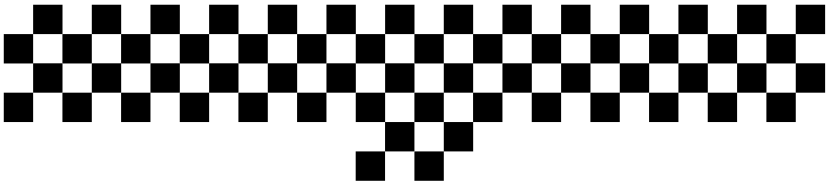
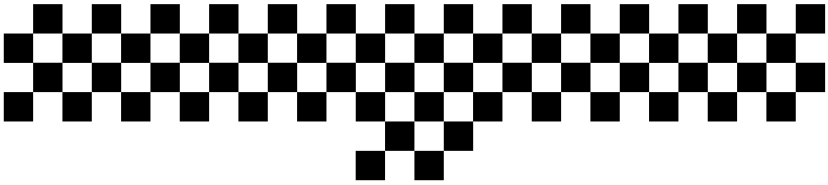
Библиотека СОК

ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОАУДИТА

В.М. ФОКИН



ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОАУДИТА



МОСКВА
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"
2006

В.М. ФОКИН

ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОАУДИТА

МОСКВА
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"
2006
УДК 621:006.354; 621.004:002:006.354
ББК 31.361
Ф75

Р е ц е н з е н т

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Геральд Павлович Бойков

Фокин В.М.
Ф75 Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. 256 с.

Представлены основные положения, структура, содержание и мероприятия энергосбережения и энергоаудита в вопросах теплотехники, теплотехнологиях, теплогенерирующих и котельных установках, системах электроснабжения и тепловых сетях. Приведены методики и рекомендации по расчету теплового баланса, тепловых схем, энергоэффективности оборудования, позволяющие выбрать энергосберегающий режим работы различных тепловых установок. Рассмотрены методические

указания по проведению энергетических обследований и составлению энергетического паспорта потребителей топливно-энергетических ресурсов.

Предназначена для научных, инженерно-технических работников, преподавателей вузов, аспирантов, студентов, бакалавров теплоэнергетических специальностей, магистров техники и технологии, а также для самостоятельной подготовки специалистов, ответственных за энергопотребление, энергосбережение, энергоаудит и энергоэффективность во всех отраслях производства, на транспорте и в жилищно-коммунальном хозяйстве.

УДК 621:006.354; 621.004:002:006.354
ББК 31. 361

ISBN 5-94275-279-6

© Фокин В.М., 2006
© «Издательство Машиностроение-1», 2006

Научное издание

ФОКИН Владимир Михайлович

ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОАУДИТА

Монография

Редактор Т.М. Глинкина
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкова

Подписано к печати 29.05.2006
Формат 60 × 84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная
Объем: 14,88 усл. печ. л.; 15,00 уч.-изд. л.
Тираж 300 экз. С. 302^{M}

"Издательство Машиностроение-1", 107076, Москва, Стромынский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)718108

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография включает ряд разделов, предназначенных для теплотехников и энергетиков, работников промышленных предприятий и научных работников, занимающихся вопросами энергопотребления, энергосбережения, энергоаудита и энергоэффективности во всех отраслях производства, на транспорте и в жилищно-коммунальном хозяйстве. В монографии проанализированы основные положения, структура, содержание и мероприятия энергосбережения и энергоаудита в вопросах теплотехники, теплотехнологиях, теплогенерирующих и котельных установках, системах электроснабжения и тепловых сетях. Приведены методики и рекомендации по расчету теплового баланса, тепловых схем, энергоэффективности оборудования, позволяющие выбрать энергосберегающий режим работы различных тепловых установок. Рассмотрены методические указания по проведению энергетических обследований и составлению энергетического паспорта потребителей топливно-энергетических ресурсов.

Монография позволяет приобрести практические навыки в разработке мероприятий по экономии тепловой и электрической энергии, топлива и материалов, более глубоко усвоить теоретические положения и ознакомиться с действующими нормативными и справочными материалами. Методики и расчеты приведены в соответствии с действующими нормативными и инструктивными материалами [15 – 25], справочниками [26 – 37], СНиП [38 – 45], ГОСТ [49 – 71].

Монография также написана и в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего, профессионального образования и предназначена при изучении дисциплин: «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях», «Источники и системы теплоснабжения предприятий», «Котельные установки и парогенераторы» по специальности «Энергообеспечение предприятий», «Энергоаудит и энергосбережение», «Промышленная теплоэнергетика» (направление 650800 — «Теплоэнергетика»).

Монография будет полезна при подготовке бакалавров и инженеров теплоэнергетических специальностей, магистров техники и технологии, а также для подготовки специалистов по энергоаудиту.

Автор далек от того, чтобы считать вполне достаточным для подготовки специалистов, научных кадров и инженеров предложенную монографию. Со стороны будут виднее и ошибки, и промахи. Может быть, когда-нибудь их удастся учесть и исправить.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

T, t – текущая температура по шкале Кельвина, К, и Цельсия, °С;
T_0 – начальная температура тела, К;
$T_с$, $T_ж$ – температура окружающей среды, жидкости, К;
$\vartheta = (T - T_0)$ – избыточная температура, К;
$\theta = T/T_0$ – безразмерная относительная температура;
x, y, z – текущие координаты;
τ – время, с;
$2R$ – полная толщина тела, м;
d, D – геометрический размер, м;
L, ℓ, δ – линейный размер, м;
F – площадь сечения тела или площадь поверхности тела, м^2;
q – удельный тепловой поток, Вт/м^2, или потери теплоты, %;
q_L – линейная плотность теплового потока, Вт/м;
Q – полный тепловой поток или тепловая мощность, Вт;
k – коэффициент теплопередачи плоской стенки, Вт/(м^2·К);
k_L – коэффициент теплопередачи цилиндрической стенки, Вт/(м·К);
c – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К);
ρ – плотность материала, кг/м^3;
$(c\rho)$ – удельная объемная теплоемкость, Дж/(м^3·К);

G – расход жидкости, кг/с, или газа, м^3/с;
V – объем, м^3, или объемный расход, м^3/с;
m, M, – масса вещества, кг;
ω – скорость вещества, м/с;
a – коэффициент температуропроводности, м^2/с;
λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м^2·К);
E – излучательная способность, Вт/м^2;
$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы;
D – паропроизводительность, кг/с;
$B_р$, $B_у$ – расчетный и условный расход топлива, кг/с, м^3/с.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловая и электрическая энергия – необходимое условие жизнедеятельности человека и создания благоприятных условий его быта. В экономике России энергосбережение и энергосберегающие технологии являются приоритетными при внедрении их в производство. Перевод предприятий на хозяйственный расчет и самофинансирование, повышение цен на топливо, воду, электроэнергию требуют пересмотра подходов к проектированию и эксплуатации оборудования теплоэнергетических установок.

Эффективность, безопасность, надежность и экономичность работы теплоэнергетических установок во многом определяются методом сжигания топлива, совершенством и правильностью выбора теплогенерирующих, тепловых и электрических систем, оборудования и приборов, своевременностью и качеством проведения пусконаладочных работ, квалификацией и степенью подготовки обслуживающего персонала. Энергосбережение и оптимизация систем производства и распределения тепловой и электрической энергии, корректировка энергетических и водных балансов позволяют улучшить перспективы развития теплоэнергетики и повысить технико-экономические показатели.

Альтернативы энергосбережению в настоящее время, безусловно, нет. Поэтому знания принципов работы, расчета и эксплуатации теплоэнергетического оборудования позволяют определить – где, что, в каких количествах, куда и почему теряется. Покрытие дефицита энергии следует осуществлять за счет таких ее источников, которые обладали бы уникальными свойствами: были возобновляемыми, экологически чистыми и не приводили бы к поступлению на планету дополнительного количества теплоты.

