечения с щелью постоянной высоты достаточно равномерные скорости всасывания достигаются при

$$\overline{f} = f/F \approx 0{,}3, \tag{6.64}$$

где f — площадь щели, м²; F — площадь канала, м².

Зависимость степени неравномерности всасывания ε от значения ξf для канала постоянного сечения сравнительно небольшой длины $\lambda l \leqslant 0{,}2$ представлена на рис. 6.17 (ξ — коэффициент местного сопротивления щели, равный примерно 0,7; λ — коэффициеит кинематической вязкости воздуха; l — длина щели, м).

Равномерное всасывание по длине щели может быть достигнуто при соответствующем изменении высоты щели. При определении переменной вы-

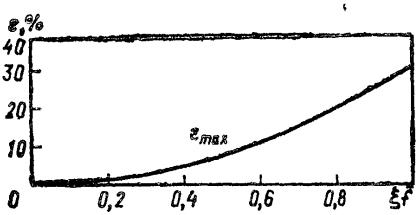


Рис. 6.17. Степень неравномерности всасывания воздушного потока для канала постоянного сечения

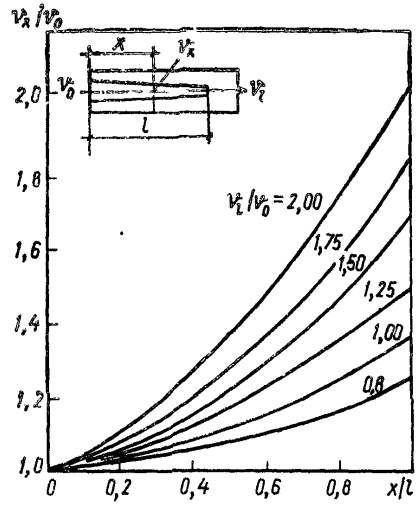


Рис. 6.18. Определение переменной высоты всасывающей щели

соты всасывающей щели рекомендуется пользоваться данными, представленными на рис. 6.18.

На графике показана зависимость:

$$\frac{v_x}{v_0} = \varphi\left(\frac{x}{l};\ \frac{v_l}{v_0}\right), \tag{6.65}$$

где v_x — скорость в щели на расстоянии x, м/с; v_0 — скорость в щели при $x=0$, м/с; l — длина щели, м; v_l — скорость в канале, м/с.

Ширина щели на расстоянии b_x определяется из условия постоянства расхода по длине щели: $v_x b_x = \text{const}$. Следует помнить, что с удалением вытяжной щели от источника вредных веществ возрастает расход отсасываемого воздуха. Расстояние между плоскостью всасывания и источником при вынужденном движении воздушного потока рекомендуется принимать менее ширины источника вытянутой формы или ширины компактного источника: $b_1 \leqslant b$. Длину воздухоприемного отверстия рекомендуется принимать равной длине источника или больше ее: $A \geqslant a$. Высоту воздухоприемного отверстия следует принимать: $B \geqslant 0{,}125l$.

6.2.5. Бортовые отсосы

Бортовые отсосы широко применяют в гальванических и травильных цехах. Различают отсосы обычные и опрокинутые (рис. 6.19). Бортовые отсосы располагают с одной стороны ванн (однобортовые) или с двух ее сторон (двухбортовые отсосы). При организации бортовых отсосов следует учитывать следующие рекомендации:

предельная ширина ванны для однобортовых отсосов должна быть не более 0,7 м;

двухбортовые отсосы целесообразно применять для ванн, если загружаемые крупные детали могут нарушать работу однобортового отсоса;

ванны с особенно вредными выделениями следует снабжать двухбортовыми отсосами, которые в большей степени, чем однобортовые отсосы, препятствуют распространению в помещении вредных веществ;

не рекомендуется устраивать бортовые отсосы у ванн, из которых происходит значительное испарение вредных веществ, вызванное большой под-

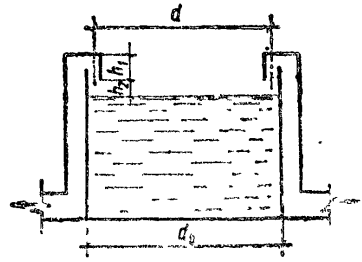


Рис. 6.19. Схема опрокинутого бортового отсоса

вижностью воздуха над поверхностью испарения; в таких случаях нельзя устраивать бортовые отсосы со сдувом, при которых подвижность воздуха над ванной особенно возрастает,

не рекомендуется устраивать бортовые отсосы со сдувом около ванны с особенно вредными выделениями, например около хромировочных ванн. Такие ванны следует снабжать бортовыми отсосами без сдува или устраивать над ними укрытия в виде крышек или кожухов. Целесообразно применение плавающих на поверхности ванн покрытий в виде различного рода легких шариков (полиэтилена и др.);

отсос со сдувом не рекомендуется устраивать и тогда, когда возможно повреждение факела сдува загружаемыми в ванну деталями;

чтобы не нарушить работу бортовых отсосов (вследствие подвижности воздуха в помещении), ванны с отсосами рекомендуется устанавливать в таких местах, где нет сквозняков и интенсивных конвективных токов.

Количество воздуха, удаляемого через бортовой отсос L, м³/ч, зависит от его вида и размеров, токсичности и интенсивности вредных выделяющихся веществ, температуры раствора и от других факторов. По методике, предложенной М. М. Барановым, количество воздуха, удаляемого от гальванических ванн, определяется по формуле:

$$L = a\sqrt[3]{\Delta t}\, l k_H k_v, \qquad (6.66)$$

где a — расход воздуха, отнесенный к 1 м длины ванны, зависящий от токсичности вредных выделений и определяемый высотой распространения вредных выделений, шириной зеркала ванны B и видом отсоса (табл. 6.5); $\Delta t = t_р - t_{р.з}$ — избыточная температура раствора в ванне, принимается не ниже 10 °С; $t_р$ — температура раствора, °С; $t_{р.з}$ — температура воздуха рабочей зоны, °С; l — длина ванны, м; k_H — поправочный коэффициент на глубину уровня раствора в ванне H; k_v — поправочный коэффициент, учитывающий скорость движения воздуха в помещении.

Для обычного однобортового отсоса $k_H = 1{,}12 - 0{,}0015H$;

для обычного двухбортового отсоса при $H = 80$ мм $k_H = 1$ и при $H > 80$ мм

$$k_H = 0{,}015\left(\frac{B}{H}\right)^2 - 0{,}305\,\frac{B}{H} + 2{,}6;$$

для опрокинутых отсосов $k_H = 1{,}2 - 0{,}0025H$.

Для гальванических и травильных цехов, относящихся к помещениям с незначительными теплоизбытками и категорией работ средней тяжести, скорость движения воздуха в рабочей зоне может быть принята равной 0,4—0,5 м/с. Тогда значение коэффициента k_v определяют по следующим зависимостям:

для однобортового обычного и опрокинутого отсосов

$$k_v = h^{0{,}07}(1 - h^{0{,}2}\Delta t \cdot 10^{-3}); \qquad (6.67)$$

для обычного двухбортового отсоса

$$k_v = \frac{\Delta t h^{0{,}2}(1 - h^{0{,}35}\Delta t \cdot 10^{-3})}{\Delta t - 10\ln(80/H)};$$

для опрокинутого двухбортового отсоса

$$k_v = h^{0{,}1}(1 - h^{0{,}25}\Delta t \cdot 10^{-3}).$$

Таблица 6.6. Количество удаляемого воздуха для нормализованных ванн, м³/ч

Размер ванн в плане, мм	Без передувки, двухбортовый отсос	С передувкой		Расход воздуха на передувку, м³/ч
		двухбортовый отсос	однобортовый отсос	
500×1100	420	—	335	30
500×1500	580	—	455	45
600×1100	540	—	470	40
600×1500	740	—	640	50
600×2200	1100	—	940	75
700×1100	660	—	615	45
700×1500	910	—	840	60
700×2200	1350	—	1230	90
1000×1500	1450	1090	1540	90
1000×2200	2180	1600	2260	130
1200×1100	1320	1080	1530	80
1200×1500	1860	1475	2090	105
1200×2200	2760	2155	3060	155

Таблица 6.7. Коэффициент $k_{\Delta t}$, учитывающий разность температур раствора и воздуха в помещении

Разность температур раствора и воздуха, °С	Без передувки	С передувкой	Разность температур раствора и воздуха, °С	Без передувки	С передувкой
	1,00	1,00	50	1,79	1,15
10	1,16	1,03	60	1,94	1,18
20	1,31	1,06	70	2,10	1,21
30	1,47	1,09	80	2,26	1,24
40	1,63	1,12			

Таблица 6.8. Коэффициент k_v, учитывающий подвижность воздуха в помещении

Разность температур, °С	$v_п$ = 0,2 м/с и h, м			$v_п$ = 0,4 м/с и h, м			$v_п$ = 0,6 м/с и h, м		
	0,08	0,12	0,2	0,08	0,12	0,2	0,08	0,12	0,2
10	1,8	1,95	2,15	2,25	2,40	2,6	2,65	2,7	2,85
20	1,6	1,7	1,8	1,95	2,05	2,2	2,2	2,25	2,4
30	1,45	1,55	1,65	1,7	1,8	1,9	1,95	2,0	2,1
40	1,35	1,4	1,45	1,55	1,6	1,7	1,75	1,8	1,9
50	1,28	1,33	1,40	1,47	1,52	1,6	1,65	1,7	1,8
100	1,2	1,25	1,30	1,38	1,42	1,48	1,53	1,57	1,64

Токсичность вредных выделений определяется высотой их распространения h и принимается равной:

40 мм — для очень токсичных вредных выделений (травление в азотной и плавиковой кислотах, свинцевание и осветление в холодных растворах, хромирование при $t_р$=45—60 °С, оксидирование черных металлов при $t_р$= =130—155 °С, снятие металлических покрытий в азотной кислоте при $t_р$= =30 °С);

80 мм — для вредных выделений (холодные процессы декапирования меди в цианиде калия и стали в хромпике, цианистое травление цветных металлов, полирование и снятие металлических покрытий соляной и серной кислотами, цианистое кадмирование, травление стали серной и соляной кислотами при $t_р$=30—40 °С, лужение при $t_р$=60—70 °С, цианистое латунирование при $t_р$=30—40 °С, железнение при $t_р$=100 °С);

160 мм — для всех остальных технологических процессов гальванических и травильных цехов.

Для нормализованных ванн, оборудованных усовершенствованными опрокинутыми бортовыми отсосами конструкции института Проектпромвентиляция, расход воздуха L определяют по формуле, м³/ч:

$$L = L_0 k_{\Delta t} k_т k_1 k_2 k_3 k_4, \qquad (6.68)$$

где L_0 — количество удаляемого воздуха, м³/ч, при поправочных коэффициентах $k_{\Delta t}$; k_1—k_4, равных единице, глубине раствора в ванне 0,15 м; принимается по табл. 6.6; $k_{\Delta t}$ — коэффициент, учитывающий температуру раствора (табл. 6.7); $k_т$; k_1—k_4 — коэффициенты, учитывающие соответственно токсичность вредных выделений, конструкцию отсоса, укрытие поверхности испарения плавающими телами и пеной, наличие воздушного перемешивания в ванне.

Для отсосов с передувкой $k_т = k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$.

Для отсосов без передувки значения $k_т$ приведены ниже:

Технологический процесс гальванопокрытий	Значение $k_т$
Промывка в горячей воде, выделение аммиака, паров клея	0,5
Меднение в этилендиаминовом электролите, обработка металлов (кроме алюминия и магния) в растворах щелочи, химическая обработка стали в растворах хромовой кислоты (пассивация, травление и др.)	1,0
Анодирование алюминия и магниевых сплавов в растворах, содержащих хромовую кислоту, оксидирование стали, химическая полировка алюминия, травление алюминия, магния и их сплавов в растворах щелочей при температуре ниже 100 °С, обработка металлов в холодных концентрированных и нагретых разбавленных растворах, содержащих соляную, ортофосфорную и азотную кислоты	1,25
Электрохимическая обработка металлов в растворах хромовой кислоты (концентрация 30—60 мг/л), щелочи, серной кислоты (концентрация 150—350 мг/л), в холодных концентрированных растворах ортофосфорной кислоты	1,6
Электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих хромовую кислоту (концентрация 150—300 мг/л при силе тока $I \geqslant 1000$ А), кадмирование, серебрение, золочение и электродекапирование в цианистых растворах при плотности тока 1—3 А/дм²	2,0
Химическая обработка металлов в растворах фтористоводородной кислоты, в концентрированных холодных и разбавленных нагретых растворах серной кислоты, в концентрированных нагретых растворах ортофосфорной кислоты	1,6
Цинкование, меднение, латунирование, декапирование, амальгамирование в цианистых растворах, никелирование в растворах при плотности тока 1—3 А/дм²	1,6

Количество воздуха для передувки $L_п$, м³/ч, следует определять по формуле:

$$L_п = L'_п k_{\Delta t}, \qquad (6.69)$$

где $L'_п$ — расход воздуха на передувку, м³/ч, для нормализованных ванн при $k_{\Delta t}$=1,

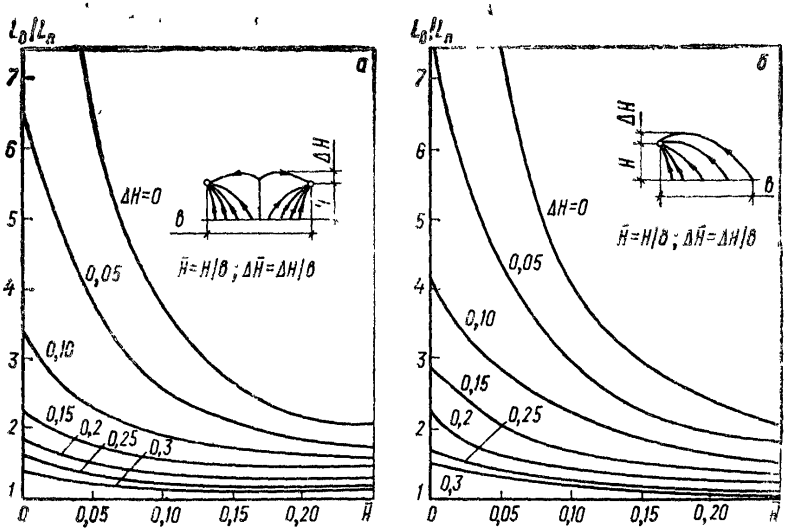


Рис. 6.20. График определения отношений расходов $L_0/L_п$ для двухбортового (*а*) и однобортового (*б*) отсосов

Кольцевые опрокинутые отсосы (см. рис 6.19). Эти отсосы более эффективны, чем обычные кольцевые отсосы. Количество отсасываемого от таких отсосов воздуха L следует рассчитывать по формуле, м³/ч:

$$L = 103d^{2,84}h_1^{0,086}h_2^{-0,033}(t_п - t_в)^{0,442}k_v, \qquad (6.70)$$

где d — диаметр, измеренный по осям всасывающей панели, м; h_1 и h_2 — расстояния соответственно от плоскости щели до уровня жидкости в ванне и от плоскости щели до верха ванны, м; $t_п$ и $t_в$ — температура соответственно поверхности жидкости и воздуха помещения, °С; k_v — поправочный множитель на подвижность воздуха в помещении (табл. 6.8).

Для холодных растворов, когда температура их поверхности близка к температуре окружающего воздуха, разность температур следует принимать в зависимости от диаметра ванны d_0 (в м):

$$t_п - t_в = 8,95/d_0. \qquad (6.71)$$

При определении объема удаляемого воздуха от бортового отсоса графическим методом должны быть известны следующие данные: длина ванны a, ширина b, расстояние от уровня жидкости до оси щели H и высота распространения всасывания — ΔH.

Рекомендуемые высоты всасывания для различных вредных веществ приведены в табл. 6.9.

Ниже приведен расчет бортового отсоса.

Определяют относительное расстояние от уровня жидкости до оси щели:

$$\bar{H} = H/b; \qquad (6.72)$$

относительную высоту распространения всасывания:

$$\Delta\bar{H} = \Delta H/h. \qquad (6.73)$$

Отношение расходов $L_0/L_п$ (L_0 — расход отсасываемого воздуха, $L_п$ — расход восходящего над ванной потока) находят по рис. 6.20.

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К):

$$\alpha = 2{,}05(t_ж - t_в)^{1/3}, \quad (6.74)$$

где $t_ж$, $t_в$ — температура жидкости ванны и воздуха помещения. Количество конвективного тепла, выделяющегося от зеркала ванны длиной 1 м, кВт:

$$Q_0 = \alpha b(t_ж - t_в)/1000. \quad (6.75)$$

Среднюю скорость подъема паровоздушной смеси определяют, исходя из предположения, что вблизи зеркала ванны она равна нулю, тогда, м/с

$$v = 0{,}155Q_0^{1/3}. \quad (6.76)$$

Расход восходящего над ванной потока, м³/ч:

$$L_п = 3600abv, \quad (6.77)$$

где a и b — размеры сторон прямоугольной ванны, м. Расход отсасываемого воздуха, м³/ч:

$$L_0 = \frac{L_0}{L_п} L_п. \quad (6.78)$$

Следует отметить, что расход воздуха, определяемый по данному методу, несколько занижен по сравнению с рекомендуемым для нормализованных ванн.

Пример 6.9. Определить расход воздуха, отсасываемого однобортовым отсосом от ванны травления длиной $a=1{,}0$ м и шириной $b=0{,}6$ м.

Исходные данные. Расстояние от уровня жидкости до оси щели $H=0{,}08$ м. Температура жидкости $t_ж=56$ °С, температура воздуха в помещении $t_в=26$ °С.

Решение. Относительное расстояние от уровня жидкости до оси щели:

$$\overline{H} = 0{,}08/0{,}6 = 0{,}134.$$

Высоту распространения всасывания берем по табл. 6.9: $H=80$ мм. Относительная высота спектра всасывания:

$$\Delta\overline{H} = 0{,}08/0{,}6 = 0{,}134.$$

Отношение расходов (см. рис. 6.20):

$$L_0/L_п = 1{,}72.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 2{,}05(56 - 26)^{1/3} = 6{,}25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Количество конвективного тепла, выделяющегося от зеркала ванны длиной 1 м:

$$Q_0 = \frac{6{,}25\cdot 0{,}6\,(56 - 26)}{1000} = 0{,}113 \text{ кВт}.$$

Средняя скорость подъема паровоздушной смеси:

$$v = 0{,}155\cdot 0{,}113^{1/3} = 0{,}075 \text{ м/с}.$$

Расход восходящего над ванной потока:

$$L_п = 3600\cdot 1{,}0\cdot 0{,}6\cdot 0{,}075 = 158 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход отсасываемого воздуха:

$$L_0 = 1{,}72\cdot 158 = 272 \text{ м}^3/\text{ч} \approx 270 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 6.9. Рекомендуемая высота всасывания вредных веществ для ванн некоторых процессов

Процесс	Обрабатываемый материал	Температура раствора, °С	Химикаты	Вредные выделения	Высота всасывания над верхом бортового отсоса, H, мм
Травление	Сталь	15—60	Серная кислота	Аэрозоль (туман) серной кислоты	80
	»	30—40	Соляная кислота	Водород хлористый	80
	»	15—20	Азотная кислота	Пары азотной кислоты	40
	Медь	15—20	Плавиковая кислота	Фтористый водород	40
	Кадмий	15—20	Цианистый калий	Цианистый водород	80
Декапирование	Медь и сплавы	15—20	Цианистый калий или натрий	То же	80
	Сталь	15—20	Хромпик	Аэрозоль (туман) серной кислоты	80
Матирование	Медь	15—20	Азотная, серная кислоты	Пары азотной кислоты и оксиды азота	40
	Алюминий	15—20	Хлорид натрия	Аэрозоль (туман) едкой щелочи	160
Цинкование	Черные металлы	18—20	Цианистый натрий	Цианистый водород	160
Меднение	Сталь	18—25	Цианистый калий	То же	80
Лужение	Медь	60—70	Едкий натр	Пары щелочи	80
Кадмирование	Черные металлы	15—20	Электролит	Цианистый водород	80
Обезжиривание	То же	60—80	Фосфористый натрий	Пары воды и щелочи	160
Свинцевание	»	15—20	Карбонат свинца, плавиковая кислота	Фтористый водород	40

Латунирование	»	30—40	Свободный цианид	Цианистый водород	80
Хромирование	Черные и цветные металлы	45—60	Оксиды хрома, серная кислота	Оксиды хрома	40
Серебрение	Цветные металлы	15—20	Цианистый калий	Цианистый водород	80
Золочение	То же	15—20	То же	То же	80
Оксидирование	Черные металлы	130—155	Едкий натр, азотная кислота	Пары едкой щелочи	40
	Латунь	18—25	Аммиак	Аммиак	160
Осветление	Цветные металлы	15—20	Оксиды хрома, азотная кислота	Оксиды азота	40
Железнение	Сталь	100	Серная кислота	Пары серной кислоты	80
Полирование	Медь	—	Фосфорная кислота	Фосфорная кислота	80
Снятие металлических покрытий	Разный	18—20	Соляная и серная кислоты	Оксиды хрома	80
		30	Азотная кислота	Пары азотной кислоты	40
Фосфатирование	Черные металлы	96—99	Мажер	Фосфорная кислота	160

Таблица 6.10. Расход воздуха, отсасываемого панелью Чернобережского

Ширина панели A, мм	Площадь живого сечения, м^2	Значение L, м^3/ч, при скорости движения воздуха в живом сечении, м/с						
		2	2,5	3	3,5	4	5	6
600	0,086	620	775	930	1080	1240	1550	1860
750	0,110	790	990	1185	1380	1580	1980	2370
900	0,130	935	1170	1400	1640	1870	2340	2810

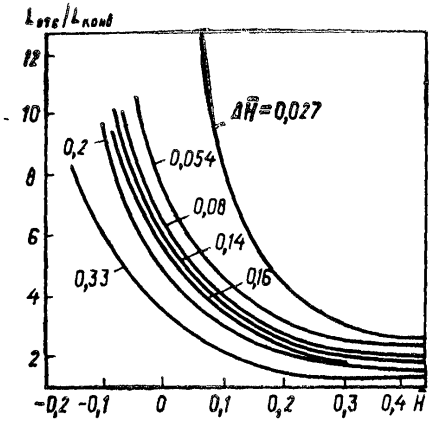


Рис 6.21 Расчетный график для определения относительного объема отсасываемого воздуха $L_{отс}/L_{конв}$ кольцевым отсосом

Взаимодействие кольцевого отсоса и конвективного потока над нагретой поверхностью. Характер этого взаимодействия над нагретой поверхностью определяется соотношением количества отсасываемого воздуха $L_{отс}$ и поднимающегося над нагретой поверхностью $L_{конв}$. Кроме того, оказывают влияние на него геометрические параметры кольцевого отсоса При небольшом количестве отсасываемого воздуха $L_{отс}/L_{конв}<(4-6)$ наблюдается вихревое движение над нагретой поверхностью. При большем количестве отсасываемого воздуха $L_{отс}/L_{конв}>(4—6)$ по всасывающей щели вихреобразование не наблюдается.

Расчет кольцевого отсоса сводится к определению количества отсасываемого воздуха, необходимого для предотвращения прорыва вредных веществ в помещение. Для этой цели используется расчетный график (рис. 6.21), на котором дана зависимость относительного объема отсасываемого воздуха $L_{отс}/L_{конв}$ от относительной высоты подъема конвективного потока (спектра вредностей) и определяющего геометрического параметра кольцевого отсоса $\bar{H}$. Геометрический параметр $\bar{H}$ для кольцевого отсоса находят по формулам.

$$\bar{H}=\frac{h_H+b/2}{d}; \tag{6.79}$$

$$\bar{H}=\frac{2h_в+(h_в+b)/2}{d}. \tag{6.80}$$

Величины h_H, $h_в$ и b принимают по конструктивным и технологическим соображениям. Рекомендуется принимать $h_H/d>0{,}054$. Чтобы избежать возможного охлаждения поверхности источника вредностей подтекающим воздухом, следует принимать $h_H\geqslant 2b$ Относительную ширину щели $\bar{b}=b/d$ рекомендуется принимать в пределах 0,04—0,16. По условиям технологического процесса заглубление верхней кромки щели $h_в$ следует принимать как можно больше Допустимая высота относительного распространения вредных веществ над верхней кромкой кольцевой щели $\Delta\bar{H}=H/d$ определяется, исходя из токсичности содержащихся в потоке нагретого воздуха (конвективном потоке) вредных веществ По значениям $\bar{H}$ и $\Delta\bar{H}$, пользуясь рис. 6.21, определяют относительный расход отсасываемого воздуха $L_{отс}/L_{конв}$. Количество воздуха в конвективном потоке, поднимающемся над горизонтальной нагретой поверхностью на относительную высоту $b/d\leqslant 1{,}5$, определяют по эмпирической формуле, м³/ч:

$$L_{конв}=2200\sqrt[3]{QF^2l}; \tag{6.81}$$

где Q — конвективный поток;

$$Q=\frac{\alpha l N_{конв}}{3600}, \tag{6.82}$$

$\alpha = 3{,}25\sqrt[4]{\Delta t_{пов}}$ — коэффициент теплоотдачи Вт/(м²·ч·К); $\Delta t_{пов}$ — избыточная температура поверхности источника вредных веществ, К; l — высота расположения рассматриваемого сечения над нагретой поверхностью;

$$l = h_н + b + h_в + \Delta H. \qquad (6.83)$$

Зная $L_{отс}/L_{конв}$ и $L_{конв}$, определяют $L_{отс}$. Аэродинамическое сопротивление кольцевых отсосов складывается из потерь давления на входе воздуха в кольцевую щель отсоса и потерь давления при входе воздуха из кожуха в воздуховод. Коэффициент местного сопротивления входа $\xi_{вх}$ в щель или кольцевой канал в зависимости от $f_щ/f_{возд}$ приведен ниже:

$f_щ/f_{возд}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\xi_{вх}$	1,5	2,7	3,7	4,2	4,6	4,8	4,9	5

Значения $\xi_{вх}$ относятся к средней скорости в кольцевой щели. Коэффициент местного сопротивления входа в воздуховод из кожуха $\xi_{возд}$ определяют из зависимости:

$f_щ/f_{возд}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5
$\xi_{возд}$	14	8	6	5	3,5	2,5	2	1,8	1,7

Значение $\xi_{возд}$ относится к средней скорости на входе в воздуховод. В случае кольцевого отсоса (см рис. 6.7) при $f_щ/f_{возд} = 0{,}1 - 1{,}5$ величину $\xi_{возд}$ можно принять постоянной и равной 0,6.

Пример 6.10. Определить количество удаляемого воздуха отсосом с кольцевой щелью от ванны диаметром $d = 1{,}5$ м.

Исходные данные. Температура раствора $t_{пов} = 95$ °С. Температура воздуха в помещении $t_н = 16$ °С. Щель расположена у верхней кромки отсоса. Высота распространения вредных веществ $\Delta H = 160$ мм.

Решение. Считаем высоту щели постоянной по периметру $b = 0{,}06$ м. Уровень раствора от нижней кромки щели $h_н = 0{,}2$ м. Избыточная температура поверхности источника вредных веществ, °С:

$$\Delta t_{пов} = 95 - 16 = 79\ °С.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = 3{,}25\sqrt[4]{79} = 9{,}7\ \text{Вт/(м}^2\cdot\text{ч}\cdot°\text{С)}$$

Площадь источника вредных выделений:

$$F = 0{,}785d^2 = 0{,}785\cdot 1{,}5^2 = 1{,}75\ \text{м}^2.$$

Высота расположения рассматриваемого сечения:

$$h = \Delta H + b + h_н = 0{,}16 + 0{,}06 + 0{,}2 = 0{,}42\ \text{м}.$$

Величина конвективного теплового потока:

$$q = \alpha F \Delta t/3600 = 9{,}70\cdot 1{,}75\cdot 79/3600 = 1332\ \text{Вт}.$$

Объем отсасываемого воздуха $L_{конв} = 2200\sqrt[3]{1332 : 3600\cdot 1{,}75^2\cdot 0{,}42} = 1730$ м³/ч. Геометрический параметр кольцевого отсоса:

$$\Delta\bar{H} = \frac{0{,}2 + 0{,}06\,1/2}{1{,}5} = 0{,}153.$$

Отношение $h_н/d = 0{,}16/1{,}5 = 0{,}107$. Для $\Delta\bar{H} = 0{,}153$ и $h_н/d = 0{,}107$ по рис. 6.21 находим $L_{отс}/L_{конв} = 3{,}5$. Расход отсасываемого воздуха через бортовой отсос:

$$L_{отс} = 3{,}5\cdot 1730 = 6070\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

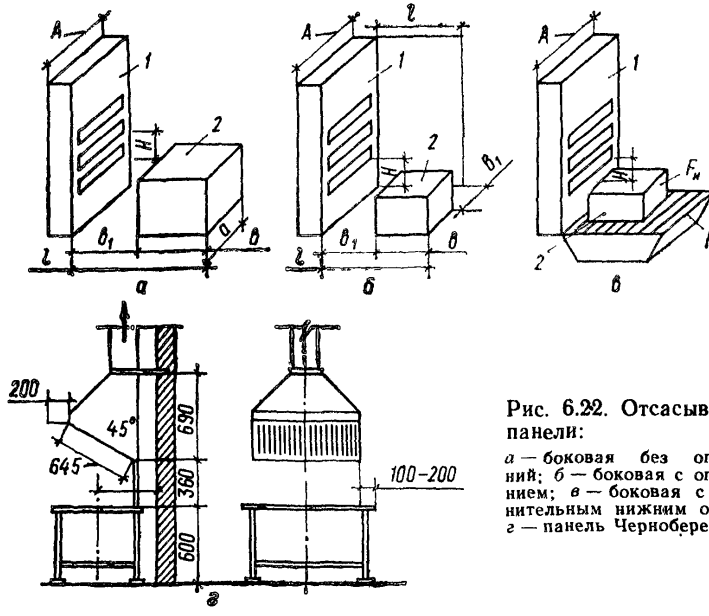


Рис. 6.22. Отсасывающие панели:

а — боковая без ограждений; *б* — боковая с ограждением; *в* — боковая с дополнительным нижним отсосом; *г* — панель Чернобережского

6.2.6. Отсасывающие панели

Отсасывающие панели в основном применяют для тепловых источников и при сварочных работах на стационарных постах, когда более полное укрытие источника вредных выделений невозможно или нецелесообразно. Отсасывающие панели (рис. 6.22) размещают максимально вплотную к тепловому источнику. Нижнюю кромку всасывающих отверстий следует располагать на уровне верха источника тепла, а ширину панели A принимать равной $1{,}2a$. Расход воздуха L для боковых панелей, показанных на рис. 6.22, *а* и *б*, равен в соответствии со справочником проектировщика, м²/ч:

$$L = CQ_к^{1/3}(H + B)^{5/3}, \qquad (6.84)$$

где C — коэффициент, зависящий от конструкции панели и ее расположения относительно источника тепла; $Q_к$ — конвективная составляющая источника тепла, Вт; H — расстояние от верха плоскости источника до центра всасывающих отверстий панели, м; B — ширина источника, м.

Коэффициент C для панелей на рис. 6.22, *а*, *б* и *в*:

$$C = 228\left[\frac{l}{H + B}\right]^{2/3}; \qquad (6.85)$$

$$C = 228m\left[\frac{l}{H + B}\right]^{1/2}; \qquad (6.86)$$

$$C = \frac{1170F_и}{F_р}\left(\frac{F_и}{F_р} - 1\right) + 650, \qquad (6.87)$$

где l — максимальное удаление источника от панели, м; $F_и$, $F_р$ — площади соответственно источника и решетки, м²; m — коэффициент, зависящий от относительного расстояния между источником и экраном (см. рис. 6.22).

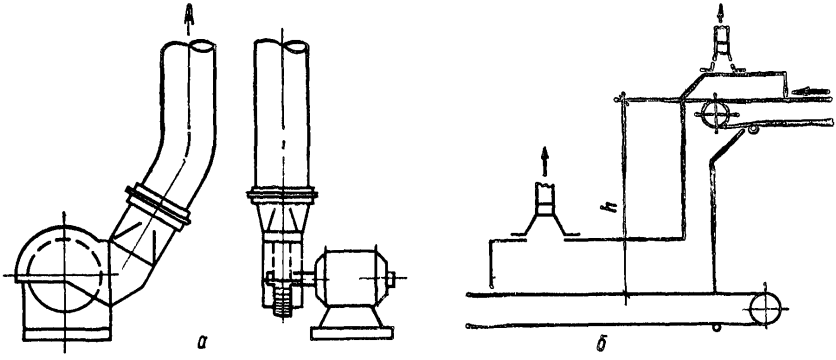


Рис. 6.23. Схема установки кожуха около заточного станка (*а*) и ленточного транспортера (*б*)

b_1/b	0	0,3	1	>1
m	1	1,5	1,8	2

При сварочных работах и обезжиривании крупных деталей применяют панели равномерного всасывания (рис. 6.22, *г*). Расход воздуха, отсасываемого такой панелью, определяется ее шириной и скоростью воздуха в живом сечении (табл. 6.10).

В отсутствие необходимых данных расход воздуха, удаляемого от панелей, следует принимать равным 3200 м³/ч на 1 м² панели при ее расположении вблизи стены и 5000—7000 м³/ч на 1 м² панели — при расположении вдали от стены.

Кожухи, укрытия и встроенные отсосы (рис. 6.23). Производительность местных отсосов $L_{кр}$, м³/ч, от укрытия обдирочного, полировального и заточного оборудования определяют по формуле:

$$L_{кр} = ad, \tag{6.88}$$

где d — диаметр круга, мм; a — удельная величина отсоса воздуха, м³/ч на 1 мм круга:

Круг	a, м³/(ч·мм)
Корундовый:	
стационарный	2
качающийся	3
Войлочный	4
Матерчатый	6

Расход воздуха от очистного галтовочного барабана находят по формуле, м³/ч:

$$L_б = 1800 d_б^2, \tag{6.89}$$

где $d_б$ — диаметр барабана, м.

Расход удаляемого воздуха от встроенного местного отсоса при полуавтоматической сварке в среде защитных газов или под слоем флюса составляет, м³/ч:

$$L = k\sqrt[3]{I}, \tag{6.90}$$

где k — опытный коэффициент, принимаемый для щелевых отсосов равным 12, для воронкообразных — 16; I — сила тока, А.

Одной из часто встречающихся задач вентиляционной техники по устройству рационального укрытия является устройство кожуха (течки) над

местом падения материала. Для обеспечения локализующего эффекта от такого кожуха должен быть сделан отсос воздуха, количество которого определяют по формуле, м³/с:

$$L = \frac{F\sqrt{19{,}6h(1 - f\operatorname{ctg}\alpha) + v_0^2}}{3}, \qquad (6.91)$$

где F — площадь отверстия течки, м; h — высота падения материала, м; α — угол падения материала, град; v_0 — скорость движения материала, поступающего в течку, м/с; f — коэффициент трения материала о стенки течки.

Ниже приведены значения коэффициента трения при скольжении по стали некоторых материалов:

Гипс	0,43	Песок	0,63
Глина	0,7	Руда	0,7
Глинозем порошкообразный	0,48	Спек дробильный	0,6
Земля формовочная и торф	0,58	Уголь каменный	0,57
Известняк	0,78	Фторид алюминия	0,58
Кокс	0,5	Цемент и щебень	0,55
Криолит, нефелиновый концентрат кальцинированный	0,63	Шлак	0,8

Если высота падения не превышает 1 м, то для определения количества воздуха, отсасываемого от укрытия, можно воспользоваться формулой:

$$L = Fv_0, \qquad (6.92)$$

принимая v_0 равным 1,5—2,0 м/с. Объем вытяжки от ленточных транспортеров при скорости воздуха в трубе 17,8 м/с приведен ниже:

Объем вытяжки, м³/ч	800	1130	1540	2000
Ширина ленты, мм	До 450	450—500	600—900	>900
Диаметр отсасывающего патрубка, мм	125	150	175	200

Эти опытные данные близко совпадают с вычисленными по формуле (6.91), если принять высоту падения 1 м, начальную скорость материала $v_0 = 1$ м/с, размер течки $0{,}5 \times 0{,}5$ м² и коэффициент заполнения ее материалом 0,4. Если высота падения материала с транспортера превышает 1,0 м/с, то количество отсасываемого воздуха следует определять по формуле (6.91). Для борьбы с пылением при загрузке материала в бункер в последнем необходимо обеспечить соответствующее разрежение. Этого можно достигнуть, отсасывая из бункера некоторое количество воздуха, определяемое по формуле, принимая $v_0 = 1{,}5$—2,0 м/с. Чтобы обеспечить требуемый локализующий эффект для элеваторов, транспортирующих холодный материал, отсос от кожуха элеватора следует предусматривать внизу у башмака. Для элеваторов, транспортирующих горячий материал, отсос воздуха следует предусматривать вверху, что обусловлено перераспределением давлений, гравитационным напором, значительной высотой элеватора и разностью температур воздуха в кожухе элеватора и в помещении. Для определения количества воздуха, которое следует отсасывать от верха элеватора, транспортирующего горячий материал, можно воспользоваться формулой:

$$L = \frac{h\sqrt{h\Delta t + 25}}{60}, \qquad (6.93)$$

где L — количество воздуха, отсасываемого из верхней части элеватора, транспортирующего горячий материал, м³/с; h — высота элеватора, м; Δt — разность температур воздуха в элеваторе и вне его. Приводимые выше соображения не исключают необходимости при транспортировании горячих материалов устраивать отсос и в нижней части элеваторов, где вследствие

падения материала, несмотря на большой гравитационный напор, результирующее давление может оказаться больше атмосферного.

Многочисленные наблюдения подтвердили целесообразность устройства как верхнего, так и нижнего отсоса для элеваторов, транспортирующих горячий материал. В этом случае количество отсасываемого воздуха следует разделить поровну между двумя отсосами.

6.2.7. Нижние отсосы

Нижние отсосы следует применять в тех случаях, когда использование других более экономичных местных отсосов (верхних, боковых) невозможно по гигиеническим, конструктивным, технологическим или эстетическим требованиям, а также при выделении вредных веществ, плотность которых превышает плотность окружающего воздуха.

Нижний отсос от круглого в плане источника рекомендуется выполнять в виде кольцевой щели, расположенной симметрично с источником. Нижний отсос от прямоугольных источников рекомендуется также выполнять в виде щели по периметру или в виде двух всасывающих щелей, расположенных симметрично вдоль длинной стороны источника вредных выделений, а длина щелей принимается равной длине источника. При устройстве нижнего отсоса около источника все сечение воздухоприемного отверстия желательно перекрывать решеткой.

Такие технологические процессы, как окраска крупногабаритных изделий, обрубка литья и сварка, предусматривают также удаление воздуха через напольные вытяжные решетки или решетки, расположенные в плоскости стола. Количество удаляемого воздуха L в этих случаях определяют по формуле, м³/ч

$$L = L'F, \tag{6.94}$$

где F — габаритная площадь стола, окрасочной камеры или напольной решетки, м²; L' — удельный расход воздуха на 1 м² площади, м³/(м²·ч); принимается по следующим данным:

Технологическая операция	L', м³/(м²·ч)
Камерная окраска пневматическим распылением лакокрасочных материалов:	
содержащих свинцовые соединения или ароматические углеводороды	2500
не содержащих свинцовых соединений или ароматических углеводородов	2200
Камерная окраска безвоздушным распылением лакокрасочных материалов:	
содержащих свинцовые соединения или ароматические углеводороды	1500
не содержащих свинцовых соединений или ароматических углеводородов	1200
Бескамерная окраска безвоздушным распылением лакокрасочных материалов:	
содержащих ароматические углеводороды	1700
не содержащих ароматических углеводородов	1350
Бескамерная гидроэлектростатическая окраска лакокрасочными материалами:	
содержащими ароматические углеводороды	1100
не содержащими ароматических углеводородов	900
Бескамерная пневмоэлектростатическая окраска	900
Пневматическая обрубка литья	2500
Контактная электросварка	1800—2000

Глава 7

МЕРОПРИЯТИЯ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

При решении задач, связанных с охраной внешней среды, приоритет отдается тому комплексу мероприятий, который обеспечивает наибольшее ограничение или полное прекращение поступления во внешнюю среду неблагоприятного фактора (химического, физического, биологического).

Основными мероприятиями по снижению загрязнения атмосферного воздуха являются: технологические, архитектурно-планировочные, организация санитарно-защитной зоны, газоочистка.

7.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Радикальной мерой борьбы с загрязнением атмосферного воздуха является создание замкнутых техиологических процессов, при которых отсутствует выброс в атмосферу хвостовых газов на конечных стадиях производственного процесса или газов, образующихся на промежуточных стадиях производства.

Перспективным является и принцип комплексного использования природного сырья по типу создания производства с «безотходной» технологией.

Однако такой прииции организации промышленного производства не может быть достигнут во всех отраслях народного хозяйства, поэтому приобретают значение меры хотя и не радикального характера, но все же обеспечивающие сохранение допустимых санитарных условий жизни и отсутствие неблагоприятных последствий для здоровья населения. Одной из таких мер являются технологические мероприятия, к которым относятся следующие: 1) создание более прогрессивных в отношении уменьшения загрязнения внешней среды технологических схем; 2) замена вредных веществ в производстве безвредными или менее вредными. В качестве примера можно привести перевод котельных с твердого топлива или мазута на газ; 3) перепрофилирование производства, например, вместо производства антибиотиков наладить производство готовых лекарственных средств; 4) ликвидация производства; 5) очистка сырья от вредных примесей. В частности, большое гигиеническое и экономическое значение имеет предварительное удаление серы из топлива; 6) замена сухих способов переработки пылящих материалов новыми. Эффективность такого мероприятия может быть показана на примере перевода сухого помола в цементной промышленности на мокрый помол, в результате которого ликвидируется выброс пыли в атмосферу на этой стадии технологического процесса. К мероприятиям этой группы следует отнести и те, которые направлены на подавление мокрым способом пыления или самовозгорания отвалов пустых пород или открытых складов пылящего сырья; 7) замена пламенного нагрева электрическим. Кроме ликвидации продуктов сгорания топлива это мероприятие позволяет уменьшить загрязнение атмосферного воздуха, что достигается поддержанием оптимальных (в отношении выделения вредных веществ) температурных режимов. В качестве примера можно привести плавку лома в алюминиевых индукционных печах вместо шахтных печей, применение электропечей в стекольной промышленности; 8) герметизация гидро- и пневмотранспорта для пылящих материалов; 9) замена периодических процессов непрерывными, позволяющими, как правило, исключить залповые выбросы загрязнений, что весьма характерно для периодических процессов (открытие люка, сброс через воздушку при передавливании или заполнении).

Перечисленные выше технологические мероприятия не охватывают всех возможных приемов рационализации технологии для снижения вредных выбросов в атмосферу.

7.2. АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Следует помнить, что планировочные мероприятия, особенно если они проводятся на стадии выбора района строительства предприятия и компоновки зданий и сооружений на генплане даже существующего предприятия, не требуют каких бы то ни было капитальных затрат, но в дальнейшем помогут сэкономить на мероприятиях по газоочистке и организации санитарно-защитной зоны.

Предприятия химической промышленности, где подавляющее большинство технологических процессов связано с применением токсических веществ, не следует размещать в районах с высоким и опасным потенциалом загрязнения. При выборе района строительства необходимо руководствоваться картой районирования территории Советского Союза по потенциалу загрязнения воздуха для низких источников выбросов, разработанной Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова. Вопросы районирования изложены также в книге В. И. Зарецкого «Градостроительство и охрана окружающей среды» (Киев, 1975 г.).

В новых промышленных узлах или районах должны быть проведены микроклиматические обследования еще до начала планировки и застройки, а также выполнен анализ возможных деформаций ветровых потоков в приземных слоях атмосферы по картам с использованием моделирования в гидролотке и аэродинамических трубах.

Необходимо избегать строительства предприятий с большими выбросами вредных веществ в местах застоя воздуха, в низинах и котлованах, а также в районах с часто повторяющимися туманами и повышенными температурными инверсиями.

Следует уделять особое внимание взаимному расположению химических заводов и жилых районов. Для каждого варианта расположения химического предприятия необходимо определять допустимый выброс вредных веществ с учетом удаленности жилых районов, рельефа и климатических условий. При окончательном выборе места строительства следует исходить из минимума затрат на строительство предприятия в данном месте и расходов на очистку выбросов.

Расположение зданий и сооружений на генеральном плане предприятия (промузла) должно способствовать сквозному проветриванию самой площадки и межцеховых пространств, чтобы исключить распространение вредных примесей в воздухе на другие более «чистые» производства. Для выполнения перечисленных выше условий в основу планировочных решений должны быть положены следующие принципы:

формирование предприятия с автономными технологическими комплексами;

построение генерального плана по блочной системе;

зонирование территории на всех этапах развития предприятия;

централизация технологических коммуникаций.

Необходимо предусматривать административную, производственную, подсобно-производственную и складскую зоны.

Здания и сооружения на генеральном плане необходимо ориентировать длинной стороной вдоль господствующих ветров, используя магистральные проезды, разрывы между кварталами и блоками в качестве аэрационных коридоров. При компоновке производств, располагаемых в нескольких зданиях и сооружениях различной высоты, рекомендуется объекты меньшей высоты размещать с наветренной стороны. В отсутствие преобладающего направления ветра более высокие здания и сооружения целесообразно размещать ближе к центру планировочного блока. Административно-хозяйственные здания, размещаемые в производственной зоне, должны быть защищены полосой древесных насаждений от вредного влияния газов, пыли, шума, инсоляции и др.

Централизация выбросов. Объединение мелких выбросов в крупные централизованные устройства имеет следующие преимущества:

лучшее и рациональное использование систем очистки и контрольно-измерительной аппаратуры;

сокращение числа вентиляционного оборудования;

снижение стоимости оборудования и узлов автоматического регулирования, что обусловлено увеличением производительности установок;

увеличение разрывов между выбросом и местом забора чистого приточного воздуха.

Воздухозабор. При выборе мест воздухозабора приточных систем следует соблюдать следующие правила:

вблизи воздухозабора не должно быть источников загрязнения воздуха (хранилищ токсичных веществ, емкостей, мест слива и розлива продуктов производства);

нельзя организовывать воздухозабор вблизи открыто установленного технологического оборудования, выделяющего вредные вещества, а также в местах, где при авариях технологического оборудования возможно их выделение, вблизи коммуникационных коридоров;

не следует забирать воздух для механической вентиляции с кровли здания, а также у зданий с крышными вентиляторами, аэрационными фонарями и вытяжными шахтами на кровле.

7.3. ОРГАНИЗАЦИЯ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ

Для предприятий, их отдельных зданий и сооружений с технологическими процессами, являющимися источниками производственных вредностей, предусмотрена санитарная классификация, учитывающая мощность предприятия, условия осуществления технологических процессов, характер и количество выделяющихся в окружающую среду вредных и неприятно пахнущих веществ, шум, вибрацию, электромагнитные волны, ультразвук и другие вредные факторы, а также предусматривающая меры по уменьшению неблагоприятного влияния перечисленных факторов на окружающую среду.

Конкретное перечисление производств химических предприятий с отнесением к соответствующему классу приведено в «Санитарных нормах проектирования промышленных предприятий» СН 245-71. Всего установлено пять классов предприятий. Имеется ряд предприятий и производств, которые не отражены в СН 245-71. Для них ориентировочный класс предприятия можно определять по параметру П, характеризующему степень его воздействия на загрязнение атмосферного воздуха. Параметр П устанавливается по инструкции о порядке рассмотрения, согласования и экспертизы воздухоохранных мероприятий и выдачи разрешений на выброс загрязняющих веществ в атмосферу по проектным решениям (ОНД1-84).

В соответствии с санитарной классификацией предприятий, производств и объектов приняты следующие размеры санитарно-защитных зон:

Класс	I	II	III	IV	V
Размер зоны, м	1000	500	300	100	50

При необходимости и соответствующем технико-экономическом и гигиеническом обосновании санитарно-защитная зона может быть увеличена, но не более чем в 3 раза. Увеличение санитарно-защитной зоны возможно, например, в следующих случаях:

при малой эффективности систем очистки выбросов в атмосферу;

в отсутствие способов очистки выбросов;

при необходимости размещения жилой застройки с подветренной стороны по отношению к предприятию, в зоне возможного загрязнения атмосферы;

в условиях неблагоприятной розы ветров и при других неблагоприятных условиях (частые штили, туманы и др.);

при строительстве новых, еще недостаточно изученных, вредных в санитарном отношении производств.

Размеры санитарно-защитной зоны l, м, установленные в разделе 8 «Санитарных норм проектирования промышленных предприятий», а также

возможные отклонения от этих размеров в проектах должны подтверждаться расчетами рассеивания в соответствии с имеющимися методиками.

Определение размера санитарно-защитной зоны сводится к комплексному расчету рассеивания вредных веществ, удаляемых всеми источниками (наземными, линейными и точечными) с учетом суммации их действия и наличия загрязнений, создаваемых соседними предприятиями и транспортом. Полученные по расчету размеры санитарно-защитной зоны должны уточняться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, в зависимости от розы ветров района расположения предприятия, по формуле:

$$l = L_0 P/P_0 \quad \text{при} \quad P > P_0, \tag{7.1}$$

где L_0 — расчетное расстояние от источников загрязнения до границы санитарно-защитной зоны *без учета поправки на розу ветров*, т. е. *расстояние* от источника до точки, в которой концентрация вредных веществ равна ПДК; P — среднегодовая повторяемость направлений ветров рассматриваемого румба, %; P_0 — повторяемость направлений ветров одного румба при круговой розе ветров (например, при восьмирумбовой розе ветров);

$$P_0 = 100/8 = 12{,}5\%.$$

По направлениям ветра, для которых $P < P_0$, можно принять $l = L_0$.

Но в любом из рассмотренных вариантов (при $P > P_0$ и $P < P_0$) размер санитарно-защитной зоны рекомендуется принимать не менее установленного по санитарной классификации. Размер санитарно-защитной зоны до границы жилой застройки устанавливается:

а) *для предприятий* с технологическими процессами, являющимися источниками загрязнения атмосферного воздуха вредными и неприятно пахнущими веществами непосредственно от источников загрязнения атмосферы сосредоточенными (через трубы, шахты) или рассредоточенными выбросами (через фонарь зданий и др.), а также от мест загрузки сырья или открытых складов;

б) для тепловых электрических станций, производственных и отопительных котельных — от дымовых труб.

Планировочная организация санитарно-защитных зон. Планировочная организация санитарно-защитных зон кроме выполнения основной задачи — защиты воздушной среды населенных пунктов от промышленных загрязнений — должна также отвечать требованиям архитектурно-композиционной увязки жилых районов города с промышленными предприятиями.

При планировке санитарно-защитных зон следует учитывать, что одним из важных факторов, обеспечивающих защиту воздушной среды населенных пунктов от промышленных загрязнений, является озеленение зон газоустойчивыми древесно-кустарниковыми насаждениями.

Зонирование территории санитарно-защитных зон с выделением участков под застройку, озеленение защитными древесно-кустарниковыми насаждениями, прокладка транспортных путей и размещение сети инженерных коммуникаций должны осуществляться с учетом различной интенсивности загрязнения производственными выбросами приземного слоя атмосферы на территории зоны. Для этой цели следует составлять комплексную графоаналитическую схему кривых приземных концентраций вредных веществ от всех основных источников выбросов предприятий.

Участки под застройку объектов, размещаемых на территории санитарно-защитных зон, следует отводить в местах, в которых по условиям закономерности распространения производственных выбросов обеспечивается наименьшая степень загрязнения приземного слоя атмосферы.

При планировке и застройке санитарно-защитных зон следует руководствоваться номенклатурой объектов и планировочных элементов, допускаемых к размещению на их территории.

При планировочной организации санитарно-защитных зон и размещении объектов и планировочных элементов следует руководствоваться принципиальными схемами зонирования территории в зависимости от ширины зон.

Защитное озеленение санитарно-защитных зон древесно-кустарниковыми насаждениями должно занимать площадь (из расчета по ширине зоны):

а) для зон шириной до 300 м — не менее 60%;

б) то же, от 300 до 1000 м — не менее 50%;

в) то же, от 1000 до 3000 м — не менее 40%.

В санитарно-защитной зоне не допускается размещение городских стадионов, садов и парков общественного пользования, а также общеобразовательных школ, лечебно-профилактических и оздоровительных учреждений общего пользования.

Использование территорий санитарно-защитных зон для сельскохозяйственного производства под полевые, огородные или садовые культуры допускается только по согласованию в каждом конкретном случае с местными органами Министерства сельского хозяйства СССР и органами санитарно-эпидемиологической службы.

Номенклатура объектов, допускаемых к размещению на территории санитарно-защитных зон в зависимости от их ширины, приведена в табл. 7.1.

Озеленение и благоустройство санитарно-защитных зон. Проектирование озеленения санитарно-защитных зон должно осуществляться с учетом характера промышленных загрязнений, а также местных природно-климатических и топографических условий.

Растения, используемые для озеленения санитарно-защитных зон, должны быть эффективными в санитарном отношении и достаточно устойчивыми к загрязнению атмосферы и почв промышленными выбросами. При проектировании озеленения следует отдавать предпочтение созданию смешанных древесно-кустарниковых насаждений, обладающих большей биологической устойчивостью и более высокими декоративными достоинствами по сравнению с однопородными посадками. При этом не менее 50% общего числа высаживаемых деревьев должна занимать главная древесная порода, обладающая наибольшей санитарно-гигиенической эффективностью, жизнеспособностью в данных почвенно-климатических условиях и устойчивостью по отношению к выбросам данного промпредприятия. Остальные древесные породы являются дополнительными, способствующими лучшему росту главной породы. Менее устойчивые породы, но дающие большой эффект в очистке воздуха, как древесные, так и кустарниковые, должны размещаться внутри массива под прикрытием опушечных посадок.

Для опушечных насаждений подбирают наиболее устойчивые породы деревьев и кустарников. Опушечным насаждениям, обращенным к селитебной территории, промышленным предприятиям, административным зданиям, дорогам, следует придавать более живописный характер.

При подборе растений для озеленения санитарно-защитных зон следует руководствоваться таблицами «Географические зоны применения ассортимента деревьев и кустарников» и «Ассортимент деревьев и кустарников для озеленения санитарно-защитных зон промышленных предприятий». Для цветочного оформления санитарно-защитных зон рекомендуется использовать газоустойчивые виды однолетних, двухлетних и многолетних цветочных растений, рекомендуемые «Ассортиментом газонных трав».

Существующие зеленые насаждения на территории санитарно-защитной зоны должны быть максимально сохранены и включены в общую систему озеленения зоны. При необходимости должны предусматриваться мероприятия по их реконструкции. Вновь создаваемые зеленые насаждения должны представлять собой посадки плотной структуры изолирующего типа, которые создают на пути загрязненного воздушного потока механическую преграду, осаждая и поглощая часть вредных выбросов, или посадки ажурной структуры фильтрующего типа, выполняющие роль механического и биологического фильтра загрязненного воздушного потока.

Таблица 7.1. Номенклатура объектов, размещаемых на территории санитарно-защитных зон в зависимости от их ширины

Нанменование	При ширине зоны, м		
	до 300	300—1000	1000—3000
Озеленение, благоустройство			
Древесно-кустарниковые насаждения	+	+	+
Газоны, цветники	+	+	+
Питомники	—	—	+
Сельскохозяйственные культуры	—	—	+
Площадки для отдыха работающих на предприятиях	+	+	+
Транспортные сети			
Автодороги, проезды	+	+	+
Развязки дорог на разных уровнях	—	—	+
Тротуары	+	+	+
Велосипедные дорожки	+	+	+
Стоянки автомотовелотранспорта	+	+	+
Железнодорожные пути	—	—	+
Вертолетные площадки	—	—	+
Инженерные коммуникации			
Сети инженерных коммуникаций	+	+	+
ЛЭП от 20 до 110 кВ	—	+	+
ЛЭП от 110 до 220 кВ	—	—	+
Здания административно-служебного и научно-технического назначения			
Административно-служебные здания промпредприятий	+	+	+
Здания научно-технического назначения при промпредприятиях	+	+	+
Помещения для аварийного персонала и охраны предприятий	+	+	+
Профтехучилища, техникумы	+	+	+
Павильоны стационарного наблюдения за загрязнением атмосферы	+	+	+
Здания торгово-коммунального назначения			
Торговые здания, киоски	+	+	+
Заводские столовые	+	+	+
Заводские поликлиники, амбулатории	+	+	+
Пожарное депо	+	+	+
Бани, прачечные	+	+	+
Гаражи	+	+	+
Котельные (на газовом топливе с обоснованием их размещения по расчету рассеивания)	—	+	+
Промтоварные склады, не выделяющие вредностей	—	+	+
Мелкие предприятия, не выделяющие производственных вредностей	—	+	+

Примечание: + размещение допустимо, — размещение недопустимо

Изолирующие посадки создаются в виде плотных древесных массивов и полос с опушками из кустарников на территории санитарно-защитных зон. Насаждения изолирующего типа размещают вблизи промышленного предприятия. Наиболее эффективны посадки с обтекаемыми опушками, т. е. созданными кустарниковыми и древесными породами с постепенно уменьшающимися по высоте кронами. Деревья основной породы в изолирующих посадках высаживаются через 3 м в ряду при расстоянии 3 м между рядами; расстояние между деревьями сопутствующих пород 2—2,5 м; крупные кустарники высаживаются на расстоянии 1—1,5 м один от другого, мелкие — 0,5 м при ширине междурядий 2 1,5 м.

Для скорейшего достижения фронтальной сомкнутости насаждений в посадки изолирующего типа (внутрь полос и массивов) могут быть введены дополнительно кустарники. Посадки фильтрующего типа являются основными в защитных насаждениях, ими могут быть заняты также предзаводские входные территории, участки лесопарковых маршрутов и мест кратковременного отдыха.

Схемой размещения насаждений с фильтрующими посадками предусматривается чередование в шахматном порядке закрытых и открытых пространств. В качестве открытых пространств наряду с участками, озелененными низкой растительностью, могут рассматриваться дороги, транспортные развязки, железнодорожные станции, площадки открытых складов, автостоянки и др. При этом соблюдение в плане строгой геометрической формы и размещения массивов и открытых участков необязательно.

Участки под фильтрующие посадки рекомендуется отводить площадью не менее 3—3,5 га, под открытые пространства — площадью 1—1,5 га. Фильтрующие посадки выполняют в виде различных по площади массивов и полос без кустарниковых опушек. Составляющие их породы должны иметь крупные и высокоподнятые кроны. Для увеличения листовой поверхности допускается введение внутрь массива кустарниковых пород (5—10% количества высаживаемых деревьев).

Оптимальные условия проветривания и очистки воздушного бассейна в санитарно-защитной зоне достигаются созданием коридоров проветривания, особенно в направлении господствующих ветров. В качестве коридоров проветривания могут быть использованы трассы автомобильных и железных дорог, линии высоковольтных электропередач, водоемы и другие открытые пространства. Коридоры проветривания не должны быть направлены в сторону жилой застройки

При создании санитарно-защитных зон на территориях, покрытых лесом, необходимо обеспечить хорошее проветривание и отвод загрязненных воздушных масс как с самой промплощадки, так и с территории санитарно-защитной зоны, создавая просеки шириной 60- 80 м, но не более 100 м, направленные в сторону от жилой застройки. Со стороны просеки насаждения не должны иметь плотных опушек, препятствующих их проветриванию.

Если лесной массив сформирован из пород, не устойчивых к загрязнению территории промышленными выбросами, необходимо предусмотреть лесохозяйственные мероприятия по постепенной замене этих пород устойчивыми.

При проектировании санитарно-защитных зон действующих предприятий в стесненных условиях сложившейся городской застройки удельный вес озеленяемых территорий и их размещение устанавливаются по согласованию с местными органами санитарного надзора и органами строительства и архитектуры.

Проектирование озеленения санитарно-защитной зоны должно осуществляться с учетом утвержденных технико-экономических обоснований (ТЭО) строительства предприятий или другой предпроектной документации, заменяющей ТЭО, в которых наряду с подтверждением экономической целесообразности и хозяйственной необходимости строительства или реконструкции предприятия определяются:

обоснованность принятых размеров санитарно-защитной зоны;

характер использования ее территории;

затраты на создание зоны с включением в них стоимости озеленения и благоустройства озеленяемой территории, а также затрат, связанных с изъятием земель из сельскохозяйственного пользования и выносом жилья, детских и лечебных учреждений. Объем материалов, необходимых для разработки проекта озеленения, а также его состав приведены в «Руководстве по проектированию санитарно-защитных зон промышленных предприятий» (М., Стройиздат, 1984 г.).

7.4. ОЧИСТКА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

Эффективность того или иного метода пылеулавливания зависит от скорости переноса аэрозольных частиц к осадительной поверхности. Причем большое значение имеет скорость вблизи осадительной поверхности. Для некоторых методов пылеулавливания скорость такого переноса определяется свойствами аэрозольных частиц, например, их подвижностью.

Большой круг задач газоочистки сопряжен с осаждением аэрозольных частиц из турбулентного потока под воздействием градиента внешних сил, который является движущей силой переноса аэрозольных частиц на осадительную поверхность. В качестве осадительной поверхности может быть капля или пленка жидкости, стенка циклона, поверхность волокна, гранула шихтового материала. Перед осаждением аэрозольных частиц на поверхность происходит их торможение, которое начинается на некотором расстоянии от поверхности, определяемом как путь торможения аэрозольной частицы. Поэтому линии тока изгибаются и обтекают тело, на котором происходит осаждение аэрозольных частиц на расстоянии не более этого пути, вследствие чего эффективность осаждения аэрозольных частиц на поверхность этого тела будет зависеть от двух критериев: St и Re, значения которых должны превышать их критические величины

Такой режим переноса аэрозольных частиц определяет работу силового поля в инерционных пылеуловителях, таких как циклоны, турбулентные промыватели типа скруббера Вентури, разные насадочные или полые скрубберы, волокнистые туманоуловители и некоторые другие пылеулавливающие аппараты.

Задачи пылеулавливания, возникающие при фильтрации аэрозолей через волокнистые, слоевые и рукавные фильтры, связаны с переносом аэрозольных частиц в пористых средах.

Любая пористая перегородка характеризуется аэрозольной проницаемостью, определяющей ее свойства задерживать аэрозольные частицы, при этом пористая перегородка забивается пылью и возникает необходимость в ее регенерации. Цикличность процесса фильтрации определяет наличие в таких установках секций, которые периодически отключаются на регенерацию.

Как правило, эффективность рассматриваемых процессов пылеулавливания описывается в виде экспоненциальной функции

$$\eta = 1 - e^{-\xi}. \qquad (7.2)$$

Очевидно, что значение этой функции изменяется в интервале 0—1 и возрастает с увеличением показателя экспоненты ξ, т. е. значение эффективности того или иного метода пылеулавливания определяется конкретным содержанием величины ξ. Например, изменение эффективности от 0,8 до 0,99 соответствует изменению величины ξ от 1,6 до 4,7 т. е. в 3 раза. В табл. 7.2 приведены данные по фракционной эффективности улавливания пыли различными аппаратами, а также данные по эффективности улавливания стандартной пыли со среднеквадратичным значением радиуса $r = 7{,}5$ мкм и дисперсией распределения частиц по размерам, равной 4.

Таблица 7.2. Эффективность улавливания пыли различными пылеуловителями

Пылеуловители	Эффективность, %, улавливания пыли с радиусом частиц, мкм			
	25	2,5	0,5	стандартная пыль
Циклоны:				
высокоэффективные	85	67	10	34,2
малогабаритные	96	89	90	93,8
батарейные	62	42	10	47,2
Электрофильтры:				
сухие	98	92	82	94,1
мокрые	99	98	92	99
Рукавные фильтры	99,9	99,9	99,0	99,8
Скрубберы:				
орошаемые	96	91	35	90,3
Вентури	99,8	99,6	94	99,7

Таблица 7.3. Рекомендации по выбору максимально допустимой скорости газов в осадительных камерах

Пыль	Плотность частиц, кг/м^3	Среднемедианный размер частиц, мкм	Максимально допустимая скорость газов, м/с
Алюминиевая стружка	2720	335	4,3
Асбест	2200	261	5,0
Известняк	2780	71	6,4
Крахмал	1270	64	1,75
Неметаллическая пыль из плавильных печей	3020	117	5,6
Оксид свинца	8260	14,7	7,6
Стальная дробь	6850	96	4,7
Деревянная стружка	1180	1370	4,0
Деревянные опилки	—	1400	6,6

7.4.1. Сухая очистка вредных газовых выбросов и ее аппаратурное оформление

По способу действия аппараты сухой очистки газов можно разделить на следующие группы:

пылеосадительные камеры, принцип действия которых основан на использовании гравитационных сил;

инерционные пылеуловители, при работе которых используется сила инерции;

циклоны, принцип действия которых основан на использовании центробежных сил.

Пылеосадительные камеры. В пылеосадительных камерах (рис. 7.1) происходит гравитационное осаждение частиц пыли, или осаждение под действием силы тяжести, что представляет собой наиболее простой вид осаждения пыли.

В таблице 7.3 приведены некоторые рекомендации по выбору максимально допустимой скорости газов в осадительных камерах.

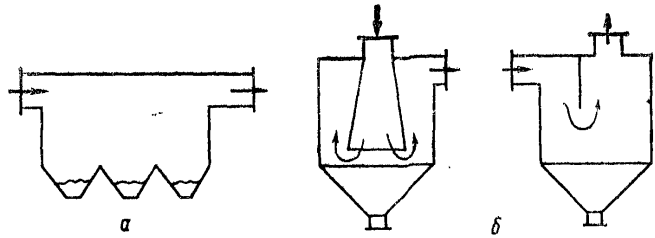


Рис. 7.1. Пылеуловители:
а — пылеосадительная камера; *б* — инерционные пылеуловители

При ламинарном движении запыленного газа под влиянием силы тяжести пылинки осядут на дно пылевых камер со скоростью витания $v_в$ (см. гл. 6).

По номограмме (рис. 7.2) можно определить объем газа, приходящегося на 1 м² площади пола камеры. Номограмма построена в предположении, что вязкость газа равна вязкости воздуха. Если вязкость газа существенно отличается от вязкости воздуха, то полученный по номограмме результат следует умножить на величину $\sqrt{\mu_г/\mu_в}$, где $\mu_г$ и $\mu_в$ — соответственно динамическая вязкость газа и воздуха при данной температуре.

На практике в пылевых камерах часто осаждается и высокодисперсная пыль. Это объясняется коагуляцией частиц, возникающей при значительной концентрации и скорости аэрозоля.

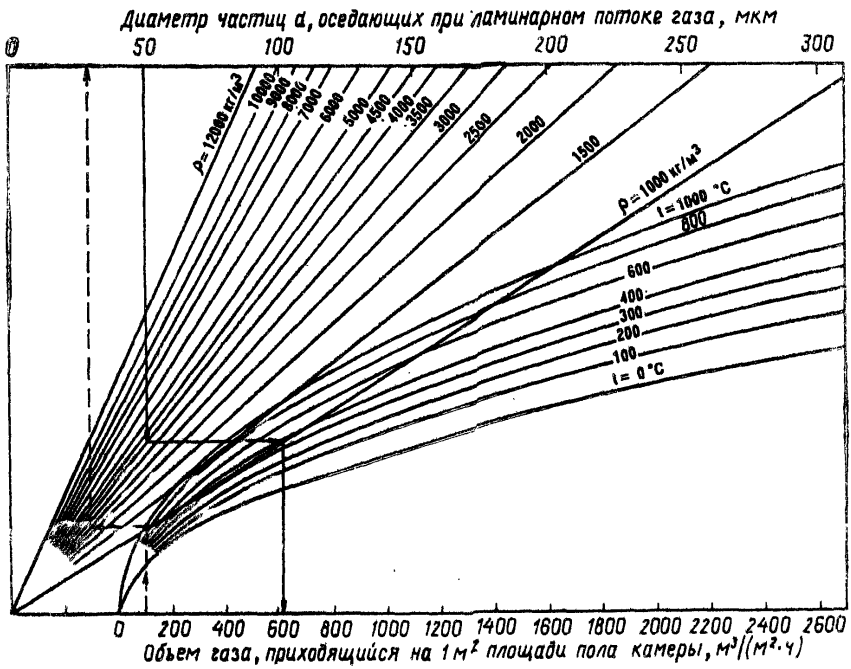


Рис. 7.2. Номограмма для определения объема газа, приходящегося на 1 м² пола пылеосадительной камеры

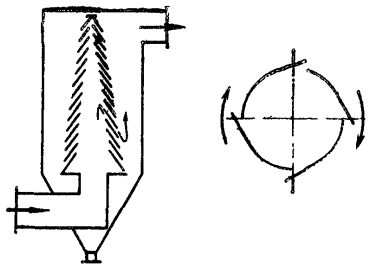


Рис. 7.3. Жалюзийный пылеуловитель

Эффективность улавливания высокодисперсной пыли с частицами менее 5 мкм в пылеосадительных камерах даже больших размеров близка к нулю, крупные же частицы пыли размером 30—40 мкм и больше улавливаются достаточно хорошо.

Недостатками пылеосадительных камер по сравнению с другими пылеулавливающими устройствами являются их большой объем и малая эффективность, а преимуществами — малое гидравлическое сопротивление, простота и надежность конструкции и возможность удалять от газового потока фракции крупных частиц, обладающих повышенной абразивностью. Поэтому их целесообразно использовать в качестве первой ступени очистки перед более эффективными пылеуловителями.

Инерционные пылеуловители. К простейшим инерционным пылеулавливающим средствам можно отнести небольшие по сравнению с пылеосадительными камерами емкости, в которых скорость запыленного потока, подводимого сверху или сбоку, изменяется по величине и направлению. Изменение направления скорости потока достигается, в частности, размещением в аппарате одной или нескольких перегородок (см. рис. 7.1).

При резком изменении направления движения газового потока частицы пыли под воздействием инерционной силы будут стремиться перемещаться в прежнем направлении и в дальнейшем могут быть выделены из этого потока. На этом принципе работает ряд пылеуловителей.

Камера с перегородкой (см. рис. 7.1) по эффективности пылеулавливания мало отличается от обычной осадительной горизонтальной камеры, но имеет более высокое гидравлическое сопротивление. При этом частицы пыли крупнее 25—30 мкм улавливаются на 65—85%. Гидравлическое сопротивление составляет 100—500 Па.

Жалюзийные пылеуловители. Принцип действия жалюзийных пылеуловителей (рис. 7.3) основан на резком (около 150°) изменении направления узких струек газового потока, проходящих через зазоры между лопастями жалюзи, и отклонении ударяющихся о поверхности лопастей частиц пыли в направлении щели (отверстия), через которую удаляется часть газового потока, обогащенного пылью. Основными достоинствами жалюзийных пылеуловителей являются малое гидравлическое сопротивление и значительно меньшие по сравнению с любыми другими пылеуловителями размеры. Недостатками жалюзийного пылеуловителя являются: износ пластин решетки при высокой концентрации особенно крупной пыли и возможность образования отложений при охлаждении газов до точки росы. Жалюзийные пылеуловители применяют для улавливания частиц пыли крупнее 20 мкм.

Центробежные пылеуловители (циклоны). Центробежные силы, возникающие при вращении газового потока, широко используются в технике пылеулавливания. На этом принципе основана работа наиболее многочисленной группы пылеуловителей-циклонов. Циклоны имеют преимущества перед другими аппаратами, применяемыми для очистки газов, что обусловлено небольшой их стоимостью, простотой устройства и обслуживания, сравнительно небольшим сопротивлением и высокой производительностью.

На рис. 7.4 схематично представлены основные виды конструкций циклонных пылеуловителей.

Газы, направляющиеся в аппарат, поступают в цилиндрическую часть циклона (рис. 7.5), где движутся по спирали с увеличивающейся скоростью от периферии к центру внутрь, опускаясь по наружной спирали, затем поднимаются по внутренней спирали и выходят через выхлопную трубу Степень улавливания пыли в различных циклонах приведена на рис. 7.6.

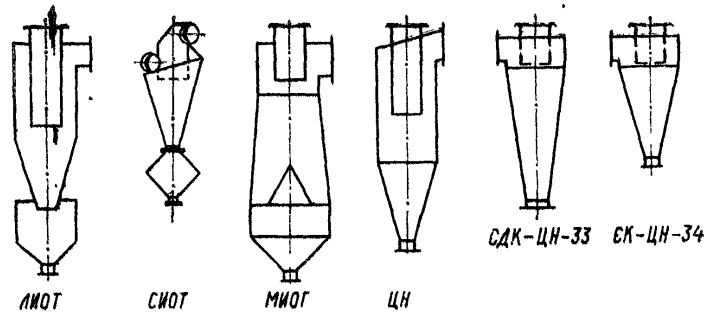


Рис. 7.4. Основные виды конструкций циклонных пылеуловителей

Циклонные пылеуловители имеют следующие преимущества: отсутствие каких-либо движущихся частей; надежное функционирование при температурах газов вплоть до 500 °С без каких-либо конструктивных изменений (если предусматривается применение более высоких температур, то аппараты можно изготовлять из специальных материалов); возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями; пыль улавливается в сухом виде; гидравлическое сопротивление почти постоянно; успешно работают при высоких давлениях газов; весьма просты в изготовлении; рост запыленности газов не приводит к снижению фракционной эффективности очистки.

Вместе с тем необходимо иметь в виду, что гидравлическое сопротивление высокоэффективных циклонов достигает 1250—1500 Па, и частицы размером меньше 5 мкм улавливаются плохо. При больших расходах очищенных газов применяют групповую компоновку аппаратов.

Комбинированные аппараты. Одним из представителей комбинированных аппаратов, т. е. использующих несколько принципов действия в одном аппарате, является устройство сухой очистки газов типа ТМС. На рис. 7.7 показана принципиальная схема устройства и его присоединительные размеры.

Устройство состоит из входной прямоугольной камеры *1*, патрубка *2*, прямоугольного канала *3*, соединяющего камеру *1* с нижней частью устройства. В верхней части прямоугольного канала расположен клапан *9*, соединенный с тягой *10*, выведенной в верхнюю часть камеры. В нижней части прямоугольного канала находится рассекатель *8*. Прямоугольный канал *3* через щелевые каналы *6* соединен с цилиндрическими вихревыми камерами *5*, в центральной части которых находятся трубы *4*. В противоположной части от щелевых каналов *6* трубы переходят в жалюзийный пылеуловитель. С одной из сторон труб *4* расположены патрубки *11* для отвода очищенных газов. Под цилиндрическими вихревыми камерами находится бункер *7*. Для более тонкой очистки газов (при небольших ее объемах) в трубах может быть расположена пористая набивка (рис. 7.8).

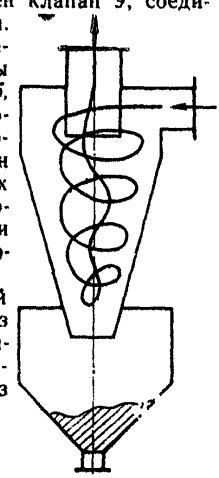


Рис. 7.5. Схема основного движения газов в циклоне

Устройство работает следующим образом. Очищаемый газ поступает во входную прямоугольную камеру *1* через патрубки *2*, где мелкие частицы укрупняются во встречных газовых струях. Далее газ направляется в прямоугольный канал, где в нижней части его разделяется через

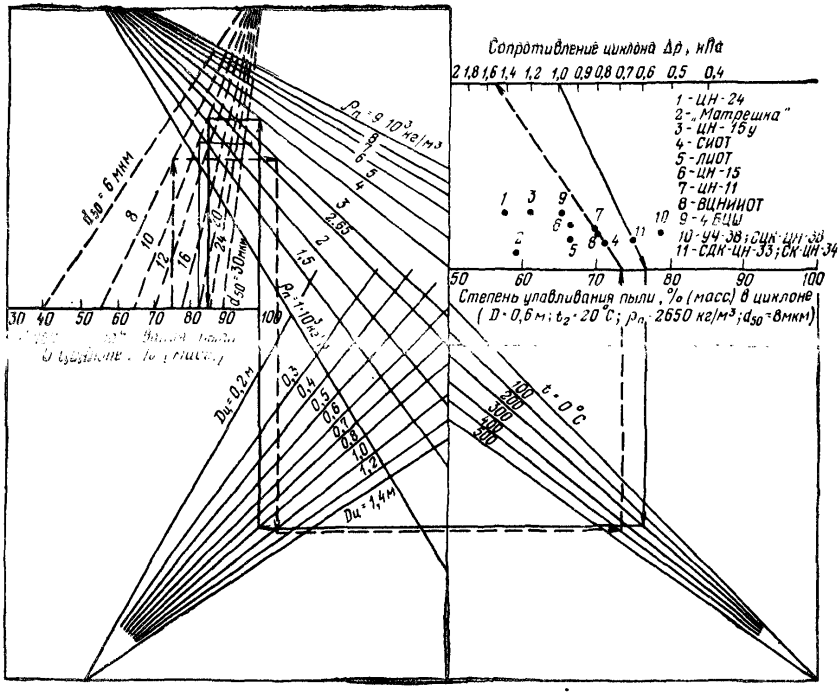


Рис. 7.6. Степень улавливания пыли в циклонах различных типов

рассекатель на два потока, поступающие в цилиндрические вихревые камеры, представляющие собой горизонтально расположенные циклоны.

Очищаемый газ в цилиндрических камерах движется в направлении жалюзийного пылеуловителя, встроенного в центральную часть цилиндрической вихревой камеры. Очистка газов в жалюзийном пылеуловителе происходит в результате резкого изменения направления газового потока. Очищенный газ удаляется через патрубки, расположенные в противоположной части от жалюзийного пылеуловителя. Уловленный продукт (пыль) удаляется через бункер в нижней части устройства.

Производительность устройства регулируется в широких пределах, что достигается изменением сопротивления устройства при перемещении клапана в верхней части прямоугольного вертикального канала.

Фильтрация. Метод фильтрации как метод пылеулавливания является наиболее эффективным. Рассмотрим некоторые его особенности. При фильтрации аэрозолей эффективность и сопротивление фильтра изменяются во времени. При этом происходит весьма сложный процесс, когда поровые каналы фильтрующей поверхности заполняются со стороны входа запыленного газа аэрозольными частицами. Через некоторое время образуется «вторичная» пористая структура, участвующая в процессе улавливания пыли из газов. Фильтрующей средой уже становится не только сама пористая перегородка, но и образующийся пылевой слой.

Пылевой слой имеет поры, размеры которых соизмеримы с размером частиц. Поэтому осевший слой пыли улавливает частицы из газа, как бы отсеивая их, т. е. практически полностью. Основная масса пылинок не проникает внутрь перегородки, а оседает снаружи слоя, в результате чего толщина слоя пыли возрастает.

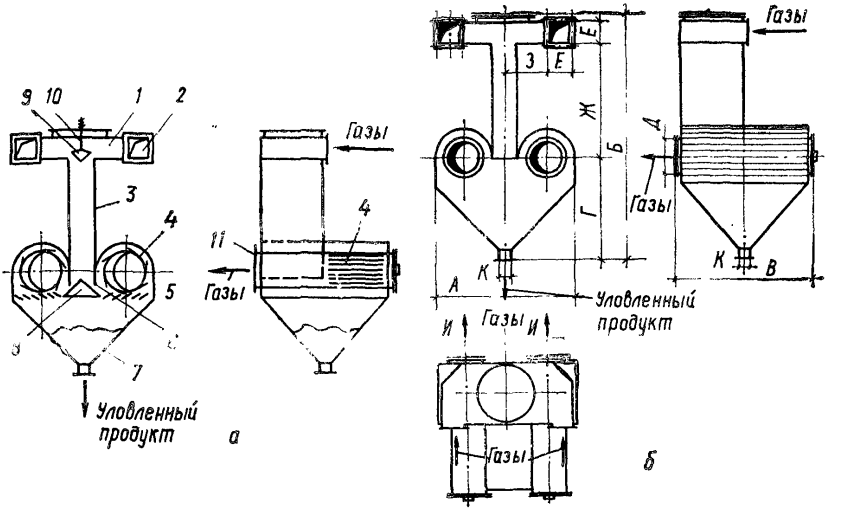


Рис. 7.7. Принципиальная схема устройства очистки типа ТМС (*а*) и присоединительные размеры (*б*), мм:

ТМС	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Д*	*Е*	*Ж*	*З*	*И*	*К*
1	1180	1720	1120	780	*D*—273	150	550	400	378	100
2	1510	2100	1320	1020	*D*—325	200	820	370	490	150
3	1510	2100	2120	1020	*D*—325	300	820	270	490	150
4	2490	3650	2120	1660	*D*—530	500	1320	695	795	150
5	2490	3650	2700	1660	*D*—530	600	1320	595	795	150

Наличие на ткани слоя пыли не только резко повышает эффектнвность улавливания по сравнению с эффективностью чистой (незапыленной) ткани, но и увеличивает ее гидравлическое сопротнвление, которое во много раз превышает сопротивление чистой ткани.

Регенерация фильтровальных перегородок является одной из главных задач промышленной фильтрации запыленного газа, определяющей эффективность этого метода очистки газов. Регенерация фильтровальных поверхностей определяется такими факторами, как адгезия — прилипание частиц пыли к поверхности фильтровальной перегородки и аутогезия — слипание частиц в слое. Суммарное действие этих факторов удерживает пылевой слой на фильтровальной поверхности даже в случае отключения фильтра от газовой нагрузки (обычно перед регенерацией).

Прочность слоев пыли зависит от ее полидисперсности, а также от упаковки частиц в слое. Прочность пылевого слоя сильно возрастает при повышении влажности, влияние которой становится особенно большим, если вещество растворимо: при испарении капиллярной влаги между частицами образуются кристаллические сростки, которые многократно увеличивают прочность пылевых слоев. Прочность слоев пыли, образованных при фильтрации, изменяется по толщине слоя в соответствии с распределением статических давлений. Она имеет наибольшее значение вблизи фильтрующей перегородки и наименьшее — на свободной поверхности слоя. Величина разрывной прочности слоя позволяет разделить все пыли на четыре класса (табл. 7.4).

В табл. 7.5 приведены значения прочности на разрыв слоев некоторых пылей в просушеином состоянии при комнатной температуре. На основании

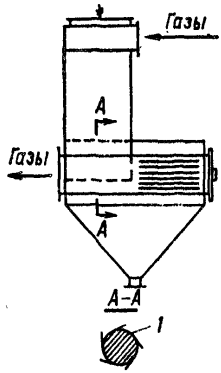


Рис. 7.8. Пористая фильтрационная набивка *1* в устройстве очистки типа ТМС

таких данных можно приближенно оценить прочность слоев, образующихся при фильтрации.

Фильтровальные ткани. Широкое распространение получили различные ткани из синтетического и стеклянного волокна. Эти ткани обладают высокой термостойкостью и механической прочностью.

Специальной термомеханической обработкой тканям придают специфические свойства, улучшающие их эксплуатационные свойства в процессе фильтрации запыленного газа в агрессивной и влажной среде. Текстильная структура этих тканей должна также обеспечивать высокую эффективность процесса фильтрации запыленного газа. Каждая фильтровальная ткань не обладает всей совокупностью положительных свойств. Применение фильтровальной ткани для определенного процесса улавливания требует индивидуального подбора. Выбор нужного типа ткани зависит от температуры и химического состава газа. Обычно этот выбор осуществляют экспериментально.

Наиболее широкое распространение в качестве фильтровальных материалов получили стеклоткани. Они характеризуются высокими термомеханическими и фильтровальными свойствами, а также стойкостью к агрессивным компонентам газа. Фильтровальные стеклоткани изготовляют из алюмоборосиликатного стекла, вытягиваемого через фильтры, подвергают термообработке и наносят кремнийорганическое защитное покрытие.

Силикографитовая пропитка позволяет значительно увеличить термомеханическую прочность стеклоткани. Для достижения высокой степени очистки применяют стеклоткани с штапельным (скрученным из коротких нитей) или текстурированным утком.

Материалы из синтетических волокон, обладающие высокой прочностью и термостойкостью, в последние годы почти полностью вытеснили технические материалы из шерсти и хлопка. Большое распространение получили ткани из акрилонитриловых волокон. Эти ткани обладают высокой механической прочностью, однако термомеханическая прочность их характеризуется резким снижением с ростом температуры от 100 °С и выше.

Ткани из полиэфирных волокон — лавсановые ткани — обладают хорошей термомеханической прочностью, большой изгибоустойчивостью, превышающей изгибоустойчивость стеклотканей в десятки раз. Применение этих тканей ограничивается пределом температуры 140 °С. Следует отметить, что лавсановая ткань в отличие от нитрона удовлетворительно работает только в среде сухого газа. Значительная усадка этой ткани во влажной среде исключает ее практическое применение для фильтрации сильно увлажненных газов. Прочность лавсановых тканей в щелочной среде при высоких температурах резко снижается.

Весьма перспективными тканями с высокими термомеханическими показателями являются ткани из волокон ароматических полиамидов. Эти волокна имеют хорошую прочность и изгибоустойчивость. Все синтетические ткани довольно стойки в кислых средах и окислителях. Из синтетических волокон изготовляют также иглопробивные материалы путем их сволачивания с последующей прошивкой на иглопробивных машинах. Такие материалы имеют высокую воздухопроницаемость, хорошие фильтровальные свойства, прочны на изгиб и разрыв. Эти ткани имеют объемную структуру, поэтому для улучшения стряхивания пыли их поверхность подвергают термической обработке, при которой происходит оплавление наружных волокон, и поверхность ткани становится гладкой. Нетканые иглопробивные ткани применяют обычно в фильтрах с импульсной продувкой.

Пылезадерживающая способность фильтровальных тканей. Наряду с

Таблица 7.4. Деление пылей на классы в зависимости от разрывной прочности слоя

Класс	Тип пыли	Разрывная прочность p, Па	Размер частиц, мкм
1	Неслипающаяся	$<10^2$	20—30
2	Слабослипающаяся	$(1—3)10^2$	10—20
3	Среднеслипающаяся	$(3—10)10^2$	3—10
4	Сильнослипающаяся	$>10^3$	2—3

Таблица 7.5. Классификация пылей по слипаемости

Вид пыли	Средний размер частиц, мкм	Прочность на разрыв F^2, Па	Группа слипаемости
Пыль от доменной печи	20	10	I
Глинозем	40	10	I
Ликоподий	35	10	I
Оксид магния	20	30	I
Шамот	12	35	I
Известковая пыль	7	50	I
Глинозем	15	50	I
Тальк	3,5	60	I
Антрацит	7	140	II
Кварц	15	200	II
Антрацит	3	400	III
Крахмал	9	450	III
Пыль электролиза алюминия	4	460	III
Зола бурого угля	7	550	III
Мрамор	4,5	600	III
Оксид цинка	2	600	III
Магнезит	8	700	III
Доломит	25	700	III
Известняк акишенский	4	800	III
Зола сланцев	10	800	III
Цемент	5	900	III
Фарфор	2	1100	IV
Мрамор	2	1500	IV
Мел	2	2100	IV
Диоксид титана	2	2300	IV

термостойкостью и механической прочностью фильтровальные ткани обладают высокой пылезадерживающей способностью, которая зависит от величины воздухопроницаемости ткани, т. е. от ее текстильной структуры. Для гладких тканей коэффициент воздухопроницаемости (м/Па·с):

$$v/\Delta p_0 = 1{,}7 \cdot 10^{-3},$$

где v — скорость фильтрации воздушного потока, м/с; Δp_0 — сопротивление незапыленной ткани, Па.

Для ворсовальных тканей оптимальное значение воздухопроницаемости составляет примерно

$$v/\Delta p_0 = 4{,}1 \cdot 10^{-3} \text{ м/(Па·с)}.$$

Таблица 7.6. Классификация фильтрующих аппаратов

Тип фильтра	Конструктивные признаки	Способ регенерации
Многосекционные с продувкой отдельной секции типа ФР, ФРДО, СМЦ, ФРО, Tilghman, Nittobo; со струйной продувкой отдельного рукава или группы рукавов типа РФСП	Рукавные с внутренней фильтрацией	Обратная продувка
Многосекционные с продувкой отдельной секции типа Universal; с продувкой рукавов через вращающиеся сопла; с пульсирующей продувкой плоских (карманных) фильтровальных элементов	Каркасные с наружной фильтрацией	То же
С продувкой и деформацией рукавов путем их сплющивания (коллапс-регенерация); с продувкой и механическим встряхиванием рукавов типа РГФ, ФВ, ФВК, УРФМ, ФРУ	Рукавные бескаркасные с внутренней фильтрацией	Обратная продувка и механическое встряхивание
Ячейковые типа ФЯ; рукавные с подачей импульса в объем между рукавами типа ФРГМ, то же, навстречу запыленному потоку	Бескаркасные с внутренней фильтрацией	Импульсная регенерация
С подачей импульса в объем цилиндрического элемента типа ФРКМ; клиновые или плоские с подачей импульса в объем фильтрующего элемента типа ФПИ	Каркасные с наружной фильтрацией	Обратная продувка и механическое встряхивание
Слоевые зернистые фильтры (гравийные, керамические, металлокерамические)	Каркасные	Обратная продувка с рыхлением слоя
Рулонные и катушечные с неподвижной фильтровальной поверхностью типа ФВГ	Бескаркасные с внутренней фильтрацией	Без регенерации

Таблица 7.7. Габаритные размеры и массы некоторых абсорбционных газоочистных устройств

Характеристика	УСД-ЛИОТ	ПВМ	КМП	ТМ
	Производительность $L = 9000$ м^3/ч			
d, мм	1730	1514	2300	1510
b, мм	1200	2500	1415	735
h, мм	2200	3412	4365	2395
Масса, кг	400	1395	1060	430
	Производительность $L = 18\,000$ м^3/ч			
d, мм	2625	2510	2800	1510
b, мм	1800	2314	1845	1135
h, мм	4170	3680	4990	2395
Масса, кг	748	1984	1260	580
	Производительность $L = 26\,000$ м^3/ч			
d, мм	2625	2416	3540	2490
b, мм	1800	4750	2240	1135
h, мм	4170	4110	5630	3390
Масса, кг	748	4737	1840	830

Скорость фильтрации для различных тканей можно рассчитать по формуле:

$$v = B\sqrt{2gr}, \qquad (7.3)$$

где r — средний радиус аэрозольных частиц, м; g — ускорение свободного падения; B — коэффициент, равный для гладкой стеклоткани 1, для ворсованных лавсановых и нитроновых тканей 1,4, для нетканых и иглопробивных материалов 1,6.

При больших скоростях резко возрастает гидравлическое сопротивление и возникают динамические пробои пылевого слоя на отдельных участках рукава, сопровождающиеся увеличением выноса пыли. Кроме того, при увеличении скорости остаточная запыленность довольно резко возрастает сразу же после регенерации; требуется слишком часто проводить регенерацию фильтровальных рукавов, что приводит к быстрому износу ткани. Регенерация стеклоткани проводится, как правило, только обратной продувкой.