Граждане РФ повседневно ощущают проблемы теплоэнергетического комплекса страны. Общество не научилось экономно использовать имеющиеся ресурсы и в обществе отсутствует должная координация в деятельности всех, причастных к этой проблеме структур ввиду их разобщенности. Неотложная задача настоящего времени – за счет энергосберегающих технологий существенно снизить удельное энергопотребление во всех отраслях производства, на транспорте и в ЖКХ.

Решению задач энергоаудита и теплоэнергосбережения в теплоэнергетике и теплотехнологиях предназначена эта монография.

1. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Основные термины и определения приведены в ГОСТ Р 51387–99 «Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение» [56].

1. *Теплофизические свойства* (ТФС) или *теплофизические характеристики* (ТФХ) веществ, материалов и изделий – коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, теплоотдачи, теплопередачи, термическое сопротивление теплопередачи, удельная объемная или весовая тепло-

емкости, степень черноты, температура насыщения. Физический смысл и определения коэффициентов приведены в разд. 2.

2. *Топливо* – вещество, которое может быть использовано в хозяйственной деятельности для получения тепловой энергии, выделяющейся при его сгорании. Виды, классы, свойства, теплота сгорания органических твердых, жидких, газообразных топлив приведены в разд. 3

3. *Энергоноситель* – вещество или форма материи, находящиеся в различных агрегатных состояниях (твердое, жидкое, газообразное, плазма, поле, излучение). Энергия этих веществ, при создании определенных условий, используется для целей энергоснабжения.

4. *Природный энергоноситель* – энергоноситель, образовавшийся в результате природных процессов: вода гидросферы (при использовании энергии рек, морей, океанов); горячая вода и пар геотермальных источников; воздух атмосферы (при использовании энергии ветра); органическое топливо (нефть, газ, уголь, торф, сланцы), биомасса.

5. *Произведенный энергоноситель* – энергоноситель, полученный как продукт производственного технологического процесса: водяной пар различных параметров котельных установок и других парогенераторов; горячая вода; сжатый воздух, ацетилен; продукты переработки органического топлива и биомассы и т.п.

6. *Топливно-энергетические ресурсы* (ТЭР) – совокупность природных и производственных энергоносителей, запасенная энергия которых при существующем уровне развития техники и технологии доступна для использования в хозяйственной деятельности предприятий, транспорта, жилищно-коммунальном комплексе.

7. *Вторичные топливно-энергетические ресурсы* (ВЭР) – топливно-энергетические ресурсы, полученные как отходы или побочные продукты (выбросы) производственного технологического процесса.

Вторичные ТЭР встречаются в виде теплоты различных параметров и топлива. К ВЭР относят: нагретые уходящие газы технологических агрегатов; газы и жидкости систем охлаждения; отработанный водяной пар; сбросные воды; вентиляционные выбросы, теплота которых может быть полезно использована. К ВЭР в виде топлива относят: твердые и жидкие отходы, газообразные выбросы нефтеперерабатывающей, нефтедобывающей, химической, целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей и других отраслей промышленности, городской мусор и т.п.

8. *Первичная энергия* – энергия, заключенная в ТЭР.

9. *Полезная энергия* – энергия, теоретически необходимая (в идеализированных условиях) для осуществления заданных операций, технологических процессов или выполнения работы и оказания услуг.

Примеры определения термина «полезная энергия»:

- в системах освещения – по световому потоку ламп;
- в силовых процессах: для двигательных процессов – по рабочему моменту на валу двигателя; для процессов прямого воздействия – по расходу энергии, необходимой в соответствии с теоретическим расчетом проведения заданных усилий;
- в электрохимических и электрофизических процессах – по расходу энергии, необходимой для проведения заданных условий;
- в термических процессах – по теоретическому расходу энергии на нагрев, кипение, плавку, испарение материала и проведение эндотермических реакций;
- в системах отопления, вентиляции, кондиционирования, горячего водоснабжения, холодоснабжения – по количеству теплоты, полученной потребителями или пользователями;
- в системах преобразования, хранения, транспортировки топливно-энергетических ресурсов – по количеству ресурсов, получаемых из этих систем.

10. *Возобновляемые топливно-энергетические ресурсы* – природные энергоносители, постоянно пополняемые в результате естественных (природных) процессов.

Возобновляемые ТЭР основаны на использовании:

- источников энергии: солнечного излучения, энергии ветра, рек, морей и океанов, внутренней теплоты Земли, воды, воздуха;

- энергии естественного движения воздуха, водных потоков и существующих в природе градиентов температур и разности плотностей;
- энергии биомассы, получаемой в качестве отходов растениеводства и животноводства, искусственных лесонасаждений и водорослей;
- энергии от утилизации отходов промышленного производства, твердых бытовых отходов и осадков сточных вод;
- энергии от сжигания растительной биомассы, термической переработки отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности.

11. *Энергоустановка* – комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенных для производства или преобразования, передачи, накопления, распределения или потребления энергии.

12. *Рациональное или эффективное использование ТЭР* – использование топливно-энергетических ресурсов, обеспечивающее достижение максимальной при существующем уровне развития техники и технологии эффективности с учетом ограниченности их запасов и соблюдения требований снижения техногенного воздействия на окружающую среду и других требований общества. Понятие «Рациональное использование ТЭР» является общим по сравнению с понятием «Экономное расходование ТЭР» и включает:

- выбор оптимальной структуры энергоносителей, т.е. оптимального количественного соотношения различных используемых видов энергоносителей в установке, на участке, в цехе, на предприятии, в регионе, отрасли, хозяйстве;
- комплексное использование топлива, его теплоты, в том числе и отходов продуктов сгорания топлива в качестве сырья для промышленности (например, использование золы и шлаков в строительстве);
- комплексное использование гидроресурсов рек и водоемов;
- учет возможности использования органического топлива (например нефти) в качестве ценного сырья для промышленности;
- комплексное исследование экспортно-импортных возможностей и других структурных оптимизаций.

13. *Экономия ТЭР* – сравнительное в сопоставлении с базовым, эталонным значением сокращение потребления ТЭР на производство продукции, выполнение работ и оказание услуг установленного качества без нарушения экологических и других ограничений в соответствии с требованиями общества.

Экономию ТЭР определяют через сравнительное сокращение расхода, а не потребления ТЭР, корреспондирующееся с расходной частью топливно-энергетического баланса конкретным энергопотребляющим объектом (изделием, процессом, работой и услугами).

Эталонные значения расхода ТЭР устанавливаются в нормативных, технических, технологических, методических документах и утверждаются уполномоченным органом применительно к проверяемым условиям и результатам деятельности.

14. *Непроизводительный расход ТЭР* – потребление ТЭР, обусловленное несоблюдением или нарушением требований, установленных государственными стандартами, иными нормативными актами, нормативными и методическими документами.

15. *Энергосбережение* – реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) ТЭР и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии.

16. *Показатель энергосбережения* – качественная и (или) количественная характеристика проектируемых или реализуемых мер по энергосбережению.

17. *Энергосберегающая политика* – комплексное системное проведение на государственном уровне программы мер, направленных на создание необходимых условий организационного, материального, финансового и другого характера для рационального использования и экономного расходования ТЭР.

18. *Энергетическое обследование* – обследование потребителей ТЭР с целью установления показателей эффективности их использования и выработки экономически обоснованных мер по их повышению.

19. *Топливно-энергетический баланс* – система показателей, отражающая полное количественное соответствие между приходом и расходом (включая потери и остаток) ТЭР в хозяйстве в целом или на отдельных его участках (отрасль, регион, предприятие, цех, процесс, установка) за выбранный интервал времени.

Термин выражает полное количественное соответствие (равенство) за определенный интервал времени между расходом и приходом энергии и топлива всех видов в энергетическом хозяйстве. Топливно-энергетический баланс является статической характеристикой динамической системы энергетического хозяйства за определенный интервал времени. Оптимальная структура топливно-энергетического баланса является результатом оптимизационного развития энергетического хозяйства.