Фильтрующие аппараты. Классификация фильтрующих аппаратов дана в табл. 7.6.

Наиболее распространенными пылеулавливающими аппаратами, работающими по методу фильтрации, являются рукавные фильтры. В последние годы диапазон применения рукавных фильтров в отечественной практике и за рубежом расширился в связи с тем, что эти аппараты дают возможность достичь самой низкой остаточной запыленности в сравнении с другими промышленными пылеуловителями. Этому способствует интенсивное развитие конструкций рукавных фильтров и появление новых фильтровальных материалов.

Рукавные фильтры представляют собой аппараты прямоугольной формы. Внутри корпуса подвешены рукава диаметром 130—300 мм, высотой от 2 до 10 м (рис. 7.9). Фильтрация газов осуществляется через наружную или внутреннюю поверхность рукава. После того как на фильтрующей поверхности накопится слой пыли и гидравлическое сопротивление фильтра достигнет предельно допустимой величины, производят регенерацию рукавов обратной или импульсной продувкой или их механическим встряхиванием в сочетании с обратной продувкой.

Рукавные фильтры различаются способами регенерации, площадью фильтрующей поверхности, допустимой величиной рабочего давления (разрежения), числом секций, диаметром, высотой и конструктивными особенностями рукавов. Эффективность очистки газов в рукавных фильтрах составляет 98—99%. При значительной запыленности газового потока рукавные фильтры рекомендуется использовать в качестве второй ступени очистки (например, после циклона).

Недостатком рукавных фильтров является быстрый износ материала рукавов. При выходе из строя одного рукава даже в большом аппарате эффективность фильтра резко снижается. Определение в работающем фильтре секции с поврежденным рукавом, а тем более самого рукава занимает значительное время, и в течение этого периода запыленность на выходе из фильтра будет повышенной. К такому же результату может приводить и недостаточная герметичность, обусловленная некачественным монтажом узлов аппарата. Недостаточная эффективность систем регенерации обычно влечет за собой повышение гидравлического сопротивления. Это соответственно увеличивает расход электроэнергии и может привести к росту остаточной запыленности или к необходимости более частой регенерации, что в конечном итоге отрицательно сказывается на сроке службы рукавов. Отдельные превышения температуры над нормативными значениями также могут снизить долговечность рукавов. Таким образом, аппарат, являющийся потенциально высокоэффективным, но не достаточно надежным, может в среднем давать худшие результаты, чем менее эффективный, но более надежный.

Электрическая очистка газов. На установках с большой единичной производительностью по аэрозольным выбросам в качестве пылеулавливающих

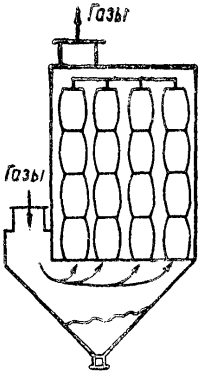


Рис. 7.9. Рукавный фильтр

аппаратов применяют, как правило, электрофильтры различных конструкций. Работу электрофильтра можно описать следующим образом. Между двумя осадительными поверхностями (электродами) натянут ряд проводов (коронирующие электроды). Запыленный газ направляется в пространство между осадительными и коронирующими электродами. При подаче высокого напряжения на коронирующие электроды аэрозольные частицы заряжаются и под действием градиента электрического потенциала поля перемещаются к осадительным электродам.

7.4.2. Абсорбционная очистка газовых выбросов и ее аппаратурное оформление

Процесс очистки газов от пыли в газоочистных абсорбционных аппаратах осуществляется жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы и уносит их из аппарата в виде шлама, при этом происходят абсорбция и охлаждение газов, поэтому мокрые газоочистные аппараты можно применять для очистки газов не только от пыли и капель жидкости, но и от газообразных составляющих (особенно хорошо растворимых HCl, NH_3, HF и др.), а также в качестве теплообменных аппаратов.

Абсорбционные аппараты для очистки газов имеют следующие особенности по сравнению с другими устройствами очистки:

сравнительно небольшая стоимость и более высокая эффективность улавливания взвешенных частиц по сравнению с сухими механическими аппаратами;

пригодны для очистки газов от частиц размером до 0,1 мкм (например, турбулентные газопромыватели — труба Вентури);

могут не только успешно конкурировать с такими высокоэффективными пылеуловителями, как рукавные фильтры, но и использоваться в тех случаях, когда рукавные фильтры нельзя применять, например, при высокой температуре и повышенной влажности газов, при опасности возгораний и взрывов очищаемых газов или улавливаемой пыли;

одновременно с взвешенными частицами могут улавливать парообразные и газообразные компоненты.

В мокрых газоочистных аппаратах используют различные механизмы осаждения, обеспечивающие необходимый контакт частиц с промывной жидкостью:

гравитационное осаждение (седиментация) — в результате вертикального движения вниз частиц под действием силы тяжести во время прохождения их через газоочистной аппарат. Этот вид осаждения характерен для крупных частиц;

инерционное осаждение — когда масса частицы или скорость ее движения настолько значительны, что она не может следовать вместе с газом по линии тока, огибающей препятствие, а стремясь по инерции продолжить свое движение, сталкивается с препятствием и осаждается на нем;

эффект касания (зацепления) — когда расстояние от частицы, движущейся с газовым потоком, до обтекаемого тела равно или меньше ее радиуса;

осаждение под действием центробежной силы. При криволинейном движении газового потока развиваются центробежные силы, под действием которых взвешенные частицы отбрасываются на орошаемые поверхности ап-

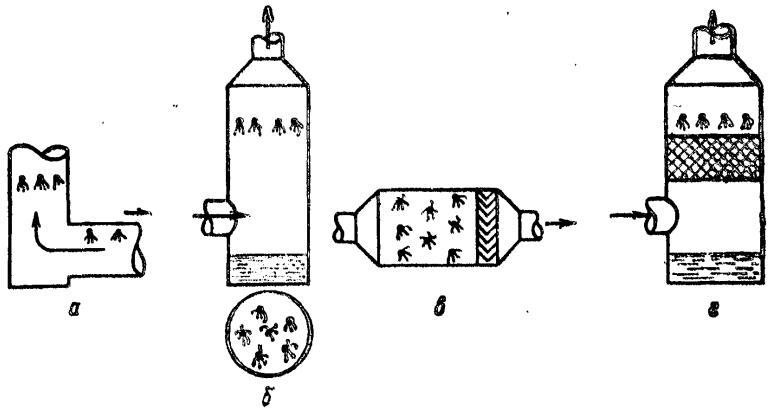


Рис. 7.10. Абсорбционные устройства для очистки газов:
а — оросительное устройство; *б* — полый форсуночный скруббер; *в* — промывная камера; *г* — насадочный скруббер

парата (мокрые циклоны) или поверхности пузырей (барботажные аппараты);

диффузию — мелкие частицы испытывают непрерывное воздействие молекул газа, находящихся в броуновском движении, в результате которого возможно осаждение этих частиц на поверхности обтекаемых тел или стенок аппарата. В турбулентном потоке диффузионный эффект резко возрастает;

электрическое осаждение — в результате взаимодействия электрических зарядов на каплях промывной жидкости или на взвешенных в газах частицах, или одновременно на тех и других.

Механизм осаждения частиц определяется следующими факторами: размером капель распыляемой жидкости, плотностью орошения (или количеством промывной жидкости), размером, плотностью и смачиваемостью взвешенных частиц, скоростью газового потока, свойствами газов и действием электрических сил.

По способу действия аппараты мокрой очистки можно разделить на следующие группы:

1) полые и насадочные газопромыватели (оросительные устройства, промывные камеры; полые форсуночные, каскадные и насадочные скрубберы);
2) барботажные и пенные аппараты;
3) аппараты ударно-инерционного типа;
4) центробежного действия;
5) динамические газопромыватели (механические скрубберы; дезинтеграторы);
6) скоростные газоочистные аппараты.

Работу аппаратов мокрой газоочистки характеризуют следующие показатели: эффективность очистки, скорость газов, гидравлическое сопротивление, расход энергии, жидкости и материалов, стоимость установки и очистки.

Полые и насадочные газопромыватели. В полых и насадочных газопромывателях запыленные газы проходят через завесу распыляемой, разбрызгиваемой или стекающей жидкости. При этом частицы пыли захватываются каплями промывной жидкости и осаждаются в промывателе, а очищенные газы удаляются из аппарата.

Оросительные устройства. Наиболее простым типом газопромывателя является оросительное устройство (рис. 7.10), представляющее собой ряд форсунок, встроенных в газопровод или дымовую трубу для создания водяных завес на пути запыленного газового потока. Скорость очищаемых газов

в оросительном устройстве следует принимать не более 3 м/с, чтобы избежать значительного уноса брызг. Расход воды зависит от температуры очищаемых газов и степени их охлаждения и колеблется от 0,1 до 0,3 кг/м³.

Рекомендуется после оросительных устройств в газопроводах устанавливать каплеуловители и снабжать газопроводы дренажными устройствами. Оросительные устройства применяют в тех случаях, когда очищаются газы, содержащие взвешенные частицы размером более 15—20 мкм, и к степени очистки газов не предъявляют высокие требования

Промывные камеры. Промывная камера представляет собой усовершенствованное оросительное устройство (рис. 7.10, *в*) Внутри камеры в несколько рядов (чаще всего в шахматном порядке) размещены распылители-форсунки для создания водяных завес на пути очищаемого газового потока. Иногда для повышения эффективности очистки на пути движения газов в промывной камере устанавливают отбойные пластины, перфорированные листы или сетки. В конце промывной камеры размещают брызгоуловитель для улавливания капельной жидкости, уносимой газовым потоком.

Размеры промывных камер выбирают, исходя из скорости движения газов, которую принимают обычно в пределах 1,5—2,5 м/с. Продолжительность пребывания газов в камере должна быть не менее 3 с. Расход воды на промывку газов составляет 0,2—1,0 кг/м³. Гидравлическое сопротивление промывных камер вместе с брызгоуловителями не превышает 300—500 Па. При правильно сконструированной камере и хорошей промывке достигается относительно высокая очистка газов от частиц размером более 10 мкм.

Полые форсуночные скрубберы. Полый форсуночный скруббер представляет собой колонну круглого или прямоугольного сечения, в которой газ контактирует с каплями жидкости, распыляемой форсунками (см рис. 7.10, *б*) По направлению движения газов и жидкости полые скрубберы делятся на противоточные, прямоточные и с поперечным подводом жидкости. Скорость газов на выходе из аппарата принимается равной 0,7—1,5 м/с. При бо́льшей скорости газов наблюдается интенсивный брызгоунос.

Гидравлическое сопротивление полого скруббера весьма незначительно: в отсутствие каплеуловителя и газораспределителя оно обычно не превышает 250 Па. Полые форсуночные скрубберы обеспечивают высокую степень очистки только при улавливании частиц размером $d_ч > 10$ мкм и малоэффективны при улавливании частиц размером $d_ч < 5$ мкм.

Насадочные скрубберы. Насадочные скрубберы представляют собой колонны, заполненные телами различной формы (см. рис. 7.10, *г*). До последнего времени насадочные скрубберы являлись наиболее распространенным типом мокрого газоочистителя, однако частое забивание насадки при обработке запыленных газов привело к резкому сокращению их применения в технике пылеулавливания. Насадочные колонны целесообразно использовать только при улавливании хорошо смачиваемой пыли, особенно когда процессы улавливания пыли сопровождаются охлаждением газов или абсорбцией.

Насадку загружают в колонну на опорную решетку, свободное сечение которой составляет обычно не менее 75%. При режимах ниже точки подвисания брызгоунос незначителен (~0,1 г/м³). Вблизи точки подвисания он достигает 2—10 г/м³. Эффективность очистки достигает 90% при улавливании частиц пыли размером $d_ч > 2$ мкм и входной запыленности до 10—12 г/м³. Более высокая входная запыленность допускается при улавливании хорошо растворимой пыли. Расход жидкости в насадочных скрубберах колеблется от 0,15 до 2,6 л/м³, а гидравлическое сопротивление — от 160 до 3600 Па на 1 м слоя насадки.

Барботажные пылеуловители. В барботажных аппаратах (рис. 7.11) очищаемые газы в виде пузырьков проходят через слой жидкости, при этом вследствие увеличения поверхности соприкосновения газов с жидкостью улучшается процесс очистки газов от взвешенных частиц.

Очищаемые газы продавливаются в жидкость через отверстия в трубе или газопроводе (последние опущены ниже уровня жидкости) или через край перегородки, также опущенной ниже уровня жидкости. Для дробления

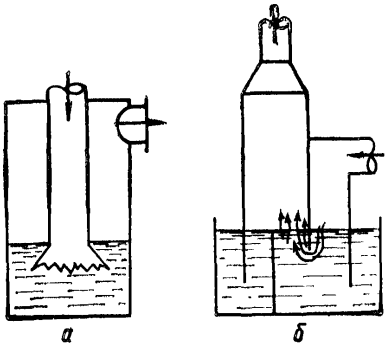


Рис. 7.11 Барботажные аппараты для очистки газов:
а — прямого действия; *б* — с разделяющей перегородкой

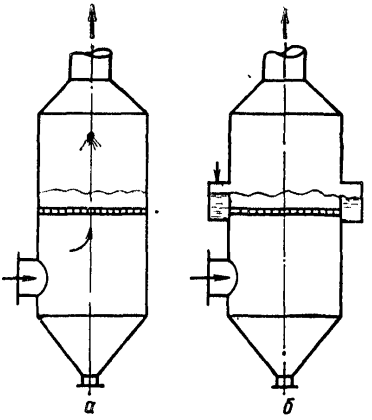


Рис. 7.12. Пенные пылеуловители:
а — с провальной решеткой, *б* — с переливной решеткой

газов на мелкие пузырьки край трубы часто делают зубчатым. Скорость свободного всплывания пузырьков в жидкости равна 0,25—0,35 м/с, а скорость газов в сечении обычного барботера не намного превышает скорость всплывания пузырьков. Эффективность подобных аппаратов достаточно велика при улавливании частиц размером $d_ч \geqslant 5$ мкм.

Пенный пылеуловитель с провальными решетками. Пенный пылеуловитель с провальными решетками представляет собой колонну цилиндрического или прямоугольного сечения, в которой установлены одна или несколько дырчатых или щелевых решеток (рис. 7.12). В аппарате подобного типа подвод газов в зону контакта с жидкостью и отвод последней из этой зоны осуществляется через одни и те же дырчатые или щелевые отверстия. Достоинством такого пылеуловителя по сравнению с другими является меньшая забиваемость отверстий решеток пылью, что обусловлено лучшим промыванием ее жидкостью.

Линейная скорость газов, при которой образуется пенный режим, мало зависит от плотности орошения и составляет обычно около 1 м/с. Диаметр отверстий в решетках пенного пылеуловителя составляет 4—8 мм, ширина щели 4—5 мм, а площадь свободного сечения колеблется в пределах 0,2—0,25 на 1 м². Диаметр мокрого пылеуловителя с провальными решетками по конструктивным соображениям не должен превышать 2,5 м. Для уменьшения брызгоуноса верхнюю решетку пенного пылеуловителя удаляют от места отвода газов из аппарата на расстояние не менее 0,9 м. Скорость воздушного потока для уменьшения брызгоуноса не должна превышать 1,5 м/с.

В пенном аппарате с переливными решетками (см. рис. 7.12, *б*) обычно устанавливают дырчатые решетки с отверстиями диаметром 3—8 мм. Площадь свободного сечения колеблется в пределах 0,15—0,25 на 1 м².

Скорость газов в свободном сечении пенных аппаратов с переливными решетками находится в интервале 1—3 м/с. Расход жидкости на орошение аппарата составляет 0,2—0,3 кг/м³. Высота пены на решетке при указанных параметрах газов и жидкости обычно не превышает 80—100 мм. Гидравлическое сопротивление пенного пылеуловителя колеблется от 300 до 1700 Па.

Степень улавливания пыли в пенных аппаратах зависит от размера и плотности пылинок, скорости газа и высоты слоя пены. Взаимосвязь между степенью улавливания, диаметром пылинок и их плотностью при высоте

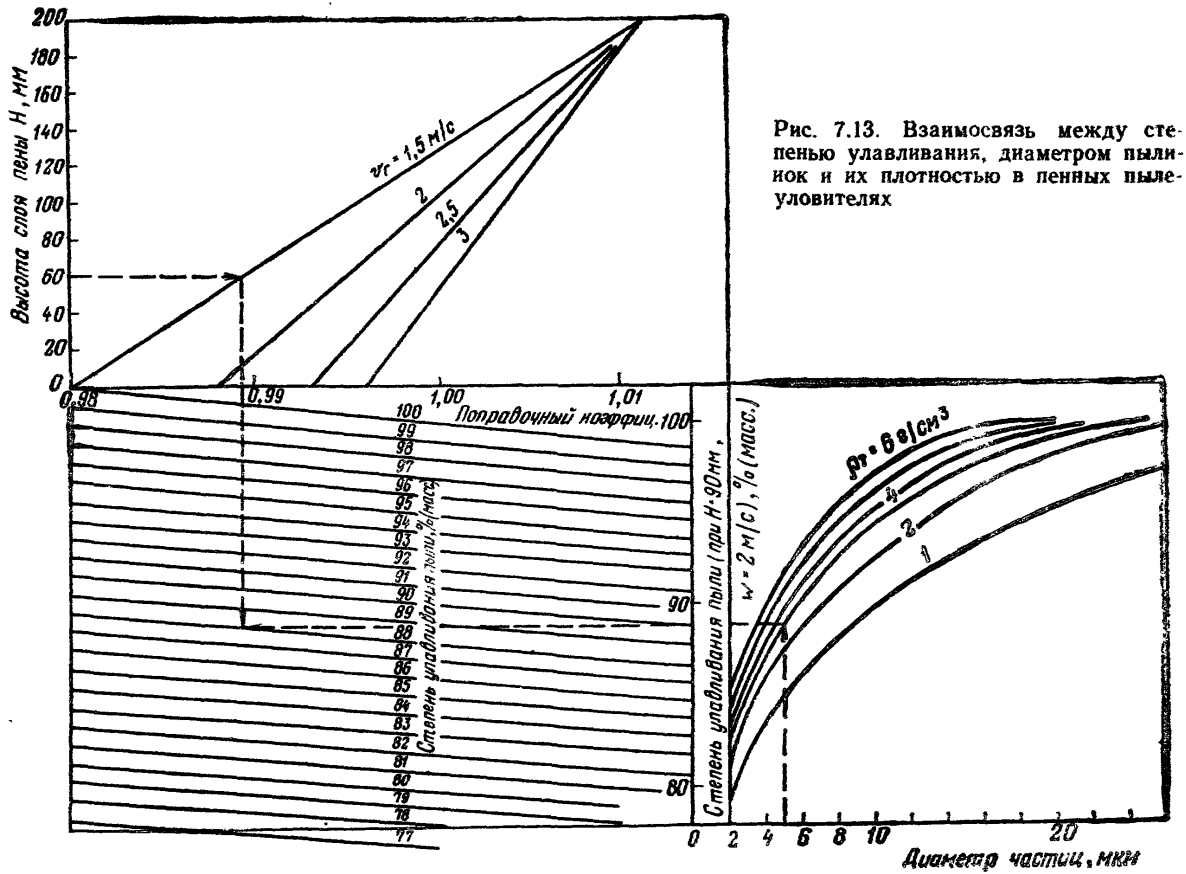


Рис. 7.13. Взаимосвязь между степенью улавливания, диаметром пылинок и их плотностью в пенных пылеуловителях

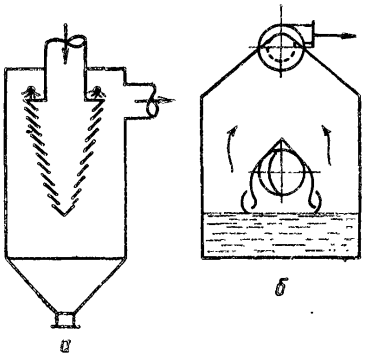


Рис. 7.14. Пылеуловители ударно-инерционного типа:
а — типа УСД-ЛИОТ; *б* — ротоклон

лены 90 мм и скорости газа $v = 1{,}5$—3 м/с изображена графически на рис. 7.13. Номограмма применима для гидрофильных пылей (SiO_2, $CaCO_3$, Al_2O_3, Fe_2O_3, $BaSO_4$) при $\rho_ч d_ч > 1$ и гидрофобных пылей (уголь, сера, сульфиды) при $\rho_ч d_ч > 43{,}5$, где $\rho_ч$ — плотность пылинок, г/см^2; $d_ч$ — диаметр пылинок, мкм.

Недостатки пенных уловителей: зарастание и забивание решетки, трудность регулировки и поддержания постоянной эффективности очистки при изменяющейся производительности системы. Общими недостатками полых, насадочных и пенных аппаратов являются: сравнительно большие размеры, невысокая эффективность, нарушение аэродинамики воздушных потоков при неравномерной плотности орошения, забивание насадки и большой каплеунос.

Мокрые газоочистные аппараты ударно-инерционного действия. Аппараты этого типа работают по принципу инерционного осаждения частиц во время преодоления очищаемыми газами препятствия, смоченного жидкостью, или при резком изменении направления движения газового потока над поверхностью жидкости. Пылеуловители этого типа удовлетворительно работают только при улавливании хорошо смачивающейся пыли с частицами размером более 20 мкм.

Пылеуловитель ударно-смывного действия (УСД-ЛИОТ). Этот аппарат (рис. 7.14), разработанный Ленинградским институтом охраны труда (ЛИОТ), предназначен для очистки от пыли вентиляционного воздуха.

К аппаратам ударно-инерционного действия относится большая группа мокрых пылеуловителей, в которых контакт газов с жидкостью возникает при ударе газового потока о поверхность жидкости и последующем прохождении газо-жидкостной смеси через отверстия различной конфигурации. В результате такого взаимодействия образуются капли диаметром 300—400 мкм. Особенностью аппаратов ударного действия является полное отсутствие средств перемещения жидкости, и поэтому вся энергия, необходимая для создания поверхности контакта, подводится через газовый поток.

Среди мокрых пылеуловителей этого типа можно выделить два наиболее распространенных в промышленности аппарата: статический ротоклон и скруббер ударного действия (скруббер Дойля). Кривая фракционной эффективности ротоклона (типа N) для пыли плотностью 2700 кг/м^3 приведена на рис. 7.15.

Важное значение для нормальной эксплуатации имеет поддержание постоянного уровня жидкости в аппарате. Даже незначительное изменение уровня жидкости может привести к резкому снижению эффективности или значительному увеличению гидравлического сопротивления. Вода в количестве, не превышающем 0,03 кг/м^3, подается только для компенсации ее потерь за счет испарения и уноса со шламом. Гидравлическое сопротивление аппаратов составляет 1000—1500 Па.

Разработана конструкция пылеуловителя ПВМ с более простым по конфигурации каналом (рис. 7.16, *а*). На рис. 7.16, *б* показана конструкция мокрого пылеуловителя ударного действия — скруббера Дойля. Газовый поток поступает через трубы, в нижней части которых установлены конусы, увеличивающие скорость газов в свободном сечении трубы. В щели на выходе из трубы скорость газов составляет 35—55 м/с. Двигаясь с этой скоростью, газовый поток ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из ка-

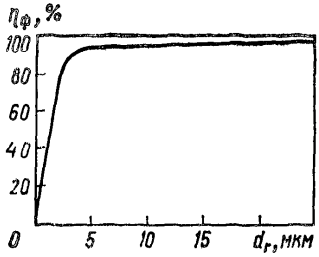


Рис. 7.15. Кривая фракционной эффективности ротоклона

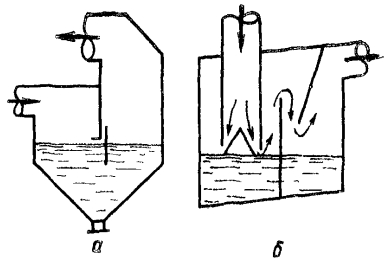


Рис. 7.16. Абсорбционные уловители ударно-инерционного типа:
а — типа ПВМ; *б* — скруббер Дойля

пель жидкости. Уровень жидкости в скруббере на 2—3 мм ниже кромки трубы. Расход жидкости в скруббере составляет около 0,13 кг/м³, а гидравлическое сопротивление — примерно 1500 Па.

Принцип использования центробежной силы для улавливания частиц пыли, широко используемой в циклонах, нашел применение и в ряде мокрых аппаратов. Центробежные скрубберы, применяемые на практике, конструктивно можно разделить на два вида: аппараты с тангенциальным подводом газов и аппараты, в которых вращение газового потока обеспечивается специальными направляющими лопатками. Скорость газов на входе в аппараты первого типа колеблется в пределах 15—60 м/с, а орошение осуществляется форсунками, устанавливаемыми в центральной части аппарата и вдоль его стенок аппарата (рис. 7.17). Расход орошающей жидкости в центробежных скрубберах составляет 0,65 кг/м³ газов, а гидравлическое сопротивление — порядка 320—570 Па. Расход воды на орошение циклонов с водяной пленкой составляет 0,13—0,3 кг/м³, гидравлическое сопротивление 400—800 Па.

Динамические газопромыватели. В газопромывателях этого вида очищаемые газы приводятся в соприкосновение с жидкостью, разбрызгиваемой вращающимся телом (валом с лопастями, перфорированным барабаном, дисками и т. п.).

Необходимость приложения механической энергии для контакта между очищаемыми газами и жидкостью является особенностью газоочистных аппаратов данной группы. Некоторые динамические газопромыватели являются также и дымососами.

Дезинтеграторы. Аппарат этого типа представляет собой мокрый пылеуловитель — вентилятор. Он состоит из статора и ротора, которые снабжены направляющими лопатками. Жидкость подается через сопла во вращающийся ротор.

Газовый поток, движущийся между кольцами ротора и статора со скоростью 60—90 м/с, а также направляющие лопатки обеспечивают интенсивное дробление жидкости на мелкие капли, что обусловливает интенсивный контакт газов и улавливаемых частиц с жидкостью. Образующаяся смесь под воздействием центробежной силы отбрасывается к стенкам аппарата и затем в виде шлама выводится из дезинтегратора, а очищенные охлажденные газы, пройдя аппарат, выводятся наружу.

Турбулентные газопромыватели. Эти газопромыватели применяют главным образом для очистки газов от тонкодисперсной пыли. Принцип действия аппаратов основан на интенсивном дроблении газовым потоком, движущимся с высокой скоростью (порядка 60—150 м/с), орошающей его жидкости. Осаждению частиц пыли на каплях орошающей жидкости способствуют *турбулентность газового потока* и высокие относительные скорости между улавливаемыми частицами пыли и каплями

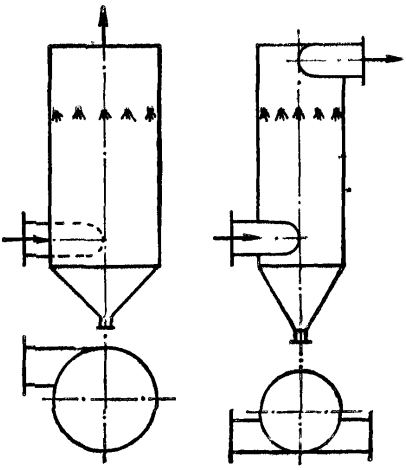


Рис. 7.17. Центробежные скрубберы:
а — типа ВТИ; *б* — типа ЛИОТ

К турбулентным промывателям относятся скрубберы Вентури, диафрагменные (дроссельные) и с подвижным дисковым шибером. Все перечисленные аппараты характеризуются высокой степенью очистки, большими гидравлическими потерями и необходимостью установки каплеуловителя. Наиболее распространенным аппаратом этого класса является скруббер Вентури, основную часть которого для снижения «вредных» гидравлических потерь выполняют в виде трубы Вентури, имеющей плавное сужение на входе газа (конфузор) и плавное расширение на его выходе (диффузор). Узкая часть трубы Вентури получила название горловины.

Существует большое число конструкций скрубберов Вентури, различающихся способом подвода орошающей жидкости, сечением и длиной горловины, компоновкой и т. д. На рис. 7.18, *а* и *б* показаны две конструкции скруббера Вентури, получившие название Пиз-Антони. В обеих конструкциях жидкость подводится в горловину под прямым углом к потоку газов, а осаждение капель происходит в аппарате центробежного действия. Различие состоит лишь в том, что в первой конструкции каплеуловителя вращение газового потока обеспечивается его тангенциальным подводом, а во второй для этого предусмотрено розеточное устройство, установленное в конце диффузора.

На рис. 7.18, *в* и *г* показана конструкция трубы Вентури, нормализованная институтами НИИОгаз и Гипрогазоочистка. При больших расходах очищаемых газов устанавливают несколько труб Вентури, образующих группу, или даже целую батарею труб.

Существуют различные точки зрения на оптимальный способ ввода орошающей жидкости в трубу Вентури (в горловину или в конфузор на некотором расстоянии от горловины, которое является оптимальным для обеспечения равномерной плотности орошения).

При подаче жидкости в горловину (скрубберы типа Пиз-Антони) требуется меньший расход жидкости по сравнению с подачей в конфузор.

Эффективность улавливания пыли в скрубберах Вентури увеличивается с ростом скорости газов в горловине и величины удельного орошения. Оптимальное соотношение между скоростью газов в горловине трубы и величиной удельного орошения специфично для каждой пыли и зависит от ее дисперсного состава. Так, при улавливании частиц пыли, размеры которых меньше 0,1 мкм, большое значение приобретает продолжительность контакта запыленных газов с поверхностью диспергированной жидкости. В этом случае повышение эффективности может быть достигнуто при снижении скорости газов до 50 м/с и увеличении удельного орошения до 3,0 л/м³.

Скрубберы Вентури в зависимости от гидродинамического режима делятся на низконапорные (при сопротивлении до 5000 Па) и высоконапорные (при сопротивлении 5000—25000 Па).

Эжекторные скрубберы Вентури. В аппаратах этого типа основная доля энергии, затрачиваемой на очистку газов, подводится к орошающей жидкости, причем частично эта энергия расходуется на транспортировку газов через аппарат, что обусловлено эжектирующим действием высокоскоростной струи жидкости.

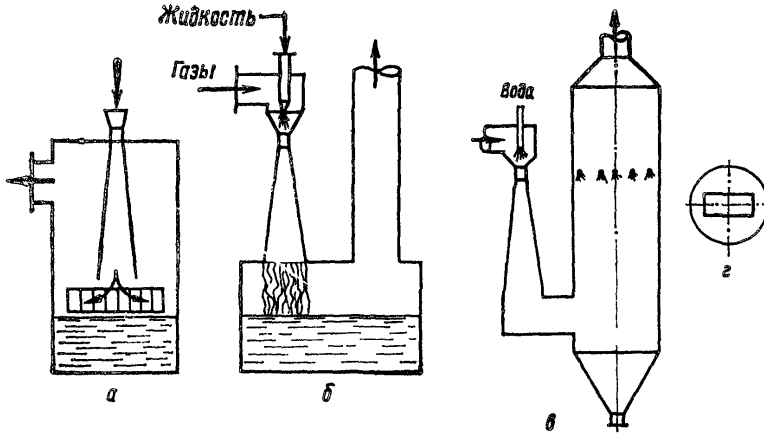


Рис. 7.18. Скрубберы Вентури:
а — с розеточным устройством; *б* — эжекторный скруббер Вентури; *в* — унифицированная труба Вентури с каплеуловителем; *г* — то же, в виде сужения в трубе

Принципиальная схема эжекторного скруббера представлена на рис. 7.18, *б*. Жидкость подается в распыливающую форсунку под давлением 600—1000 Па и более и увлекает за собой очищаемый газовый поток.

Диафрагменный (дисковый) скруббер. Для очистки доменного газа на ряде заводов США вместо труб Вентури устанавливают диск с одним или несколькими прямоугольными отверстиями (рис. 7.18, *г*). Такой диск монтируется в большом газопроводе, а вода впрыскивается через многочисленные форсунки, устанавливаемые вокруг диска.

Принцип действия дискового устройства аналогичен принципу действия скруббера Вентури, но потери напора в нем больше (что обусловлено «вредным» гидравлическими сопротивлениями). Поэтому такой скруббер обычно устанавливают после доменных печей, работающих под давлением, в качестве аппарата предварительной очистки (перед мокрым электрофильтром). Применение дискового скруббера объясняется его низкой стоимостью и возможностью обработки большого количества газов. Гидравлическое сопротивление в дисковом скруббере составляет примерно 17 500—25 000 Па.

На рис. 7.19 представлено абсорбционное устройство для очистки газов типа ТММ (продольный разрез и вид сверху), являющегося наиболее перспективным. В верхней части устройства расположена прямоугольная входная камера *3* с патрубками *4* для ввода газа, в камере имеются форсунки *5*. Под камерой расположен газоход *6*, выполненный в виде трубы Вентури. Перед входом в трубу Вентури расположен клапан *2* с тягой *1*, выведенной выше прямоугольной камеры. В нижней части трубы Вентури находится рассекатель *7*. К трубе Вентури через щелевидные каналы *8* примыкают две цилиндрические вихревые камеры *9* с общей ванной для жидкости *10*. В вихревых цилиндрических камерах в центральной их части установлены трубы *11* с продольными прорезями, образующие ловушки жалюзийного типа, трубы снабжены патрубками *12*.

В ванне установлены перфорированные трубы, через которые поступает часть циркуляционной жидкости для исключения отложений твердых частиц в ванне (постоянное взмучивание).

При поступлении газа во входную камеру *3* через патрубки *4*, расположенные один против другого, газ увлажняется жидкостью, распыляемой форсунками *5*. Размер частиц после прохождения входной камеры при пер-

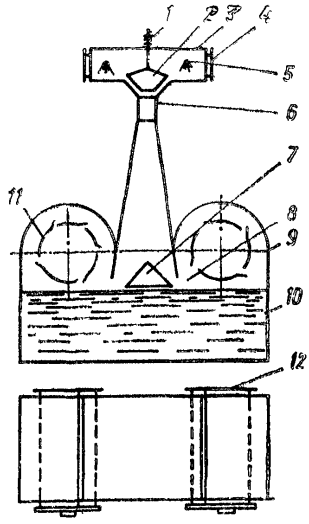


Рис. 7.19. Абсорбционное устройство для очистки газов типа ТММ

воначальном размере $d_0 < 10$ мкм можно определить по формуле:

$$d = 6{,}3 d_0^{0{,}2}. \qquad (7.4)$$

Не вступившая в контакт жидкость стекает на стенки суживающейся части трубы Вентури. Входная камера может служить одновременно и для охлаждения горячих газов, подаваемых на очистку. После входной камеры газ проходит через трубу Вентури и продольные щелевидные каналы *8*, регулируемые при наладке перемещением рассекателя *7*, и затем поступает тангенциально в цилиндрические камеры *9*. Величина сечения горловины трубы Вентури регулируется перемещением клапана *2* тягой *1*, выведенной выше прямоугольной камеры.

Очистка газов в месте сопряжения трубы Вентури с цилиндрическими камерами обеспечивается ударом газовой струи о зеркало жидкости, стекающей в ванну со стенок трубы Вентури

В цилиндрических камерах газ движется в основном в узкой области, прилегающей к стенкам камер, и затем поступает в ловушки жалюзийного типа.

Очистка газов в цилиндрических камерах (циклонах) основана на инерционном принципе и принципе центробежной сепарации. Очищенные газы удаляются через ловушки, имеющие трубы *12*, расположенные в торцовых стенках цилиндрических камер.

При очистке горячих газов аппарат может быть защищен футеровкой. Для очистки агрессивных газов аппарат можно выполнить из пластмасс, нержавеющей стали или нанести на его стенки соответствующее антикоррозийное покрытие

Ниже приведен сопоставительный анализ устройства очистки газовых выбросов типа ТМ с имеющимися устройствами очистки.

В аппаратах этого типа более высокая эффективность очистки достигается:

а) увеличением среднего размера частиц в результате их слипания в верхней прямоугольной камере при движении газовых струй;

б) устройством ловушек жалюзийного типа, расположенных в цилиндрических вихревых камерах (циклонах). Возможность дополнительной ступени очистки, позволяющей одновременно уменьшить каплеунос, обусловлена тем, что газовый поток в вихревой зоне движется в основном в узкой области, прилегающей к стенкам обечаек. Относительное скоростное поле газов в вихревых цилиндрических камерах приведено на рис. 7.20,

в) совмещением в одном устройстве нескольких ступеней очистки газового потока.

Суммарную степень очистки газов в нескольких аппаратах (или ступенях очистки), установленных последовательно, рассчитывают по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \ldots (1 - \eta_n), \qquad (7.5)$$

где $\eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_n$ — степень очистки газов соответственно в первом, втором и n-м газоочистном аппарате.

Для абсорбционного устройства ТМ степень очистки газов составит:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_к)(1 - \eta_{тр})(1 - \eta_{цл})(1 - \eta_{уд})(1 - \eta_ц)(1 - \eta_ж), \qquad (7.6)$$

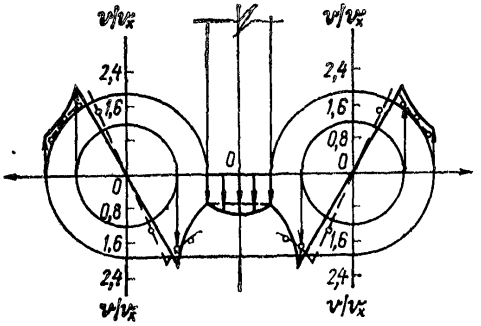


Рис. 7.20. Относительное скоростное поле газов в вихревых цилиндрических камерах абсорбционного устройства типа ТММ (v — скорость воздуха в центре, м/с; v_x — скорость воздуха на расстоянии x от центра)

где $\eta_к$ — степень очистки при коагуляции; $\eta_{тр}$ — степень очистки в трубе Вентури; $\eta_{пл}$ — степень очистки при прохождении через пленку жидкости, стекающей с трубы Вентури; $\eta_{уд}$ — степень очистки при ударе газового потока о зеркало жидкости; $\eta_ц$ — степень очистки при прохождении газов через цилиндрические вихревые камеры (циклоны); $\eta_ж$ — степень очистки при прохождении газов через жалюзийные ловушки, установленные в цилиндрических вихревых камерах.

На рис. 7.21 приведены габаритные и присоединительные размеры абсорбционного устройства типа ТММ для очистки газов. В табл. 7.7 представлены размеры различных аппаратов очистки (рис. 7.22), а также их массы.

Из сравнения данных табл 7 7 следует, что наиболее компактным и менее металлоемким является абсорбционное устройство типа ТММ, что объясняется органическим сочетанием высокоскоростных зон устройства без технически сложных транспортных переходов между ними, что приводит к еще большей надежности его работы

Устройство типа ТММ ввиду его компактности (т. е высокой удельной производительности) дает возможность реализации прогнозируемых агрегатных установок большой производительности (для котельных ТЭЦ, обжиговых и агломерационных металлургических печей)

Широкое применение абсорбционного устройства типа ТММ обусловлено еще и тем, что в нем происходит коагуляция частиц с образованием крупных агрегатов (размером 0,1 мкм и более), а это значительно облегчает последующее их осаждение в трубе Вентури Границы применения абсорбционного устройства типа ТМ для очистки газов показаны на рис. 7.23.

Регулирование эффективности очистки в абсорбционном устройстве типа ТМ, а также производительности осуществляется тремя способами:

1) перемещением клапана *2* (см. рис. 7.19) тягой *1* выведенной за пределы верхней части входной прямоугольной камеры;

2) перемещением рассекателя *7*;

3) изменением уровня реакционной жидкости в ванне

Первые два способа регулирования наиболее эффективны и используются при наладке устройства. Третий способ применяют при необходимости более тонкого регулирования.

Еще одним преимуществом устройства ТММ является меньшее число типоразмеров, что объясняется возможностью более широкого регулирования производительности при постоянной эффективности очистки газового потока.

При использовании группы устройств очистки ТММ (обезвреживание одноименных вредных веществ) сборный бак и циркуляционные насосы могут быть общими (рис 7 24)

Одной из модификаций устройства очистки газов типа ТММ является аппарат с вихревыми камерами, в которые загружают легкие полистирольные или какие-либо другие легкие шарики (рис. 7.25), что способствует уве-

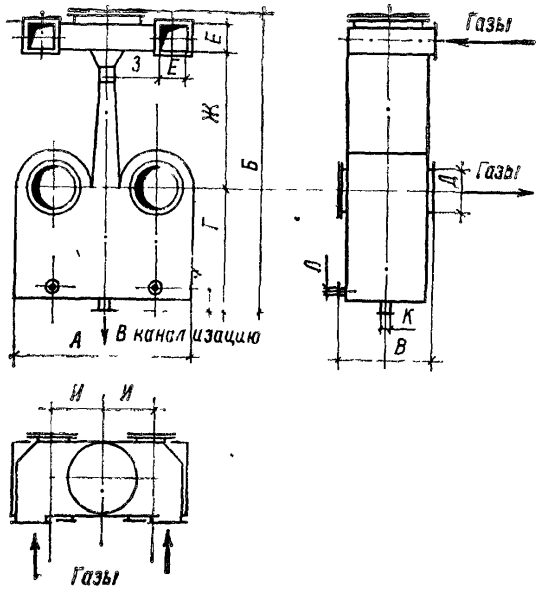


Рис 7 21. Габаритные и присоединительные размеры абсорбционного устройства типа ТММ, мм:

ТММ	А	Б	В	Г	Д	Е
1	1180	1720	635	860	*D*—273	150
2	1510	2395	735	860	*D*—325	200
3	1510	2395	1135	860	*D*—325	200
4	2490	3390	1135	1300	*D*—530	500
5	2490	3300	1900	1300	*D*—530	600

ТММ	Ж	З	И	К	Л	М
1	544	404	378	*D*—76	*D*—25	150
2	1170	468	490	*D*—76	*D*—25	150
3	1170	468	490	*D*—76	*D*—25	150
4	1320	695	795	*D*—76	*D*—25	150
5	1320	595	795	*D*—76	*D*—25	150

личению степени контакта газа и жидкости. В вихревых камерах можно установить также вращающиеся жалюзийные уловители

Гидравлическое сопротивление турбулентных газопромывателей складывается из сопротивления сухого аппарата (газопромывателя без жидкости) и сопротивления, возникающего от подачи жидкости (давление, которое приходится преодолевать при транспортировании и дроблении жидкости). На номограмме (рис 7 26) приведены значения общего сопротивления. Необходимо иметь в виду, что коэффициент местного сопротивления трубы Вентури ξ, составляет 0,1 – 0,15, в зависимости от тщательности изготовления, но в производственных условиях значение его возрастает до 0,25—0,3 вследствие образования ржавчины, отложений и др

Фракционный коэффициент улавливания пылевых частиц в трубе Вентури приближенно можно определить по формуле

$$\eta = 1 - \frac{1}{e^{1{,}56 \cdot 10^{3} \sqrt{St}}} \qquad (7.7)$$

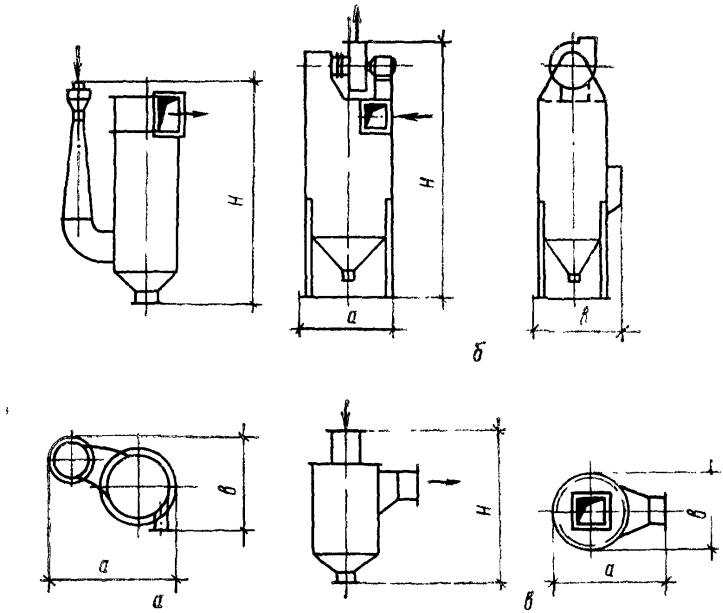


Рис. 7.22. Схемы и габаритные размеры мокрого пылеуловителя (труба Вентури) типа КМП (а), типа ПВМ (б) и УСД-ЛИОТ (в)

где η — коэффициент улавливания пыли, доли единицы; L — удельный расход жидкости в трубе Вентури, л/м³ газа; St — критерий Стокса;

$$\mathrm{St} = \frac{\rho_ч v_г d^2_ч}{18 \nu \rho_г D_0}; \qquad (7.8)$$

$\rho_ч$ — плотность пылинок, кг/м³; $\rho_г$ — плотность газа в горловине трубы, кг/м³; $v_г$ — скорость газа в горловине трубы, м/с; $d_ч$ — диаметр частиц аэрозоля, м; ν — кинематическая вязкость газа в горловине трубы, м²/с; D_0 — средний диаметр капель, мкм;

$$D_0 = 4870/v_г + 28L^{1,5}, \qquad (7.9)$$

где L — удельный расход жидкости в трубе Вентури л/м³ газа.

Для нахождения диаметра капель в зависимости от скорости газа в горловине и удельного расхода жидкости можно воспользоваться номограммой на рис. 7.27, для нахождения критерия Стокса — номограммой на рис. 7.28. На рис. 7.29 даны значения для различных удельных расходов жидкости и значения критерия Стокса.

7.4.3. Термическое обезвреживание газовых выбросов и его аппаратурное оформление

Метод термического обезвреживания газовых выбросов отличается от абсорбционного и адсорбционного методов более высокой степенью очистки, отсутствием в большинстве случаев коррозионных сред и сточных вод. Метод применяют в тех случаях, когда другие не являются достаточно надежными и не гарантируют высокой или полной эффективности очистки, например, при уничтожении болезнетворных микробов или запаха,

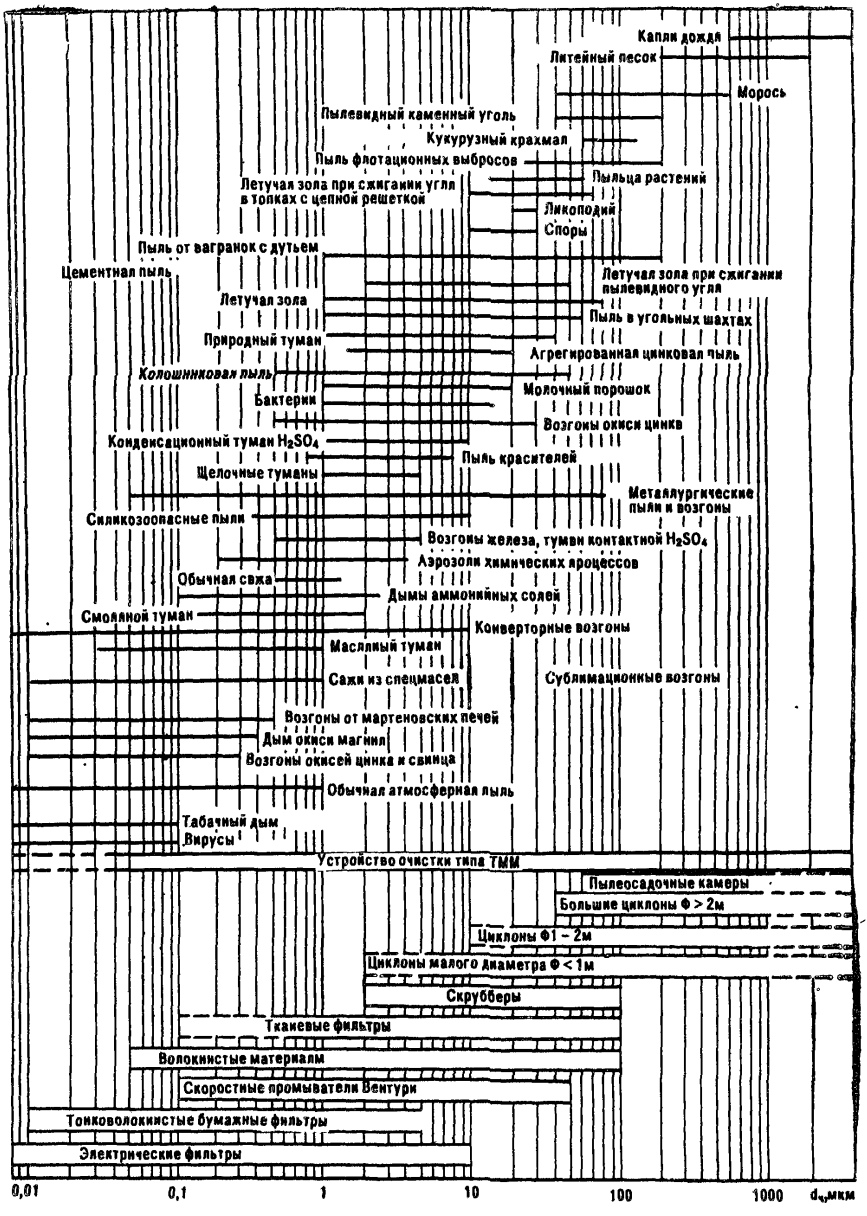
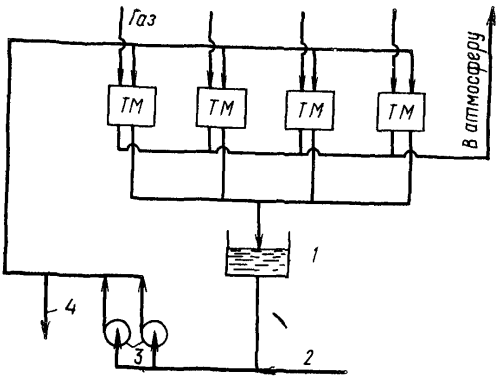


Рис. 7.23. Границы применения абсорбционного устройства типа ТМ



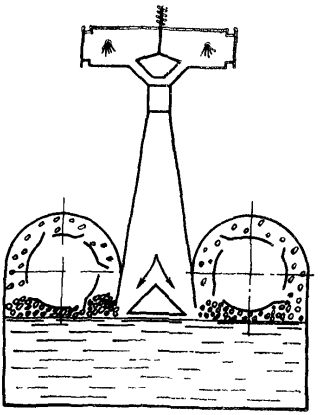


Рис. 7.24. Принципиальная схема обвязки по воде группы абсорбционных устройств типа ТММ:

1 — сборная емкость; *2* — подпитка жидкости; *3* — насосы; *4* — сброс жидкости

Рис. 7.25. Абсорбционное устройство для очистки газов типа ТММ с загрузкой в вихревые камеры легких шариков

Установки термического обезвреживания просты по конструкции и занимают меньшую площадь, чем установки адсорбционной очистки. Недостатками термического обезвреживания газовых выбросов являются образование оксидов азота и значительный расход топлива.

При рассмотрении возможности применения метода термического обезвреживания и определения конкретных параметров его осуществления необходимо учитывать характер образующихся при окислении продуктов реакции. Так, при сжигании газов, содержащих фосфор, галогены, серу, образуются продукты реакции, часто во много раз превышающие по токсичности исходный газовый выброс. Другой пример — термическое обезвреживание сероводородосодержащих газов. При определенных температурных условиях образуется SO_3 — соединение, токсичность которого в три раза выше, чем сероводорода. В то же время при правильном ведении процесса конечным продуктом окисления является SO_2 — вещество менее токсичное, чем сероводород.

Метод термического обезвреживания применим для выбросов, содержащих токсичные вещества в виде твердых включений органического происхождения (сажу, частицы углерода, древесную пыль и т. д.), и выбросов, содержащих токсичные компоненты органического происхождения, но не включающие в себя значительное количество галогенов, фосфора и серы.

Следующий важный параметр, учитываемый при выборе аппаратурно-технологической схемы термического обезвреживания, — это температура самовоспламенения вредных веществ. Ниже приведены температуры самовоспламенения некоторых веществ, °С:

Аммиак	649
Ацетон	538
Бензол	579
Бутадиен	449
Бутиловый спирт	367
Винилацетат	426
Водород цианистый	538
Глицерин	393
Дибутилфталат	404
Дихлорметан	640
Дихлорэтилен	413
Керосин	254
Крезол	559
Ксилол	496

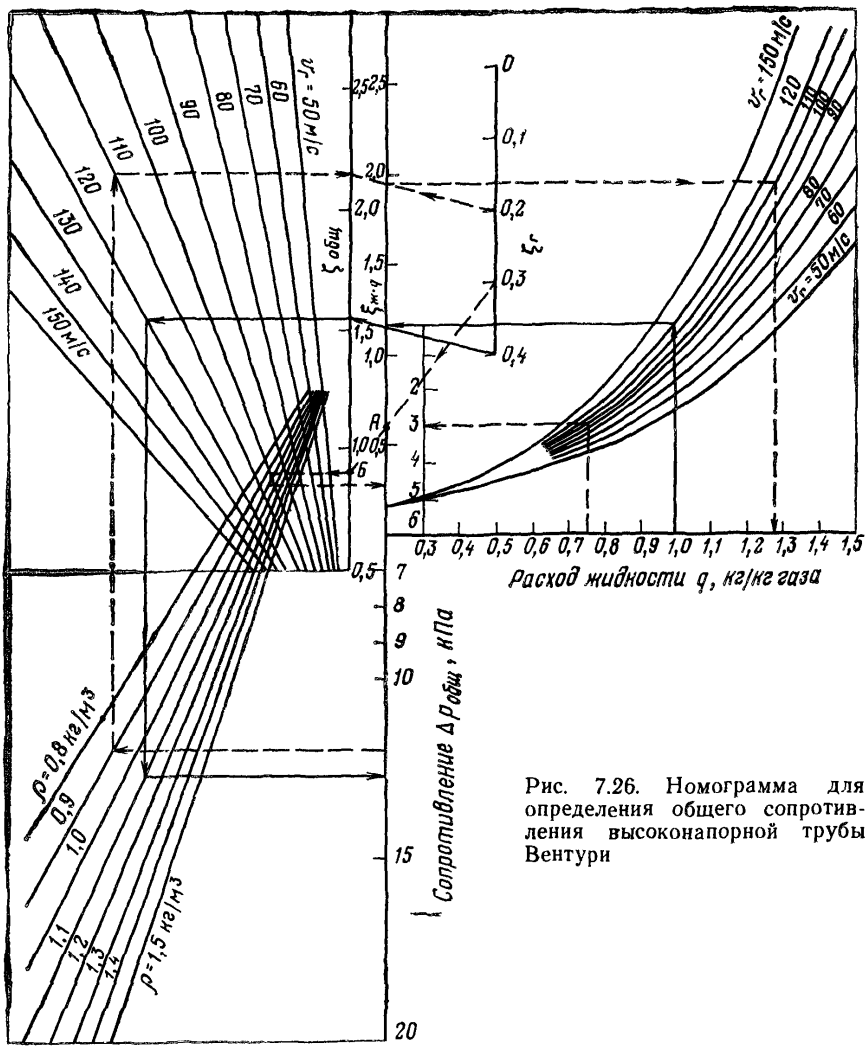


Рис. 7.26. Номограмма для определения общего сопротивления высоконапорной трубы Вентури

Пропан	468
Пропилен	504
Сероводород	260
Скипидар	253
Стирол	491
Толуол	552
Углерода оксид	652
Метан	537
Метиловый спирт	470
Метиловый эфир	350
Метилэтилкетон	516
Нитробензол	496
Олеиновая кислота	363
Фенол	715
Фталиевый ангидрид	584
Фурфурол	393
Фурфуроловый спирт	490
Хлорбензол	674
Циклогексан	268
Этан	510
Этилацетат	486
Этилбензол	466

Этилена оксид	430	Этиловый спирт	426
Этиленгликоль	413	Этиловый эфир	186

При транспортировании и сжигании вредных выбросов необходимо предусматривать определенные технические мероприятия, предотвращающие обратное распространение пламени (различной конструкции огнепреградители).

Наиболее простым приемом предотвращения обратного распространения пламени является разбавление газовой смеси воздухом до обеспечения взрывобезопасной смеси.

Н. А. Гуревичем предложено газовые выбросы разделить на три основные группы в зависимости от низшей теплоты сгорания $Q^{p}_{н}$ и содержания кислорода в газе X_{O_2} (табл. 7.8).

В ИГ АН УССР разработан метод термического обезвреживания газовых выбросов, заключающийся в использовании этих газов вместо дутьевого воздуха при сжигании высококалорийного топлива. Для обеспечения надежного и качественного горения природного газа минимальное содержание кислорода в газовых выбросах должно быть около 17%. Исходя из этого, предложено все отбросные газы разбить на две группы:

газы с содержанием кислорода менее 17%, которые можно рассматривать лишь в качестве добавки к дутьевому воздуху;

газовые выбросы с содержанием кислорода более 17% Эти газы могут полностью заменить чистый воздух в качестве окислителя

При рассмотрении вопроса термического обезвреживания газовых выбросов особое место следует уделить выбросам, содержащим конденсирующиеся вещества (пары нефтепродуктов, смолы и т д.) и горючую пыль, имеющую высокую слипаемость. При транспортировании этих газов наблюдаются локальные отложения горючих веществ, особенно в местах резкого изменения направления движения газового потока или изменения сечения газохода. Это часто приводит к воспламенению скопившихся горючих веществ, что вызывает аварийную ситуацию В качестве контрмероприятий в этих случаях применяют либо искусственное выжигание скопившихся в газоходах горючих отложений, либо периодическую продувку газоходов паром (так называемая «пропарка»).

Все это необходимо учитывать при решении вопроса о возможности термического обезвреживания вредных выбросов того или иного производства.

Для обезвреживания промышленных газообразных отходов сложного состава применяют метод высокотемпературного (800—1200 °С) сжигания примесей в пламенных печах и факелах. При этом углеводороды окисляются до безвредных продуктов - углекислого газа и воды. Очевидно, что высокотемпературное сжигание целесообразно применять только при высокой

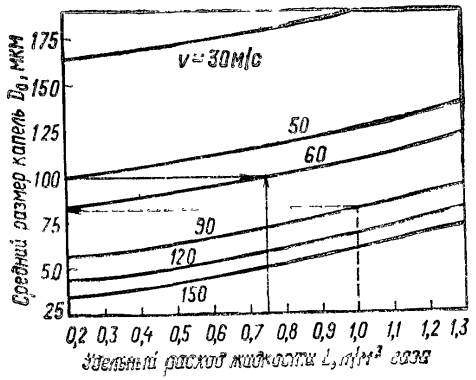


Рис. 7.27. Номограмма для нахождения диаметра капель в зависимости от скорости газа в горловине высоконапорной трубы Вентури и удельного расхода жидкости

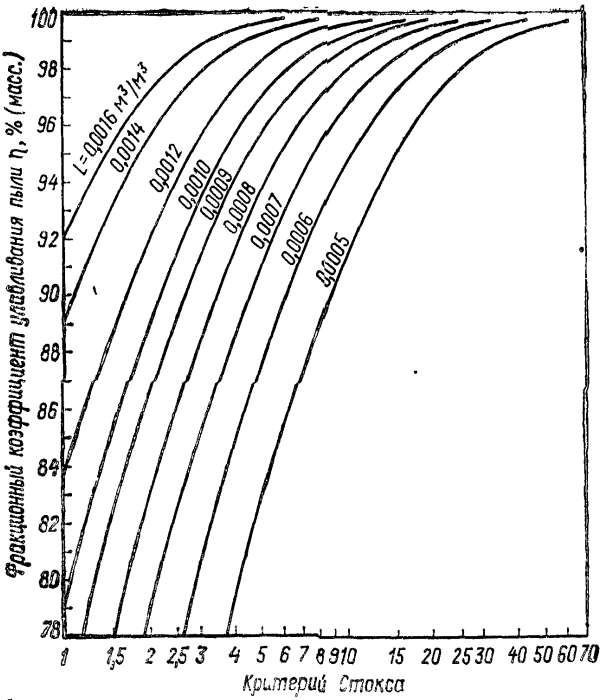


Рис. 7.28. Номограмма для нахождения критерия Стокса

теплоте сгорания самих отходящих газов. При рассмотрении применимости варианта термического обезвреживания необходимо кроме экономического аспекта учитывать возможность вторичного загрязнения атмосферы оксидами азота, образующимися в значительных количествах в агрегатах с высокой теплонапряженностью топочного пространства.

Существуют различные типы аппаратов термического обезвреживания газовых выбросов, и их можно разделить на следующие группы:

камерные печи;

печи с использованием циклонного принципа движения газов;

регенеративные установки термического обезвреживания;

аппараты со струйным смешением;

системы обезвреживания в технологических аппаратах (паровые котлы и т. п.).

Одним из современных и перспективных методов обезвреживания вредных органических примесей и оксида углерода в газовых выбросах сложного состава является глубокое каталитическое окисление, обеспечивающее достаточно высокую степень очистки при расходе топлива, в несколько раз меньшем по сравнению с расходом при термическом методе.

Существует область температур и времени контакта, в которой при осуществлении процесса в промышленном масштабе эксплуатационные расходы минимальны. Анализ практических условий работы установок каталитической очистки показывает, что эти температуры лежат в пределах 300—450 °С, а время контакта составляет соответственно 0,1—0,5 с, а иногда до 1 с.

Катализаторы обычно работают при концентрациях горючих ниже 25% от нижнего предела самовоспламенения: с превышением этой концентрации развивается высокая температура и катализатор может выгорать. Обычно

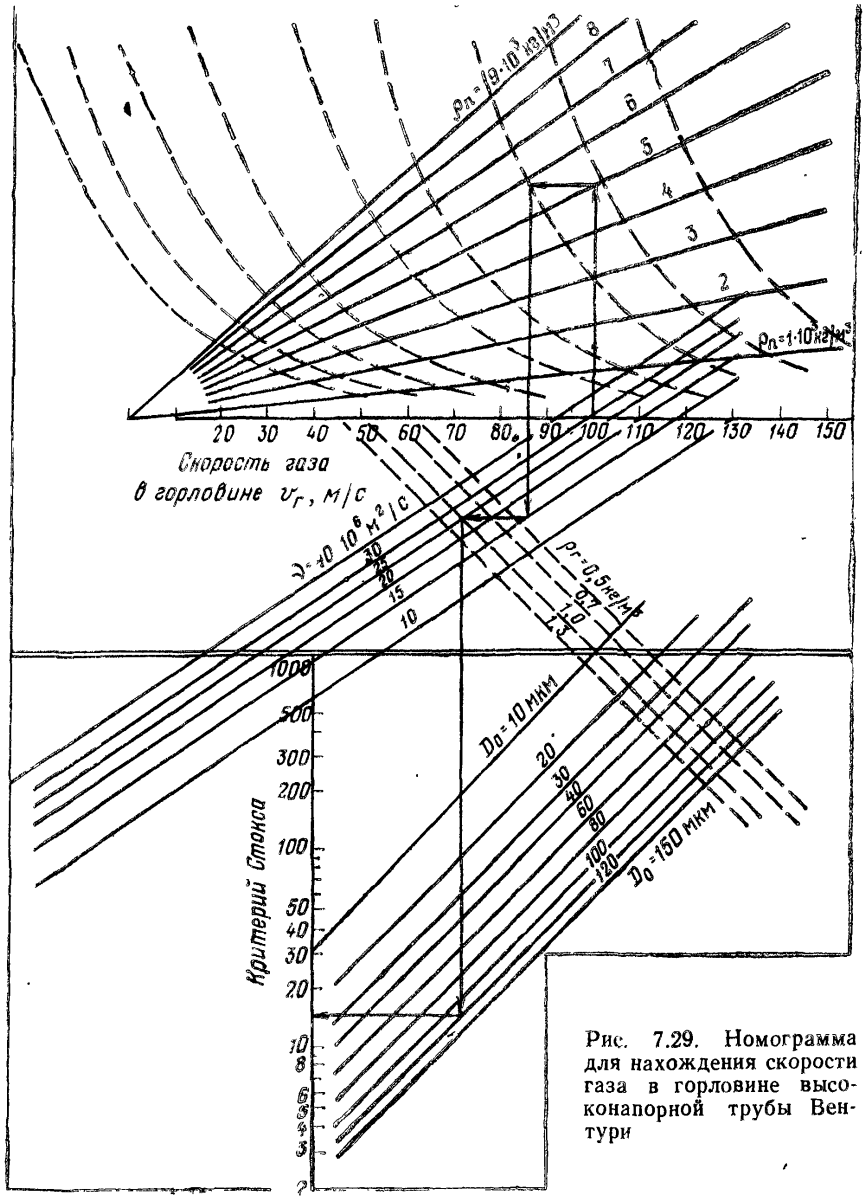


Рис. 7.29. Номограмма для нахождения скорости газа в горловине высоконапорной трубы Вентури

максимальная рабочая температура его не превышает 800—850 °С. Это вносит осложнения в эксплуатацию в условиях переменных концентраций примесей.

Катализаторы *чувствительны к составу обезвреживаемых газов.* Некоторые элементы (фосфор, кремний, свинец, железо, ванадий, мышьяк) даже в

Таблица 7.8. Пределы низшей теплоты сгорания $Q_н^р$ и содержания кислорода X_{O_2} в газовых выбросах различных видов

Газовые выбросы	X_{O_2}	$Q_н^р$
Низкокалорийные газы	5	300
Отработанный воздух	5—18	300—100
Загрязненный воздух	18	100

Таблица 7.9. Катализаторы, применяемые для промышленной очистки газовых выбросов

Тип катализатора	Активное вещество	Материал-носитель	Форма
Цельнометаллический	Неблагородные металлы; металлы Pt-группы	Нержавеющая сталь	Ленты, спирали, листы
	То же	То же	То же
Смешанный	Неблагородные металлы и оксиды Pt- и Pd-группы	Al_2O_3 и нержавеющая сталь	»
Керамический с регулярным расположением элементов	Металлы Pt-группы	Al_2O_3	Соты и решетки
	Оксиды неблагородных металлов	Al_2O_3	То же
Насыпной	Металлы Pt-группы	Al_2O_3	Шарики, цилиндрики, таблетки
	Оксиды неблагородных металлов	Al_2O_3	Гранулы неопределенной формы

очень малых количествах могут отравлять катализатор. Ухудшают работу катализаторов и сокращают сроки их службы галогены и сера как в элементной форме, так и в соединениях. Например, недопустима концентрация хлорорганических и сернистых соединений порядка 1000—5000 мг/м³ из-за отравляющего действия соляной кислоты и триоксида серы. Наконец, каталитическое окисление неприменимо для газов, содержащих высококипящие или высокомолекулярные соединения, вследствие неполного сгорания и забивания поверхности катализатора.

Достоинства: простота и универсальность. Один и тот же катализатор можно использовать для работы на различных видах выбросов, изменив расход топлива и соответственно температуру в реакционной зоне.

Применяемые для промышленной очистки газов катализаторы можно разделить на четыре группы (табл 7.9).

Условия проведения реакции глубокого окисления, температура процесса, аэродинамическая обстановка, структура и геометрические характеристики используемого катализатора определяют конструкцию аппаратов для проведения каталитического обезвреживания примесей промышленных газообразных выбросов.

Многочисленные промышленные процессы газоочистки, основанные на каталитических реакциях окисления, имеют различные варианты технического осуществления (рис. 7.30).

Схему простого каталитического дожигания (рис. 7.30, *а*) применяют при очистке отходящих газов небольшого объема и в отсутствие потребителя горячего теплоносителя. Очищаемый газ, если его температура ниже необходимой для процесса дожигания, нагревают до требуемой температуры и направляют на катализатор. После прохождения через слой катализатора

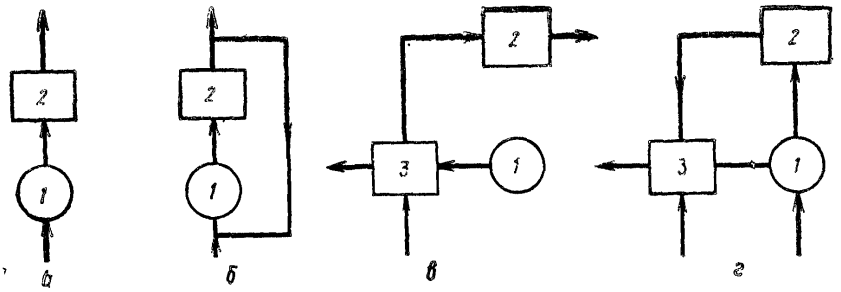


Рис. 7.30. Схемы каталитического обезвреживания газовых выбросов.

а — без рециркуляции газов; *б* — с частичной рециркуляцией газов; *в* — с теплообменником на дымовых газах; *г* — со смесительным теплообменником; *1* — подогреватель; *2* — реактор; *3* — теплообменник

газ выбрасывается в атмосферу, а полученное им тепло остается неиспользованным.

Схему с частичной рециркуляцией газов (рис. 7.30, *б*) используют для достижения некоторой экономии топлива. При этом способе появляется возможность регулирования концентрации компонентов в газе, поступающем в контактное устройство. Кроме того, в результате разбавления предотвращается возможность возникновения в лобовых слоях катализатора температурных пиков и его разрушения

«Мазутную» схему (рис. 7.30, *в*) применяют тогда, когда в дымовых газах после сжигания топлива содержатся соединения, являющиеся ядом для катализатора. В этом случае подогрев очищаемых газов до температуры начала реакции глубокого окисления примесей на катализаторе осуществляется в теплообменном устройстве.

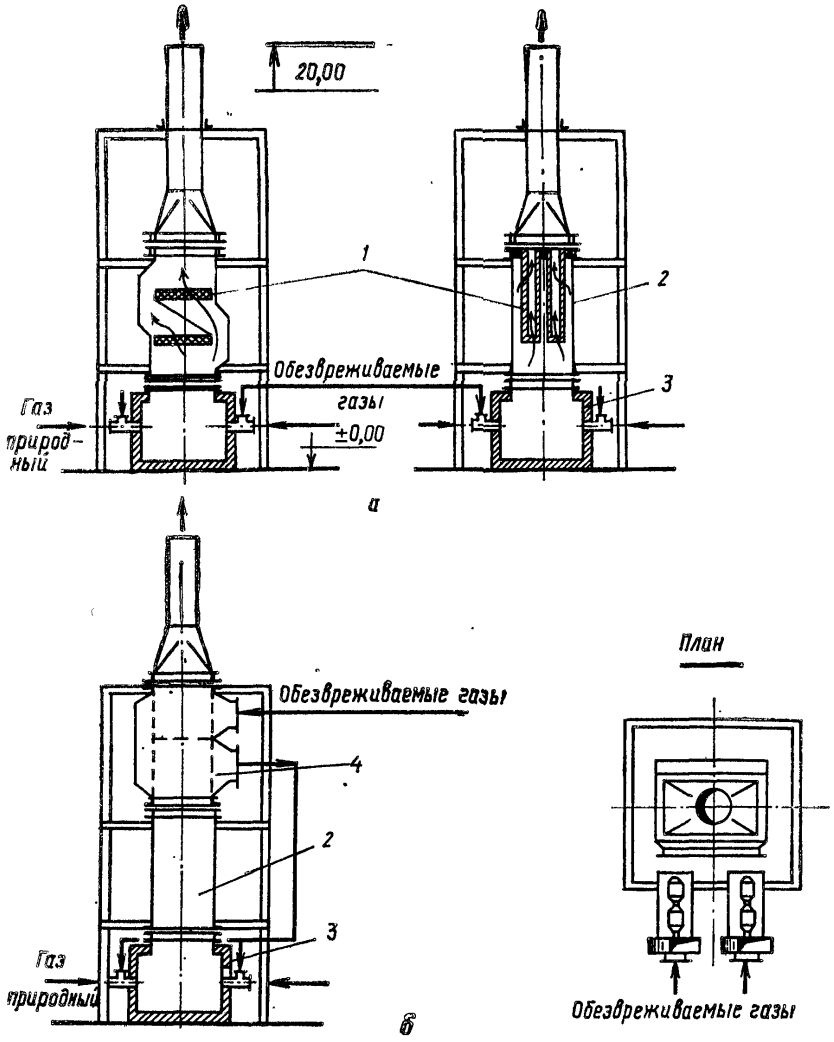
Схема установки каталитического дожигания с утилизацией тепла (рис. 7.30, *г*), кроме подогревателя и контактного устройства, оснащена утилизатором тепла. В зависимости от температуры очищенных газов тепло может быть использовано для получения горячей воды, технического пара или же в общем энергетическом балансе источника выделения вредных веществ, например для сушки окрашенных изделий в сушильных камерах окрасочных линий машиностроительных предприятий.

При оценке различных схем, естественно, возникает вопрос о предельных возможностях экономии топлива в результате регенерации тепла. Теоретически расход дополнительного топлива может быть сколь угодно малым, так как в предельном случае при любой величине температурного напора в теплообменнике можно обеспечить подогрев газов за счет развития поверхности теплообмена. Однако в реальных устройствах существуют определенные технические ограничения, которые и диктуют величину практически достижимого минимума расхода дополнительного топлива.

При уменьшенном расходе дополнительного топлива труднее рационально организовать рабочий процесс в реакционной камере. Минимальный расход топлива может составить 3–5 кг условного топлива на 1000 м³ обезвреживаемых газов без учета теплоты сгорания окисляемых примесей.

Различные схемы каталитического обезвреживания обусловливают многообразие их аппаратурного оформления в зависимости от типа катализатора и расположения (горизонтальное или корзиночное) топок, рекуператоров и т. п. На рис. 7.31 показаны два типа топок каталитического обезвреживания объединенных в одном корпусе (с рекуперацией тепла и без нее) и занимающих минимальные производственные площади.

Температура реакции окисления различных веществ на различных катализаторах контактного типа изменяется в широких пределах: от 200 до 430 °С (табл. 7.10).



ис. 7.31. Топки для каталитического обезвреживания:

- без рекуперации тепла; *б* — с рекуперацией тепла; *1* — катализатор; *2* — контактный парат; *3* — топка; *4* — воздухоподогреватель или водоподогреватель

Выбор и оценка различных катализаторов должны проводиться с уче-м состава, количества образующихся газов, технологии производства, концентраций и особенностей сгорающих веществ и примесей. Считают, что кализаторы на металлическом носителе обладают рядом преимуществ по авнению с другими: большой срок службы катализатора (до 10 лет), воз-жность регенерации, высокая механическая прочность, устойчивость к ис-ранию, небольшая масса, большая поверхность соприкосновения с обраба-ваемым газом. Высокая механическая прочность, термостабильность и не-

Таблица 7.10. Температура начала реакции глубокого каталитического окисления различных органических веществ по данным различных источников, °С

Окисляемое вещество	Коуль *	Decatox **	Sater ***
Альдегиды	316—371	234—273	—
Амины	—	250—346	—
Антрацены	316—371	—	—
Ацетилен	—	207—241	—
Бензин	—	261—298	—
Бензол	—	—	277
н-Бутан	—	303—343	299
Водород	343	—	—
н-Гексан	—	208—243	332
н-Гептан	—	200—240	304
Глицерин	—	293—329	—
н-Декан	—	—	260
н-Додекан	—	—	280
Ксилол	—	200—240	304
Лаки	316—371	—	—
Малеиновая кислота	316—343	—	—
Метан	—	—	404
Муравьиная кислота	—	339—389	—
Нафталин	—	338—386	—
Нафтахиноны	316—343	—	—
Нитротолуол	—	265—297	—
Оксид углерода	316—343	—	—
н-Октан	—	200—240	254
Парафин	316—371	229—279	—
Выбросы пенициллинового производства	—	218—254	—
н-Пентан	—	—	310
Пластификаторы	—	245—315	—
Пропан	—	293—332	343
Пропилен	—	239—282	—
Растворители	260—400	—	—
Сероводород	—	208—243	—
Смолы	260—400	—	—
н-Тетрадекан	—	—	288
Тринитротолуол	—	215—250	—
Толуол	—	*314—361*	238
Уксусная кислота	—	300—341	—
Фенол	216—427	315—343	—
Формальдегид	316—343	—	—
Фталевая кислота	316—343	—	—
Щавелевая кислота	—	339—389	—
Этан	—	300—340	360
Этанол	—	261—293	—
Этилен	—	247—290	—
Эфир	—	208—243	—

* *Коуль А. Л., Ризенфельд Ф. С.* Очистка газов. М., Гостоптехиздат, 1962.

** DECATOX. Katalytische Abgasreinigung. Проспект-каталог фирмы «B. Sehilde A. G», Бад херсфельд (ФРГ).

*** *H. R. Suter.* J. of the Air Poll. Control ASS. 1955. V. 5. № 3. P. 173.

значительное гидравлическое сопротивление делают металлические катализаторы пригодными для очистки *больших объемов газовых выбросов.*

В табл. 7.11 для ряда органических веществ приведены значения температуры, обеспечивающие эффективность их обезвреживания, равную 99% при времени контакта 0,36 с с начальной концентрацией 1 мг/л. Из таблицы видно, что органические вещества полностью окисляются при 200—430 °С, при этом температура окисления зависит как от окисляемого вещества, так и от катализатора. Следует отметить, что катализатор, оптимальный в реакции окисления одного компонента, может оказаться малоактивным при окислении другого.

Наряду с достоинствами метод каталитического обезвреживания газовых выбросов имеет и такие существенные недостатки, как сложность аппаратурного оформления и сравнительно высокие капитальные и эксплуатационные затраты.

7.4.4. Адсорбционная очистка газовых выбросов

Адсорбция — процесс избирательного поглощения одного или нескольких компонентов из газовой или жидкой смеси твердыми телами, при этом происходит концентрирование вещества из газовой или жидкой фазы на поверхности или в объеме пор твердого тела.

Адсорбционные методы очистки и рекуперации органических веществ обеспечивают высокую степень извлечения улавливаемых веществ при малых их концентрациях в газовоздушной смеси, позволяют улавливать практически любые растворители. Ниже рассмотрены процессы адсорбции только из газовой фазы.

Адсорбенты, применяемые для очистки газов, должны обладать высокой адсорбционной способностью, селективностью, инертностью по отношению к адсорбату и газу-носителю, механической прочностью, способностью к регенерации, низкой стоимостью. В зависимости от природы материала, метода обработки и структуры различают несколько типов адсорбентов, имеющих различную истинную, кажущуюся и насыпную плотность (табл. 7.12).

Основные виды промышленных адсорбентов и ионообменных материалов. *Активные угли* имеют ряд особенностей, определяемых характером их поверхности и пористости. Поверхность углерода электронейтральна, и адсорбция на углях в основном определяется дисперсионными силами взаимодействия. При выборе углей учитывают также их гидрофобность и горючесть. Отечественной промышленностью выпускаются угли марок АГ, КАУ, СКТ различных модификаций и рекуперационные угли марок АР, АРТ, СКТ-3 (табл. 7.13).

Силикагели — синтетические минеральные адсорбенты, используемые в основном для осушки газовых потоков. В ряде случаев силикагели конкурентоспособны *по отношению к активным углям,* что обусловлено их негорючестью и низкой температурой регенерации (100—200 °С).

По своей природе силикагели — гидрофильные адсорбенты с высокой адсорбционной емкостью. Отечественной промышленностью выпускаются кусковые зерна неправильной формы и гранулированные твердые стекловидные или матовые зерна размером 0,2—0,7 мм, насыпной плотностью 400—900 кг/м³. В гранулированные силикагели в качестве упрочняющей добавки против растрескивания вводят 4—10% триоксида алюминия (табл. 7.14).

Крупнопористые силикагели применяют преимущественно для адсорбции газов и паров при их высокой концентрации и для предварительной осушки, так как он легко отдает адсорбированную *влагу при температуре* до 100 °С.

Цеолиты представляют собой каркасные алюмосиликаты, содержащие в своем составе молекулы воды, а также катионы — элементы I и II групп Периодической системы.

Отличительной особенностью цеолитов является их способность адсорбировать молекулы одних веществ и не адсорбировать молекулы других,

Таблица 7.11. Условия каталитического окисления органических веществ

Компонент	Катализатор	Температура, °С
Метан	Co_3O_4	400
	Pt/Al_2O_3	300
	Pt/Al_2O_3	400
Пропан	MnO_2	214
Пентан	Co_3O_4	200
	Pt/Al_2O_3	200
	Pt/Al_2O_3	250
	АП-56	347
Бензол	Co_3O_4	200
	Pt/Al_2O_3	200
	Pt/Al_2O_3	300
Ксилол	Pt/Ni — Cr	220
Изопропилбензол	CuO	430
Диметиловый эфир	АП-56	230
Этанол	CuO	310
Этилацетат	А34 нефтехим	415
Ацетон	АП-56	140
Бутилацетат	Pt/Ni — Cr	400
	CuO/Cr_2O_3	230
Метилметакрилат	АП-56	150
Метилпирролидон	АП-56	300

Таблица 7.12. Плотность некоторых адсорбентов, кг/м ^{3}

Адсорбенты	Истинная	Кажущаяся	Насыпная
Активные угли	1750—2100	500—1000	200—600
Мелкопористый силикагель	2100—2300	1300—1400	800—850
Крупнопористый силикагель	2100—2300	750—850	500—600
Цеолиты	2100—2400	1200—1400	600—800

Таблица 7.13. Основные характеристики некоторых марок углей

Марка углей	Размер гранул, мм	Насыпная плотность, кг/м ^{3}	Предельный адсорбционный объем микропор, см ^{3}/г
СКТ	1,0—3,5	380—500	0,45—0,59
АГ-2	1,0—3,5	600	0,30
АГ-3	1,5—2,7	450	0,30
АГ-5	1,0—1,5	450	0,30
САУ	1,0—5,0	450	0,36
КАУ	1,0—5,0	400	0,33
АР-3	1,0—5,5	550	0,33
АРТ	1,0—6,0	550—600	0,33
СКТ-3	1,0—3,5	420—450	0,46

Таблица 7.14. Характеристика некоторых силикагелей

Марка силикагеля	Средний радиус пор, м	Удельная поверхность, $м^2/г$	Суммарная пористость, $м^3/г$
КСК-крупный, крупнопористый, гранулированный	$4{,}5 \cdot 10^{-9} — 4{,}5 \cdot 10^{-8}$	300—450	$(0{,}9—1{,}1)\,10^{-3}$
МСК-мелкий, крупнопористый, кусковой	$(6{,}4—7)\,10^{-9}$	282—288	$(0{,}93—0{,}97)\,10^{-3}$
КСМ-крупный, мелкопористый, гранулированный	$(0{,}8—1{,}5)\,10^{-9}$	550—580	$0{,}34 \cdot 10^{-3}$
КСС-крупный, среднепористый, гранулированный	$(1{,}8—3{,}5)\,10^{-9}$	500—650	$(0{,}60—0{,}85)\,10^{-3}$

Таблица 7.15. Содержание жизнеспособных грибов-продуцентов в воздухе на различных расстояниях от ферментера

Расстояние от ферментера, м	Пробы		Число колоний в 1 $м^3$ атмосферного воздуха	
	число	число отрицательных	максимальное	среднее
80—100	39	0	12480	8869
150	4	0	5190	4582
200	10	0	3720	2502
300	27	0	6110	2596
400	57	2	2860	823
500—600	16	0	2340	377
700—800	84	24	1240	252
1000	58	33	130	13

Таблица 7.16. Содержание белка в воздухе на различных расстояниях от сушильной установки

Расстояние от сушильной установки, м	Число проб	Содержание белка, $мг/м^3$		Расстояние от сушильной установки, м	Число проб	Содержание белка, $мг/м^3$	
		максимальное	среднее			максимальное	среднее
30	14	7,3	4,5	500—600	3	0,12	0,12
50—80	40	12	3,9	700—800	12	0,95	0,29
200	15	2,8	1,2	1000	4	0,1	0,1
300—400	22	0,52	0,22				

т. е. они играют роль молекулярных сит. Одной из важнейших причин такого действия является эффективный диаметр пор цеолитов. Адсорбироваться на цеолитах могут только те вещества, критический диаметр молекул которых меньше размера входных окон во внутрикристаллические полости цеолитов.

Адсорберы. Существуют различные конструкции адсорберов: периодического и непрерывного действия, горизонтальные и вертикальные и т. д. К аппаратам периодического действия относятся вертикальные, горизонтальные кольцевые адсорберы, а также выполненные в виде трубчатого тепло-

обменника. Единичная производительность вертикальных однослойных адсорберов обычно не превышает 10 тыс. м³/ч.

Основным положительным фактором адсорбционных установок периодического действия с *неподвижным* слоем угля является отсутствие в них истирания частиц сорбента в результате трения одна о другую и о стенки аппарата, трубопроводов и т. п. В адсорберах периодического действия достигается достаточно высокая степень очистки и осушки газов, подаваемых в аппарат. Кроме того, простота аппаратурного оформления, а также возможность автоматизации процесса обусловливают их широкое применение.

Основными недостатками адсорберов периодического действия являются небольшие скорости газового потока в шихте и относительно малая доля сорбента, активно участвующего в процессе (зона массопередачи, как правило, значительно меньше общей толщины слоя). Большое сечение горизонтальных адсорберов и наличие сфероидальных участков не обеспечивают равномерности распределения парогазовых потоков по сечению, а, следовательно, и полноты использования адсорбционной емкости сорбента. Поэтому вертикальные адсорберы по сравнению с горизонтальными более рациональны в использовании. Адсорберы горизонтальной конструкции *целесообразно* применять при очистке больших количеств газа от хорошо сорбирующихся микропримесей.

Для очистки газов от микропримесей, присутствующих в небольших концентрациях, можно применять кольцевые адсорберы. Если необходимо ускорить процесс теплообмена на стадиях нагрева и охлаждения или получить десорбат в концентрированном виде, часто используют адсорберы, выполненные в виде трубчатого теплообменника: адсорбент засыпан в трубки, а греющая или охлаждающая среда находится в межтрубном пространстве.

Одним из путей интенсификации адсорбционного процесса является применение непрерывной адсорбции. Преимущества непрерывных адсорбционных процессов с движущимся плотным слоем сорбента следующие:

высокая скорость парогазового потока в шахте (по сравнению со скоростями в стационарном слое), определяющая компактность установки;

высокий коэффициент использования сорбента (весь слой на стадиях адсорбции — десорбции находится в зоне массопередачи);

отсутствие энергозатрат на периодическое нагревание и охлаждение одного и того же аппарата;

возможность полной автоматизации процесса и простота обслуживания.

Недостатки непрерывных процессов:

высокие требования к прочности зернистого сорбента;

необходимость применения дорогостоящего теплоносителя;

эрозия аппаратуры;

низкий коэффициент теплопередачи, влекущий за собой большие площади теплообменных поверхностей колонны (холодильник, десорбер).

Непрерывность процесса может быть достигнута циркуляцией адсорбента в замкнутой системе и расчленением адсорбционной колонны на локальные зоны, в каждой из которых в оптимальных рабочих условиях осуществляется одна из основных стадий процесса: адсорбция, нагрев и десорбция, охлаждение и т. д.

В условиях движущегося слоя важное значение имеет механическая прочность гранул адсорбента. Пыль, образующаяся при разрушении адсорбента, засоряет газ, может вызвать эрозию газопроводов, приводит к нарушению гидравлического режима в аппарате.

Следовательно, для работы на установках с движущимся слоем необходимо использовать высокопрочные адсорбенты сферической формы.

В адсорбционных установках периодического действия предусматривают несколько адсорберов для различных технологических стадий — адсорбции, десорбции, сушки или охлаждения. Продолжительность работы адсорбера на стадии адсорбции определяется полнотой поглощения загрязняю-

щего компонента. Для этого используют различные методы анализа газа, выходящего из реакционного аппарата.

Стадия адсорбции имеет наибольшую продолжительность по сравнению с другими — десорбцией, сушкой или охлаждением. При повышении концентрации загрязняющего вещества в отходящем газе до определенного значения адсорбер переключают на стадию десорбции. Перегретый пар, проходя через слой сорбента, удаляет адсорбат в специальную емкость. Часть тепла при этом может быть утилизирована в холодильнике-конденсаторе. После стадии десорбции проводится осушка слоя адсорбента инертным газом (например, азотом) или горячим воздухом. После охлаждения сорбента холодным газом (воздухом, азотом и т. д.) реакционная колонна вновь готова к использованию на стадии адсорбции.

Такая схема адсорбционной установки периодического действия может быть несколько изменена, поскольку возможны варианты при выборе метода и режима регенерации адсорбента.

Одной из основных стадий адсорбционного процесса является десорбция поглощенных веществ, которая может проводиться различными способами: повышением температуры слоя адсорбента, снижением давления в системе, отдувкой адсорбата в токе газа-носителя, применением вакуума. Неправильный выбор температурного режима при регенерации сказывается в дальнейшем на адсорбционной емкости адсорбента.

Одним из самых распространенных методов десорбции является прогрев слоя адсорбента до определенного температурного уровня с последующей продувкой слоя небольшим количеством газа или пара. Режим процесса десорбции выбирают с учетом как типа адсорбента, так и особенностей поглощенных веществ. Если адсорбат представляет собой смесь веществ, то при определении режима десорбции ориентируются на тот компонент, скорость десорбции которого наименьшая.

Метод десорбции и режим проведения процесса невозможно определить только расчетным способом. Необходимо проведение исследований в этом направлении для каждой определенной системы адсорбент — адсорбат. Метод регенерации трудно подвергается прогнозированию и теоретическому обоснованию и предполагает только экспериментальный поиск оптимальных режимов ведения процесса.

Технико-экономические показатели адсорбционной очистки. При рассмотрении вопроса о целесообразности применения адсорбционного метода очистки нужно иметь в виду, что данный метод, также как и остальные, позволяет решать не только экономические задачи (например, возврат растворителей в производство), но и задачи оздоровления воздуха производственных помещений и прилегающих к ним территорий, чистота которого несомненно влияет на производительность труда работающего персонала и в конечном итоге — на экономические показатели производства.

Ниже приведено минимальное значение концентраций некоторых растворителей в паровоздушной смеси (ПВС), при котором рекуперация их находится на грани рентабельности:

Растворитель	Концентрация в ПВС, г/м³	Растворитель	Концентрация в ПВС, г/м³
Ацетон	3,0	Сероуглерод	6,0
Бензин	2,0	Толуол	2,0
Бензол	2,0	Трихлорэтилен	1,8
Бутилацетат	1,5	Четыреххлористый углерод	4,5
Ксилол	2,1	Этанол	1,8
Метилацетат	2,1	Этилацетат	2,1
Метиленхлорид	2,0		

Удельные капитальные затраты на очистку 1000 м³ выбросов углеадсорбционным способом составляют от 0,8 до 5 руб., удельные эксплуатационные расходы — от 0,5 до 1,1 руб.