Топливно-энергетический баланс может составляться:

- по видам ТЭР (ресурсные балансы);
- по стадиям энергетического потока ТЭР (добыча, переработка, преобразование, транспортировка, хранение, использование);
- по единому или сводному топливно-энергетическому балансу всех видов энергии и ТЭР, и в целом по народному хозяйству;
- по энергетическим объектам (электростанции, котельные), отдельным предприятиям, цехам, участкам, энергоустановкам, агрегатам;
- по назначению (силовые процессы, тепловые, электрохимические, освещение, кондиционирование, средства связи и управления);
- по уровню использования (с выделением полезной энергии и потерь);
- в территориальном разрезе и по отраслям народного хозяйства.

При составлении топливно-энергетического баланса различные виды ТЭР приводят к одному количественному измерению. Процедура приведения к единообразию может производиться:

- по физическому эквиваленту энергии, заключенной в ТЭР, т.е. в соответствии с первым законом термодинамики;
- по относительной работоспособности (эксергии), т.е. в соответствии со вторым законом термодинамики;
- по количеству полезной энергии, которая может быть получена из указанных ТЭР в теоретическом плане для заданных условий.

20. *Энергетический паспорт промышленного потребителя* ТЭР – нормативный документ, отражающий баланс потребления и показатели эффективности использования ТЭР в процессе хозяйственной деятельности объектом производственного назначения и могущей содержать энергосберегающие мероприятия.

21. *Энергетический паспорт гражданского здания* – документ, содержащий геометрические, энергетические и теплотехнические характеристики зданий и проектов зданий, ограждающих конструкций и устанавливающий соответствие их требованиям нормативных документов.

22. *Энергосберегающая технология* – новый или усовершенствованный технологический процесс, характеризующийся более высоким коэффициентом полезного использования ТЭР.

23. *Сертификация энергопотребляющей продукции* – подтверждение соответствия продукции нормативным, техническим, технологическим, методическим и иным документам в части потребления энергоресурсов топливо- и энергопотребляющим оборудованием.

24. *Показатель энергетической эффективности* – абсолютный, удельный или относительный параметр потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса.

25. *Коэффициент полезного использования энергии* – отношение всей полезно используемой в хозяйстве (участке, энергоустановке и т.п.) энергии к суммарному количеству израсходованной энергии.

26. *Коэффициент полезного действия* – отношение полезной энергии к подведенной; параметр, характеризующий совершенство процесса превращения, преобразования или передачи энергии.

27. *Потеря энергии* – разность между количеством подведенной (первичной) и потребляемой (полезной) энергии. Потери энергии классифицируются следующим образом:

а) по области возникновения: при добыче, хранении, транспортировки, переработке, преобразовании, при использовании и утилизации;

б) по физическому признаку и характеру:

- потери теплоты в окружающую среду с уходящими топочными газами, технологической продукцией, технологическими отходами, уносами материалов, химическим, механическим и физическим недожогом, охлаждающей водой;
- потери электроэнергии в трансформаторах, дросселях, электропроводах, электродах, линиях электропередач, энергоустановках;
- потери жидкостей и газов с утечками через неплотности;
- гидравлические потери напора при дросселировании и потери на трение при движении жидкости (пара, газа) по трубопроводам с учетом местных сопротивлений;
- механические потери на трение подвижных частей машин и механизмов;

в) по причинам возникновения:

- вследствие конструктивных недостатков,
- в результате неправильной эксплуатации агрегатов и не оптимально выбранного технологического режима работы;
- в результате брака продукции и по другим причинам.

28. *Полная энергоемкость продукции* – параметр расхода энергии и (или) топлива на изготовление продукции, включая расход на добычу, транспортировку, переработку полезных ископаемых и производство сырья, материалов, деталей с учетом коэффициента использования сырья и материалов.

29. *Энергоемкость производства продукции* – параметр потребления энергии и (или) топлива на основные и вспомогательные технологические процессы изготовления продукции, выполнение работ, оказание услуг на базе заданной технологической системы. Практически при производстве любого вида продукции расходуются ТЭР, и для каждого из видов продукции существует соответствующая энергоемкость технологических процессов их производства. При этом энергоемкость технологических процессов производства одних и тех же видов изделий, выпускаемых различными предприятиями, может быть различна.

30. *Показатель экономичности энергопотребления изделием* – количественная характеристика эксплуатационных свойств, отражающих техническое совершенство конструкции, качество изготовления, уровень или степень потребления энергии и (или) топлива при использовании этого изделия по прямому функциональному назначению.

Показатели экономичности энергопотребления индивидуальны для различных видов изделий. Они характеризуют совершенство конструкции данного вида изделия и качество его изготовления. В качестве показателей экономичности энергопотребления, как правило, следует выбирать удельные показатели.

31. *Потребитель топливно-энергетических ресурсов* – физическое или юридическое лицо, осуществляющее пользование топливом, электрической энергией и (или) тепловой энергией (мощностью).

32. *Организация-энергоаудитор* (энергоаудитор) – юридическое лицо (организация, кроме государственных федеральных надзорных органов), осуществляющее энергетическое обследование потребителей ТЭР и имеющее лицензию на выполнение этих работ.

1.2. НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

1. Задачи энергосбережения определенные в Законе РФ «Об энергосбережении», предполагают реализацию правовых, организационных, на-

учных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии [54]. В стандарте ГОСТ Р 51387–99 «Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение» реализованы требования:

- закона РФ «Об энергосбережении»;
- закона РФ «О стандартизации»;
- закона РФ «Об обеспечении единства измерений»;
- закона РФ «Об охране окружающей среды»;
- закона РФ «О лицензировании отдельных видов деятельности»;
- федеральной целевой программы «Энергосбережение России» (1998 – 2005 гг.), утвержденном постановлением Правительства РФ № 80 от 24.01.1998 (ФЦП «Энергосбережение России»);
- постановления Правительства РФ «Положение о Министерстве топлива и энергетики Российской Федерации» № 60 от 27.01.1996 (постановление № 60);
- постановления Правительства РФ № 1009 от 13.08.1997 «Правила подготовки нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти и их государственной регистрации»;
- постановления Правительства РФ № 938 от 12.08.1998 «О государственном энергетическом надзоре в Российской Федерации»;
- правил проведения энергетических обследований организаций, утвержденных Минтопэнерго РФ от 25.03.1998.

В поддержку мероприятий по обеспечению энергосбережения на федеральном и региональном уровнях принято несколько десятков нормативных актов, нормативных и методических документов.

2. Комплекс нормативных и методических документов по обеспечению энергосбережения приведен в ГОСТ Р 51387–99.

Основные нормативные правовые акты:

- закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» № 4871-1 от 27.04.1993;
- закон Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг» № 5153-1 от 14.06.1993;
- закон Российской Федерации «О государственном регулировании тарифов на электрическую и тепловую энергию в Российской Федерации» № 41-ФЗ от 14.04.1995;
- закон Российской Федерации «Об энергосбережении № 28-ФЗ от 3.04.1996;
- закон Российской Федерации «О стандартизации» № 5154-1 от 10.06.1996;
- закон Российской Федерации «О лицензировании отдельных видов деятельности» № 158-ФЗ от 25.09.1998;
- постановление Правительства Российской Федерации № 965 от 26.09.1995 «Положение о лицензировании в энергетике» РД 4.38.128–95;
- постановление Правительства Российской Федерации № 1006 от 13.10.1995 «Об энергетической стратегии России»;
- постановление Правительства Российской Федерации № 1087 от 2.11.1995 «О неотложных мерах по энергосбережению».

3. Основное назначение ГОСТ Р 51387–99 «Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение» – системно упорядочить активно развивающиеся процессы нормативно-методического обеспечения энергосбережения на федеральном, региональном (субъектов РФ), ведомственном и локальном уровнях с использованием принципов, учитывающих рыночные условия хозяйствования.

Стандарт устанавливает основные понятия, принципы, цели и субъекты деятельности в области нормативно-методического обеспечения энергосбережения, состав и назначение основополагающих нормативных, методических документов и распространяется на деятельность, связанную с эффективным использованием топливно-энергетических ресурсов, на энергопотребляющие объекты (установки, оборудование, продукцию производственно-технического и бытового назначения), технологические процессы, работы, услуги.