7.4.5. Неприятно пахнущие вредные вещества и методы их обезвреживания

Источниками выделения неприятно пахнущих вредных веществ (НПВ) в атмосферу являются многие производства. «Силу» запаха можно оценить двумя независимыми параметрами: интенсивностью запаха и кратностью разбавления газа до порога восприятия запаха.

Рассматривая вопрос охраны как производственных помещений, так и окружающей среды, необходимо отметить, что наибольшую опасность представляет загрязнение воздушной среды производственных помещений и атмосферного воздуха в районе расположения микробиологических промышленных процессов, что влечет за собой поступление микроорганизмов (плесневых и дрожжевых грибков, бактерий, актиномицетов, вирусов) и вредных веществ в дыхательные пути людей в виде аэрозолей. Вредное влияние может проявляться в результате внедрения в организм и последующего размножения жизнеспособных микроорганизмов — продуцентов, а также специфической сенсибилизации организма под влиянием как живых, так и мертвых микроорганизмов, промежуточных и окончательных продуктов микробиологического синтеза. Вредное действие могут оказывать отдельные продукты жизнедеятельности микроорганизмов, обладающие антибактериальными, ферментными и токсическими свойствами.

Загрязнение производственных помещений вызывается в основном недостаточной герметизацией технологического оборудования, например ферментеров. Как показывает анализ проб воздуха в производственных помещениях и в микробиологической лаборатории, количество грибов-продуцентов составляет около 200—350 спор на 1 м³ воздуха. В течение короткого промежутка времени (*после внесения посевного материала*) количество спор достигает 5000 на 1 м³ воздуха. Основное же количество спор поступает в окружающую среду с отработанным воздухом от ферментера.

Значительными источниками загрязнения производственных помещений жизнеспособными грибами являются также сепараторы, в которых происходит сгущение биомассы дрожжей. Причины загрязнения воздуха — недостаточная герметизация оборудования, наличие открытых лотков для дрожжевой суспензии и поступление загрязненного воздуха через вентиляционные системы.

В табл. 7.15 и 7.16 приведены данные о содержании в воздухе грибов-продуцентов и белка от ферментеров и сушильных установок на различных расстояниях от них.

Работы по уменьшению степени загрязнения окружающей среды НПВ необходимо вести по нескольким направлениям: совершенствование технологического процесса, совершенствование аппаратурного оформления процесса, уменьшение влияния НПВ на окружающую среду и очистка от НПВ.

Термический способ обезвреживания. Необходимыми условиями удовлетворительной очистки газов термическим способом являются: остаточное содержание окислителя (кислорода воздуха), хорошее перемешивание его с загрязненными газами, достаточное время пребывания газовой смеси в высокотемпературой зоне (600—1000 °С), которое не должно быть менее 0,5 с.

Несоблюдение этих условий может привести к частичному сгоранию пахнущих соединений, образованию альдегидов и органических кислот, имеющих намного худший запах, чем исходные соединения. В установках термического обезвреживания рекомендуется предусматривать рекуперацию тепла для предварительного нагрева обезвреживаемых газовых выбросов.

Недостатками термического обезвреживания отходящих газов являются потребность в больших количествах дефицитного и дорогостоящего топлива, образование оксидов азота в процессе горения топлива, высокая себестоимость очистки газовых выбросов (0,5—0,6 руб. за 1000 м³ газа), необходимость изготовления оборудования из термически устойчивых материалов — уже при 650 °С необходима конструкция из нержавеющей стали.

Таблица 7.17. Сравнительная оценка известных окислителей

Окислитель	pH среды	Стоимость окислителя, эквивалентного 1 кг кислорода, руб	Количество энергии на 1 г-атом кислорода, Вт	ПДК исходной формы, мг/м³	Окислительный потенциал *B*
H_2O_2	Любая	2,1	26	1,4	—1,77
Озон	>7	2,7	17,1	0,1	—1,27
PbO_2	<7	—	15,1	0,1	—1,45
NaOCl	>7	1,84	13,9	1,0	—0,89
$Ca(OCl)_2$	>7	1,55	13,9	6	—0,89
$KClO_3$	В твердом виде	—	6,9	1*	—1,19
$KMnO_4$	7	5165	3,8	$1 \cdot 10^{-3}$	—1,64
$Na_2Cr_2O_7$	7	1,95	3,70	$0,1 \cdot 10^{-4}$	—1,33
Хлор	7	0,31	—	1	—1,359
ClO_2	7	—	—	—	1,5

* 1 кг/кг

Термокаталитическое обезвреживание. Метод термокаталитического окисления, сохраняя все основные достоинства термического окисления, имеет ряд преимуществ:

использование катализаторов позволяет успешно окислять газы с малой теплотой сгорания при $t=250$—350 °С, при этом значительно снижается потребление топлива на предварительный разогрев очищаемой смеси;

время контакта, необходимое для полного окисления неприятно пахнущих компонентов в термокаталитическом реакторе, меньше минимального времени пребывания смеси в реакторе термического окисления;

менее жесткие требования к качеству перемешивания очищаемого газа с потоком окислителя;

снижается концентрация оксидов азота на выходе из установки очистки;

окисление НПВ при более низких, чем при термическом окислении, температурах позволяет использовать дешевые конструктивные материалы, что способствует уменьшению удельных капитальных затрат;

по сравнению с термическим термокаталитическое обезвреживание менее энергоемкое; себестоимость очистки 1000 м³ газа составляет примерно 0,35 руб.

Ниже рассмотрены некоторые типы катализаторов для обезвреживания наиболее распространенных неприятно пахнущих веществ.

Алюмоплатиновый катализатор АП-56 *можно* использовать для обезвреживания газовых выбросов, содержащих спирты, альдегиды, органические кислоты, эфиры и предельные углеводороды, а также для дезодорации выбросов масложиркомбинатов, в состав которых входят только кислородсодержащие органические соединения.

Медно-марганцевый катализатор рекомендуется применять для удаления запаха ацетальдегида. Он легко регенерируется при промывке водой.

Термокаталитическим методам присущи следующие недостатки:

трудности использования в случае присутствия в очищаемых газах пыли;

галогены, сернистые и азотистые соединения являются ингибиторами процесса окисления органических компонентов;

фосфор, висмут и другие компоненты вызывают глубокое и необратимое отравление катализаторов.

Абсорбционно-окислительные методы очистки. Эти методы очистки следует отнести к наиболее перспективным. Окислителями в этих процессах являются: *гипохлорид натрия*, хлор, пероксидные соединения, перманганат калия, бихроматы, озон и другие, перечень которых представлен в табл. 7.17.

Водная абсорбция НПВ основана на растворимости газов в воде. Однако многие вещества, обладающие запахом и входящие в состав промышленных выбросов, плохо растворимы. Поэтому абсорбцию водой, как правило, применяют на первом этапе очистки для охлаждения отходящих газов, конденсации высококипящих компонентов и удаления твердых частиц. Это особенно важно при очистке горячих газовых потоков с высоким содержанием влаги, например технологических выбросов, образующихся при варке отходов мясного производства (соковые пары), сушке дрожжей в распылительной сушилке и т. д.

Хлором обезвреживают отходящие газы предприятий по переработке отходов животного происхождения, в которых находится значительное количество НПВ, представляющих собой серосодержащие соединения (H_2S, меркаптаны, дисульфиды и т. д.), карбонильные производные и азотсодержащие соединения.

В последние годы проведен ряд работ по обезвреживанию озоном некоторых промышленных газов, в том числе и газов с резким неприятным запахом, содержащим метилмеркаптопропионовый альдегид, ацетальдегид, формальдегид, фенольные соединения как в жидкой, так и в газовой фазе и другие продукты органического синтеза, а также газов, содержащих сернистые соединения (сероуглерод, сероводород). Показана возможность применения озонирующих установок для очистки вентиляционного воздуха с целью его повторного использования в ряде отраслей (животноводстве, птицеводстве, производстве искусственных волокон).

Хорошо абсорбирует и окисляет сульфиды, меркаптаны, альдегиды и плохо окисляет кислородсодержащие органические соединения абсорбционно-окислительная система, в качестве окисляющего агента в которой служит перманганат калия в виде 1—4%-го раствора. Высокая стоимость метода и образование большого количества неутилизируемых сточных вод тормозят его развитие.

Исследован известковый метод очистки на предприятиях, производящих рыбную муку, перерабатывающих животные отходы и отходы от птицеферм. В качестве промывной жидкости при дезодорировании газов применяют водный раствор каустической соды.

Тщательный анализ сведений об окислителях (методы их получения, применения; влияние на окружающую среду и взаимодействия с НПВ) свидетельствует о том, что кислород и некоторые пероксидные соединения являются наиболее приемлемыми реагентами. Галогены, их производные (гипохлориды, броматы и др.), сильные кислородные кислоты (азотная, хромовая, марганцевая и др.), а также оксиды ряда металлов желательно использовать в замкнутых циклах.

Существуют методы, где в качестве абсорбционно-окислительной системы используются пероксид водорода, фосфорная, уксусная кислоты или их соли. Предлагается также использование абсорбента на основе пероксида водорода для дезодорации сернистых и душистых веществ, присутствующих в газовых выбросах.

Аппаратурное оформление абсорбционно-окислительного метода очистки НПВ может быть самым разнообразным (полые и насадочные скрубберы, пенные аппараты и циклоны и др.). Однако предпочтительнее применение аппаратов типа низконапорной трубы Вентури (см. раздел 7.4.2).

Адсорбционные методы дезодорации газовых выбросов. Основой адсорбционных способов очистки и дезодорации являются физические процессы и процессы хемосорбции: пахучие вещества связываются на поверхности адсорбентов и удаляются из среды-носителя. Обычно используют мелкопористые адсорбенты: активные угли, силикагели, алюмогели, цеолиты, пористые стекла, иониты и т. д. Из них только активный уголь отвечает необходимым требованиям, предъявляемым к твердому поглотителю.

Согласно литературным данным при $t=20$ °С и $p=101{,}3$ кПа, удерживающая способность активного угля, например по отношению к тетрамети

лендиамину, составляет 0,25, а по отношению к валериановой кислоте 0,35. После насыщения адсорбент заменяют или регенерируют.

Известно несколько типов дезодорантов, приготовленных на основе угля. Так, для холодильников предлагают использовать дезодорант на основе древесного угля, активированного перборатом натрия и сульфатом железа. Для многократного применения предложен гранулированный дезодорант, включающий уголь, обработанный серной кислотой, а также перлит и гипс. Для очистки выбросных газов канализационно-очистных станций рекомендован древесный уголь, пропитанный иодатом калия. НПВ можно дезодорнровать синтетическими смолами с объемом пор 30—50%. Для дезодорирования воздуха в обычную систему кондиционирования воздуха помещают фильтр, заполненный гидрофильным активированным адсорбентом (Al_2O_3), глиной, бокситом). Адсорбент пропитывают 5%-ным водным раствором окислителя, выбранного из ряда $KMnO_4$, $NaMnO_4$, $Mg(MnO_4)_2$, $Ca(MnO_4)_2$. При пропускании через фильтр загрязненного воздуха содержащиеся в нем НПВ адсорбируются и одновременно окисляются до CO_2, H_2O и других продуктов окисления без запаха. Для аналогичных целей можно использовать состав, содержащий уголь (древесный, активный), а также углеродистый материал на основе каменного и бурого угля.

В состав дезодоранта для промышленных зданий входят 100 ч. нитрогуминовой кислоты, 25 ч. комплексной соли, содержащей 75% MnO_2 и 12,5% FeO и 100 ч. воды. Сухой продукт хорошо поглощает NH_3 и H_2S. Для дезодорации атмосферы от серосодержащих веществ и соединений кислотного характера используют смесь, содержащую гашеную известь, MnO_2 и K_2CO_3. В качестве дезодоранта для очистки воздуха используют также древесные опилки в смеси с MnO_2.

Адсорбционный метод обеспечивает высокую степень очистки и позволяет вести процесс при сравнительно небольших энергетических затратах.

Биологическая очистка газов от неприятно пахнущих веществ. Сущность метода состоит в аэробном разложении, окислении и ассимиляции микроорганизмами уловленных примесей. Особенностью метода является использование естественных биологических процессов без применения чуждых экологической системе материалов и реагентов.

Биологический метод очистки может быть реализован в аппаратах или устройствах трех основных типов:

в фильтрах со слоем увлажненной почвы или компоста, через который пропускается очищаемый газ (земляные фильтры);

в фильтрах с инертной насадкой, на поверхности которой искусственно выращивается биопленка (аэробиофильтры);

в аппаратах барботажного типа с водной суспензией активного ила (абсорберы биоочистки).

Земляные фильтры используют на протяжении нескольких лет для борьбы с неприятными запахами на мясокомбинате, фабрике ферментов, табачной фабрике, салотопке, на предприятиях, производящих рыбную муку, костный клей, мыло. Фильтр со слоем почвы используется для очистки сульфидсодержащих газов из канализационных камер.

Метилмеркаптан удаляется при нагрузке земляных фильтров до 1 мг/(кг·ч) на активную массу. Аммиак на адаптированном фильтре может усваиваться микроорганизмами в бо́льших количествах. Органические НПВ могут быть удалены в земляных фильтрах при нагрузке до 100 мг/(кг·ч) на активную массу.

Неорганические соединения, содержащиеся в газах (H_2S, NO_2, SO_2), на фильтре окисляются до кислот, поэтому сорбционная мощность фильтра может быть оценена по содержанию щелочных веществ или реагентов в фильтре.

Аэробиофильтры и абсорберы биоочистки. Аэробиофильтры предназначены для очистки газов, образующихся при мокром окислении избыточного активного ила. Для очистки применяют суспензию, содержащую 5—10 г/л активного ила.

Абсорберы рекомендуются для очистки газов от серосодержащих соединений. В абсорберах используют суспензию микроводорослей хлорелла, выращиваемых в нестерильных условиях.

Пропускная способность этих аппаратов очистки на один-два порядка превышает пропускную способность земляных фильтров, что позволяет создать компактные установки биологической очистки газов большой производительности.

Газофазная обработка. Такая обработка может осуществляться реагентами, химически взаимодействующими с НПВ. В качестве окисляющего агента преимущественно используется озон. Дезодорирующей способностью обладает также кислород, подвергнутый ультрафиолетовому облучению.

В США запатентован способ очистки воздуха от меркаптанов облучением его при $t=20$ °С ртутными лампами низкого давления, дающими излучение с длиной волны $\lambda=170$—300 нм. Высокая степень дезодорации достигается при концентрации меркаптанов менее 300 ч/млн.

Для очистки газов от органических кислот, альдегидов, меркаптанов, аминов и других веществ предложено обрабатывать отходящие газы в постоянном электрическом поле при напряжении, не вызывающем дугового разряда. Находит применение метод маскировки, состоящий в том, что в газ с НПВ вводят летучий дезодорант, который снижает интенсивность запаха НПВ или делает его более приемлемым.

Самыми простыми дезодорантами являются, очевидно, озон и другие окислители при очень низких концентрациях. Известно несколько сотен маскирующих составов, включающих до 40 компонентов, таких как ароматические соединения, кетоны, спирты, эфиры, альдегиды и т. д. Для растворителей в качестве дезодоранта предложен фениламиноэтил. Чтобы уменьшить запах газообразных продуктов сгорания жидкого нефтяного топлива, предложено вводить в него смесь мускус-ксилола и ванилина (в количестве 0,006% от массы топлива).

7.5. РАССЕИВАНИЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

7.5.1. Нормативные документы по расчетам рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе

В настоящее время единственным утвержденным документом по расчетам рассеивания являются «Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий» ОНД-86, которые охватывают как расчеты рассеивания за пределами зоны аэродинамической тени промплощадки (обязательная часть Указаний), так и в пределах зоны аэродинамической тени промплощадки (рекомендуемая часть Указаний).

При расчетах рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе соблюдаются следующие общие положения.

1. Для определения опасности загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха выбросами вредных веществ рассчитывают наибольшую концентрацию этих веществ в расчетной точке (на промышленной площадке или в жилом районе), соответствующей наиболее неблагоприятным метеорологическим условиям (когда скорость ветра достигает опасного значения $u_м$, наблюдается интенсивный вертикальный турбулентный обмен).

2. Наибольшая допустимая концентрация каждого вредного вещества в расчетной точке C приземного слоя атмосферы на промышленной площадке в местах организованного и неорганизованного воздухозабора системами вентиляции и кондиционирования воздуха определяется по формуле, мг/м³:

$$C \leqslant 0{,}3\text{ПДК}_{р.з};$$

в населенных местах — по формуле:

$$C \leqslant ПДК_{н.м},$$

где $ПДК_{р.з}$ — предельно допустимая концентрация в рабочей зоне; $ПДК_{н.м}$ — предельно допустимая концентрация для населенных мест.

3. В приведенных формулах используются максимальные часовые количества вредных веществ. Разовые концентрации, найденные из проб, взятых в течение 20 мин, пересчитывают в часовые.

4. Приземные максимальные концентрации вредных веществ на территории санитарных охранных зон курортов, в местах размещения крупных санаториев и домов отдыха, зонах отдыха городов с населением более 200 тыс. человек не должны превышать 0,8 ПДК, установленных «Санитарными нормами проектирования промышленных предприятий» для атмосферного воздуха населенных пунктов.

5. Значения приземных концентраций вредных веществ, рассчитанные по изложенным ниже методам, относятся к установившимся условиям распространения сохраняющейся в атмосферном воздухе примеси над ровной или слабопересеченной местностью. При проектировании предприятий, размещаемых в условиях сложного рельефа, за указаниями по расчету следует обращаться в Главную геофизическую обсерваторию им. А. И. Воейкова.

6. Если при выбросах в атмосферу вредные вещества полностью или частично превращаются в более токсичные, то в расчетах необходимо учитывать образовавшиеся вещества.

Характерные типы распространения вредных веществ при выбросе их через высокие трубы. Газы, выбрасываемые из трубы в атмосферу, поднимаются над верхним срезом трубы. Подъем газов обеспечивается направленной вверх скоростью, а также подъемом теплых газов, выпускаемых в более холодный окружающий воздух. Высота подъема газов зависит от турбулентности, возрастающей с увеличением скорости протекания газа в трубе, от плотности газа, уменьшающейся с ростом температуры, а также от горизонтального движения ветра, уменьшающего действие вертикальной скорости и эффекта подъема.

Примесь, выброшенная в атмосферу из источников, рассеивается и переносится в воздухе постоянно существующими в атмосфере турбулентными вихрями разных масштабов. Интенсивность атмосферной турбулентности и, следовательно, интенсивность диффузии примеси в разных погодных условиях различны и определяются главным образом двумя факторами: вектором скорости ветра и вертикальным температурным градиентом.

Температурный градиент, характеризующий изменение температуры воздуха по вертикали, определяется степенью нагретости поверхности земли и прилегающего к ней слоя воздуха. Чем сильнее нагрета земля, тем интенсивнее вертикальное перемещение воздуха. Если нагретый воздух расширяется адиабатически (без обмена теплом с окружающими массами воздуха), то температура его повышается ~1 °С на 100 м, и воздух обладает теми же свойствами, что и окружающие массы воздуха и, следовательно, не будет иметь дополнительного ускорения. Такое состояние атмосферы называется безразличным (нейтральным).

Если температура окружающего воздуха понижается с высотой так, что ее вертикальный градиент больше адиабатического (что бывает при сильно нагретой солнцем поверхности земли), то движущийся снизу объем воздуха получает ускорение. Нагретые конвекционные струи поднимаются вверх, а взамен их вниз опускаются холодные струи воздуха. Такие условия называются неустойчивыми конвективными.

Если вертикальный градиент температуры воздуха близок к нулю или становится отрицательным (т. е. температура с высотой возрастает), то вертикально поднимающийся объем воздуха оказывается холоднее окружающих масс, и его движение затухает. Такие условия называются устойчивыми инверсионными.

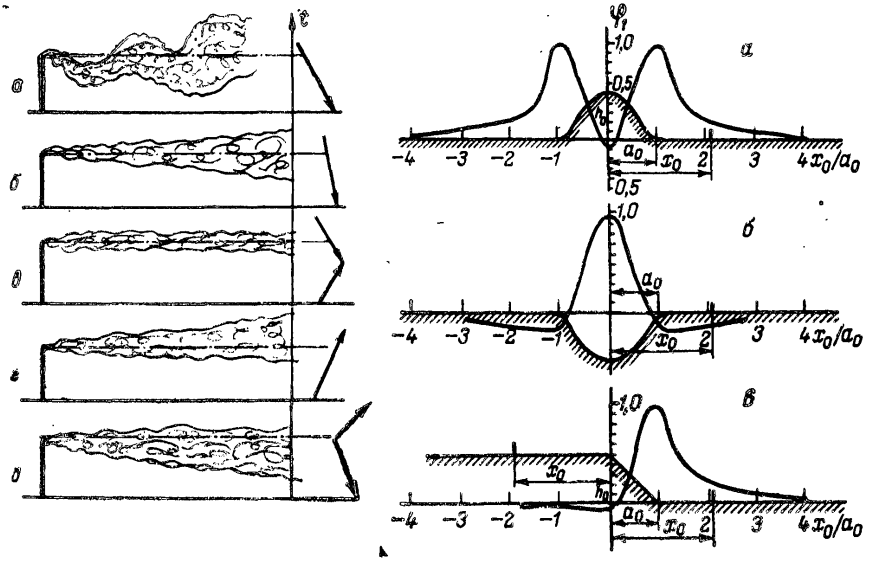


Рис. 7.32. Характерные формы струй от высоких дымовых труб:
а — волнообразная; *б* — конусообразная; *в* — веерообразная; *г* — приподнятая; *д* — задымляющая

Рис. 7.33. Типы рельефа местности для учета поправок при расчетах рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе:
а — гребень (холм); *б* — ложбина (впадина); *в* — уступ

Для количественного выражения состояния устойчивостн атмосферы обычно используют соотношение вертикального градиента температуры и скорости ветра, либо в виде безразмерного критерия устойчивости Ричардсона Ri, либо в виде более удобных эмпирических его аналогов. Такими аналогами являются: параметр стратифнкации ε, практический критерий стратификации *A*, параметр стратификации *Б* и параметр *n* Сеттона.

Кроме того, состояние атмосферы характеризуется такими показателями: неустойчивость — очень сильная, умеренная, слабая; безразличное состояние; устойчивость — слабая, умеренная, сильная. Рассеяние примеси в условиях каждого класса устойчивости атмосферы имеет свои особенности, формирующие характерный вид дымовой струи. По виду реальных струй можно получить информацию о термодинамическом состоянии нижней атмосферы.

По мнению американских метеорологов, форма струи, вытекающей из трубы, зависит в основном от вертикального температурного градиента вблизи нее. Они предложили классификацию форм струй дыма, которые могут наблюдаться из одиночных или более или менее изолированных труб. Схематически эти формы струй показаны на рис. 7.32. Образование волнообразной струи (рис. 7.32, *а*) происходит при очень неустойчивом вертикальном температурном градиенте. Эта форма обычно наблюдается днем при хорошей погоде, при сильном нагревании земли солнцем. Конусообразная форма струи ((рис. 7.32, *б*) встречается при слабом вертикальном градиенте температуры и часто наблюдается при облачной и ветреной погоде, особенно во влажном климате. Веерообразная форма струи (рис. 7.32, *в*) возникает при температурной инверсии. Ее форма напоминает извивающуюся реку, которая постепенно расширяется с удалением от трубы.

Таблица 7.18. Величины η_m при различных значениях n_1 и n_2

n_1	Ложбина (впадина) для n_2			Уступ для n_2			Гребень (холм) для n_2		
	6—9	10—15	16—20	6—9	10—15	16—20	6—9	10—15	16—20
0,5	2,0	1,6	1,3	1,8	1,5	1,2	1,5	1,4	1,2
0,6—1	1,6	1,5	1,2	1,5	1,3	1,2	1,4	1,3	1,2
1	1,5	1,4	1,1	1,4	1,2	1,1	1,3	1,2	1,0

Вертикальное рассеяние почти не наблюдается. Рассеяние выбрасываемого вещества зависит от скорости ветра на уровне устья трубы: величина концентрации в струе изменяется обратно пропорционально скорости ветра. Веерообразная форма струи часто наблюдается при снежном покрове, слабом ветре и чистом небе. В гигиеническом отношении (для близких расстояний) ее нельзя рассматривать как неблагоприятную, так как выбросы не приближаются к земной поверхности.

Приподнятая форма струи (рис. 7.32, *г*) чаще наблюдается ночью и обычно в течение 1—3 ч, хотя отмечались случаи, когда подобная форма струи поддерживалась в течение всей ночи. Приподнятую форму струи рассматривают как наиболее благоприятную для рассеивания выбрасываемых из трубы веществ.

Наиболее неблагоприятна в гигиеническом отношении задымляющая форма струи (рис. 7.32, *д*), при которой падение температуры воздуха обычно начинается вблизи земли и распространяется на некоторую высоту (зимой — сильнее, летом — слабее). В этих условиях выбрасываемые из трубы вещества в большой концентрации тепловыми вихрями приносятся к земле вдоль всей струи. Задымляющая струя дает наиболее значительную среднюю наземную концентрацию вредных веществ, она принята за расчетную как наиболее неблагоприятная и дающая наибольшую приземную концентрацию.

Роль особенностей рельефа. Под влиянием неровностей рельефа изменяется турбулентный режим воздушных потоков и, следовательно, характер рассеяния, а также поле концентраций примеси вблизи земли; в сложных формах рельефа возникает местная циркуляция воздуха, образуются восходящие и нисходящие потоки, особым образом изменяется направление ветра.

Для учета влияния рельефа и водоемов на значения концентраций, вычисленных для условий ровного места, вводят безразмерный коэффициент η, который принимается равным 1, если в радиусе 50 высот труб от источника перепад отметок местности не превышает 50 м на 1 км. В других случаях поправку на рельеф устанавливают на основе картографического материала, освещающего рельеф местности в радиусе 50 высот труб от источника, но не менее 2 км.

Если в окрестности рассматриваемого источника выбросов (предприятия) можно выделить отдельные изолированные препятствия, вытянутые в одном направлении (гряды, гребень, ложбина, уступ), то коэффициент η принимают по формуле:

$$\eta = 1 + \varphi_1 \frac{|x_0|}{a_0}(\eta_m - 1), \qquad (7.10)$$

где x_0 — расстояние от середины препятствия в случае гряды или ложбины и от верхней кромки склона в случае уступа до источника; a_0 — полуширина гряды, гребня, ложбины или протяженность бокового склона уступа, η_m — определяется по табл. 7.18 в зависимости от рельефа; сечения рельефов представлены на рис. 7.33.

В табл. 7.18 величины n_1 и n_2 определяются по формулам:

$$n_1 = H/h_0 \qquad (7.11)$$

$$n_2 = a_0/h_0 \qquad (7.12)$$

где n_1 — определяется с точностью до десятых, а n_2 — с точностью до целых; H — высота источника; h_0 — высота (глубина) препятствия.

Значения функции φ_1 приведены на рис. 7.33. Для случая уступа, если источник расположен на верхнем его плато, в качестве аргумента функции φ_1 вместо $|x_0|/a_0$ принимается x_0/a_0 .

Если препятствие представляет собой гряды (ложбины), вытянутые в одном направлении, то параметры h_0 и a_0 определяются для поперечного сечения, перпендикулярного этому направлению. Если изолированное препятствие представляет собой отдельные холмы (впадины), то h_0 выбирают соответствующей максимальной (минимальной) отметке препятствия, а n_2 — максимальной крутизне склона, обращенного к источнику.

Для источников выбросов, попадающих в зону влияния нескольких изолированных препятствий, следует определять поправочные коэффициенты для каждого отдельного препятствия и использовать максимальные из них.

Когда препятствия имеют большую крутизну ($n_2 \leqslant 5$), а также когда рельеф местности настолько сложен, что не удается выделить отдельные изолированные препятствия, или когда требуется уточнить зависимость поправки η от расстояния источника до препятствия с учетом затухания их влияния, поправки на рельеф устанавливаются Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова, в которую должны быть направлены соответствующий картографический материал, информация о высотах и других параметрах выброса рассматриваемых источников, а также информация (при наличии) об особенностях изменений метеорологического режима, обусловленных рельефом.

Ориентировочно поправку на рельеф можно определить, исходя из следующих соображений:

при уклонах до 0,1—0,15° и перепадах до 100 м поправка составляет 1,3—1,5;

при расположении предприятия вблизи горной гряды с уклонами местности 0,15—0,25° поправка равна 2;

если предприятие расположено в котловине или ущелье глубиной 100—200 м с уклоном 0,2—0,3° и более поправка на рельеф равна 3.

С увеличением высоты трубы, начиная с $H = 100$ м, поправки на рельеф несколько уменьшаются.

Особым метеорологическим режимом характеризуются прибрежные районы. Известно, что атмосферная диффузия над водоемами и морями менее интенсивна, чем над сушей, что обусловлено меньшей механической турбулентностью атмосферы над поверхностью воды. Для этих районов учет необходим при оценке загрязнения суши через водяную поверхность и только по экспериментальным данным; при этом необходимо учитывать соотношение температур воды и воздуха, расстояние «разгона» над поверхностью водоема. При распространении примеси в таких районах наблюдается эффект поглощения примеси водной поверхностью и уменьшение вследствие этого содержания примеси в прилегающем к поверхности слое воздуха. Окончательную величину поправки на рельеф местности следует принимать по данным территориальной гидрометеослужбы.

7.5.2. Суммация действия вредных веществ в расчетах рассеивания

При одновременном присутствии в атмосфере нескольких n вредных веществ, обладающих суммацией действия, безразмерная суммарная концентрация (для каждой группы указанных вредных веществ однонаправленно-

го действия) не должна превышать единицы при расчете по формуле:

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \ldots + \frac{C_n}{ПДК_n} \leqslant 1, \qquad (7.13)$$

где C_1, C_2, ..., C_n — концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе в одной и той же точке местности, мг/м³; $ПДК_1$, $ПДК_2$, ..., $ПДК_n$ — максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, мг/м³.

К вредным веществам однонаправленного действия, как правило, относят вещества близкие по химическому строению и характеру биологического воздействия на организм человека. Ниже приведены сочетания некоторых веществ однонаправленного действия:

ацетон и фенол; ацетон, акролеин, фталевый ангидрид; ацетон и ацетофенон; ацетон, фурфурол, формальдегид и фенол; ацетальдегид и винилацетат; аэрозоли пятиокиси ванадия и оксидов марганца; диоксид серы; аэрозоли пятиокиси ванадия и трехокиси хрома; бензол и ацетофенон; валериановая, капроновая и масляная кислоты; гексахлоран и фазолон; 2,3-дихлор-1,4-нафтохинон и 1,4-нафтохинон; 1,2-дихлорпропан, 1,2,3-трихлорпропан и тетрахлорэтилен; изопропилбензол и гидропероксид изопропилбензола; изобутенилкарбинол и диметилвинилкарбинол; метилдигидропиран и метилентетрагидропиран; мышьяковистый ангидрид и ацетат свинца; мышьяковистый ангидрид и германий; озон, диоксид азота и формальдегид; оксид углерода, диоксид азота, формальдегид, гексан; пропионовая кислота и пропионовый альдегид; диоксид серы и аэрозоль серной кислоты; диоксид серы и никель металлический; диоксид серы и сероводород; диоксид серы и диоксид азота; диоксид серы, оксид углерода, фенол и пыль конвертерного производства; диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота и фенол; диоксид серы и фтористый водород; сильные минеральные кислоты (серная, соляная и азотная); оксид углерода и пыль цементного производства; уксусная кислота и уксусный ангидрид; фенол и ацетофенон; фурфурол, метиловый и этиловый спирты; циклогексан и бензол; этилен, пропилен, бутилен и амилен.

7.5.3. Фоновая концентрация вредных веществ в расчетах рассеивания

Фоновые концентрации вредных веществ, содержащихся в атмосфере, мг/м³, должны учитываться при установлении ПДВ и ВСВ, а также при проектировании вновь строящихся и реконструируемых предприятий в районах, где атмосферный воздух уже загрязнен вредными веществами, выбрасываемыми другими предприятиями. Сумма расчетной и фоновой концентраций для каждого вредного вещества в атмосфере не должна превышать установленной ПДК:

$$C + C_ф \leqslant ПДК. \qquad (7.14)$$

Величины фоновой концентрации определяются в соответствии с «Временными указаниями по определению фоновых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе для нормирования выбросов и установления ПДВ». Фоновую концентрацию, установленную по достаточно полным данным наблюдений постов Общегосударственной службы контроля загрязнения атмосферы, запрашивают в Госкомгидромете по месту размещения предприятия. Такие измерения в основном проводятся по следующим вредным веществам: диоксиду серы, диоксиду азота, оксиду углерода и пыли, в ряде городов и промышленных районов — по некоторым специфическим вредным веществам: сероводороду, фенолу, аммиаку и др. Госкомгидромет выдает значения фоновых концентраций по постам для тех веществ, по которым проводятся наблюдения.

По другим веществам фон устанавливается на основе применения расчетных методов, изложенных в разделе 7.5.1. С этой целью по данным инвентаризации выбросов для всех источников выполняется расчет суммарного поля концентраций при неблагоприятных условиях.

Для действующих предприятий значения фоновой концентрации без учета вклада рассматриваемого источника или совокупности источников рассматриваемого предприятия приближенно определяются по соотношениям:

$$C'_{\Phi} = \left(1 - 0{,}4\frac{C}{C_{\Phi}}\right)C_{\Phi} \quad \text{при} \quad C \leqslant 2C_{\Phi}; \tag{7.15}$$

$$C'_{\Phi} = 0{,}2C_{\Phi} \quad \text{при} \quad C > 2C_{\Phi},$$

где C — наибольшее значение концентрации от источника или совокупности источников на посту, для которого определено C_{Φ}.

В общем случае, когда для постов установлены пять значений, расчеты проводят отдельно для каждой градации скорости ветра. В отсутствии значительных различий для C_{Φ}, *относящихся к разным градациям скорости* ветра, используется одно значение C_{Φ} для поста. При расчете характеристик загрязнения атмосферы по комбинациям веществ с суммирующим вредным действием учитывается фон всех этих веществ. В случае расчета рассеивания по какому-то одному вредному веществу ($ПДК_1$), обладающему эффектом суммации с другим веществом, имеющим заданную фоновую концентрацию $C_{\Phi 2}$, фоновую концентрацию $C_{\Phi 2}$ можно привести к фоновой концентрации $C_{пр.\Phi 1}$ по формуле:

$$C_{пр.\,\Phi 1} = ПДК_1 \cdot \frac{C_{\Phi 2}}{ПДК_2}, \tag{7.16}$$

где $C_{пр.\Phi 1}$ — приведенная фоновая концентрация, мг/м³; $ПДК_1$, $ПДК_2$ — предельно допустимые концентрации рассматриваемых веществ, мг/м³.

7.5.4. Применение ЭВМ при расчетах рассеивания

Расчет рассеивания вредных веществ, содержащихся в выбросах нескольких источников, рассредоточенных на промплощадке, целесообразно выполнять на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ). Для определения суммарного загрязнения атмосферного воздуха от всех источников при различных направлениях и величинах скорости ветра с учетом суммирующего вредного действия и фонового загрязнения созданы унифицированные программы расчета загрязнения атмосферы (ПРЗА). Применение ПРЗА обеспечивает:

унифицированный единый для всех типов ЭВМ алгоритм расчета загрязнения атмосферы;

гарантированную точность расчета;

унифицированную форму записи исходных для расчета данных;

унифицированную форму выдачи на печать исходных данных и результатов расчета;

рациональность расходования машинного времени.

7.6. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЙ ВЫБРОС ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

Предельно допустимый выброс вредных веществ в атмосферу (ПДВ) устанавливают для каждого источника загрязнения атмосферы при условии, что выбросы вредных веществ от данного источника и от совокупности источников города или другого населенного пункта (с учетом перспективы развития промышленных предприятий и рассеивания вредных веществ в атмосфере) не создадут приземную концентрацию, превышающую их предельно

допустимые концентрации (ПДК) для населения, растительного и животного мира.

Рассчитанные значения ПДВ должны являться научно обоснованной технической нормой выброса промышленными предприятиями вредных химических веществ, чтобы обеспечить соблюдение требований санитарных органов по чистоте атмосферного воздуха населенных мест и промышленных площадок.

Основными критериями качества атмосферного воздуха при установлении ПДВ для источников загрязнения атмосферы являются ПДК, утвержденные Министерством здравоохранения СССР.

Для населенных мест требуется выполнение соотношения

$$C/\text{ПДК} \leqslant 1, \tag{7.17}$$

где C — расчетная концентрация вредного вещества в приземном слое атмосферного воздуха населенных мест.

При наличии в атмосфере нескольких вредных веществ необходимо учитывать суммацию их вредного действия в соответствии с перечнем, утвержденным Министерством здравоохранения СССР.

При установлении ПДВ для источника загрязнения атмосферы учитывают установленные расчетом или экспериментально значения фоновых концентраций вредных веществ в воздухе C_Φ (мг/м³) от остальных источников (в том числе от автотранспорта) города или другого населенного пункта. Поэтому в формулу подставляют значения:

$$C = C_\text{р} + C_\Phi, \tag{7.18}$$

где $C_\text{р}$ — расчетная концентрация в расчетной точке, мг/м³; C_Φ — фоновая концентрация в расчетной точке, мг/м³.

В зонах санитарной охраны курортов, местах размещения крупных санаториев и домов отдыха, зонах отдыха городов при использовании соот-

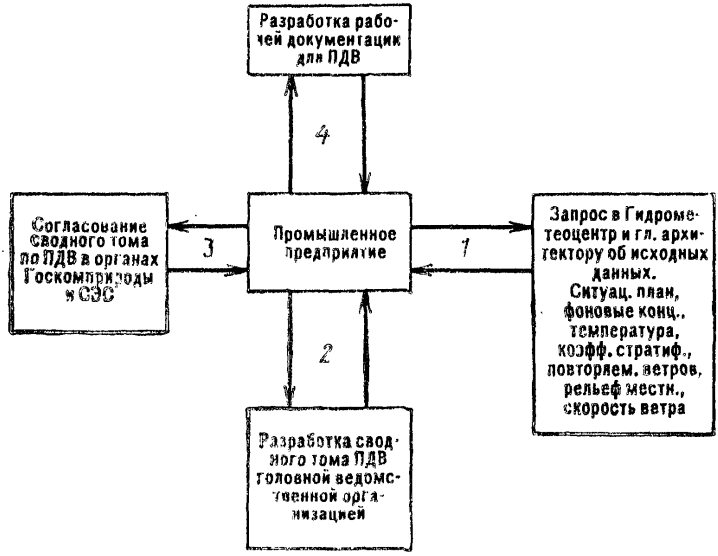


Рис 7.34. Схема последовательности работ по достижению предприятием предельно допустимых выбросов (1—4 — последовательность проведения работ)

ношения (7.17) следует брать не единицу, а 0,8. Следует учитывать, что при установлении ПДВ для действующих предприятий могут встретиться два случая:

существующее загрязнение атмосферного воздуха данным и окружающими предприятиями меньше ПДК;

существующее загрязнение атмосферного воздуха больше ПДК.

В первом случае установление ПДВ упрощается и за данную величину может быть принята и величина фактического выброса вредных веществ действующего предприятия. Во втором случае необходимо рассчитывать величину загрязнения, создаваемого источниками данного предприятия $C_{пр}$. Если $C_{ф}-C_{пр} \geqslant$ ПДК, то ПДВ по согласованию с инспектирующими организациями может достигаться поэтапно.

На первом этапе устанавливают для предприятия величину временно согласованных выбросов (ВСВ). После детального изучения наиболее опасных источников загрязнения атмосферы можно установить расчетом ПДВ для каждого источника, проводя определенные мероприятия. В одних случаях это будет связано с необходимостью реконструкции или изменения технологии, в других — со строительством или реконструкцией газопылеулавливающих установок, в третьих — с реконструкцией самих источников выбросов, и все это с учетом организации санитарно-защитной зоны предприятия. Перечень исходных данных для установления ПДВ приведен в ГОСТ (Охрана природы. Атмосфера) и в ГОСТ 17.2.3.02—78.

На рис. 7.34 указан порядок работ по достижению предприятием предельно допустимых выбросов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I. Физико-химические свойства некоторых веществ

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293K$ $p = 100кПа$, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерленда Sat	const определения парциального давления паров жидкости (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана	
								const A	const B	const C	min	max
Азот	N_2	28,01	820	63,15	77,35	165	104	4,428	52,7	230	—	—
Азота(IV) диоксид	NO_2	46,01	1447	261,9	294,3	111	433	8,9170	1798,5	270	230	320
Азота(I) оксид	N_2O	44,01	1226	182,3	184,7	131	271	7,0038	654,25	247	144	200
Азота(II) оксид	NO	30,01	1280	109,5	121,4	183	178	8,7429	682,93	268	95	140
Азота(V) оксид	N_2O_5	108,01	1642	314,2	305,5	137	260	12,77	3017	273	—	—
Азота(III) фторид	NF_3	71,00	1537	66,15	144,1	168	212	6,7796	501,90	258	103	155
Акрилонитрил	C_3H_3N	53,06	806	189,5	351,7	65	517	6,8784	1233,3	230	—	—
Акролеин	C_3H_4O	56,06	841	186,0	325,7	73,1	478	7,665	1558	273	—	—
н-Альдегид анисовый	$C_8H_8O_2$	136,15	1126	273,2	522,7	69,7	637	7,6233	2359,4	230	—	—
Альдегид коричный	C_9H_8O	132,17	1050	265,7	525,2	55,4	644	7,7139	2329,6	230	—	—
Альдегид масляный	C_4H_8O	72,10	801	176,8	348,0	66,5	424	7,598	1768,4	273	—	—
Альдегид уксусный	C_2H_4O	44,05	783	150,2	293,4	86,9	431	7,0161	1034,5	230	—	—
2-Аминоэтанол	C_2H_7NO	61,084	1016	283,5	443,5	71	655	7,7379	1732,1	186	344	477
Аммиак	NH_3	17,03	610	195,4	239,9	93	503	5,007	1198	273	—	—
Ангидрид малеиновый	$C_4N_2O_3$	98,06	1480	326	473,1	60,9	695	7,825	2420	273	—	—
Ангидрид пропионовый	$C_6H_{10}O_3$	130,15	1010	—	440,2	57	647	7,8474	1977,8	230	—	—
Ангидрид уксусный	$C_4H_6O_3$	102,09	1082	199	412	65,2	502	7,121	1427,8	198	—	—
Ангидрид фталевый	$C_8H_4O_2$	148,11	—	404,2	557,71	—	820	7,9995	2879,1	278	407	558
н-Анизидин	C_7H_9ON	123,16	1071	330,4	518,2	58	632	9,7529	2370,8	230	—	—
Анилин	C_6H_7N	93,13	1022	267,0	457,6	51,6	672	6,9212	1457,0	176	308	457
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	178,18	1255	489,7	614,4	—	903	7,6739	2819,6	247	490	655
Ацетальдегид	$C_2H_4O_2$	44,05	778	150,2	293,6	80	431	7,0564	1070,6	236	210	320
Ацетилен	C_2H_2	26,04	400	192,4	239,6	94	198	7,571	925,59	283	—	—

Ацетилхлорид	C_2H_3ClO	78,50	1104	160,2	323,9	79	476	6,8406	1062,9	217	237	355
Ацетон	C_3H_6O	58,08	791	178,2	329,7	66	542	7,2506	1281,7	237	258	366
Ацетонитрил	C_2H_3N	41,05	783	229,3	354,8	78,2	519	8,151	1838,2	73	—	—
Ацетофенон	C_8H_8O	120,15	1028	292,8	475,2	62,2	698	7,513	1946	220	—	—
Бензальдегид	C_7H_6O	106,13	1041	216,0	418,4	10470	614	7,9405	2113,1	273	280	419
Бензилхлорид	C_7H_7Cl	126,59	1100		507,2	60,9	745	7,6605	2217,8	230	—	—
Бензилцианид	C_8H_7N	117,15	1017	249,4	373,2	60,3	577	6,01401	1023,6	230	—	—
Бензин «Галоша»	Смесь	101	751	—	470,4	60,6	573	7,9245	2372	273	—	—
Бензоилхлорид	C_7HSOCl	140,57	1212	—	522,0	—	767	7,4539	1820,0	148	405	560
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	122,12	1075	395,6	522,0	—	767	7,4539	1820,0	148	405	560
Бензол	C_6H_6	78,12	879	278,7	353,3	70,00	380	6,984	1252,8	225	—	—
Бром	Br_2	159,82	3102	265,9	331,1	146	533	9,82	2210	73	—	—
Бутадиен-1,3	C_4H_6	54,09	650	164,3	268,7	67,7	395	6,6707	854,75	230	—	—
Бутан	C_4H_{10}	58,12	579	134,8	272,7	68	401	6,8089	935,85	239	195	290
Бутанол	$C_4H_{10}O$	74,12	824,6	183,2	390,7	51900	574	9,5973	2664,7	280	274	399
Бутанон-2	C_4H_8O	72,10	—	187,2	352,8	—	518	7,0245	1292,8	232	225	353
Бутанонитрил	C_4H_7N	69,09	792	161	390,2	58	574	7,0395	1390,7	217	307	433
Бутен-1	C_4H_8	56,08	595	87,8	266,9	72	392	6,8426	926,09	240	190	295
Бутен-2	C_4H_8	56,08	621	134,3	276,9	71	407	6,8692	960,09	237	200	305
Бутен-1-он-3	C_4N_6O	70,09	710	227,6	278,1	77	409	6,9530	956,99	230	200	305
Бутиламин	$C_4H_{11}N$	73,14	740	224,1	351	59,5	516	8,103	1709	273		
н-Бутиланилин	$C_{10}H_{15}N$	149,24	932	259,0	513,9		755	7,1221	1771,8	177	385	560
н-Бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	116,16	882	199,7	399,2	66,4	575	7,006	1340,7	199	273	373
Бутилбензоат	$C_{11}H_{14}O_2$	178,23	1006	251	523	—	769	7,0947	1906	179	390	570
втор-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	134,22	860	185,2	456,4	—	617	6,9831	1577,9	201	335	486
Бутилен	C_4H_8	56,08	594	132,8	266,2	75	391	6,8413	923,19	240	190	290
Бутилхлорид	C_4H_9Cl	92,57	886	150,1	351,2	69	516	6,9378	1227,4	224	255	385
втор-Бутилхлорид	C_4H_9Cl	92,57	873	141,8	341,2	98	502	6,9446	1195,8	226	250	375
н-Бутилциклогексан	$C_{10}H_{20}$	140,27	799	198,4	454,1	51	668	6,9102	1538,5	201	332	485
втор-Бутилциклогексан	$C_{10}H_{20}$	140,27	813	—	452,5	52	665	6,8909	1530,7	202	360	470
трет-Бутилциклогексан	$C_{10}H_{20}$	140,27	813	232,0	444,7	54	654	6,8567	1501,7	206	357	450
Бутин-1	C_4H_6	54,09	650	147,4	281,2	72	413	6,9749	986,45	233	200	300
Бутин-2	C_4H_6	54,09	691	240,9	300,2	71	441	7,0733	1101,7	236	240	320
γ-Бутиролактон	$C_4H_6O_2$-	86,09	1128	229,7	477,2	61,4	587	8,1669	2286,2	230	—	—
Винилацетат	$C_4H_6O_2$	86,09	932	173	345,7	68,4	508	8,091	1797,4	273	—	—
Винилформиат	$C_3H_4O_2$	72,06	963	215,5	319,6	88	470	7,2323	1116,0	210	240	350

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293$K и $p = 100$кПа, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t \approx 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерленда Sat	const определения парциального давления паров жидкости (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана	
								const A	const B	const C	min	max
Винилхлорид	C_2H_3Cl	*62,50*	*910*	*119,5*	*259,8*	*84,4*	382	6,4971	783,4	230	—	—
Винилэтиловый эфир	C_4H_8O	72,11	793	157,9	308,7	73	454	6,9013	1063,7	229	225	340
Вода	H_2O	18,01	1000	273,2	373,2	82	673	7,9608	1678	230	—	—
Водород	H_2	*2,02*	*71*	*13,96*	*20,35*	*83*	*30*	*5,9208*	*71,614*	*270*	*14*	25
Водорода бромид	HBr	80,92	1241	186,3	206,4	171	375	8,734	1171	273	—	—
Водорода фторид	HF	20,01	990	189,8	293,1	116	360	7,3739	1316,8	273	—	—
Водорода иодид	NI	127,91	2803	222,4	237,6	171	349	5,6088	416,03	188	215	256
Гексадекан	$C_{16}H_{34}$	226,45		291,4	559,9		823	6,7875	1656,4	137	378	560
Гексадецен-1	$C_{16}H_{32}$	224,43	782	277,3	558,0	39	820	7,0443	1843,6	158	420	592
1-Гексадецилциклопентан	$C_{21}H_{42}$	294,57	632	—	637,0	—	936	7,1030	2048,0	121	488	674
Гексадиен-1,5-ин-3	C_6H_6	78,11	692	132,0	332,6	64	489	7,0073	1185,0	228	282	350
Гексаметилендиамин	$C_6H_{16}N_2$	116,21	825	315,2	477,2	48	582	8,566	2708	273	—	—
н-Гексан	C_6H_{14}	86,18	660	177,8	341,9	59	436	6,870	1166,3	224	219	342
Гексанол-1	$C_6H_{14}O$	102,17	—	221,21	430,4	—	632	7,2780	1420,3	165	329	430
Гексафторбензол	C_6F_6	186,05	1320	—	353,4	78	520	7,0329	1228,0	215	270	390
Гексафторэтан	C_2F_6	138,02	1590	172,4	195	136	287	6,7933	657,05	246	170	200
Гексен-1	C_6H_{10}	70,13	673	133,3	336,6	61	495	6,8656	1153,0	226	240	360
Гексен-2 (транс.)	C_6H_{12}	84,162	678	140,0	341	61	501	6,8934	1173,3	225	245	365
Гексен-2 (цис.)	C_6H_{12}	84,162	687	132,0	342,0	61	503	7,0380	1258,6	234	245	370
Гексен-3 (транс.)	C_6H_{12}	84,162	677	159,7	341,0	61	501	6,9177	1189,7	225	245	365
Гексен-3 (цис.)	C_6H_{12}	84,162	680	135,3	340,0	61	500	6,8785	1164,1	225	245	365
н-Гексилциклопентан	$C_{11}H_{22}$	154,30	632	—	476,3	49	700	6,9547	1608,0	192	351	507
Гелий	He	4,003	123	1,75	4,25	190	6	5,3207	14,649	271	4	4
н-Гептадекан	$C_{17}H_{36}$	240,48	778	295	575,2	37	846	7,0142	1865,1	149	434	610

Гептадеканол	$C_{17}H_{36}O$	256,47	870,8	327	597,0	37	878	6,7819	1595,0	85	464	656
Гептан	C_7H_{16}	100,20	700,5	182,2	371,6	5260	546	6,9515	1295,4	220	213	371
Гептанол-1	$C_7H_{16}O$	116,20	822	239,2	449,0	54	660	6,6476	1140,6	127	333	449
Гептен-1	C_7H_{14}	98,189	697	154,3	366,8	57	539	6,9006	1257,5	219	265	400
н-Гептилциклопентан	$C_{12}H_{24}$	168,32	632	—	497,3	47	731	6,9742	1672,2	184	368	529
Гидразин	N_2H_4	32,05	1010	274,7	386,7		568	8,8733	2266,4	266	356	385
Дейтерий	D_2	4,032	161,6	18,73	23,65	108	351	5,7741	68,570	273	19	25
Декалин (транс.)	$C_{10}H_{18}$	138,25	870	242,8	460,4	57	677	6,8613	1568,1	207	363	470
Декалин (цис.)	$C_{10}H_{18}$	138,25	897	230	468,9	57	689	6,8753	1594,5	203	368	495
Декан	$C_{10}H_{22}$	142,29	745,1	243,2	447,3	12700	657	7,3953	1810,0	228	290	447
Деканол	$C_{10}H_{22}O$	158,28	830	280,1	503,4	46	740	6,9224	1472,0	134	376	503
Децен-1	$C_{10}H_{20}$	140,27	741	206,9	443,7	49	652	6,9542	1497,5	197	356	460
н-Децилциклогексан	$C_{16}H_{32}$	224,43	876	—	570,8	40	839	7,0193	1899,3	161	463	573
н-Децилциклопентан	$C_{15}H_{30}$	210,41	631,9	—	552,5	42	812	7,0034	1825,7	163	413	586
Дибутиламин	$C_8H_{19}N$	129,25	767	211	432,8	52	637	7,2660	1616,4	209	322	459
Дибутиловый эфир	$C_8H_{18}O$	130,22	768	175,3	415,6	52	609	6,9824	1431,5	207	305	455
Дибутилфталат	$C_6H_{22}O$	278,35	1047	238	608,0	—	894	7,3629	2107,3	135	469	567
Диметиламин	C_2H_7N	45,09	656	181,0	280,1	86	412	7,0639	1024,4	238	218	310
N, N'-Диметиланилин	$C_8H_{11}N$	121,18	956	275,6	466,3	57	568	7,5373	1970,2	230	—	—
2,2'-Диметилбутан	C_6H_{14}	86,178	649	173,3	323,1	63	475	6,7548	1081,2	229	230	350
2,3-Диметилбутан	C_6H_{14}	86,178	662	144,6	331,1	62	487	6,8098	1127,2	229	235	354
2,3-Диметилбутен-1	C_6H_{12}	84,162	678	115,9	329,0	65	484	6,8623	1134,7	229	235	360
2,3-Диметилбутен-2	C_6H_{12}	84,162	708	198,9	346,3	64	509	6,9505	1215,4	225	250	375
3,3-Диметилбутен-1	C_6H_{12}	84,162	653	158	314,3	66	462	6,6774	1010,5	225	225	340
2,2-Диметилгексан	C_8H_{18}	114,23	645	152	382,0	55	562	6,8371	1273,6	215	276	405
2,3-Диметилгексан	C_8H_{18}	114,23	712	—	388,8	54	572	6,8700	1315,5	214	283	415
2,4-Диметилгексан	C_8H_{18}	114,23	700	—	382,6	54	562	6,8530	1287,8	215	278	408
2,5-Диметилгексан	C_8H_{18}	114,23	693	181,9	382,3	54	562	6,8598	1287,3	216	278	408
3,3-Диметилгексан	C_8H_{18}	114,23	710	147	385,1	55	566	6,8511	1307,8	217	279	411
3,4-Диметилгексан	C_8H_{18}	114,23	719	—	390,9	54	575	6,8798	1330,0	215	284	417
Диметилдихлорсилан	$C_2H_6Cl_2S$	129,06	1273	195,4	343,5	61	505	7,1435	1328	241	—	—
2,2-Диметилпентан	C_7H_{16}	100,21	674	149,4	352,2	58	518	6,8147	1190	223	254	378
2,3-Диметилпентан	C_7H_{16}	100,21	695	—	362,9	58	533	6,8537	1238	222	262	388
2,4-Диметилпентан	C_7H_{16}	100,21	673	154	362,9	58	533	6,8261	1192,0	222	256	378
3,3-Диметилпентан	C_7H_{16}	100,21	693	138,7	359,2	58	528	6,8266	1228,6	225	260	385
2,3-Диметилпиридин	C_7H_9N	107,16	942	—	434,0	—	638	7,4477	1832,6	240	420	440

Веществао	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293K$ и $p=100кПа$, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерленда Sat	const определения парциального давления паров жидкостн (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана		
								const A	const B	const C	min		max
2,5-Диметилпиридин	C_7H_9N	107,16	938	—	430,2	—	632	7,0809	1539,6	210	350		435
3,4-Диметилпиридин	C_7H_9N	107,16	954	—	452,3	—	665	7,3620	1840,1	232	400		460
3,5-Диметилпиридин	C_7H_9N	107,16	939	—		—	654	7,3330	1783,6	229	400		460
2,2-Диметилпропаноат	C_5H_{12}	72,151	591	256,6	282,6	67	416	6,6042	883,41	228	260		305
2,2-Диметилпропанол-1	$C_5H_{12}O$	88,150	783	327	384,7	65	566	7,8752	1604,7	208	328		406
Диметилсульфид	C_2H_6S	62,13	846	174,9	310,5	69,2	454	6,8811	1064	230	—		—
2,3-Диметилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	348	491	—	722	7,0539	1617,5	171	420		500
2,4-Диметилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	298	484	—	711	7,0553	1587,4	169	410		500
2,5-Диметилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	348	484,3	—	712	7,0514	1592,7	171	410		490
2,6-Диметилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	322	474,1	—	697	7,0706	1628,3	188	400		480
3,4-Диметилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	338	500	—	735	7,0791	1621,4	159	430		520
3,5-Диметилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	337	494,8	—	727	7,1307	1639,8	164	410		500
Диметилформамид	C_3H_7NO	73,049	948,7	212,7	486,2	66,2	593	7,034	1483	204	248		426
1,2-Диметилциклогексан (транс.)	C_8H_{16}	112,22	776	185,0	396,6	61	583	6,8330	1353,9	219	286		424
1,2-Диметилциклогексан (цис.)	C_8H_{16}	112,22	796	223,1	402,9	61	592	6,8374	1367,3	216	290		430
1,3-Диметилциклогексан (транс.)	C_8H_{16}	112,22	785	183,0	397,6	61	585	6,8345	1343,7	215	288		425
1,3-Диметилциклогексан (цис.)	C_8H_{16}	112,22	766	197,6	393,3	61	578	6,8388	1338,5	218	284		420
1,4-Диметилциклогексан (транс.)	C_8H_{16}	112,22	763	236,2	392,5	61	577	6,8177	1330,4	218	283		420

1,4-Диметилциклогексан (цис.)	C_8H_{16}	112,22	783	185,7	397,5	61	585	6,8328	1345,6	216	287	425
1,1-Диметилциклопентан	C_7H_{14}	98,189	759	203,4	361,0	60	531	6,8172	1219,5	222	260	390
1,2-Диметилциклопентан (транс.)	C_7H_{14}	98,189	759	155,6	365,0	67	537	6,8441	1242,7	222	260	500
1,2-Диметилциклопентан	C_7H_{14}	98,189	777	219,3	372,7	67	548	6,8500	1269,1	220	270	400
1,4-Диоксан	$C_4H_8O_2$	88,11	—	284,9	350,3	—	514	7,5161	1632,4	251	285	374
Дипропиламин	$C_6H_{15}N$	101,19	738	210	383,8	59	564	7,2066	1415,4	218	302	422
Диатолилметан	$C_{15}H_{16}$	196,29	895	—	565,2	53,3	689	8,61	3200	273	—	—
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	154,22	1180	342,4	528,8	52	664	8,569	2565	273	—	—
Дифенилметан	$C_{13}H_{12}$	168,24	1006	300	537,5	—	790	6,2910	1260,5	105	473	563
1,1-Дифторэтан	$C_2H_4F_2$	66,05	976,6	156,2	248,5	109	365	7,0299	909,99	244	238	273
1,2-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	147,01	1306	256,1	445	—	669	7,0702	1649,5	213	331	483
1,3-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	147,01	1288	248,4	445,0	—	669	7,3036	1782,4	230	326	475
1,4-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	147,01	1248	326,3	446,5	—	656	6,9979	1575,1	209	327	477
Дихлорметан	CH_2Cl_2	84,94	1325	178,1	313	91	425	7,071	1134,6	231	—	—
1,2-Дихлорпропан	$C_3H_6Cl_2$	112,99	1150	172,7	370,0	77	544	6,9654	1296,4	221	288	408
1,1-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	98,97	1168	176,2	330,5	86	486	6,9852	1171,4	228	242	352
1,2-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	98,97	1254	273,2	356,7	61	524	7,661	1640,2	260	252	356
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	73,14	707	223,4	328,6	66,2	484	7,2231	1267,5	236	240	332
1,4-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	134,22	862	231	456,9	—	672	6,9981	1588,3	202	335	487
Диэтиленгликоль	$C_4H_{10}O_3$	106,12	1116	265	519	60	632	8,1527	2727,3	273	—	—
Диэтилкарбонат	$C_5H_{10}O_3$	118,13	976	—	399,2	57,5	586	7,5695	1669,2	230	—	—
Диэтилкетон	$C_5H_{10}O$	86,13	814	234,2	375,1	63,2	552	8,3019	1803,6	230	—	—
Диэтилоксалат	$C_6H_{10}O_4$	146,15	1078	—	458,6	65,4	559	4,2612	573,42	30	—	1
3,3-Диэтилпентан	C_9H_{20}	128,26	752	—	419,3	52	616	6,8926	1451,2	216	350	440
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	90,19	837	169,2	365,2	—	537	6,9283	1257,8	219	260	390
Додекан	$C_{12}H_{26}$	170,34	763,3	263,6	489,4	22640	719	8,1708	2463,7	254	321	490
Додеканол	$C_{12}H_{26}O$	186,33	835	297,1	533,1	43	789	6,6289	1408	116	407	580
Додецен-1	$C_{12}H_{24}$	168,32	758	238,0	486,5	45	715	6,9751	1619,8	182	361	517
н-Додецилциклопентан	$C_{17}H_{34}$	238,46	870,5	—	584,1	39	859	7,0318	1909,1	149	441	619
Изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	134,22	853	221,7	445,9	—	655	6,9280	1525,4	204	326	476
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	102,13	885	178	371,4	69	546	7,0482	1294,4	209	278	409
Изобутилциклогексан	$C_{10}H_{20}$	140,27	795	—	444,5	52	653	6,8679	1493,1	203	355	455
Изопропиламин	C_3H_9N	59,11	717	190	307,2	70	452	6,9468	1108,2	224	235	350
Изопропилбензол (кумол)	C_9H_{12}	120,18	878,6	177,2	425,5	10750	625	6,9377	1461,0	208	276	926
Изопропилхлорид	C_3H_7Cl	78,54	862	156	308,9	80	453	6,9653	1081,6	230	225	340

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293$ K и $p = 100$ кПа, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерлеида Sat	const определения парциального давления паров жидкости (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана	
								const A	const B	const C	min	max
Изопропилциклогексан	C_9H_{18}	126,24	802	183,4	427,8	55	629	6,8731	1453,2	209	330	440
Изопропилциклопентан	C_8H_{16}	112,22	776	160,5	399,6	59	587	6,8661	1379,4	218	289	427
Иод	I_2	253,80	4940	386,8	458,7	123	568	16,250	3158	2,0	—	—
α-Ионон	$C_{13}H_{20}O$	192,30	930	—	523,2	53	768	8,1451	2526,9	230	—	—
Капролактам	$C_6H_{11}NO$	113,16	1002	342,2	535,2	58,2	768	6,78	2344	273	—	—
Керосин	Смесь		819	—	568,7	52,5	650	6,0000	1223,9	203	—	—
Кислород	O_2	31,99	1149	54,4	90,15	191	133	6,6913	319,01	267	63	100
Кислота акриловая	$C_3H_4O_2$	72,06	1051	285	414,2	74	609	7,1926	1441,5	193	315	450
Кислота валериановая	$C_5H_{10}O_2$	102,14	939	239	459,5	60	676	7,6568	1777,2	187	350	495
Кислота масляная	$C_4H_8O_2$	88,10	958	267,9	436,7	62,8	532	9,291	2774	273	—	—
Кислота 2-метилпропановая	$C_4H_8O_2$	88,107	968	227,2	427,2	66	628	7,2870	1470,3	179	330	465
Кислота муравьиная	CH_2O_2	46,03	1219	281,5	373,8	85,7	457	12,486	8160	273	—	—
Кислота пропионовая	$C_3H_6O_2$	74,08	993	252,5	414,0	64,6	609	7,8369	1839,2	230	—	—
Кислота уксусная	$C_2H_4O_2$	60,05	1049	289,8	391,1	72	575	7,557	1642,5	273	273	391
Кислота фенилуксусная	$C_8H_8O_2$	136,15	228	—	538,7	55,8	655	8,4849	2776,8	230	—	—
Кислота хлороводородная	HCl	36,46	1149	—	358,3	137	356	8,443	1023,1	273	—	—
Кислота хлоруксусная	$C_2H_3O_2Cl$	94,50	1580	—	462,3	78,5	679	12,486	3160	273	—	—
Кислота циановодородная	HCN	27,03	688	259,4	298,8	89	439	9,372	1877	273	—	—
м-Крезол	C_7H_8O	108,13	1034	285,4	475,9	—	700	7,5079	1856,3	199	370	480
п-Крезол	C_7H_8O	108,13	1019	307,9	475,6	—	699	7,0350	1511,1	162	370	480
о-Крезол	C_7H_8O	108,13	1028	304,1	464,0	—	682	6,9116	1435,5	165	370	480
Кремния тетрахлорид	$SiCl_4$	169,90	1480	203,2	330,4	92	486	6,8626	1144	230	238	364

Криптон	Kr	83,80	2420	115,8	119,8	232	176	6,6306	416,38	26	113	129
Ксенон	Xe	131,30	3060	161,3	165	211	243	6,6428	566,28	259	158	178
н-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	121,18										
о-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	121,18	993	—	491,1	57	601	7,633	2035,4	216	—	—
м-Ксилол	C_8H_{10}	106,17	881,1	225,2	412,3	8000	606	7,0085	1461,9	215	251	493
п-Ксилол	C_8H_{10}	106,17		286,5	411,5	—	604	6,9918	1454,3	215	286	493
Мезитила оксид	$C_6H_{10}O$	98,15	865	—	402,8	58,3	491	7,012	1399,1	209	—	—
Метан	CH_4	16,03	425	90,7	111,7	101	164	6,6118	389,92	266	93	120
Метанол	CH_4O	32,04	792	175,5	337,9	87	487	8,349	1835	273	263	363
Метантиол	CH_4S	48,10	866	150	279,2	84	410	7,0315	1015,5	239	200	300
Метилакрилат	$C_4H_7O_2$	86,09	956	196,7	353,2	72	519	6,9959	1211,0	214	260	390
Метиламин	CH_5N	31,06	699	179,7	266,7	78,6	392	8,911	1577	237	—	—
2-Метил-2-аминопропан	$C_4H_{11}N$	73,14	687	188	340,6	67	502	7,0103	1174,4	217	251	373
2-Метиланилин	C_7H_9N	107,15	998	258,4	476,3	—	700	7,2889	1768,7	201	375	500
3-Метиланилин	C_7H_9N	107,15	989	242,8	473,3	—	696	7,2743	1772	200	355	500
4-Метиланилин	C_7H_9N	107,15	964	316,9	473,3	—	696	7,2513	1755	201	350	500
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	74,08	934	175	330,2	74	485	7,0049	1130	217	245	360
Метилбензоат	$C_8H_8O_2$	136,15	1089	260,8	472,6	—	695	7,0473	1629,4	192	350	516
Метилбромид	CH_3Br	94,95	1675	179,5	276,8	148	407	6,959	986,59	238	—	—
2-Метилбутадиен-1,3	C_5H_8	68,11	686	159,5	314,2	—	462	6,9434	1103,9	231	250	335
2-Метилбутан	C_5H_{12}	72,15	639,2	113,2	301	63,8	442	6,7931	1022,6	233	190	301
2-Метилбутанол-1	$C_5H_{12}O$	88,15	819	203	401,2	63	590	7,0662	1195,2	157	307	402
2-Метилбутанол-2	$C_5H_{12}O$	88,15	809	264,4	375	65	551	6,5193	863,40	135	298	375
3-Метилбутанол-1	$C_5H_{12}O$	88,15	810	156	403,7	63	593	7,2582	1314,3	169	298	426
3-Метилбутанон-2	$C_5H_{10}O$	86,13	803	181	367,4	62	538	6,1573	865,60	170	271	406
2-Метилбутен-1	C_5H_{10}	70,13	650	135,6	304,3	68	447	6,8731	1053,8	233	220	325
2-Метилбутен-2	C_5H_{10}	70,13	662	139,4	312,0	67	459	6,9155	1095,1	233	226	335
3-Метилбутен-2	C_5H_{10}	70,13	627	104,7	293,2	68	431	6,8261	1013,5	237	210	315
2-Метилгексан	C_7H_{16}	100,21	679	154,9	363,2	56	534	6,8731	1235,6	220	264	390
3-Метилгексан	C_7H_{16}	100,21	687	100	365	56	537	6,8676	1240,2	219	265	390
2-Метилгептан	C_8H_{18}	114,23	702	164	390,8	53	575	6,9173	1337,5	214	285	417
3-Метилгептан	C_8H_{18}	114,23	706	152,7	392,1	53	576	6,8993	1331,5	212	286	418
4-Метилгептан	C_8H_{18}	114,23	705	152,2	390,9	53	575	6,9006	1327,6	213	285	417
Метилгидразин	CH_6N_2	46,07	747	—	360,7	84	535	6,5752	1007,5	181	270	400
1-Метил-2-изопропилбензол	$C_{10}H_{14}$	134,22	876	—	451,5	—	664	6,9403	1548	203	330	481

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293$K и $p = 100$кПа, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерленда Sat	const определения парциального давления паров жидкости (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана	
								const A	const B	const C	min	max
1-Метил-3-изопропилбензол	$C_{10}H_{14}$	134,22	861	—	448,4	—	659	6,9404	1539,0	204	328	478
1-Метил-4-изопропилбензол	$C_{10}H_{14}$	134,22	857	200	450,4	—	662	6,9236	1537	203	329	480
Метилиодид	CH_3I	141,94	2279	206,7	315,8	143	464	6,8569	1083,1	230	—	—
Метилметакрилат	$C_5H_8O_2$	100,12	946	—	374,4	61,5	456	7,2467	1446	230	—	—
2-Метилнафталин	$C_{11}H_{10}$	142,20	990	307,7	514,2		756	7,0684	1840,2	198	377	548
2-Метилпентан	C_6H_{14}	86,178	653	119,5	333,4	60	490	6,8390	1135,4	227	240	370
3-Метилпентан	C_6H_{14}	86,178	664	155	336,4	60	495	6,8488	1152,4	227	240	365
2-Метилпентанон-4	$C_6H_{12}O$	100,16	801	189	390,0	58	573	6,8255	1256,7	202	285	425
2-Метилпентен-2	C_6H_{12}	84,12	691	138,1	341	62	501	6,9236	1183,8	225	245	370
3-Метилпентен-2 (транс.)	C_6H_{12}	84,12	698	134,7	343,6	62	584	6,9106	1186,4	227	248	364
3-Метилпентен-2 (цис.)	C_6H_{12}	84,12	694	138,3	340,8	62	501	6,9262	1194,5	225	250	366
4-Метилпентен-2 (транс.)	C_6H_{12}	84,12	669	132	331,7	62	488	6,8802	1142,9	227	240	354
4-Метилпентен-2 (цис.)	C_6H_{12}	84,12	669	139	332,5	62	489	6,8412	1120,7	227	238	352
2-Метилпропан	C_4H_{10}	58,12	557	113,6	261,5	69	384	6,7480	882,79	240	187	280
2-Метилпропаналь	C_4H_8O	72,10	789	208,2	335,2	68	493	6,9438	1162,6	222	247	370
Метилпропаноат	$C_4H_8O_2$	88,11	915	185,7	353,1	69	519	7,0222	1217,8	214	260	385
2-Метил-1-пропанол-1	$C_4H_{10}O$	74,12	802,7	165,2	390,7	83000	575	8,7051	2058,4	246	264	389
2-Метил-4-пропанол-2	$C_4H_{10}O$	74,123	787	298,8	356	68	523	7,3199	1154,5	178	293	380
2-Метилпропилацетат	$C_6H_{12}O_2$	116,16	869	185	384,2	60	566	7,0231	1343,2	207	289	427
α-Метилстирол	C_4H_{10}	118,18	908	—	438,6	56,6	534	7,2668	1680,1	220	—	—
Метилфениламин	C_7H_9N	107,15	989	—	473,2		696	7,0818	1631,3	192	320	480
2-Метил-2-фенилпропан	$C_{10}H_{14}$	134,22	867	215,3	442,3	—	650	6,9182	1503,6	203	32	472

Метилформиат	$C_2H_2O_2$	60,05	974	174,2	304,7	81	448	7,1703	1125,2	230	225	324
Метилфторид	CH_3F	34,033	889	131,4	194,8	119	286	7,0975	740,21	254	141	209
Метилхлорид	CH_3Cl	50,49	990	175,4	249	98	441	6,994	902,4	244	—	—
2-Метил-2-хлорпропан	C_4H_9Cl	92,569	842	247,8	324,2	75	477	6,8670	1114,9	229	235	360
Метилциклогексан	C_7H_{14}	98,19	774	146,6	374,0	61	550	6,8229	1270,7	221	270	400
Метилциклопентан	C_6H_{12}	84,16	754	130,7	345	67	507	6,8623	1186	226	250	375
1-Метил-2-этилбензол	C_9H_{12}	120,20	881	192,3	438,3	—	644	7,0031	1535,4	207	321	467
1-Метил-3-этилбензол	C_9H_{12}	120,20	865	177,6	434,5		638	7,0157	1529,2	209	318	463
1-Метил-4-этилбензол	C_9H_{12}	120,20	861	210,8	435,2	—	640	6,9979	1527,1	209	318	463
Метилэтилкетон	C_4H_{80}	72,10	805	186,5	352,8	63	430	7,764	1725	273	225	353
2-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	114,23	719	158,2	230,8	54	560	6,8635	1326,8	215	282	415
3-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	114,23	727	182,3	391,5	55	576	6,8673	1347,2	220	283	418
Метилэтилсульфид	C_3H_8S	76,16	837	167,2	340,1	—	500	6,9384	1182,5	225	250	360
1-Метил-1-этилциклопентан	C_8H_{18}	112,22	—	—	394,7	56	580	6,8714	1355,3	218	285	420
Метоксибензол	C_7H_8O	108,14	996	235,7	428	—	629	7,0526	1490	204	370	440
Нафталин	$C_{10}H_8$	128,17	—	353,5	491,1	—	722	10,555	3123,3	244	273	353
Неон	Ne	20,18	1204	24,5	26,95	294	40	6,0844	78,376	271	24	29
Нитрозилхлорид	ClNO	65,46	1397	213,5	267,7	109	394	7,3614	1094,7	250	210	285
Нитрометан	CH_3NO_2	61,04	1138	244,6	374,4	72	550	7,0439	1291,0	209	278	409
н-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	137,14	1122	—	511,2	67,7	623	7,9728	2513	273	—	—
н-Нонадекан	$C_{19}H_4O$	268,53	796	305	603,1	35	887	7,0152	1932,8	138	456	639
Нонан	C_9H_2O	128,25	733,2	219,2	423,9	9680	623	7,0528	1510,7	212	275	423
Нонен-1	C_9H_{18}	126,24	745	191,8	420	51	617	6,9538	1435,3	206	308	448
н-Нонилциклопентан	$C_{14}H_{28}$	196,38	656	—	535,3	43	787	6,9959	1779	170	400	569
Озон	O_3	48,00	1356	80,5	161,3	140	237	6,8369	552,50	251	109	174
Октадекан	$C_{18}H_{36}$	254,50	781,6	301,3	589,5	36	867	7,0021	1894,3	143	445	625
Октадеканол-1	$C_{18}H_{38}O$	270,50	836,7	331	608	36	894	6,8139	1718,8	80	474	658
Октадецен-1	$C_{18}H_{36}$	252,49	789	290,8	588	37	864	7,0451	1917,9	146	444	623
Октан	C_8H_{18}	114,23	718,5	216,2	398,8	7140	586	6,9690	1379,6	212	259	339
Октанол-1	$C_8H_{18}O$	130,22	826	257,7	468,4	47,9	571	6,596	1170,1	20	—	—
Октанол-2	$C_8H_{18}O$	130,22	821	241,2	452,9	48,9	664	6,434	1066	120	—	—
Октен-1	C_8H_{16}	112,22	715	171,4	394,4	54	580	6,9326	1353,5	213	288	420
Октен-2 (транс.)	C_8H_{16}	112,22	720	185,4	398,1	53	585	6,8858	1361,5	215	289	425
н-Октилциклопентан	$C_{13}H_{26}$	182,35	658	—	516,9	45	760	6,9895	1729,8	177	385	549
Пентадекан	$C_{15}H_{32}$	212,42	775,2	283,1	543,9	28410	799	6,9424	1739,1	158	365	543
Пентадецилциклопентан	$C_{20}H_{40}$	280,54	648,7	—	625,0	36	919	7,0829	2016,0	128	476	661
Пентадиен-1,3 (транс)	C_5H_8	68,12	676	185,7	315,2	69	463	6,9131	1103,8	232	250	340

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293$ K и $p = 100$ кПа, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p \approx 100$ кПа	const Сатерленда *Sat*	const определения парциального давления паров жидкости (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана	
								const *A*	const *B*	const *C*	min	max
Пентадиен-1,4	C_5H_8	68,12	661	124,9	229,1	70	440	6,8354	1018	231	240	320
Пентан	C_5H_{12}	72,15	645,5	143,2	309,2	2830	454	6,8472	1062,6	232	223	309
Пентаналь (валериановый альдегид)	$C_5H_{10}O$	86,13	810	182	376,6	61	554	7,0191	1316	215	277	412
Пентанол	$C_5H_{12}O$	88,15	—	194,2	411	—	604	7,1825	1287,6	161	347	430
Пентанол-2	$C_5H_{12}O$	88,15	814	—	401,2	58,4	589	8,4217	1931	230	—	—
Пентанон-2	$C_5H_{10}O$	86,13	—	195,2	374,9	—	551	7,8642	1870,4	273	256	376
Пентен-1	C_5H_{10}	70,13	—	108,2	303,1	—	445	6,7857	1014,3	230	213	373
Пентен-2 (транс)	C_5H_{10}	70,13	649	132,9	309,5	65	455	6,9057	1084	233	220	330
Пентен-2 (цис)	C_5H_{10}	70,13	656	121,8	310,1	65	456	6,8727	1067,9	231	220	330
Пентилацетат	$C_7H_{14}O_2$	130,20	—	—	421,2	—	619	7,1687	1579,5	221	298	420
Пентин-1	C_5H_8	68,12	690	167,5	313,3	66	460	6,9673	1092,5	227	230	335
Перфторгексан	C_6F_{14}	338,04	1605	186,0	330,3	96	446	6,8751	1080,8	213	270	330
Перфторгептан	C_7F_{16}	338,05	1733	195	355,7	106	523	6,9377	1181,1	209	270	390
Перфторметилциклогексан	C_7F_{14}	350,06	—	—	349,5	83	514	6,8240	1133,7	211	290	385
Перфторциклогексан	C_6F_{12}	300,05	1553	—	325,7	88	479	6,0404	596,74	136	280	400
α-Пиколин	C_6H_7N	93,13	950	—	402	61,7	591	8,375	2194	273	—	—
β-Пиколин	C_6H_7N	93,13	961	—	417,2	60,7	613	7,032	1469,9	210	—	—
γ-Пиколин	C_6H_7N	93,13	955	276,9	418,5	60,3	614	7,0425	1469,9	210	343	418
Пиперидин	$C_5H_{11}N$	85,15	862	262,7	379,5	—	558	6,9922	1309,6	212	280	416
Пиридин	C_5H_5N	79,10	983	231,5	388,5	66,5	570	6,8827	1281,3	205	254	389
Пиррол	C_4H_5N	67,09	967	—	404,2	—	594	7,2946	1501,5	210	330	440
Пирролидин	C_4H_9N	71,12	852	—	360,2	—	530	6,9245	1180,0	205	300	400

Пропадиен	C_3H_4	40,06	658	136,9	238,8	—	351	5,7136	458,05	196	174	257
Пропан	C_3H_8	44,09	582	85,5	231,2	75	340	6,8296	813,19	248	164	249
Пропандиол-1,2	$C_3H_8O_2$	76,09	1036	213	460,5	71	677	8,9170	2645,7	251	357	483
Пропанол	C_3H_8O	60,09	805	146,9	370,4	68	518	9,518	2469,1	273	273	370
Пропанол-2	C_3H_8O	60,09	786	183,7	355,7	70	460	10,449	2365,2	230	247	421
Пропен (пропилен)	C_3H_6	42,08	612	87,9	225,4	78	331	6,8195	784,99	247	160	240
Пропеналь	C_3H_6O	56,06	797	193	224,4	72	330	7,0492	1154,8	229	235	350
н-Пропиламин	C_3H_9N	59,11	717	190	321,8	64	473	7,11	1177,9	230		
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	102,14	887	178	374,8	63	556	7,0481	1294,4	209	280	410
Пропилбензол	C_9H_{12}	120,18	862	173,7	432,4	—	635	6,9513	1491,3	207	316	461
α-Пропиленоксид	C_3H_6O	58,08	829	161	307,5	74,3	453	6,9699	1065,3	226		
Пропилпропаноат	$C_6H_{12}O_2$	70,05	883	—	395,6	62,3	581	8,0525	2048,5	273	—	—
Пропилхлорид	C_3H_7Cl	78,54	891	150,4	319,6	77	469	6,9310	1121,1	230	230	350
Пропилциклогексан	C_9H_{18}	126,24	793	178,7	429,9	54		6,8864	1460,8	208	313	459
н-Пропилциклопентан	C_8H_{16}	112,22	781	155,8	404,1	58	594	6,9039	1384,4	213	294	431
Пропин (метилацетилен)	C_3H_4	40,06	706	170,5	249,9	81	367	6,7848	803,72	229	183	267
Пропионитрил	C_3H_5N	55,08	782	180,3	369,2	61	543	6,6300	1277,2	218	270	405
Ртуть	Hg	200,59	13546	234,3	629,1	273	103	7,85	3127	273	—	—
Сероводород	H_2S	34,08	960	136,5	263,0	116	331	8,50	1175,3	273	—	—
Сероуглерод	CS_2	76,14	1263	161,3	319,4	89	449	6,770	1074,2	230	258	353
Серы(IV) оксид	SO_2	64,06	1383	197,7	263	117	396	4,898	1227	273	—	—
Серы(VI) оксид	SO_3	80,06	1940	280	324,3	80,3	476	9,89	2230	273	—	—
Серы(VI) фторид	SF_6	146,05	1914	222,5	209,3	149	308	8,4159	1096,5	262	159	220
Спирт аллиловый	C_3H_6O	58,080	855	144	370,2	77	544	7,3424	1271,7	188	286	400
Спирт изобутиловый	$C_4H_{10}O$	74,12	802	165,2	381	66	560	8,7051	2058,4	246	264	389
Стирилкарбинол	$C_9H_{10}O$	134,18	1044	—	523,2	51,2	638	7,8557	2387,9	273	—	—
Стирол	C_8H_8	104,15	906	242,5	418,4	61,7	614	7,267	1604,6	222	266	419
Тетрагидрофуран	C_4H_8O	72,10	—	208,2	338,2	—	497	5,9996	753,81	176	298	339
Тетрадекан	$C_{14}H_3O$	198,39	769,7	279	526,7	29600	774	7,2751	1950,5	191	349	527
Тетрадецен-1	$C_{14}H_{28}$	196,38	773,2	260,3	524,3	42	771	7,0200	1745	170	392	557
Тетрафторметан	CF_4	88,01	1774	86,4	145,2	163	243	6,9722	540,50	260	93	148
Тетрафторэтилен	C_2F_4	100,02	1519	130,7	194,8	108	200	6,8965	653,83	246	140	210
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	165,85	1624	251	394,2	76,1	579	7,02	1415,5	221	—	—
Тионилхлорид	$SOCl_2$	118,95	1655	168,7	348	87,3	511	7,65	1660	273	—	—
Тиофен	C_4H_4S	84,14	107	234,9	357,3	78	525	6,9592	1246	221	260	380
Толуол	C_7H_8	92,14	866	178	383,8	76,5	518	6,9530	1343,9	219	303	573
Трибутиламин	$C_{12}H_{27}N$	185,36	779	—	486,6	—	715	7,0736	1678,8	187	362	531

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293$K и $p = 100$кПа, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, K	Температура кипения $T_к$, K	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерленда Sat	const определения парциального давления паров жидкостн (const Антуана)			Интервал температур для const Антуана	
								const A	const B	const C	min	max
Тридекан	$C_{13}H_{28}$	184,36	770,4	267,8	508,6	29620	748	7,9690	2468,9	250	332	509
1-Тридецен	$C_{13}H_{26}$	182,35	766	250,1	505,9	43	744	6,9856	1674,7	175	377	537
н-Тридецилциклопентан	$C_{18}H_{36}$	252,49	650,6	—	528,6	38	880	7,0472	1947	142	453	634
Триметиламин	C_3H_9N	59,11	633	156	276,1	—	406	6,9703	968,69	234	215	305
1,2,3-Триметилбензол	C_9H_{12}	120,	894	247,7	449,2	—	660	7,0408	1593,9	207	329	479
1,2,4-Триметилбензол	C_9H_{12}	120,19	880	227	442,5	—	650	7,0437	1593,0	207	329	479
1,3,5-Триметилбензол	C_9H_{12}	120,	865	228,4	437,9	—	643	7,0743	1569,6	210	321	466
2,2,3-Триметилбутан	C_7H_{16}	100,21	690	248,3	354,1	60	521	6,7922	1200,6	226	254	379
2,3,3-Триметилбутан-1	C_7H_{14}	98,19	705	163,3	351	62	516	6,7982	1181	224	253	375
2,2,3-Триметилгексан	C_9H_{20}	128,26	—	—	406,8	53	598	6,8625	1374,2	211	297	436
2,2,4-Триметилгексан	C_9H_{20}	128,26	716,7	153	399,7	53	588	6,8461	1339,4	211	291	428
2,2,5-Триметилгексан	C_9H_{20}	128,26	717	167,4	397,3	53	584	6,8377	1325,5	211	315	420
3.3,5-Триметилгептан	$C_{10}H_{22}$	142,29	493	—	428,8	50	630	6,8552	1435,4	205	313	458
2,2,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	114,23	716	160,9	383	56	563	6,8254	1294,9	218	277	409
2,2,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	114,23	—	166,2	372,4	—	547	6,8117	1259,2	221	258	404
2,3,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	114,23	726	172,5	387,9	56	570	6,8435	1328,	220	280	415
2,3,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	114,23	719	163,9	386,6	56	658	6,8539	1315,1	218	280	413
1,1,2-Триметилциклопентан	C_8H_{16}	112,22	—	—	386,9	60	569	6,8220	1309,6	218	279	414
1,1,3-Триметилциклопентан	C_8H_{16}	112,22	—	—	378	60	556	6,8094	1276	220	273	404
1,2,4-Триметилциклопентан	C_8H_{16}	112,22	—	—	391,0	66	575	6,8419	1335	219	283	418
1,1,1-Трифторэтан	$C_2H_3F_3$	84,04	1005	161,5	226,4	121	332	6,9037	788,20	243	270	300
1,2,2-Трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	187,39	1658	238,2	320,7	94	471	6,8801	1099,9	227	250	360
1,2,3-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	147,44	1389	258,5	430,2	74	632	7,0028	1484,1	204	315	470

Трихлорфторметан	CCl_3F	137,38	1491	162	297	98	437	6,8842	1043	237	240	300
1,1,2-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	133,42	1441	236,5	386,7	85	562	6,9652	1351	217	302	428
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	131,39	1462	186,8	360,3	82,5	529	7,028	1315	230	—	—
Триэтаноламин	$C_6H_{15}O_3N$	149,19	1124	294,4	550,2	50,7	671	3,9625	548,4	230	—	—
Триэтиламин	$C_6H_{15}N$	101,19	728	158,4	362,6	—	533	6,8988	1251,8	222	260	400
Уайт-спирит		147,3	770	—	413,2	47,9	622	8,0113	2218,3	273	—	—
Углерод четыреххлористый	CCl_4	153,84	1587	250,3	349,7	90	335	6,934	1242,4	230	—	—
Углерода диоксид	CO_2	44,01	770	216,6	194,9	137	254	9,9082	1367,3	273	—	—
Углерода оксид	CO	28,01	310	68,15	81,55	166	101	3,98	3241	273	—	—
Углерода оксид-дихлорид (фосген)	$COCl_2$	98,916	1376	145	281,1	98,3	413	7,54	1310	273		
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	156,31	—	247,2	469,2	17420	690	7,6801	2103	243	304	470
Ундецен-1	$C_{11}H_{22}$	154,30	751	224	465,8	47	685	6,9665	1562,5	190	345	496
Фенантрен	$C_{14}H_{10}$	178,18	1169	373,7	612,6	—	901	7,2608	2379	204	450	655
Фенилбромид	C_6H_5Br	157,02	1495	242,3	429,2	84,3	631	7,353	1696,4	227	—	—
2-Фенилбутан	$C_{10}H_{14}$	134,22	862	197,7	446,5	—	656	6,9486	1539,2	205	323	476
Фенилиодид	C_6H_5	240,01	1855	241,8	451,7	—	664	7,0118	1640,1	209	290	470
Фенилкарбинол	C_7H_8O	108,13	1045	257,8	478,3	66,9	702	7,9342	2130	218	—	—
Фенол	C_6H_6O	94,11	1075	—	455	61,4	554	11,563	3586,3	273	—	—
Формальдегид	CH_2O	30,03	815	156	254	89,7	373	6,9050	847,1	230	254	333
Формамид	CH_3ON	45,04	1133		483,7	68,7	589	9,3206	2836,7	230	—	—
Фосфора оксид-трихлорид	$POCl_3$	153,33	1675	174,4	380,4	86,3	555	7,72	1830	273	—	—
Фосфора(III) хлорид	PCl_3	137,33	1574	182,9	349,2	86,8	513	7,681	1664	273	—	—
Фосфора(VI) хлорид	PCl_5	208,24	2110	440	432,3	87	636	14,034	3523	273	—	—
Фтор	F_2	38,00	1510	53,55	84,95	219	124	6,8053	310,13	267	59	91
Фторбензол	C_6H_5F	96,10	1024	234	357		525	7,1869	1381,8	236	250	370
Фуран	C_4H_4O	68,07	936,6	187,5	304,5	77	448	6,9752	1060,8	228	—	—
Фурфурол	$C_4H_5O_2$	96,09	1159	—	434,8	59,8	639	4,427	1052	273	—	—
Хинолин	C_9H_7N	129,16	1095	—	510,9	54	623	7,969	2597	273	—	—
Хлор	Cl_2	70,91	1408	172,1	239,4	123	351	9,950	1530	273	—	—
Хлорацетилхлорид	$C_2H_2OCl_2$	112,93	1420	—	379,2	81	557	7,1341	1331,9	207	—	—
Хлорбензол	C_6H_5Cl	112,60	1106	227,6	404,9	65,9	595	7,498	1654	232	238	405
Хлордифторметан	$CHClF_2$	86,469	1470	113	232,4	119	342	6,7576	740,38	232	225	235
Хлороформ	$CHCl_3$	119,37	1489	209,6	334,3	95	462	6,903	1163	227	—	—
Хлорпентафторэтан	C_2ClF_5	154,47	163	167	234	117	344	6,8332	802,96	242	175	230
3-Хлорпропен-1	C_3H_5Cl	76,53	937	138,7	318,3	82	467	6,9387	1099,6	226	230	350
Циклобутан	C_4H_8	56,11	694	182,4	285,8	75	420	6,9162	1024,5	241	200	290