Стандарт не распространяется на объекты военной техники, ядерные, химические и биологические энергопотребляющие объекты.

Положения, установленные в стандарте [56], обязательны для применения расположенными на территории РФ предприятиями, организациями, региональными и другими объединениями независимо от форм собственности и подчинения, а также органами управления РФ, имеющими прямое отношение к использованию ТЭР и энергосбережению. Положения стандарта [56] применяют в научно-технической, учебной и справочной литературе, при планировании разработок и разработке нормативных, методических документов по энергосбережению и обеспечению эффективного использования ТЭР.

4. Нормативные и методические документы профиля «Энергосбережение» устанавливают:

- основные термины и понятия в области энергосбережения;
- требования к составу и содержанию нормативных и методических документов по обеспечению энергосбережения, основные принципы и методические основы деятельности в области нормативно-методического обеспечения энергосбережения;
- номенклатурный состав и классификацию показателей эффективности использования ТЭР;
- порядок выбора и внесения показателей в техническую документацию;
- методы расчета энергобалансов потребителей энергоресурсов с последующей их паспортизацией (ГОСТ Р 51379);
- порядок проведения обязательной и добровольной сертификации энергопотребляющей продукции (ГОСТ Р 51380);
- методы испытаний и сертификации объектов по требованиям энергосбережения (ГОСТ Р 51380);
- порядок маркирования энергопотребляющей продукции (ГОСТ Р 51388);
- методы расчета освещенности;
- методы расчета эффективности тепловых режимов, требований к теплоизоляции, контролю поддержания температуры, общих энергобалансов зданий с последующей их паспортизацией;
- нормативы расхода топлива и энергии, методы их определения;
- требования к энергосберегающим технологиям, методы расчета энергобалансов промышленных технологических процессов;
- методы расчета и анализа направлений снижения потерь топлива и энергии при создании продукции и ее эксплуатации;
- методы определения экономической эффективности мероприятий по энергосбережению;
- направления привлечения инвестиций для реализации проектов и мероприятий по энергосбережению;
- требования к метрологическому обеспечению энергосбережения;
- требования к использованию ВЭР и нетрадиционным возобновляемым источникам энергии;
- методы автоматизированного сбора и обработки данных о расходах топлива и энергии;
- требования к информационному обеспечению в области энергосбережения и к системе обучения в обеспечении энергосбережения.

5. Реализация энергосбережения осуществляется путем правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование ТЭР и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии (закон «Об энергосбережении»).

Целями нормативно-методического обеспечения энергосбережения являются установление в государственных стандартах, технологических регламентах, технических и методических документах [56]:

- требований эффективного использования и сокращения потерь ТЭР при их добыче, производстве, переработке, транспортировке, хранении, потреблении, утилизации;

• нормативных значений показателей энергетической эффективности энергопотребляющих объектов и процессов, ограничивающих образование загрязняющих окружающую среду биосферозагрязнителей (твердых отходов, жидких сбросов, газообразных выбросов, шламов, смесей; шумов, полей, излучений), как результат использования ТЭР;

• правил проверки соответствия энергопотребляющих объектов и процессов нормативным показателям энергетической эффективности;

• порядка осуществления государственного надзора за эффективным использованием ТЭР путем проведения энергетических обследований потребителей ТЭР;

• требований обеспечения точности и единства измерений при учете ТЭР на стадиях добычи, производства, переработки, транспортировки, хранения и потребления;

• правил обеспечения соответствия стандартов, норм и нормативов в области энергосбережения и энергетической эффективности международным, межгосударственным, региональным, зарубежным стандартам, признанным в России;

• ограничений разработки, производства, закупки и применения энергопотребляющих объектов расходами энергоресурсов, превышающими установленные стандартами и регламентами уровни.

6. Основные направления использования нормативных и методических документов в области энергосбережения:

• совершенствование федерального и регионального законодательства по обеспечению энергосбережения;

• разработка программ энергосбережения, планирование и реализация энергосберегающих проектов, организация работ по энергосбережению при создании энергопотребляющих объектов и реализации процессов;

• разработка и утверждение общетехнических стандартов, иных нормативных и методических документов по энергосбережению, нормативно-правовых актов и программ;

• установление нормативных показателей энергетической эффективности для энергоемких объектов и технологических процессов;

• проведение энергетических обследований и энергетической паспортизации потребителей ТЭР;

• установление порядка и правил оценки соответствия (сертификации), методов испытаний объектов, потребляющих ТЭР, на соответствие нормативным показателям энергетической эффективности;

• установление норм точности методов измерений и обеспечение единства измерений: метрологического контроля и надзора за добычей, производством, переработкой, транспортировкой и потреблением ТЭР;

• разработка стандартов на возобновляемые, новые источники энергии, вторичные энергоресурсы и альтернативные виды топлива.

7. Результатами нормативно-методического обеспечения энергосбережения являются [56]:

• нормативные документы в области энергосбережения на межгосударственном (ГОСТ), государственном (ГОСТ Р), отраслевом (ОСТ) уровнях, а также на уровнях стандартов научно-технических обществ (СТО) и предприятий (СТП);

• технические регламенты, правила, руководства и другие нормативные документы по энергосбережению, принятые органами исполнительной государственной власти;

• методические документы по расчетам экономии энергоносителей и обоснованию экономической эффективности энергосберегающих проектов;

• методические документы, в которых изложены методы, способы, схемы, алгоритмы, модели энергосбережения за счет повышения эффективности использования и снижения потерь первичных ТЭР, использования вторичных ТЭР, возобновляемой энергии и альтернативных топлив;

• методические документы, регламентирующие требования к точности методов измерений, обеспечение единства измерений, метрологического контроля и надзора при учете ТЭР на стадиях добычи, производства, переработки, транспортирования, хранения и потребления.

8. Государственная стандартизация по обеспечению энергосбережения в промышленности и строительстве проводится в соответствии с ГОСТ Р 1.2 и ГОСТ Р 1.5 на базе организаций Госстандарта России и Госстроя России. К деятельности по обсуждению и согласованию нормативных и методических документов привлекаются уполномоченные федеральные органы исполнительной власти, ответственные за экономическую и финансовую политику, развитие новых технологий и научно-технический прогресс, сохранение природных ресурсов и социальную сферу. На региональном (субъектов Российской Федерации) уровне деятельность в области нормативно-методического обеспечения энергосбережения осуществляют:

- орган исполнительной власти субъекта РФ;
- региональные энергетические комиссии (РЭК);
- территориальные органы Ростехнадзора и Госстандарта РФ;
- научно-технические центры и агентства по энергосбережению.

В соответствии с Постановлением № 938 «О государственном энергетическом надзоре в РФ», государственный контроль и надзор за рациональным использованием ТЭР осуществляют органы государственного энергетического надзора, а также аккредитованные ими организации, имеющие соответствующие лицензии. Порядок привлечения организаций к энергетическим обследованиям с использованием действующих нормативных правовых, нормативных и методических документов в обеспечение энергосбережения определяют органы исполнительной власти субъектов РФ.

1.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Энергетический паспорт (ЭП) промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) позволяет получать в концентрированном виде объективную информацию об уровне и эффективности использования ТЭР на производственных предприятиях, объектах промышленности и жилищно-коммунального хозяйства [57].

Государственный стандарт ГОСТ Р 51379–99 регламентирует основные положения энергетической паспортизации, устанавливает формы документов (составных частей паспорта промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов), отражает накопленный опыт в области энергетической паспортизации предприятий и предлагает единый унифицированный подход к его составу и структуре.

ГОСТ Р 51379–99 устанавливает основные требования к построению, изложению и содержанию энергетического паспорта промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) с целью определения фактического баланса потребления ТЭР, оценки показателей энергетической эффективности и формирования мероприятий по энергосбережению. Стандарт используется органами государственного энергетического надзора при энергетических обследованиях потребителей энергоресурсов и оценке эффективности использования ТЭР.

Энергетический паспорт потребителя ТЭР разрабатывают на основе энергетического обследования, проводимого с целью оценки эффективности использования ТЭР, разработки и реализации энергосберегающих мероприятий. Разработку и ведение паспорта обеспечивает потребитель ТЭР. Методические рекомендации по заполнению и ведению энергетического паспорта разрабатывают энергоаудиторы и согласовывают с федеральными органами исполнительной власти, уполномоченными для государственного надзора за эффективным использованием ТЭР.

Объектами энергетического обследования являются:

- производственное оборудование, машины, установки, агрегаты, потребляющие ТЭР, преобразующие энергию из одного вида в другой для производства продукции, выполнения работ (услуг);
- технологические процессы, связанные с преобразованием и потреблением топлива, энергии и энергоносителей;
- процессы, связанные с расходованием ТЭР на вспомогательные нужды (освещение, отопление, вентиляцию).

Энергетические обследования эффективности использования ТЭР проводят:

- потребители ТЭР (собственные внутренние обследования);
- энергоаудиторские организации, работающие по контракту;
- органы, осуществляющие надзор и контроль за эффективностью использования ТЭР. Правила проведения энергетических обследований потребителей ТЭР устанавливает федеральный орган исполнительной власти, уполномоченный для государственного надзора за эффективностью использования ТЭР.

За базовый год принимается последний отчетный календарный год на момент составления паспорта. Сведения по текущим годам срока действия паспорта не являются отчетными перед федеральными органами Ростехнадзора и заносятся силами предприятия для определения динамики реализации программ энергосбережения.

Обновление информации в энергетическом паспорте проводят в соответствии с действующими нормативными правовыми актами в области контроля и эффективности использования ТЭР. Заполнению подлежит номенклатура показателей тех технологических процессов, по которым ведется хозяйственная деятельность. Заполнение типовых форм ЭП ведется по тем энергоносителям, которые используются в конкретном технологическом процессе. Ответственность за достоверность данных энергетического паспорта несут лица, проводившие энергетические обследования, административное руководство потребителя ТЭР. Энергетический паспорт потребителя ТЭР должен храниться на предприятии, в территориальном органе государственного энергетического надзора и в организации, проводившей энергоаудит. Гриф энергетического паспорта определяет руководство потребителя ТЭР в установленном порядке.

Структура и содержание энергетического паспорта промышленного потребителя ТЭР

Энергетический паспорт состоит из следующих разделов [57]:

- общие сведения о потребителе ТЭР;
- сведения о потреблении ТЭР (общее потребление энергоносителей, потребление электроэнергии, потребление тепловой энергии, потребление котельно-печного топлива, потребление моторного топлива);
- сведения об эффективности использования ТЭР;
- мероприятия по энергосбережению и повышению эффективности использования ТЭР;
- выводы.

Заключительный раздел энергетического паспорта потребителя ТЭР должен включать [57]:

- перечень зафиксированных при обследовании потребителя фактов непроизводительных расходов ТЭР с указанием их значений в стоимостном и натуральном выражении;
- предлагаемые направления повышения эффективности использования ТЭР с оценкой экономии ТЭР в стоимостном и натуральном выражении с указанием затрат, сроков внедрения и окупаемости;
- количественную оценку снижения уровня непроизводительных расходов ТЭР за счет внедрения энергосберегающих мероприятий: беззатратных и низкозатратных, среднезатратных, высокозатратных.

Типовые формы энергетического паспорта промышленного потребителя ТЭР включают:

- титульный лист энергетического паспорта потребителя ТЭР;
- общие сведения о потребителе ТЭР, содержащие информацию о наименовании, реквизитах предприятия, объеме производства основной и вспомогательной продукции, численности персонала и другие сведения о предприятии;
- сведения об общем потреблении энергоносителей, содержащие информацию о годовом потреблении и коммерческом учете потребления всех видов энергоносителей, используемых потребителем ТЭР;
- сведения о потреблении электроэнергии, информацию о трансформаторных подстанциях, установленной мощности электроприемниках с краткой энергетической характеристикой энергоемкого оборудования, ин-

формацию о собственном производстве электрической и тепловой энергии, а также годовой баланс потребления электроэнергии;

- сведения о потреблении (производстве) тепловой энергии, содержащие информацию о составе и работе котельных (котельных агрегатах, входящих в состав собственной ТЭС), сведения о технологическом оборудовании, использующем тепловую энергию, расчетно-нормативном потреблении тепловой энергии, а также годовой баланс потребления тепловой энергии;
- сведения о потреблении котельно-печного и моторного топлива, об использовании вторичных энергоресурсов, альтернативных топлив, возобновляемых источников энергии, содержащие информацию о характеристиках топливоиспользующих агрегатов, об использовании моторных топлив транспортными средствами и др., а также балансы потребления котельно-печного и моторного топлива;
- сведения о показателях эффективности использования ТЭР, содержащие информацию об удельных расходах ТЭР;
- сведения об энергосберегающих мероприятиях, содержащие информацию об энергоэффективных мероприятиях по каждому виду ТЭР.

Представленные в стандарте [57] типовые формы энергетического паспорта используют в качестве базовых. В зависимости от принадлежности потребителя к отрасли экономики, особенностей и специфики производственного оборудования и технологических процессов типовые формы энергетического паспорта по рекомендациям Федерального органа исполнительной власти, осуществляющего государственный надзор за эффективным использованием ТЭР, могут быть дополнены и утверждены в составе соответствующего нормативного документа.

Титульный лист энергетического паспорта
промышленного потребителя
топливно-энергетических ресурсов

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО «_____»

«____» _____ 20___ г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
ООО «_____»

ПАСПОРТ РАЗРАБОТАН: «СОГЛАСОВАНО»

Генеральный директор ООО «____» Главный энергетик ООО «____»

«____»_____ 20___ г. «____»_____ 20___ г.

Срок действия 5 лет до 20___ года.
Типовая форма энергетического паспорта
(по требованиям ГОСТ Р 51379–99)

Обозначение и наименование формы по ГОСТ Р 51379–99	**Содержаниеэнергетического паспорта**
А. Титульный лист	Форма А.«Титульный лист»
Б. Общие сведения о промышленном потребителе	Форма Б.«Общие сведения о промышленном потребителе ТЭР»

ТЭР	
В. Общее потребление энергоносителей	Форма В.«Общее потребление энергоносителей»
Г. Сведения о трансформаторных подстанциях	Форма Г.«Сведения о трансформаторных подстанциях». Заполняется с учетом данных годовой отраслевой статистической отчетности «Перечень основного энергетического оборудования»
Д. Установленная мощность потребителей электроэнергии по направлениям использования	Форма Д.«Установленная мощность потребителей электроэнергии по направлениям». Заполняется с учетом данных годовой отраслевой статистической отчетности «Перечень основного энергетического оборудования»
Е. Сведения о компрессорном оборудовании	Форма Е.«Сведения о компрессорном оборудовании». Заполняется при наличии оборудования
Ж. Характеристика холодильного оборудования	Форма Ж.«Характеристика холодильного оборудования». Заполняется при наличии оборудования
И. Сведения о составе и работе основного оборудования ТЭС	Форма И.«Сведения о составе и работе основного оборудования ТЭС»
К. Баланс потребления электроэнергии	Форма К.«Баланс потребления электроэнергии»
Л. Сведения о составе и работе котельных	Форма Л.«Сведения о составе и работе котельных». Заполняется с учетом данных годовой отраслевой статистической отчетности «Отчет о наличии промышленных котлов, установленных на объектах»

Обозначение и наименование формы по ГОСТ Р 51379–99	**Содержание энергетического паспорта**
М. Характеристика технологического оборудования, использующего тепловую энергию (пар, горячая вода)	Форма М.«Характеристика технологического оборудования, использующего тепловую энергию (пар, горячая вода)»
Н. Расчетно-нормативное потребление тепловой энергии	Форма Н.«Расчетно-нормативное потребление тепловой энергии»
П. Баланс потребления тепловой энергии	Форма П.«Баланс потребления тепловой энергии»
Р. Характеристика топливоиспользующих агрегатов	Форма Р.«Характеристика топливоиспользующих агрегатов». Заполняется с учетом данных годовой отраслевой статистической отчетности
С. Баланс потребления котельно-печного топлива	Форма С.«Баланс потребления природного газа на собственные нужды»
Т. Характеристика использования моторных топлив транспортными средствами	Форма Т.«Характеристика использованиямоторных топлив транспортнымисредствами». Заполняется с учетом данных годовой отраслевой статистической отчетности «Работа и использование автомобильного транспорта»
У. Баланс потребления моторных топлив	Форма У.«Баланс потребления моторных топлив»
Ф. Сведения об использовании ВЭР, альтернативных	Форма Ф.«Сведения об использовании ВЭР,альтернативных (местных)

(местных) топлив и возобновляемых источников энергии	топлив и возобновляемых источников энергии»
Х. Удельный расход ТЭР на выпускаемую продукцию	Форма Х.«Показатели энергоэффективности по основным технологическим процессам»
Ц. Перечень энергосберегающих мероприятий	Форма Ц.«Перечень энергосберегающихмероприятий»

Примечание: 1) обязательные формы – А, Б, В, Г, Д, К, Л, М, Н, П, Р, С, Т, У, Ф, Х, Ц; 2) рекомендуемые формы – Е, Ж, И.

1.4. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Энергосбережение в теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях необходимо сориентировать по нескольким основным направлениям: в системах электроснабжения, в вопросах теплообмена, в теплогенерирующих установках, котельных и тепловых сетях, в теплотехнологиях, в зданиях и сооружениях, а также за счет использования вторичных ресурсов и альтернативных источников энергии.

1. *Энергосбережение в системах электроснабжения* включает системы освещения, электротехники и электроники, электрические сети, электрические машины и аппараты, системы электрохимзащиты оборудования и трубопроводов промышленных предприятий и объектов жилищно-коммунального хозяйства.

2. *Энергосбережение в вопросах теплообмена* базируется на законах теплопроводности, конвективного, лучистого и сложного теплообмена. Теплотехника – отрасль знаний, изучающая теорию и технические средства превращения энергии природных источников в тепловую, механическую и электрическую энергии, а также теорию и средства использования теплоты для отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, технологических нужд промышленности и ЖКХ.

Энергосбережение затрагивает вопросы интенсификации теплопередачи в теплообменных аппаратах, стационарной и нестационарной теплопроводности при различных граничных условиях, при внутреннем тепловыделении и наличии фильтрации, теплообмена излучением между телами и в газах, при кипении и конденсации [13].

Изучение законов преобразования теплоты в другие виды энергии и теплообмена позволяют постигнуть основы работы различного рода тепловых, теплогенерирующих и теплотехнологических установок, тепловых двигателей и нагнетателей.

3. *Энергосбережение в теплогенерирующих установках* затрагивает вопросы расчета паровых и водогрейных котельных агрегатов, электродных котлов, гелиоустановок, геотермальных установок, котлов-утилизаторов, теплонасосных установок. Разработка методик расчета теплогенерирующих установок (ТГУ), горения, теплового баланса, топочных камер, конвективных поверхностей нагрева, расхода топлива, позволяют выбрать наиболее экономичный и энергосберегающий вариант работы теплогенератора.

Классификация и устройство теплогенерирующих установок, обзор паровых, водогрейных, электродных котлов, гелиоустановок, вопросы эксплуатации котельных агрегатов, топочных устройств, оборудования водоподготовки, арматуры, контрольно-измерительных приборов и системы автоматики подробно описаны в монографиях [10, 11].

4. *Энергосбережение в производственных и отопительных котельных* основывается на проектировании и расчете рациональных тепловых схем котельных для закрытых и открытых систем теплоснабжения, экономии энергоресурсов при работе паровых и водогрейных котельных установок, экономии и сбережения воды в котельной, использовании современных приборов регулирования, контроля, управления и экономии энергоресурсов при эксплуатации котельных.

Разработка методик и основных положений работы тепловых схем производственно-отопительных котельных, с паровыми и водогрейными

котлами, расчета и подбора теплоэнергетического оборудования (теплообменников, насосов, тягодутьевых машин и др.), определения тепловых нагрузок и расхода топлива, позволяют выбрать наиболее экономичный и энергосберегающий вариант их работы. В монографии [12] подробно описаны тепловые схемы отопительных и производственно-отопительных котельных с паровыми и водогрейными котлами, приведены расчеты этих схем, что позволяет выбрать наиболее экономичный и энергосберегающий вариант их работы.

5. *Энергосбережение в тепловых сетях* касается вопросов повышения качества воды для систем теплоснабжения, использования современных теплообменников на тепловых пунктах, установки приборов расхода воды и учета теплоты, применения современных технологий тепловой изоляции, замены элеваторных узлов на смесительные установки с датчиками температуры и расхода.

В настоящее время следует экономически обосновать и договориться между производителями и потребителями тепловой энергии, администрациями и предприятиями о том, при какой тепловой мощности потребителей экономичнее применять централизованную или децентрализованную систему теплоснабжения.

6. *Энергосбережение в теплотехнологиях* охватывает разработку критериев энергетической оптимизации при производстве, передаче или сбережения тепловой энергии, баланса теплоты, интенсификации процессов теплопередачи, современных способов сжигания топлива, использования паротурбинных, газотурбинных, холодильных установок, тепловых насосов и тепловых трубок, эффективной тепловой изоляции, разработку методик расчета технико-экономических показателей. Реализация новых и коренная модернизация действующих теплотехнологических систем возможны на базе современных технологических, энергетических, научно-методических и организационных основ.

7. *Энергосбережение в зданиях и сооружениях* строится на сбережении теплоты в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Энергосбережение в зданиях и сооружениях включает в себя различные устройства: вентилируемых наружных стен, вентилируемых окон, трехслойного или теплоотражающего (в инфракрасном излучении) остекления, дополнительного утепления наружных ограждений, теплоизоляции стен за отопительным прибором, застекленных лоджий. Кроме того, для энергосбережения в зданиях и сооружениях возможно применение воздушного отопления от гелиоустановок, а также с использованием теплонасосных установок и энергии низкого потенциала (конденсата, воды, воздуха).

В промышленных зданиях и сооружениях в дополнении к этому возможно применение газовых инфракрасных излучателей, периодического режима отопления, локального обогрева рабочих площадок теплотой рециркуляционного воздуха из верхней зоны помещения, прямое испарительное охлаждение воздуха, вращающихся регенеративных воздухо-воздушных утилизаторов теплоты.

8. *Энергосбережение за счет использования альтернативных* (*нетрадиционных и возобновляемых*) *источников энергии* опирается на применении солнечных коллекторов и электростанций, тепловых насосов, гелиоустановок, фотоэлектрических и ветроэнергетических установок.

9. *Энергосбережение за счет использования вторичных энергоресурсов* (ВЭР) требует использования горючих, тепловых и ВЭР избыточного давления. Горючие – отходы технологических процессов термохимической переработки углеродистого сырья, горючие городские и сельскохозяйственные отходы. Тепловые – теплоносители, способные при определенных условиях выделять определенное количество теплоты. ВЭР избыточного давления – газы и жидкости, покидающие технологические аппараты под избыточным давлением и способные передать другому теплоносителю часть накопленной потенциальной энергии перед сбросом в окружающую среду.

Энергосбережение за счет использования ВЭР включает утилизацию теплоты уходящих топочных газов и воздуха, установки контактных теп-

лообменников, использование холодильных установок в качестве нагревателей воды, использования теплоты сепараторов пара и пара вторичного вскипания конденсата, рециркуляцию сушильного агента.

Для решения задач энергосбережения в теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях нужны высококвалифицированные специалисты, хорошо освоившие принципы проектирования и эксплуатации энергосберегающих технологий и оборудования.

В настоящее время, в век компьютерных технологий и программного обеспечения, в каждой организации и предприятии необходима программа энергосбережения и система комплексной диспетчеризации инженерного оборудования.

Система комплексной диспетчеризации инженерного оборудования включает:

- диспетчерский пункт с компьютерами и программным обеспечением, обеспечивающим доступ к технологическим параметрам и единое информационное пространство;
- энергоэффективные тепловые узлы с датчиками и автоматическими регуляторами температуры, расхода теплоносителя, учета тепловой энергии, учет потребления водопроводной воды;
- учет потребления электроэнергии всех потребителей; контроль и управление освещением;
- индикация загазованности, затопления и пожара в помещениях.

Система комплексной диспетчеризации инженерного оборудования должна иметь в распоряжении лабораторию энергоаудита с различными метрологическими характеристиками и функциями.

В ***функциональный состав лаборатории энергоаудита*** должны входить контрольно-измерительные приборы (КИП) и средства автоматизации с различными метрологическими характеристиками [47]:

- измерители-регуляторы скорости и температуры воды, температуры и влажности воздуха в вентиляционных системах;
- измерители освещенности, параметров трехфазных, однофазных и высоковольтных систем;
- измерители содержания O_2, CO_2, CO, NO_x, H_2, CH_4, давления и температуры в топочных дымовых газах;
- измерители скорости вращения подвижных элементов;
- контроллеры для систем кондиционирования, отопления и горячего водоснабжения, приточной и вытяжной вентиляции;
- контроллеры для технологического оборудования и холодильных машин, установок тепловлажностной обработки и печей;
- счетчики, таймеры, измерители расхода;
- приборы для управления насосами, сигнализаторы уровня;
- термопреобразователи, блоки питания и модули входа/выхода;
- средства сбора данных и проведения термографических исследований, включающих адаптеры и преобразователи интерфейса RS-232/RS-485, а также супервизорный контроль с программами типа OPM (OWEN PROCESS MANAGER) или SCADA-система (Supervisory, Control and Data Acquisition).

2. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ВОПРОСАХ ТЕПЛООБМЕНА

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Сбережение или сохранение тепловой энергии во многом зависит от процессов распространения теплоты в телах и процессов обмена теплотой между телами. Процессы теплообмена являются составной частью тепловых процессов машин, двигателей, аппаратов, ограждающих конструкций зданий и сооружений. В вопросах теплообмена и энергосбережения можно выделить две основные задачи.

1. Определение количества теплоты, которое при заданных условиях проходит из одной части тела в другую или передается от одного тела к другому. Эта задача является главной при расчетах теплообменных аппара-

тов, теплопередачи через плоские, цилиндрические стенки, определении потерь теплоты через изоляцию и т.п.

2. Определение температуры в различных участках тела, участвующего в процессе теплообмена. Эта задача является важной при расчете деталей машин, ограждающих конструкций, так как прочность материалов зависит от температуры, а неравномерное распределение температуры вызывает появление термических напряжений.

Существуют три основных способа переноса тепловой энергии:

1) теплопроводность – перенос теплоты от более нагретых к менее нагретым участкам тела за счет теплового движения и взаимодействия микрочастиц, что приводит к выравниванию температуры тела;

2) конвекция – перенос теплоты за счет перемещения частиц вещества в пространстве и наблюдается в движущихся жидкостях и газах;

3) тепловое излучение – перенос энергии электромагнитными волнами при отсутствии контакта между телами.

В большинстве случаев передача теплоты между телами осуществляется одновременно двумя или тремя способами. Например, обмен теплотой между твердой поверхностью и жидкостью (или газом) происходит путем теплопроводности и конвекции одновременно и называется конвективным теплообменом или теплоотдачей. В паровых котлах в процессе переноса теплоты от топочных газов к теплоносителю (воде, пару, воздуху) одновременно участвуют все три вида теплообмена – теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Перенос теплоты от горячей жидкости к холодной через разделяющую их стенку называют процессом теплопередачи.

2.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Теплопроводность – процесс распространения (переноса) теплоты путем непосредственного соприкосновения микрочастиц, имеющих различную температуру, или путем соприкосновения тел (или их частей), когда тело не перемещается в пространстве. Механизм передачи теплоты, носит молекулярный или электронный характер.

В теплофизике и теплотехнике принято считать, что любое тело состоит из мельчайших частиц. В элементах тела, которые подвержены нагреванию, молекулы начинают двигаться, в результате чего возникают упругие волны, которые передаются от большей температуры к меньшей. Это приводит к выравниванию температуры тела. Такой молекулярный перенос теплоты наблюдается в твердых телах, диэлектриках, жидкостях и газах. В металлах к этому явлению добавляется движение свободных электронов, поэтому теплопроводность металлов выше, чем в диэлектриках, жидкостях и газах.

Теплопроводность жидкостей и газов может рассматриваться только в тех случаях, когда они во всем объеме находятся в неподвижном состоянии. В реальных практических условиях внутри жидкостей и газов имеет место относительное и непрерывное движение частиц, передача тепловой энергии осуществляется, в основном, конвекцией, а эффект теплопроводности становится второстепенным. Поэтому теплопроводность жидкостей и газов встречается редко.

Согласно аналитической теории теплопроводности любое вещество рассматривается как сплошная материальная среда – континуум, что весьма удобно для математического анализа, так как позволяет представлять физические явления в малой дифференциальной форме и создает более широкие возможности для приложения существующих законов естествознания. Однако такой взгляд на материю приемлем лишь тогда, когда размеры дифференциалов вещества достаточно велики по сравнению с размерами молекул и расстояниями между ними. Указанное обстоятельство соблюдается в подавляющем большинстве случаев. Если расстояния между молекулами становятся соизмеримыми с величиной дифференциалов вещества (например, в сильно разреженном газе, когда не сохраняются понятия температуры, давления и т.п.), допущение о том, что среда сплошная, становится неприемлемым.

Всякое физическое явление протекает во времени, пространстве и связано с понятием поля (температур, давлений, потенциала). Процесс тепло-

проводности связан с распределением температур внутри тела. *Температура* характеризует степень нагрева и тепловое состояние тела.

Совокупность значений температур в различных точках пространства в различные моменты времени называется *температурным полем*. Если температура конкретной точки тела зависит только от координат $T = f(x, y, z)$, то такое температурное поле называется *стационарным*, а если от координат и времени $T = f(x, y, z, \tau)$ – *нестационарным*. Различают стационарное (независящее от времени) и нестационарное (зависящее от времени) поле температур, а также одно-, двух- и трехмерное поле, которое характеризуется одной, двумя или тремя координатами.

Изотермическая поверхность – это геометрическое место точек одинаковой температуры. Любая изотермическая поверхность разделяет тело на две области: с большей и меньшей температурой. Теплота переходит через изотермическую поверхность в область более низкой температуры. Количество теплоты ΔQ (Дж), проходящее в единицу времени $\Delta\tau$ (с) через произвольную изотермическую поверхность, называется *тепловым потоком* Q, Дж/с (Вт). В общем случае тепловой поток может совпадать или не совпадать с линией тока теплоты, может изменяться вдоль линии тока теплоты или оставаться постоянным. Значения теплового потока могут зависеть или не зависеть от времени.

Интенсивность теплообмена характеризуется плотностью теплового потока. *Плотностью теплового потока* q (или удельным тепловым потоком) называется количество теплоты ΔQ (Дж), проходящее через единицу поверхности F (м^2) в единицу времени $\Delta\tau$ (с):

$$q = \Delta Q/\Delta\tau\, F, \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \text{ или } \text{Вт}/\text{м}^2.$$

Следовательно, плотность теплового потока q это тепловой поток Q (Вт), отнесенный к единице поверхности F (м^2):

$$q = Q/F, \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Французский ученый Жан Батист Фурье (1768 – 1830 гг.), сначала экспериментально в 1807 г., а затем и теоретически в 1822 г., установил, что для изотропных (твердых) сред количество передаваемой теплоты ΔQ (Дж) пропорционально падению температуры $(-\partial T / \partial n)$, времени $\Delta\tau$ (с) и площади сечения F (м^2), перпендикулярного направлению распространения теплоты.

Математическое выражение закона теплопроводности Фурье:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F \Delta\tau \quad \text{или} \quad Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F, \quad \text{или} \quad q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}.$$

Множитель пропорциональности λ в законе Фурье называется коэффициентом теплопроводности, который характеризует способность вещества проводить теплоту. *Коэффициент теплопроводности* λ, Вт/(м · К), численно равен количеству теплоты (Дж), проходящей в единицу времени (с), через единицу поверхности (м^2), при разности температур в один градус (К), на единицу длины один метр (м).

Коэффициент теплопроводности – тепловой поток (Вт), проходящий через один квадратный метр изотермической поверхности (м^2) при температурном градиенте (К/м), равном единице.

Для разнообразных веществ коэффициент теплопроводности λ неодинаков и зависит от физических характеристик материала (структуры, плотности, влажности, давления и температуры), а для технических расчетов обычно принимается по справочным таблицам. При распространении теплоты температура в различных частях тела различна, а зависимость λ от температуры имеет вид: $\lambda = \lambda_0[1 + b(t - t_0)]$, где λ_0 – коэффициент теплопроводности при температуре t_0; b – постоянная, определяемая опытным путем.

Для большинства веществ и материалов зависимость $\lambda = f(T)$ достаточно слабая, что позволяет λ усреднять в заданном интервале температур и оперировать им как постоянной характеристикой.

Коэффициент теплопроводности λ для металлов лежит в пределах 20…400 Вт/(м · К). Самым теплопроводным металлом является серебро (410), затем идут чистая медь (395), алюминий (210). Для большинства металлов с повышением температуры λ уменьшается и лишь для отдельных сплавов (алюминий, нихром) – увеличивается. Он также убывает и при наличии разного рода примесей: для железа с 0,1 % углерода λ = 52, с 1,0 % углерода λ = 40, и установить общую закономерность влияния примесей невозможно.

Для строительных материалов λ лежит в пределах 0,02…3,0 Вт/(м · К) и с повышением температуры возрастает. Как правило, для материалов с большей плотностью, λ имеет более высокие значения. Для влажных материалов λ может быть значительно выше, чем для сухого материала и воды в отдельности. Так, например, для сухого силикатного кирпича λ ≈ 0,5, для воды ≈ 0,6, а для влажного кирпича 0,9. У влажных материалов появляется градиент давления в сторону распространения влаги и теплота с влагой как бы проталкивается.

Материалы с низким значением коэффициента теплопроводности, менее 0,23 Вт/(м · К), обычно применяются для тепловой изоляции и называются *теплоизоляционными материалами*.

Коэффициент теплопроводности жидкостей лежит в пределах 0,06…0,7 Вт/(м · К). С повышением температуры для большинства жидкостей λ убывает, а исключение составляют лишь вода и глицерин.

Коэффициент теплопроводности газов лежит в пределах 0,005…0,5 Вт/(м · К). С повышением температуры λ возрастает, а от давления практически не зависит, за исключением очень высоких (больше 200 МПа) и очень низких (меньше 20 мм рт. ст.) давлений.

Коэффициент теплопроводности не подчиняется закону аддитивности (прибавлению) и поэтому λ смеси не может быть рассчитано путем суммирования коэффициентов теплопроводности отдельных компонентов. Для сплава чистых металлов, смеси газов или жидкостей и при отсутствии табличных данных коэффициент теплопроводности λ достоверно может быть определен только путем опыта.

Необходимо помнить, что большинство тел относятся к изотропным веществам, у которых свойства одинаковы во всех направлениях. Для анизатропных тел существует зависимость физических свойств от направления. Поэтому для монокристаллов λ неодинаково в направлении различных осей, а для дерева λ различно вдоль и поперек волокон.

2.3. УСЛОВИЯ ОДНОЗНАЧНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Для решения практических задач энергосбережения в строительстве и промышленности требуется знание теплового потока, градиента температур, распределения температур внутри объема тела. Поэтому для каждого конкретного случая к дифференциальному уравнению теплопроводности добавляют математические условия или ряд дополнительных уравнений, называемых *условиями однозначности* задачи.

Условия однозначности включают в себя геометрические, физические, временные и граничные условия.

Геометрические условия характеризуют геометрические и линейные размеры тела, участвующего в процессе теплообмена.

Физические условия характеризуют физические свойства тела, среды (λ, *c*, ρ, *a*) или задается закон внутреннего тепловыделения.

Временные или начальные условия характеризуют особенности протекания процесса во времени или распределение температуры внутри тела в начальный момент времени: при τ = 0 и $T = f(x, y, z)$. Очень часто в начальный момент времени тело имеет равномерную одинаковую температуру по всему объему: τ = 0 и $T = T_0 = \text{const}$.

Граничные условия характеризуют процессы теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Граничные условия задаются несколькими возможными случаями:

I рода – задается распределение температуры на поверхности тела: $T_п = f(x, y, z, \tau)$; очень часто $T_п = \text{const}$.

II рода – задается распределение теплового потока на поверхности тела: $q_п = f(x, y, z, \tau)$; очень часто $q_п = \text{const}$.

III рода – задаются температура окружающей среды $T_с$ и закон теплообмена между средой и поверхностью тела. Эти законы зависят от многих факторов и поэтому, чаще всего, используется закон теплообмена Ньютона:

$$q = \alpha(T_п - T_с) \quad \text{или} \quad -\lambda(dT/dn) = \alpha(T_п - T_с).$$

IV рода (условия сопряжения) – характеризуют процессы теплопроводности между соприкасающимися поверхностями различных тел, когда температура в точке сопряжения тел одинакова, но тепловые потоки разные.

Вопросы стационарной и нестационарной теплопроводности для плоских, цилиндрических, тел сложной конфигурации, расчета температурных полей и энергосбережения рассмотрены в [13, 37].

2.4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Дифференциальным уравнением теплопроводности называется математическая зависимость, связывающая между собой все физические параметры, характеризующие явление теплопроводности внутри объема. Если такую связь найти явно относительно температуры, т.е. $T = f(x, y, z, \tau)$, то можно определить плотность теплового потока. Для вывода дифференциального уравнения теплопроводности необходимо представить себе объем тела в декартовой или цилиндрической системе координат, которое нагревается или охлаждается и внутри которого имеет место температурное поле. Теплопроводность вещества зависит от температуры, координат точки, времени, плотности, теплоемкости и других физических параметров тела. Для установления математической зависимости этих параметров необходимо часть из них взять в бесконечно малом значении, в виде частных производных ($\partial T / \partial x$, $\partial T / \partial y$, $\partial T / \partial \tau$, $\partial q_x / \partial x$ и т.д.), а часть в конечном – dT, dx, dy, dz, $d\tau$, λ, c, ρ.

Если начало координат расположить в центре тела, то во всех случаях его средняя температура определяется по формулам:

- для параллелепипеда

$$T_{ср} = \frac{1}{2R_1\, 2R_2\, 2R_3} \int_{-R_1}^{+R_1} dx \int_{-R_2}^{+R_2} dy \int_{-R_3}^{+R_3} T(x, y, z, \tau)\, dz;$$

- для цилиндра

$$T_{ср} = \frac{1}{\pi R^2\, 2L} \int_{0}^{+R_1} r dr \int_{0}^{2\pi} d\varphi \int_{-L}^{+L} T(r, \varphi, z, \tau)\, dz.$$

Удельное внутреннее тепловыделение W имеет вид:

$$\frac{dQ_w}{dV\, d\tau} = W,$$

где dQ_w – количество теплоты, выделяемое в объеме $dV = dx\, dy\, dz$ за время $d\tau$.

Отношение $\frac{\lambda}{(c\rho)} = a$ называется коэффициентом *температуропроводности вещества*, м^2/с, который характеризует скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом объеме тела.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для изотропного твердого тела в декартовой системе координат (установлен Ж.Б. Фурье в 1822 г.) имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{W}{(c\rho)}.$$

Если температурное поле стационарное – имеем дифференциальное уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{W}{\lambda} = 0.$$

При отсутствии внутренних источников теплоты, когда тепловыделение W равно нулю, имеем