Вещество	Формула	Молекулярная масса M	Плотность жидкости при $T = 293$ К и $p = 100$ кПа, ϱ, кг/м^3	Температура плавления $T_{пл}$, К	Температура кипения $T_к$, К	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^{-7}$, Па · с, при $t = 0$ и $p = 100$ кПа	const Сатерленда Sat	const определения парциального давления паров жидкости (const Антуана)		Интервал температур для const Антуана		
								const A	const B	const C	min	max
Циклогексан	C_6H_{12}	84,16	779	279,7	353,9	65,3	520	6,8450	1203,5	223	228	354
Циклогексанол	$C_6H_{12}O$	100,16	962	298	434,3	58,2	638	8,0103	2005,6	230	—	—
Циклогексанон	$C_6H_{10}O$	*98,14*	*948*	*242*	*428,8*	*58,4*	630	*8,357*	*2290*	*273*	—	—
Циклогексен	C_6H_{10}	82,15	816	169,7	356	—	523	6,8723	1221,9	223	300	360
Циклопентан	C_5H_{10}	70,13	745	179,3	322,4	67	474	6,8867	1124,2	231	230	345
Циклопентанон	C_5H_8O	84,12	950	222,5	403,8	—	594	6,9876	1387,1	207	300	440
Циклопентен	C_5H_8	68,12	772	138,1	317,4	—	467	6,9207	1121,8	233	244	378
Циклопропан	C_3H_6	42,08	563	145,7	240,4	82	353	6,8878	856	246	180	245
н-Эйкозан	$C_{20}H_{42}$	282,56	786,2	310	617	35	907	7,1521	2032,7	132	471	652
н-Эйкозанол	$C_{20}H_{42}O$	298,56	650,7	339	629	34	925	6,8719	1699	70	492	679
Эпихлоргидрин	C_3H_5OCl	92,52	1180	—	391,1	72,6	575	8,379	2139	273	—	—
Этан	C_2H_6	30,07	546	—	184,6	86	252	7,673	1096,9	320	—	—
Этанол	C_2H_6O	46,07	789	159,1	351,6	78,5	407	9,274	2239	273	—	—
Этантиол	C_2H_6S	*62,13*	839	125,3	309,2	—	456	6,9520	1084,5	231	224	330
Этиламин	C_2H_7N	45,09	683	192	289,8	74	426	7,3861	1137,3	236	215	316
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	88,11	*901*	189,6	350,3	69	514	*7,306*	1357,7	*230*	230	*350*
Этилбензоат	$C_9H_{10}O_2$	150,18	1046	238,3	485,9	—	714	7,0383	1669,9	189	361	531
Этилбензол	C_8H_{10}	106,17	884,5	178,2	409,3	8730	602	6,9590	1425,5	213	253	493
Этилбромид	C_2H_5Br	108,98	1451	154,6	311,6	77,4	458	6,919	1090,8	232	—	—
Этилбутаноат	$C_6H_{12}O_2$	116,16	879	180	393	59	578	6,9481	1358,3	213	288	432

3-Этилгексан	C_8H_{18}	114,23	718	—	391,7	53	576	6,8909	1327,9	213	286	418
2-Этилгексанол	$C_8H_{18}O$	130,23	833	203,2	456,7	52	671	6,6713	1204,5	133	248	458
Этилен	C_2H_4	28,05	570	104	169,4	94,1	249	7,206	768,26	282	—	—
Этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	62,07	1114	260,2	470,4	—	691	9,0126	2753,2	252	326	471
Этилендиамин	$C_2H_8N_2$	60,10	896	284	390,4	66	574	7,1259	1350	201	292	425
Этиленимин	C_2H_5N	43,07	833	195	329,2	—	485	7,1322	1133,7	210	248	359
Этиленоксид	C_2H_4O	44,05	884	161	283,5	83,2	417	7,261	1115,1	224	—	—
Этиленхлоргидрин	C_2H_5ClO	80,52	1200	—	402	73,8	590	7,8741	1791,6	230	—	—
3-Этилпентан	C_7H_{16}	100,21	698	154,6	366,6	56	539	6,8755	1251,8	220	280	392
Этилпропаноат	$C_5H_{10}O_2$	102,13	895	199,3	372,3	63	547	7,0190	1274,7	209	276	396
2-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	1037	269,8	477,7	—	706	7,8003	2140,3	227	350	500
3-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	1025	269	491,6	—	723	7,4678	1855,6	187	370	500
4-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	122,17	—	318	491	—	722	8,2908	2423,2	229	370	500
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	74,08	917	193,8	327,5	71,6	481	8,190	1730	273	—	—
Этилфторид	C_2H_5F	48,060	766,8	129,9	235,5	96	346	6,9784	854,20	246	170	252
Этилхлорид	C_2H_5Cl	64,52	892	136,8	285,5	94	411	6,9491	1012,8	237	—	—
Этилцианацетат	$C_5H_7O_2N$	113,12	1063	—	479,2	56,9	584	9,2185	2763,3	230	—	—
Этилциклогексан	C_8H_{16}	112,22	788	161,8	404,9	57	595	6,8672	1382,5	215	293	433
Этилциклопентан	C_7H_{14}	98,19	771	134,7	376,6	62	554	6,8870	1298,6	221	270	402
Этоксибензол	$C_8H_{10}O$	122,17	979	243	445	—	654	7,0213	1508,4	194	385	460
2-Этоксиэтанол	$C_4H_{10}O_2$	90,12	—	—	—	—	—	8,7413	2392,6	273	293	408
Эфир ацетоуксусный	$C_6H_{10}O_3$	130,15	1028	193,2	454	65,5	667	7,8402	1855,4	230	—	—
Эфир винилметиловый	C_3H_6O	58,08	775,4	151,5	278	82	409	6,2799	859,99	248	190	515
Эфир дивиниловый	C_4H_6O	70,09	—	—	301,5	—	443	6,9881	1055,3	229	233	333
Эфир дигексиловый	$C_{12}H_{26}O$	186,34	794	230	499,6	44	734	7,0951	1729,7	184	373	545
Эфир диизопропиловый	C_6H_{14}	102,18	724	187,7	341,6	62	502	7,0970	1257,6	230	249	364
Эфир диметиловый	C_2H_6O	46,07	667	131,7	249,5	82	366	7,3164	1025,5	256	179	281
Эфир дифениловый	$C_{12}H_{10}O$	170,21	1066	300	531,2	50,4	648	7,453	2115,2	207	—	—
Эфир диэтиловый	$C_4H_{10}O$	74,12	713	156,9	307,8	68	404	7,0555	1104,6	230	213	308
Эфир малоновый	$C_7H_{12}O_4$	160,18	1055	—	472,1	63,6	576	8,025	2206,4	230	—	—
Эфир метилэтиловый	C_3H_8O	60,09	700	134	280,5	76	412	5,8818	504,48	161	205	310
Эфир петролейный		86,17	660	—	341,9	54,6	502	6,8777	1171,5	224	—	—
Эфир пропилэтиловый	C_5H_{12}	88,15	733	146,4	372,3	63	547	6,7115	1052,5	211	246	360
Эфир этилбутиловый	$C_6H_{14}O$	102,18	749	170	364,5	59	536	6,9694	1268,8	218	265	300

Приложение II. Значение степени e^m

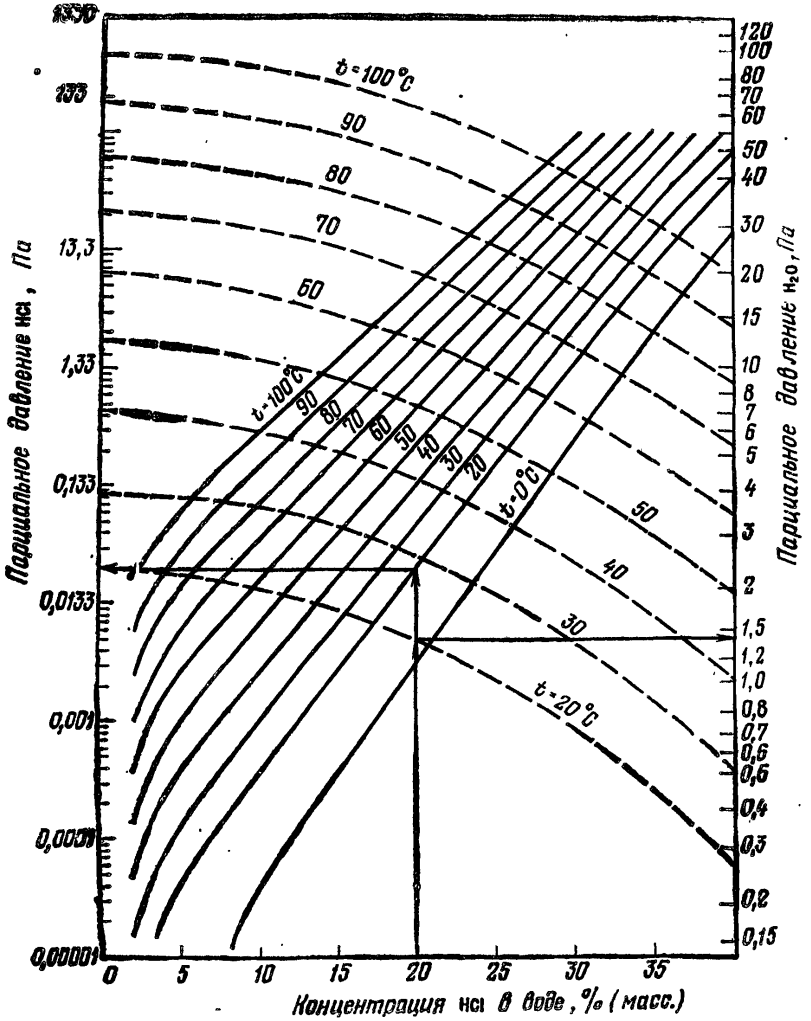
m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m
0,00	1,00	0,22	1,25	0,44	1,55	0,66	1,93	0,88	2,41	1,10	3,00
0,01	1,01	0,23	1,26	0,45	1,57	0,67	1,95	0,89	2,43	1,12	3,06
0,02	1,02	0,24	1,27	0,46	1,58	0,68	1,97	0,90	2,46	1,14	3,13
0,03	1,03	0,25	1,28	0,47	1,60	0,69	2,00	0,91	2,48	1,16	3,19
0,04	1,04	0,26	1,30	0,48	1,62	0,70	2,01	0,92	2,51	1,18	3,25
0,05	1,05	0,27	1,31	0,49	1,63	0,71	2,03	0,93	2,53	1,20	3,32
0,06	1,06	0,28	1,32	0,50	1,65	0,72	2,05	0,94	2,56	1,22	3,39
0,07	1,07	0,29	1,34	0,51	1,67	0,73	2,08	0,95	2,59	1,24	3,46
0,08	1,08	0,30	1,35	0,52	1,68	0,74	2,10	0,96	2,61	1,26	3,53
0,09	1,09	0,31	1,36	0,53	1,70	0,75	2,12	0,97	2,64	1,28	3,60
0,10	1,11	0,32	1,38	0,54	1,72	0,76	2,14	0,98	2,66	1,30	3,67
0,11	1,12	0,33	1,39	0,55	1,73	0,77	2,16	0,99	2,69	1,32	3,74
0,12	1,13	0,34	1,40	0,56	1,75	0,78	2,18	1,00	2,72	1,34	3,82
0,13	1,14	0,35	1,42	0,57	1,77	0,79	2,20	1,01	2,75	1,36	3,90
0,14	1,15	0,36	1,43	0,58	1,79	0,80	2,23	1,02	2,77	1,38	3,97
0,15	1,16	0,37	1,45	0,59	1,80	0,81	2,25	1,03	2,80	1,40	4,06
0,16	1,17	0,38	1,46	0,60	1,82	0,82	2,27	1,04	2,83	1,42	4,14
0,17	1,19	0,39	1,48	0,61	1,84	0,83	2,29	1,05	2,86	1,44	4,22
0,18	1,20	0,40	1,49	0,62	1,86	0,84	2,32	1,06	2,89	1,46	4,31
0,19	1,21	0,41	1,51	0,63	1,88	0,85	2,34	1,07	2,91	1,48	4,39
0,20	1,22	0,42	1,52	0,64	1,90	0,86	2,36	1,08	2,94	1,50	4,48
0,21	1,23	0,43	1,54	0,65	1,92	0,87	2,39	1,09	2,97	1,52	4,57

Приложение II (продолжение)

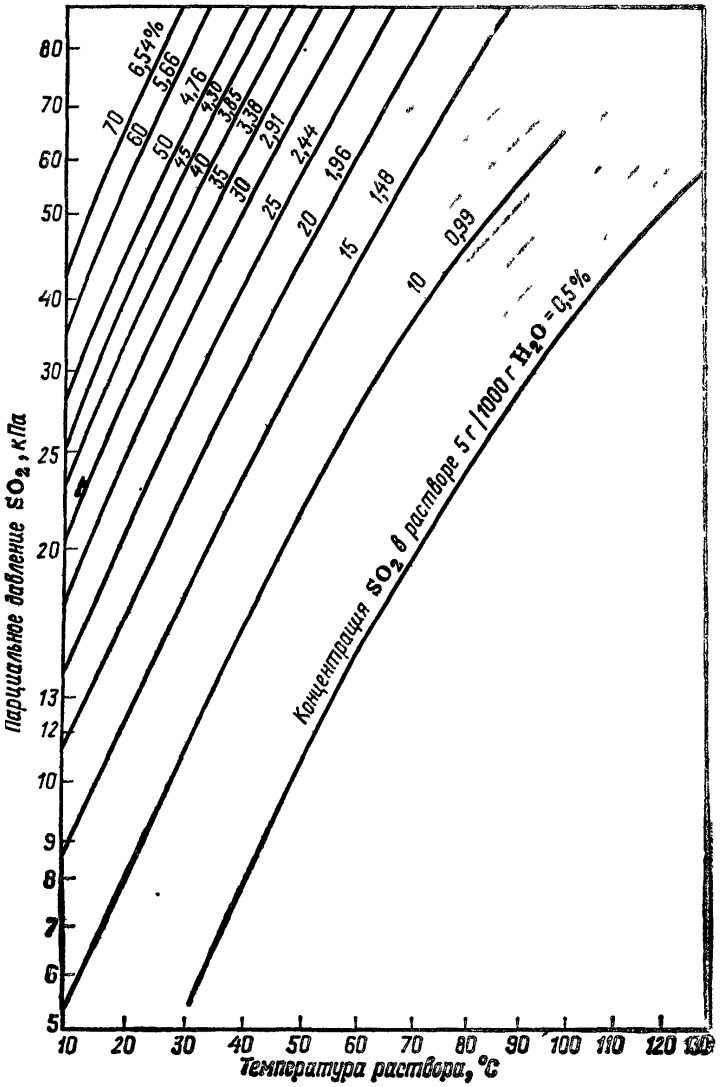
m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m
1,54	4,66	1,98	7,24	2,42	11,25	2,86	17,46	3,30	27,11	3,74	42,10
1,56	4,76	2,00	7,39	2,44	11,47	2,88	17,81	3,32	27,66	3,76	42,95
1,58	4,85	2,02	7,54	2,46	11,70	2,90	18,17	3,34	28,22	3,78	43,82
1,60	4,95	2,04	7,69	2,48	11,94	2,92	18,54	3,36	28,79	3,80	44,70
1,62	5,05	2,06	7,84	2,50	12,18	2,94	18,92	3,38	29,37	3,82	45,60
1,64	5,15	2,08	8,00	2,52	12,43	2,96	19,30	3,40	29,96	3,84	46,52
1,66	5,26	2,10	8,17	2,54	12,68	2,98	19,69	3,42	30,57	3,86	47,46
1,68	5,37	2,12	8,33	2,56	12,94	3,00	20,09	3,44	31,19	3,88	48,24
1,70	5,47	2,14	8,50	2,58	13,20	3,02	20,49	3,46	31,82	3,90	49,40
1,72	5,58	2,16	8,67	2,60	13,46	3,04	20,90	3,48	32,46	3,92	50,40
1,74	5,70	2,18	8,85	2,62	13,74	3,06	21,33	3,50	33,11	3,94	51,42
1,76	5,81	2,20	9,02	2,64	14,01	3,08	21,76	3,52	33,78	3,96	52,46
1,78	5,93	2,22	9,21	2,66	14,30	3,10	22,20	3,54	34,47	3,98	53,52
1,80	6,05	2,24	9,39	2,68	14,58	3,12	22,65	3,56	35,16	4,00	54,60
1,82	6,17	2,26	9,58	2,70	14,88	3,14	23,10	3,58	35,87	4,02	55,50
1,84	6,30	2,28	9,78	2,72	15,18	3,16	23,57	3,60	36,60	4,04	56,60
1,86	6,42	2,30	9,97	2,74	15,49	3,18	24,05	3,62	37,34	4,06	57,80
1,88	6,55	2,32	10,18	2,76	15,80	3,20	24,53	3,64	38,09	4,08	58,90
1,90	6,69	2,34	10,38	2,78	16,12	3,22	25,03	3,66	38,86	4,10	60,34
1,92	6,82	2,36	10,59	2,80	16,44	3,24	25,53	3,68	39,65	4,12	61,30
1,94	6,96	2,38	10,80	2,82	16,78	3,26	26,05	3,70	40,45	4,14	62,60
1,96	7,10	2,40	11,02	2,84	17,12	3,28	26,53	3,72	41,26	4,16	63,20

Приложение II (продолжение)

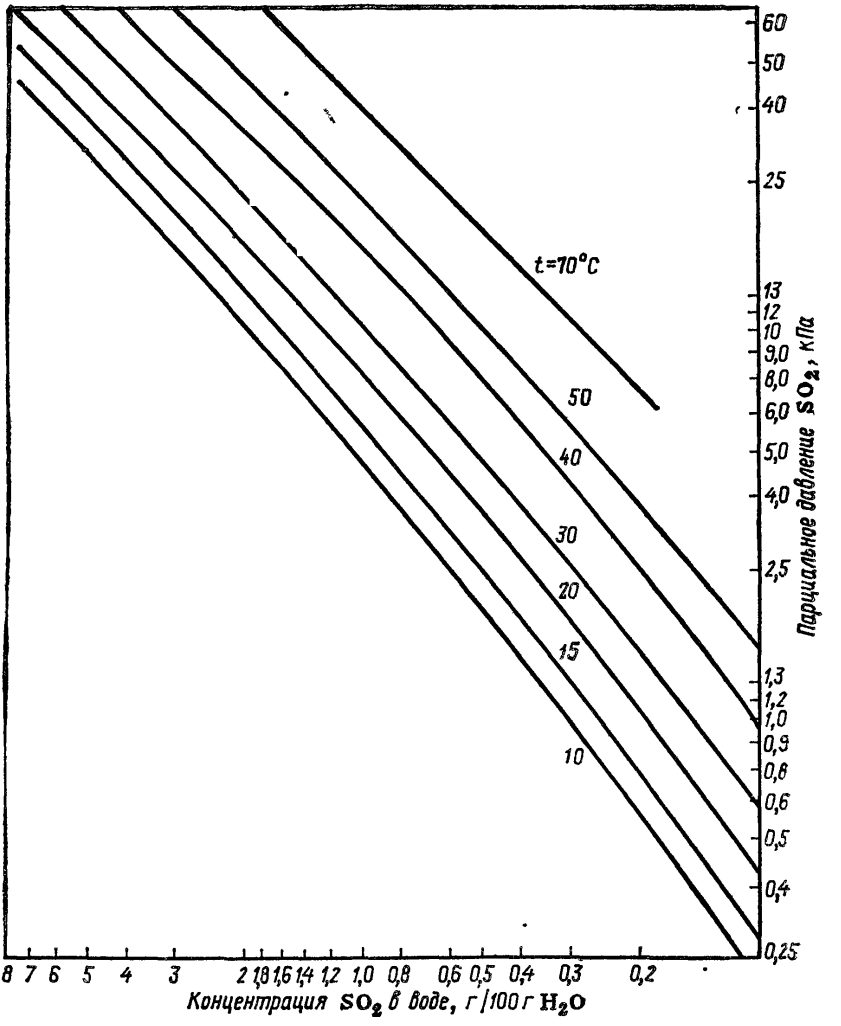
m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m	m	e^m
4,18	65,10	4,62	101,50	5,06	157,00	6,70	812,41	8,9	7332,0	12,5	266000	23,5	$158 \cdot 10^8$
4,20	66,69	4,64	103,20	5,08	160,00	6,80	897,85	9,0	8103,1	13,0	438000	24,0	$260 \cdot 10^8$
4,22	67,70	4,66	105,20	5,10	164,02	6,90	992,27	9,1	8955,3	13,5	723000	24,5	$428 \cdot 10^8$
4,24	69,20	4,68	107,40	5,12	166,45	7,00	1096,6	9,2	9897,1	14,0	1190000	25,0	$707 \cdot 10^8$
4,26	70,50	4,70	109,95	5,14	170,00	7,10	1212,0	9,3	10938	14,5	1960000	25,5	$116 \cdot 10^9$
4,28	72,00	4,72	111,60	5,16	173,20	7,20	1339,4	9,4	12088	15,0	3230000	26,0	$192 \cdot 10^9$
4,30	73,70	4,74	114,00	5,18	177,00	7,30	1480,5	9,5	13360	15,5	5330000	26,5	$316 \cdot 10^9$
4,32	75,00	4,76	116,20	5,20	181,27	7,40	1636,0	9,6	14765	16,0	8780000	27,0	$522 \cdot 10^9$
4,34	76,30	4,78	118,60	5,30	200,34	7,50	1808,0	9,7	16318	16,5	$145 \cdot 10^5$	27,5	$861 \cdot 10^9$
4,36	78,00	4,80	121,51	5,40	221,41	7,60	1998,2	9,8	18034	17,0	$239 \cdot 10^5$	28,0	$142 \cdot 10^{10}$
4,38	79,50	4,82	123,50	5,50	244,69	7,70	2208,3	9,9	19930	17,5	$393 \cdot 10^5$	28,5	$234 \cdot 10^{10}$
4,40	81,45	4,84	126,00	5,60	270,43	7,80	2440,6	10,0	22026	18,0	$649 \cdot 10^5$	29,0	$385 \cdot 10^{10}$
4,42	82,70	4,86	128,60	5,70	298,87	7,90	2697,3	10,2	26700	18,5	$107 \cdot 10^6$	29,5	$633 \cdot 10^{10}$
4,44	84,50	4,88	131,25	5,80	330,30	8,0	2981,0	10,4	31750	19,0	$177 \cdot 10^6$	30,0	$104 \cdot 10^{11}$
4,46	86,20	4,90	134,29	5,90	365,04	8,10	3294,5	10,6	39800	19,5	$290 \cdot 10^6$	30,5	$172 \cdot 10^{11}$
4,48	88,00	4,92	136,50	6,00	403,43	8,20	3641,0	10,8	48600	20,0	$478 \cdot 10^6$	31,0	$284 \cdot 10^{11}$
4,50	90,02	4,94	139,23	6,10	445,86	8,30	4023,9	11,0	59400	20,5	$790 \cdot 10^6$	31,5	$469 \cdot 10^{11}$
4,52	91,60	4,96	142,10	6,20	492,70	8,40	4447,1	11,2	72600	21,0	$130 \cdot 10^7$	32,0	$722 \cdot 10^{11}$
4,54	93,40	4,98	144,85	6,30	544,57	8,50	4914,8	11,4	88600	21,5	$214 \cdot 10^7$	32,5	$127 \cdot 10^{12}$
4,56	95,30	5,00	148,41	6,40	601,85	8,60	5431,7	11,6	108000	22,0	$353 \cdot 10^7$	33,0	$210 \cdot 10^{12}$
4,58	97,10	5,02	150,60	6,50	665,14	8,70	6002,9	11,8	132000	22,5	$582 \cdot 10^7$	33,5	$346 \cdot 10^{12}$
4,60	99,48	5,04	153,92	6,60	735,10	8,80	6634,2	12,0	161200	23,0	$958 \cdot 10^7$	34,0	$570 \cdot 10^{12}$



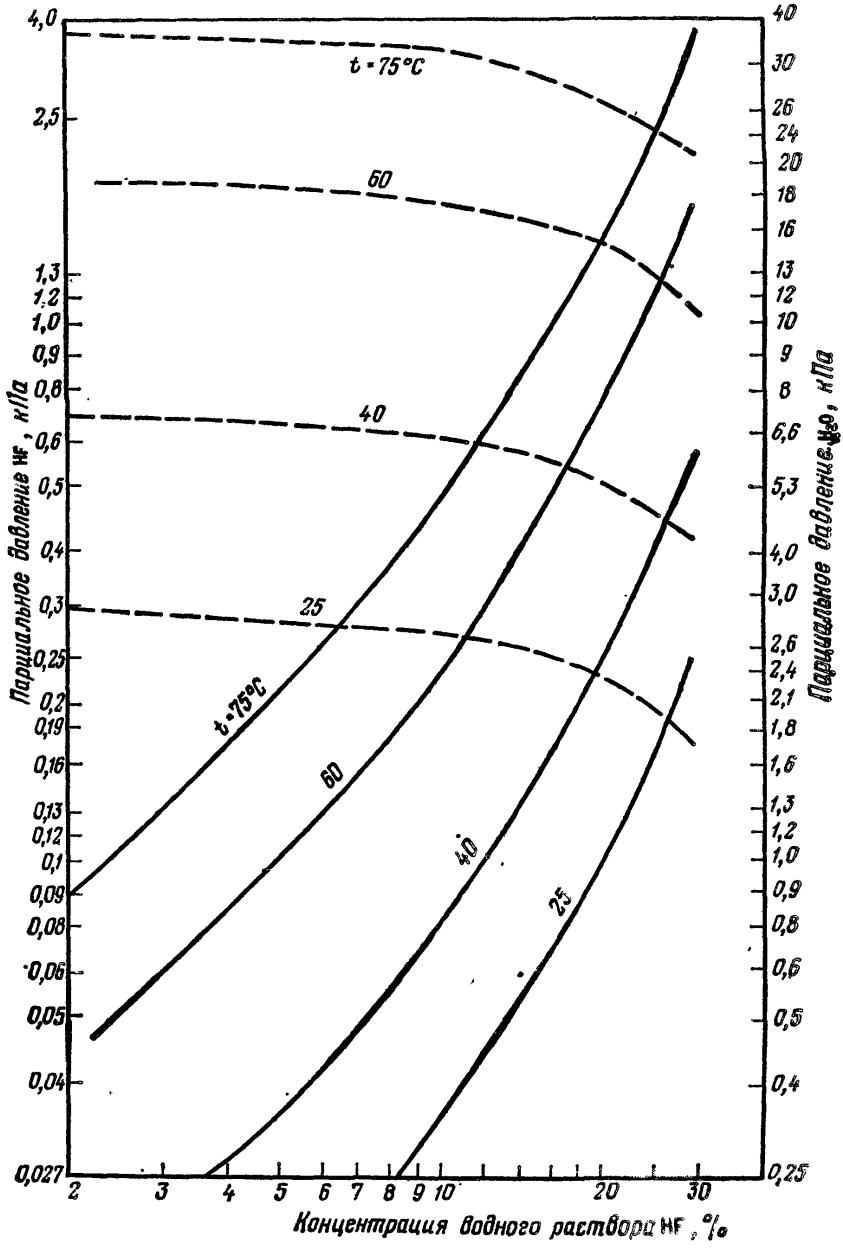
ПРИЛОЖЕНИЕ III. Зависимости парциальных давлений HCl и H_2O над растворами от концентрации HCl в воде и от температуры



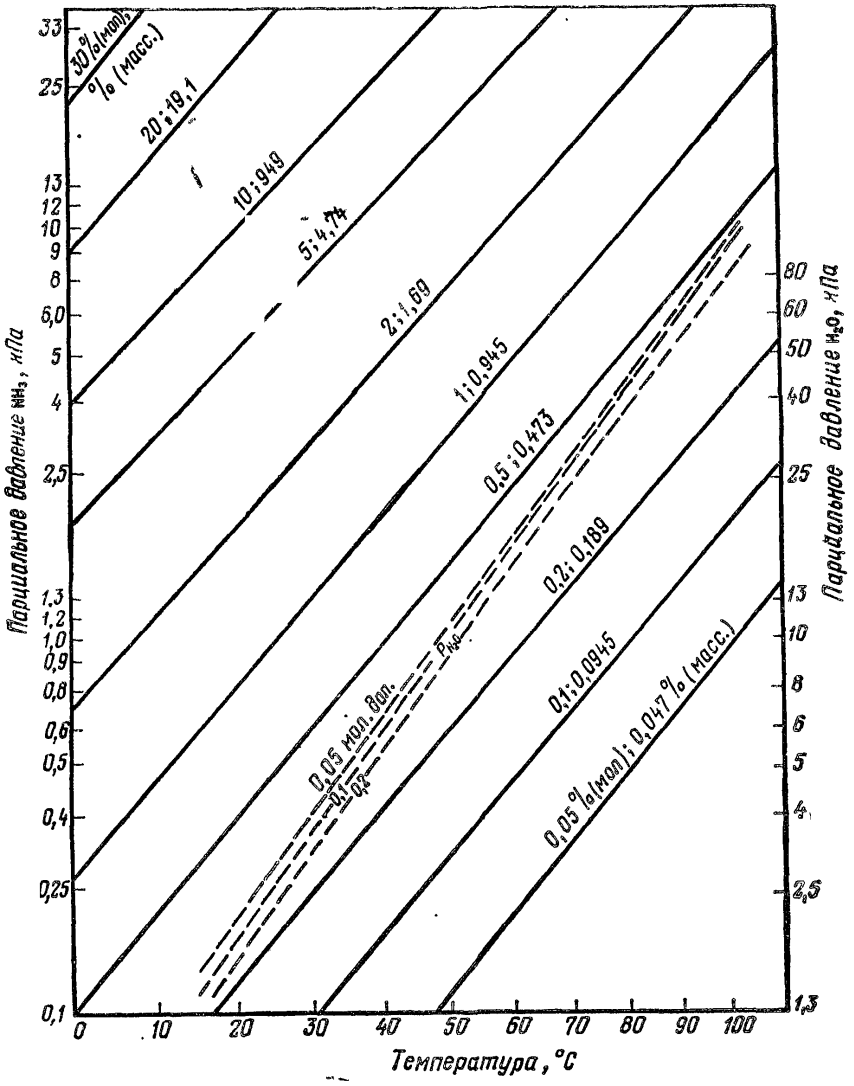
ПРИЛОЖЕНИЕ IV. Зависимость парциального давления SO_2 над его водными растворами от концентрации и температуры



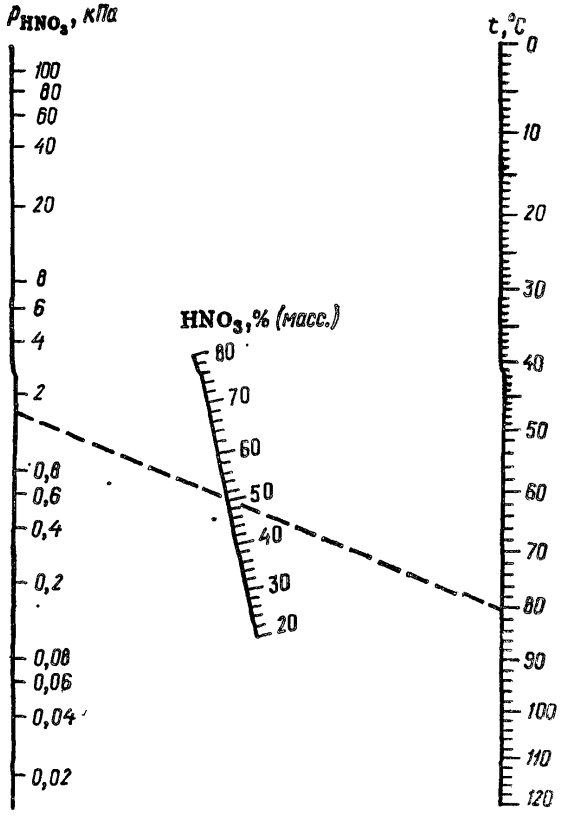
ПРИЛОЖЕНИЕ V. Зависимость концентрации SO_2 от его парциального давления над раствором



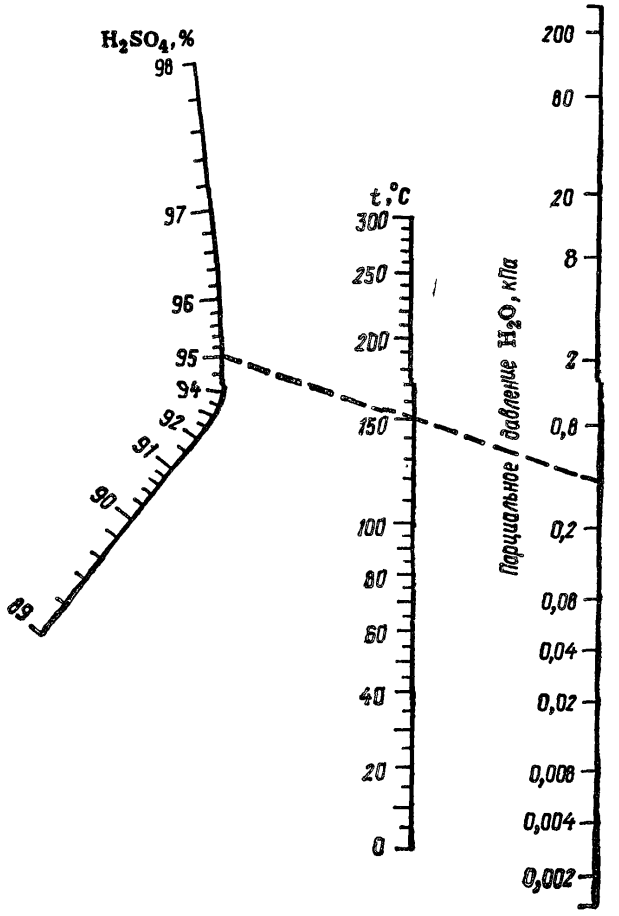
ПРИЛОЖЕНИЕ VI. Зависимость парциальных давлений HF и H_2O над водными растворами от концентрации и температуры



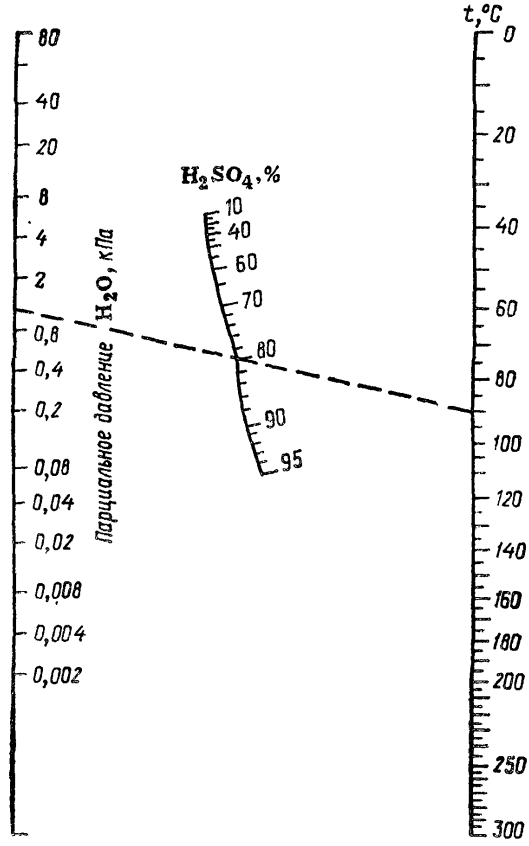
ПРИЛОЖЕНИЕ VII. Зависимости парциальных давлений NH_3 и H_2O над растворами от концентрации NH_3 в воде и от температуры



ПРИЛОЖЕНИЕ VIII. Зависимость парциального давления HNO_3 над ее водными растворами от температуры



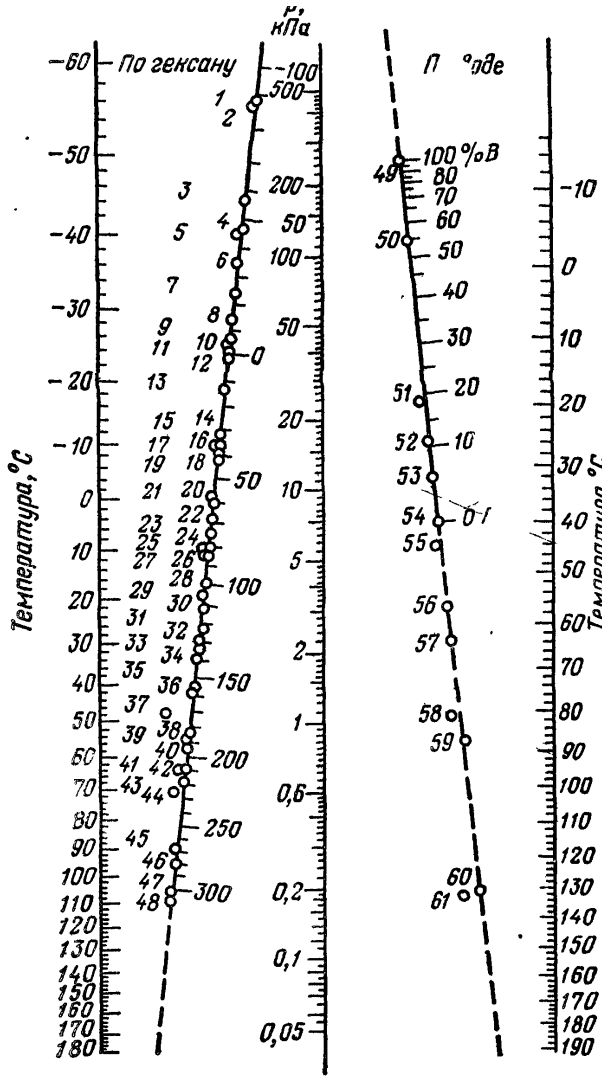
ПРИЛОЖЕНИЕ IX. Зависимость парциального давления водяного пара над 89—98%-ной H_2SO_4 от температуры



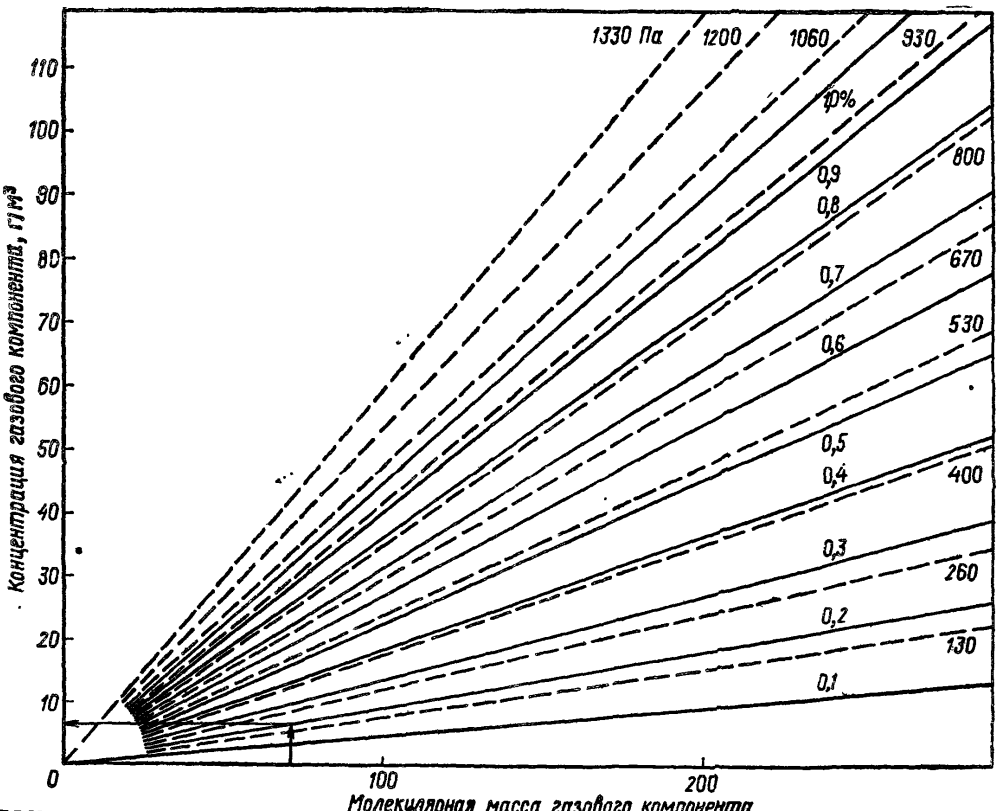
ПРИЛОЖЕНИЕ X. Зависимость парциального давления водяного пара над 10—95%-ной H_2SO_4 от температуры

Приложение XI. Зависимость давлений насыщенного пара для химически чистых веществ от температуры (по В. А. Кирееву):

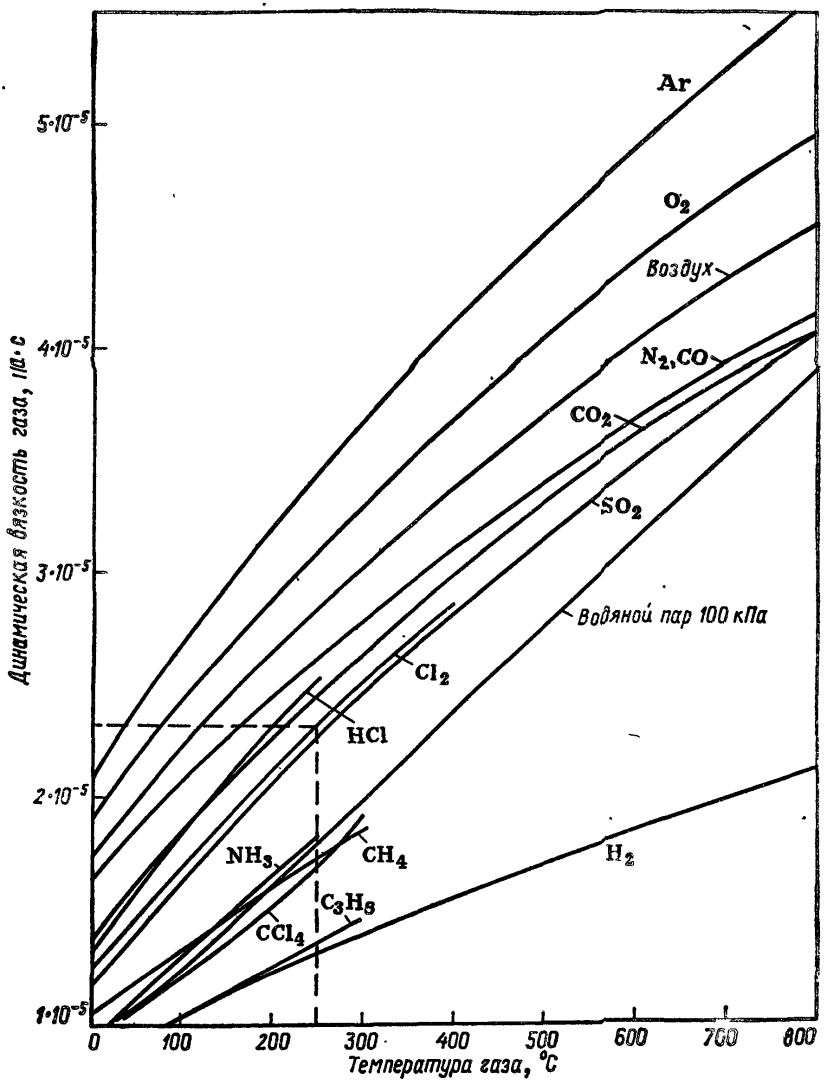
Вещество	Номер точки	Вещество	Номер точки
Аллен	6	Метиловый спирт	52
Аммиак	49	Метилформиат	16
Анилин	40	Нафталин	43
Ацетилен	2	α-Нафтол	47
Ацетон	51	β-Нафтол	48
Бензол	24	Нитробензол	37
Бромбензол	35	*н*-Октан (W)	31
Бромистый этил	18	*н*-Октан (Y)	32
α-Бромнафталин	46	*н*-Пентан	17
1,3-Бутадиен	10	Пропан	5
н-Бутан	11	Пропилен	4
α-Бутилен	9	Пропионовая кислота	56
β-Бутилен	12	Ртуть	61
н-Бутиленгликоль	58	Тетралин	42
Вода	54	Толуол	30
н-Гексан	22	Уксусная кислота	55
н-Гептан	28	Фторбензол	27
Глицерин	60	Хлорбензол	33
Декалин	38	Хлористый винил	8
н-Декан	36	Хлористый метил	7
Диоксан	29	Хлористый метилен	19
Дифенил	45	Хлористый этил	13
1,2-Дихлорэтан	26	Хлороформ	21
Изопрен	14	Четыреххлористый углерод	23
Иодбензол	39	Этан	1
м-Крезол	44	Этилацетат	25
о-Крезол	41	Этиленгликоль	59
м-Ксилол	34	Этиловый спирт	53
Изомасляная кислота	57	Этиловый эфир	15
Метиламин	50	Этилформиат	20
Метилмоносилан	3		



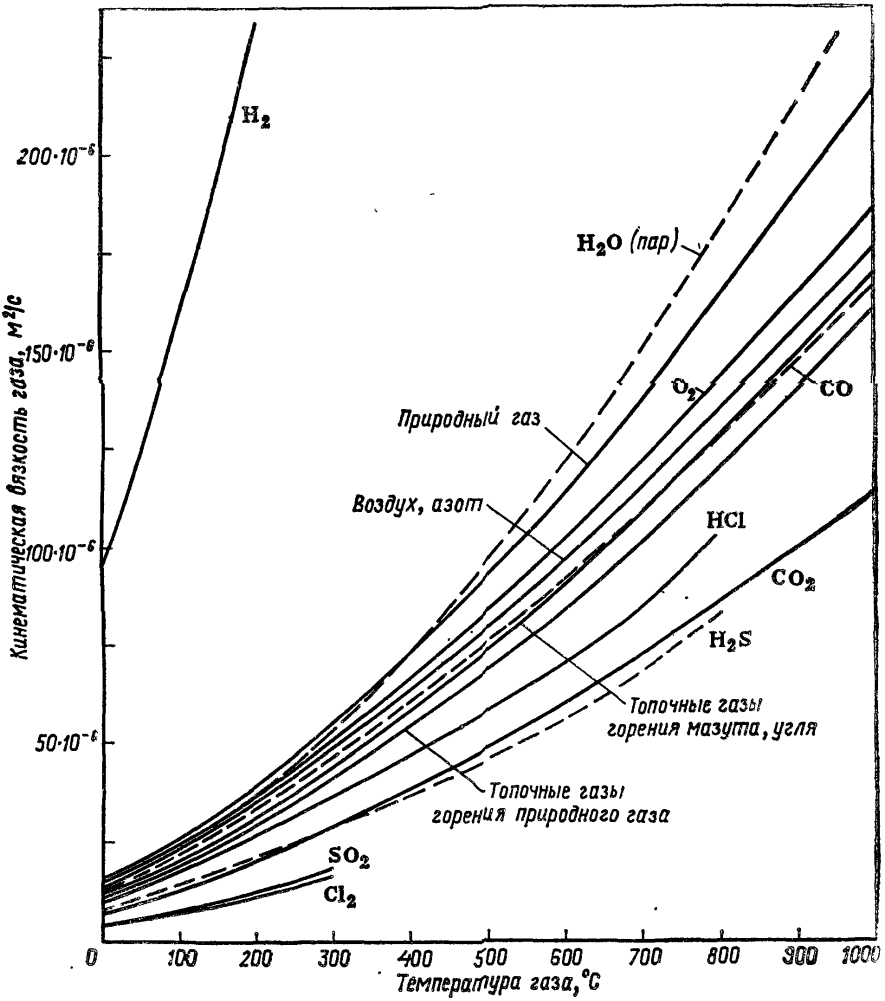
Зависимость давления насыщенного пара для химически чистых веществ от температуры (по В. А. Кирееву)



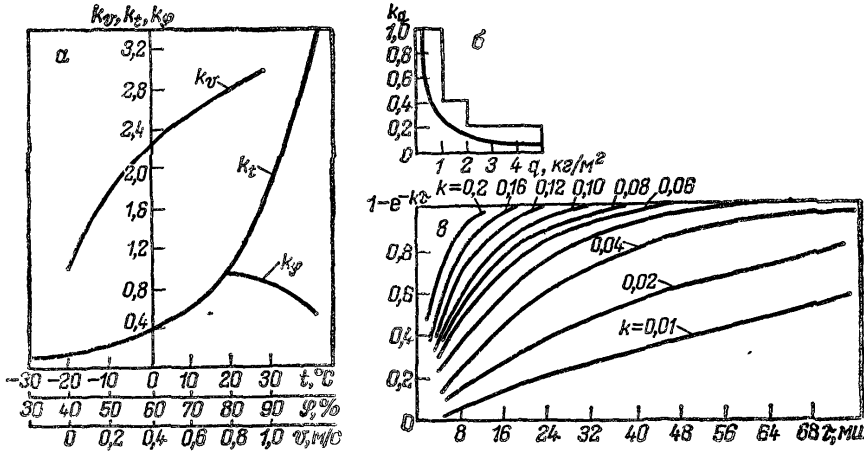
ПРИЛОЖЕНИЕ XII. Зависимость концентрации газового компонента от его молекулярной массы и парциального давления



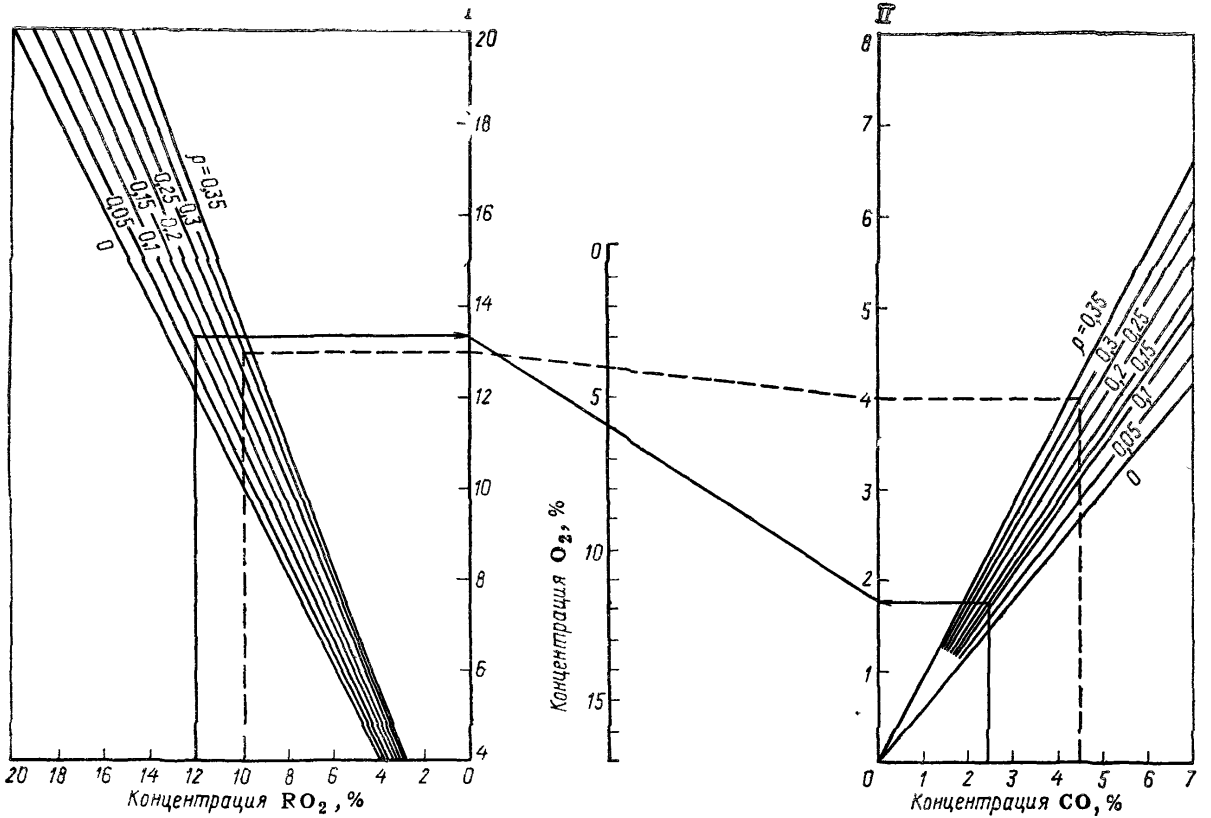
ПРИЛОЖЕНИЕ XIII. Зависимость динамической вязкости некоторых газов от температуры



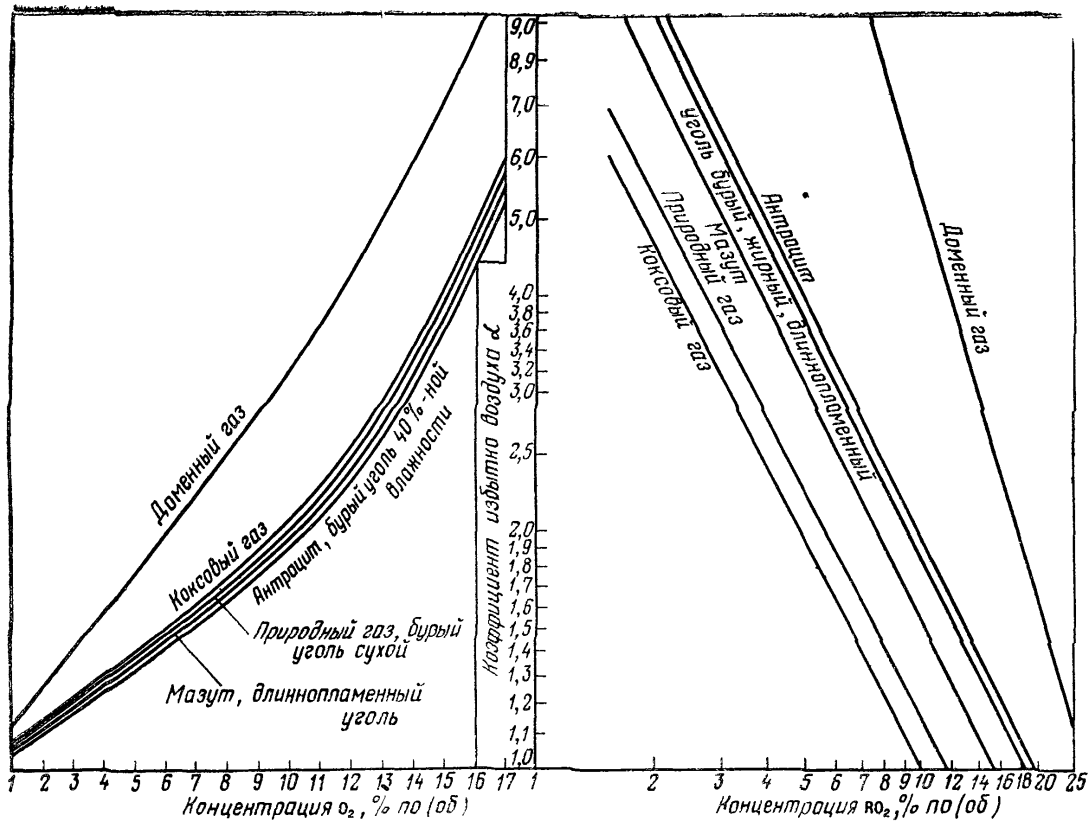
ПРИЛОЖЕНИЕ XIV. Зависимость кинематической вязкости некоторых газов от температуры



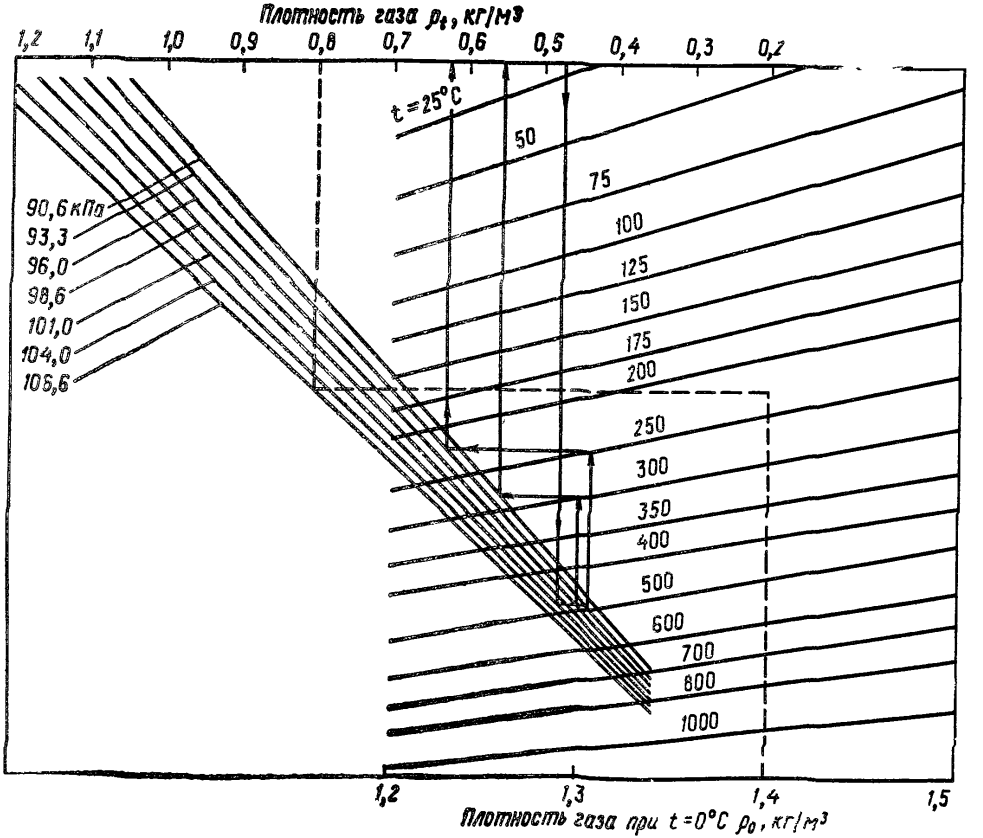
ПРИЛОЖЕНИЕ XV. Графики для определения поправочных коэффициентов на метеорологические условия (а), толщину слоя материала, нанесенного на поверхность оборудования (б), и величины $1 - e^{-kz}$ (в)



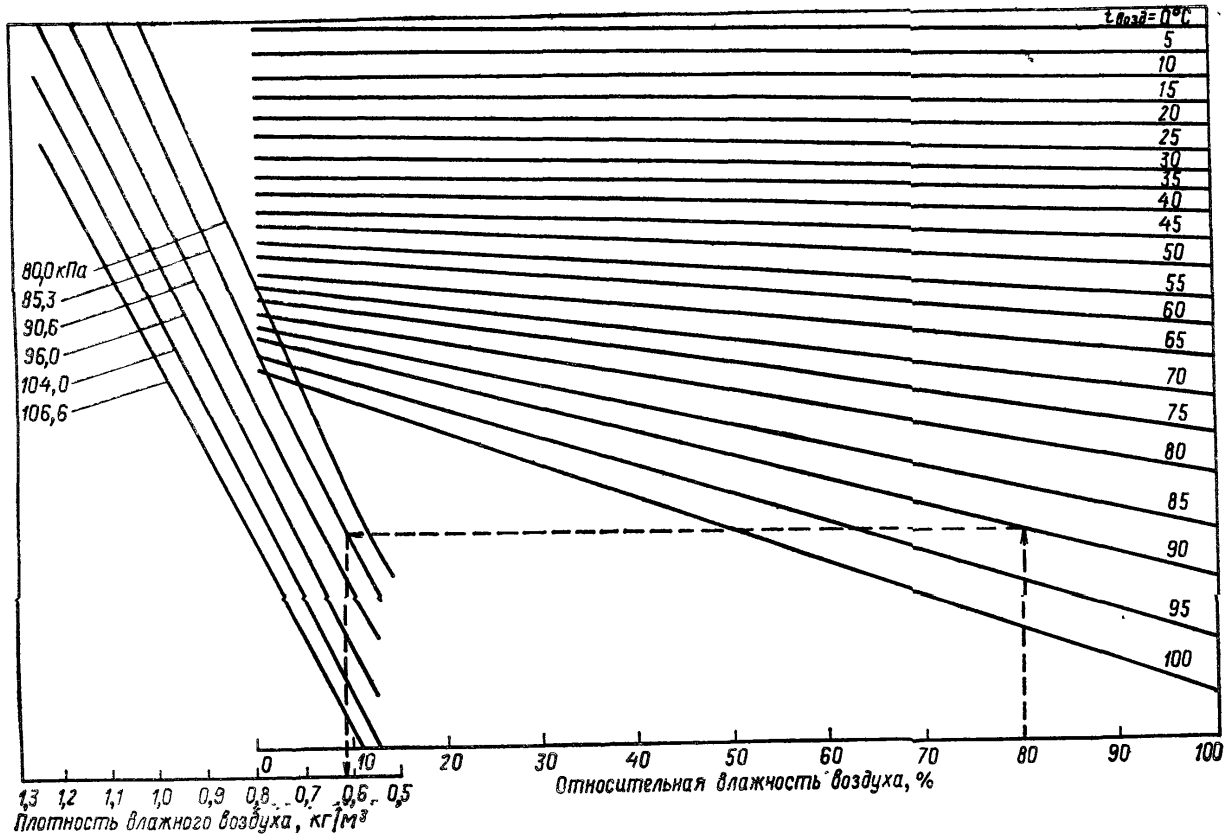
ПРИЛОЖЕНИЕ XVI. Диаграмма концентраций $RO_2(CO_2+SO_2)$ в дымовых газах (по химическому газоанализатору Орса) в зависимости от концентрации O_2 и CO для различных видов топлива при их неполном сгорании



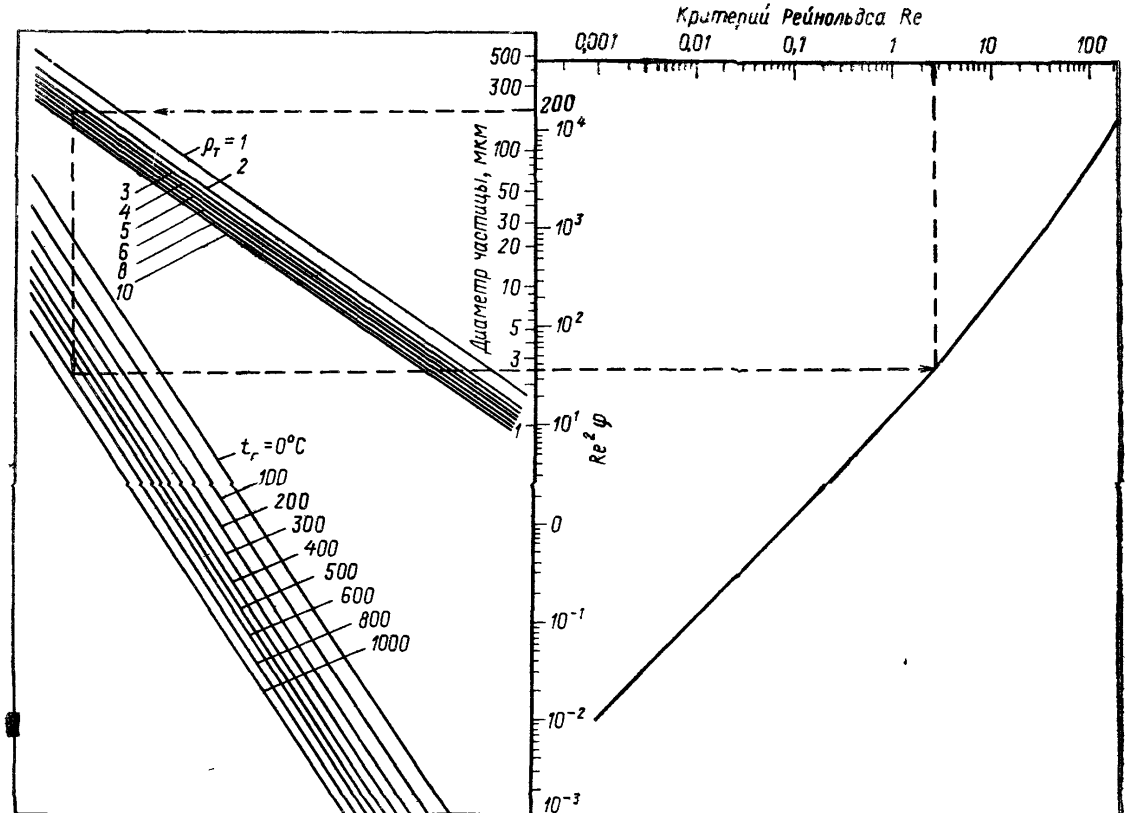
ПРИЛОЖЕНИЕ XVII Диаграмма концентраций $RO_2(CO_2+SO_2)$ в дымовых газах (по химическому газоанализатору Орса) в зависимости от коэффициента избытка воздуха α и концентрации O_2 для различных видов топлива при их полном сгораниц



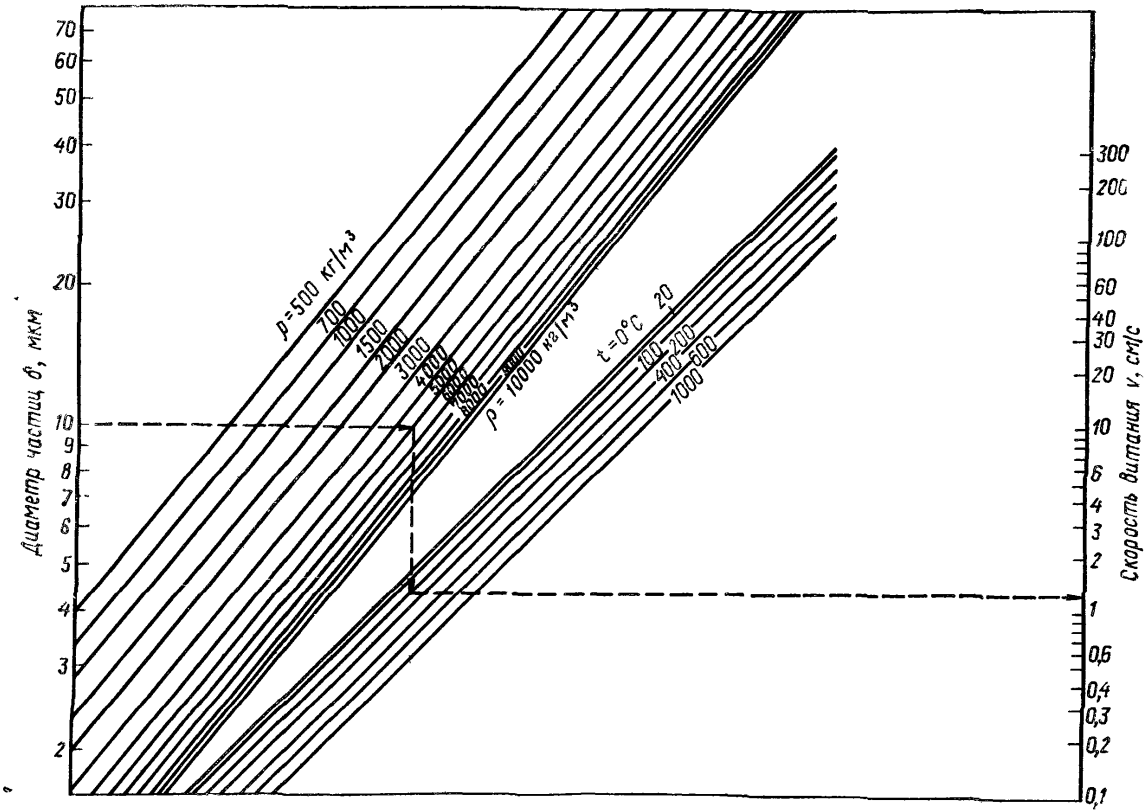
ПРИЛОЖЕНИЕ XVIII. Зависимость плотности газа от давления и температуры



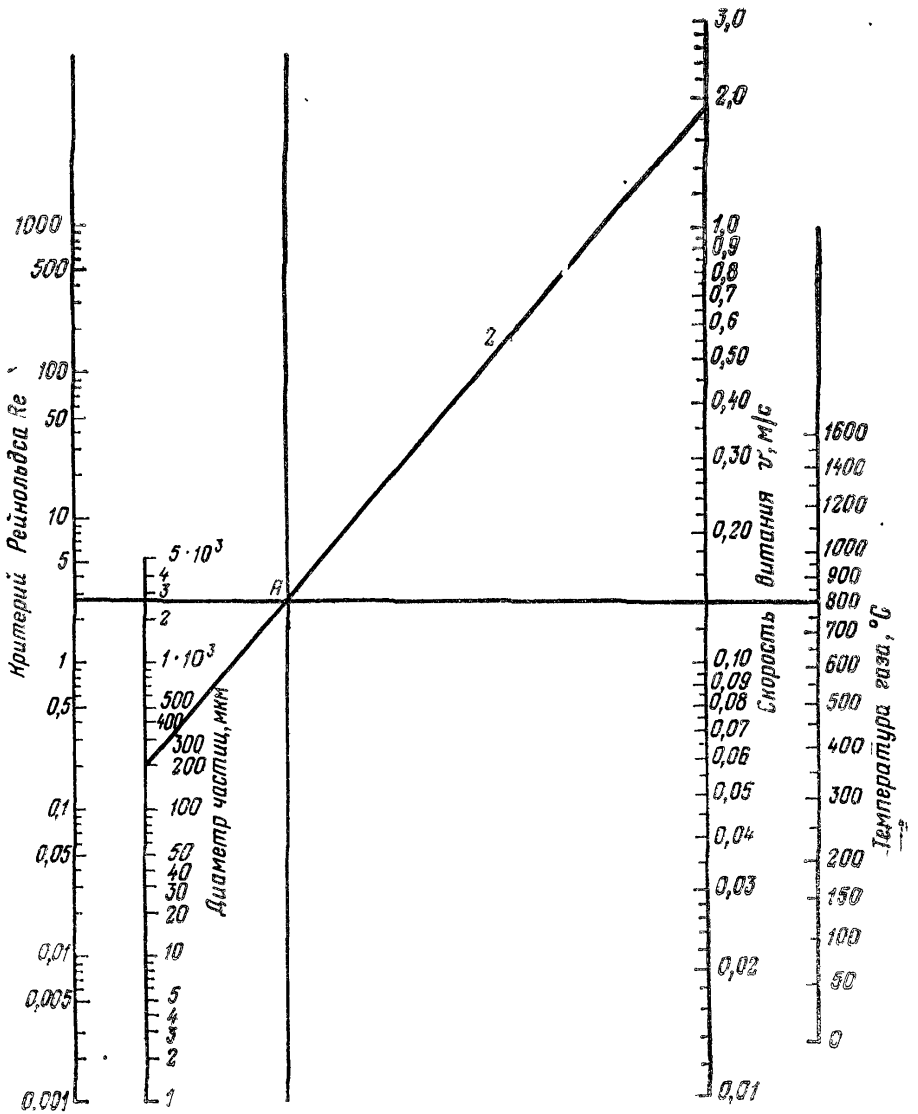
ПРИЛОЖЕНИЕ XIX. Зависимость плотности воздуха от влажности, температуры и давления



ПРИЛОЖЕНИЕ XX. Номограмма для определения критерия Рейнольдса



ПРИЛОЖЕНИЕ XXI. *Номограмма для определения скорости витания пылевых частиц размером до 50—60 мкм*



ПРИЛОЖЕНИЕ XXII. Номограмма для определения скорости витания пылевых частиц размером от 1 до 500 мкм

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 715 с.
Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений/О. С. Ковалев, И. П. Мухленов, А. Ф. Туболкин и др./Под ред. И. П. Мухленова, О. С. Ковалева. М.: Химия, 1987. 208 с.
А. с. 532386, ВО1Д47/00//Бюллетень изобретений, 1976. № 39.
А. с. 585860 ВО1Д47/00//Открытия. Изобретения. 1977. № 48.
А. с. 709174 ВО1Д47/00//Открытия. Изобретения, 1980, № 2.
А. с. 912229 ВО1Д47/10//Открытия. Изобретения. 1982, № 10.
Артамонов В. И. Растения и чистота природной среды. М.: Наука, 1986.
Ассортимент газоустойчивых растений для озеленения санитарно-защитных зон промышленных предприятий. М.; АКХ, 1973. 46 с.
Батурин В. В. Основы промышлеиной вентиляции. М.: Профиздат, 1965. 608 с.
Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
Безопасность и гигиена труда: Сборник научных работ институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат. 1985. 144 с.
Бокрис Дж. О. М. Химия окружающей среды: Пер. с англ./Под ред. О. Г. Скотниковой, Э. Г. Тетерина. М.: Химия, 1982. 672 с.
Боровков В. С., Майрановский Ф. Г. Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1978. 120 с.
Борщов Д. Я., Воликов А. Н. Защита окружающей среды при эксплуатации котлов малой мощности. М.: Стройиздат, 1987. 156 с.
Бретшнайдер Ст. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета: Пер. с польск./Под ред. П. Г. Романкова. М. — Л.: Химия, 1966. 536 с.
Буштуева К. А. Руководство по гигиене атмосферного воздуха. М.: Медицина, 1976. 416 с.
Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 720 с.
Власенко В. М. Каталитическая очистка газов. Киев: Техника, 1973. 200 с.
Власов А. Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. 227 с.
Вредные вещества в промышленности: Справочник. Ч. I, II, III и дополнение/Под ред. Н. В. Лазарева. Л.: Химия, 1977.
Временная методика нормирования промышленных выбросов в атмосферу. Расчет и порядок разработки нормативов предельно допустимых выбросов. М.: Гидрометеоиздат, 1981. 34 с.
Временное методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. Новороссийск: НИПИОТстром, 1985. 34 с.
Временные указания по расчету объемов аспирируемого воздуха от укрытий мест перегрузок при транспортировании пылящих материалов. М.: ГПИ Сантехпроект, 1973. 31 с.
Временные указания по определению фоновых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе для нормирования выбросов и установления ПДВ. М.: Госкомгидромет. Минздрав СССР. 1981. 36 с.
ГОСТ 12.1.005—76. Государственный стандарт Союза ССР. Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. М.: Издательство стандартов, 1976. 32 с.
ГОСТ 17.2.3.02—78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями. М.: Издательство стандартов, 1979. 14 с.
Десслер Х. Г. Влияние загрязнений воздуха на растительность. Причины. Воздействие. Ответные меры.: Пер. с нем. М.: Лесная промышленность.
Елинский И. И. Вентиляция и отопление гальванических и травильных цехов машиностроительных заводов. М.: Машиностроение, 1982. 135 с.
Заминян А. А., Рамм В. М. Абсорберы с псевдоожиженной иасадкой. М.: Химия, 1980. 184 с.

Иваницкая М. Ю.//Унос вредных веществ с поверхности гальванических ванн в приемные отверстия бортовых отсосов: Сб. трудов ЦНИИПромзданий. М.: 1974 № 37.
Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
Измеров Н. Ф. Социально-гигиенические аспекты охраны атмосферного воздуха в условиях научно-технического прогресса. М.: Медицина, 1976. 185 с.
Инструкция о порядке рассмотрения согласования и экспертизы воздухоохранных мероприятий и выдачи разрешений на выброс загрязняющих веществ в атмосферу по проектным решениям ОНД1—84. М.: Гидрометеоиздат, 1984. с. 16—17.
Кац Ю. И.//Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат, 1968. Вып. 50. С. 14—21.
Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М. — Л.: Химия, 1976. 512 с.
Килин П. И.//Вытяжной зонт СИОТ. И. Л. № 581-82 ЦНТИ, Свердловск, 1982.
Ключников А. Д. Теплотехническая оптимизация топливных печей. М.: Энергия, 1974. 344 с.
Кноп В., Теске В. Техника обеспечения чистоты воздуха: Пер. с нем. М.: Медицина, 1970. 200 с.
Коуль А. П., Розенфельд Ф. С. Очистка газа. М.: Недра, 1968. 392 с.
Кузнецов И. Е. Защита атмосферного воздуха от загрязнения. Симферополь: Таврия, 1973. 124 с.
Кузнецов И. Е., Троицкая Т. М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами. М.: Химия, 1979. 344 с.
Лейкин И. Н. Рассеивание вентиляционных выбросов химических предприятий. М.: Химия, 1982. 224 с.
Мельник Б. Д., Мельников Е. Б. Краткий инженерный справочник по технологии неорганических веществ. М.: Химия, 1968. 432 с.
Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86 Госкомгидромет. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.
Методические указания по расчету выброса вредных веществ автомобильным транспортом. М.: Гидрометеоиздат, 1983. 5 с.
Методические указания по расчету локализации теплогазовыделений. М.: ВЦНИИОТ ВЦСПС, 1984. 32 с.
Муравьева К. А. Человек и атмосфера. Л.: Знание, 1974. 48 с.
Новиков Г. В., Дударев А. Я. Санитарная охрана окружающей среды современного города. Л.: Медицина, 1978. 216 с.
Одум Е. Экология: Пер. с англ. М.: Просвещение. 1968. 168 с.
Охрана труда и техника безопасности. Очистка сточных вод и отходящих газов в химической промышленности. Материалы Всесоюзного совещания по технике безопасности в химической промышленности. М.: НИИТЭХИМ. Вып. 2. 1970. 71 с.
Пейсахов И. Л., Лютин Ф. Б. Атлас диаграмм и номограмм по газопылевой технике. М.: Металлургия, 1974. 116 с.
Дж. Перри. Справочник инженера-химика: Пер. с англ. М.: Химия, 1969.
Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. М: Стройиздат, 1974. 207 с.
Позин М. Е., Мухленов И. П., Тарат Э. Я. Пенные газоочистители, теплообменники и абсорберы. Л.: Госхимиздат, 1959, 123 с.
Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
Рамм В. М. Абсорбция газов. М. — Л.: Химия, 1976. 656 с.
Рекомендации по оформлению и содержанию проекта нормативов предельно допустимых выбросов в атмосферу (ПДВ) для предприятий. Новосибирск, 1987. 57 с.
Рекомендации по расчету вентиляционных выбросов от ванн хромирования и цианистых ванн гальванических цехов Н-8010/1М. Проектпромвентиляция. М.: 1971 32 с.

Рекомендации по расчету отсосов от оборудования, выделяющего тепло и газы. АЗ-877. М.: Сантехпроект, 1983. 32 с.
Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. 3-е изд.: Пер. с англ. Л.: Химия. 1982. 592 с.
Русанов А. А., Урбах И. И., Анастасиди А. П. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике. М.: Энергия, 1969. 469 с.
Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий, СН 245—71; М.: Стройиздат, 1971. 96 с.
Сахарнов А. В., Зеге И. П. Очистка сточных вод и газовых выбросов в лакокрасочной промышленности. М.: Химия, 1979. 184 с.
Сборник законодательных нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохранных мероприятий. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 320 с.
Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 183 с.
Семенова Т. А., Лейтес И. Л. Очистка технологических газов. 2-е изд. М.: Химия, 1977. 488 с.
СНиП 2-04-05—86. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. 64 с.
Спейшер В. А. Огневое обезвреживание промышленных выбросов. М.: Энергия, 1977. 262 с.
Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений/Под ред. И. Г. Староверова. Ч. I и II. М.: Стройиздат, 1976. 1977. 450 и 502 с.
Столяров Е. А., Орлова Н. Г. Расчет физико-химических свойств жидкостей. Л.: Химия, 1976. 112 с.
Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции М.: Стройиздат, 1979. 295 с.
Тарат Э. Я. и др. Пенный режим и пенные аппараты. М. — Л.: Химия, 1977.
Титов В. П., Сазонов Э. В., Краснов Ю. С., Новожилов В. И. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 208 с.
Тищенко Н. Ф. Передовой опыт в химико-фармацевтической промышленности. М.: ЦБНТИ Минмедбиопрома. 1987. Вып. 10. С. 4—15.
Тищенко Н. Ф.//Хим.-фарм. журнал. 1987. № 3. С. 355—359.
Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами М. — Л.: Химия, 1972. 248 с.
Ужов В. Н., Мягков Б. Н. Очистка промышленных газов фильтрами. М.: Химия, 1970. 190 с.
Указания по расчету циклонов А6-52. Методические материалы для проектирования. Госстрой СССР. Сантехпроект. М.: ВНИИОТ ВЦСПС, 1971. 52 с.
Фельдман Ю. Г. Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха. М.: Медицина, 1975. 160 с.
Фиалковская Т. А.//Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат, 1961. № 2. с. 22—31.
Чернышев А. К., Поплавский К. Л., Зайченко Н. Д. Сборник номограмм для химико-технологических расчетов. Л.: Химия, 1969. 279 с.
Шепелев И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
Шепелев И. А.//Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. 1967. Вып. 24. С. 190—209.
Шепелев И. А.//Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Труды ЦНИИпромзданий. М.: ЦНИИпромзданий, 1974. Вып. 37. С. 33—39.
Экхольм Э. Окружающая среда и здоровье человека: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1980. 232 с.
Эльтерман Е. М. Вентиляция химических производств. М.: Химия, 1980.
Эльтерман Е. М.//Научные труды институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат, 1976. Вып. 98. С. 50—53.
Эльтерман Е. М.//Лакокрасочные материалы и их применение. 1973. № 3. С. 84—86.

Справочное издание

Тищенко Николай Филиппович

ОХРАНА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Редактор *Л. В. Швыркова*
Художественный редактор *К. К. Федоров*
Технический редактор *Е. Н. Крумштейн*
Корректоры *Л. В. Лазуткина, М. В. Черниховская*

ИБ 2636

Сдано в наб. 03.04.90. Подп. к печ. 28.01.91. Формат 60×88¹/₁₆. Бумага офс. № 2. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,54. Усл. кр.-отт. 22,54. Уч.-изд. л. 28,39. Тираж 16 000 экз. Заказ 269. Цена 3 р.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия», 107076, Москва, Стромынка, 21, корп. 2.

Московская типография № 11 Государственного комитета СССР по печати. 113105, Москва, Нагатинская ул., д. 1.

Государственный ордена Трудового Красного Знамени

проектный институт

ПРОМСТРОЙПРОЕКТ

Предлагаем для Вашей области (города) следующие разработки:

— экологическую экспертизу проектной документации для строительства промышленных, коммунальных и транспортных предприятий;

— эколого-географическое и технико-экономическое обоснование размещения и строительства предприятий перерабатывающей промышленности, стройиндустрии, транспорта и т. д.;

— комплексный территориальный анализ области (региона) с целью выявления ареалов с критической экологической ситуацией, определения резервных территорий для рационального развития и структурной перестройки производительных сил;

— экономическую оценку городских территорий;

— участие в разработке генеральных планов городов;

— генеральные схемы развития промышленных территорий городов;

— ведение дежурных генеральных планов промузлов, промышленных территорий города;

— схемы генеральных планов промузлов и размещения групп предприятий в промышленных районах городов и других населенных пунктов;

— схемы архитектурно-планировочной организации промышленных территорий;

— информационные материалы по наличию проектно-сметной и предпроектной документации по областям и населенным пунктам;

— участие в разработке территориальных комплексных схем охраны природы, схем и проектов районной планировки;

— проектно-сметную документацию по организации санитарно-защитных зон промышленных предприятий (планировка, благоустройство и озеленение);

— ПСД по планировке и благоустройству общих территорий промышленного узла;

— выполнение работ по разделу «Охрана атмосферного воздуха от загрязнения».

Разработчик — отдел территориальных работ ГПИ Промстройпроект, тел. 242-02-67.

Обращаться по адресу:

119827 Москва, Комсомольский пр-кт, 42; телетайп 111518, тел. 242-51-87; директор — Сидорин Владимир Константинович.

ПРОМСТРОЙПРОЕКТ

Предлагаем:

1. Передачу научно-технических достижений по охране окружающей среды:

— система автоматизированного расчета газо- и влаговыделений из технологического оборудования;

— оценка характера и количества выбросов вредных веществ при производстве стройиндустрии;

— распределение вредных веществ внутри производственных помещений;

— техническая документация устройств по очистке воздуха производительностью от 500 до 50 000 м³/ч;

— банк данных по ПДК;

— система платежей за загрязнение окружающей среды;

— система автоматизированного проектирования раздела «Охрана атмосферного воздуха» и тома ПДВ.

2. Проведение расчетов по определению:

— количеств выделяющихся вредных веществ из технологического оборудования;

— эффективности работы местных отсосов;

— поля концентраций вредных веществ и скоростей у рабочих мест.

Разработчик — Тищенко Н. Ф., тел. 242-25-00.
Обращаться по адресу:
119827 Москва, Комсомольский пр-кт, 42; телетайп 111518, тел. 242-51-87; директор — Сидорин Владимир Константинович.

ПРОМСТРОЙПРОЕКТ

Вам нужна система автоматизированного расчета газо- и влаговыделений из технологического оборудования!

Система применима для инвентаризации существующих источников выделения вредных веществ, прогнозирования количества выделяющихся вредных веществ от проектируемого технологического оборудования при нормальном технологическом режиме и аварийной ситуации. С помощью алгоритма рассматриваются следующие пути поступления вредных веществ: через неплотности фланцевых соединений, щели, сальниковые уплотнения вала, лабиринтные уплотнения вала пр крышке оборудования различного назначения под давлением и разрежением; через «воздушки» в оборудовании при «большом и малом дыхании»; посредством испарения с частично закрытой и открытой поверхности жидкости, при горении, сварке и от гальванических ванн.

Система дает возможность:

— рассчитать на ЭВМ количество вредных веществ, для которых отсутствуют лабораторные методики или приборы;

— рационально заполнять опросные листы на заказ применяемого технологического оборудования;

— принимать обоснованные решения при планировании и осуществлении мероприятий в проектах ПДВ предприятий, а также определять исходные данные на проектирование вентиляции и кондиционирование производственных помещений.

Результатом расчетов являются данные количества выделяющихся вредных веществ по каждой единице технологического оборудования (г/с, кг/сут, т/год).

Можем передать систему, выполнить конкретные расчеты для промышленных предприятий. Возможно также сотрудничество с инофирмами по адаптации системы к конкретным методикам страны и имеющимся ЭВМ.

Разработчик — Тищенко Н. Ф., тел. 242-25-00.

Обращаться по адресу:
119827 Москва, Комсомольский пр-кт, 42; тел. 242-02-67.

ПРОМСТРОЙПРОЕКТ

Предлагаем техническую документацию на устройство для очистки воздуха,

предназначенное для очистки холодных и горячих газов от пыли, сероводорода, сернистого ангидрида, окислов азота, формальдегида, фенола, фурфурола, уксусной кислоты, неприятно пахнущих выбросов, хорошо растворимых органических соединений хлора, фтора, брома, йода и др.

Устройство можно использовать также как теплообменный аппарат в технологических процессах и при кондиционировании воздуха.

Его преимущества перед аналогами: небольшие габариты, высокая эффективность очистки воздуха, возможность регулирования производительности, простота в изготовлении и эксплуатации — достигаются благодаря большой скорости движения воздуха и наличию нескольких ступеней очистки в устройстве (коагуляции, низконапорной трубе Вентури, ударно-инерционному аппарату, циклону и жалюзийному уловителю).

Техническая документация на устройство для очистки воздуха разработана на основе авторских свидетельств № 532386, 585860 (см. Б. И. № 39, 1976 г. и № 48, 1977 г.). Имеются действующие установки по очистке воздуха от пыли, газов и от неприятно пахнущих вредных веществ.

Консультируем по вопросам эксплуатации этого устройства в конкретных условиях производства.

Кроме передачи технической документации возможно сотрудничество с отечественными организациями и инофирмами в области организации совместного производства устройств очистки воздуха производительностью 500—50 000 м³/ч.

Разработчик — Тищенко Н. Ф., тел. 242-25-00.
Обращаться по адресу:
119827 Москва, Комсомольский пр-кт, 42; телетайп 111518, тел. 242-51-87; директор — Сидорин Владимир Константинович.

ПРОМСТРОЙПРОЕКТ

Выполнение для Вашего города разработок по экономической оценке городских территорий даст возможность:

— формировать условия для высвобождения от промышленной застройки наиболее ценных территорий для размещения жилых и общественных зданий, парков и т. д.;

— повышать интенсивность использования промышленных территорий;

— управлять освоением наиболее перспективных для промышленного строительства земель;

— совершенствовать инженерную инфраструктуру и транспортную систему города;

— ликвидировать экономически слабые предприятия;

— создавать строительные, коммунальные, транспортные предприятия, объекты охраны окружающей среды, являющиеся собственностью города;

— сохранять ценные в историческом и архитектурном отношении промышленную застройку, здания и сооружения;

— освоить в короткие сроки неудобные территории.

На основе сравнения вариантов предлагаем конкретную программу развития и реорганизации промышленных территорий, развития городского и общеузлового (для групп предприятий) хозяйств.

Основной критерий при установлении размера ежегодной платы — соответствие данной территории функциональному назначению городской территории. Сумма платежей, наряду с другими видами отчислений в местный бюджет, обеспечит реализацию принятого варианта развития.

Можем предложить также систему расчетов по оценке платежей за загрязнение окружающей среды.

Система расчетов с использованием ЭВМ позволяет определить платежи промышленных предприятий за загрязнение воздуха, воды и вывоз твердых отходов с учетом их количества и токсичности, а также с учетом установленных предельно допустимых или временно согласованных выбросов и предусматриваемых мероприятий по снижению загрязнения окружающей среды.

Система включает в себя и необходимый для расчетов платежей банк данных коэффициентов токсичности вредных веществ.

Система позволяет более дифференцированно и более объективно подходить к определению платежей различными промышленными предприятиями с обязательным эффектом снижения загрязнения окружающей среды, в то же время система позволяет местным Советам более гибко регулировать платежи за загрязнение окружающей среды в зависимости от потребности региона.

Система может быть использована промышленными предприятиями, объединениями, местными Советами, а также контролирующими службами Госкомприроды и Минздрава СССР.

Кроме передачи разработанной системы возможно оказание технической помощи в привязке ее к конкретным условиям региона, в расширении возможностей системы — определение платежей за землю, в использовании данной системы на различных типах ЭВМ.

Разработчик — отдел территориальных работ ГПИ Промстройпроект; тел. 242-02-67, 242-25-00

Обращаться по адресу:

119827 Москва, Комсомольский пр-кт, 42; телетайп 111518, тел. 242-51-87; директор — Сидорин Владимир Константинович.

Справочник

Н.Ф. ТИШЕНКО

Охрана атмосферного воздуха.

Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе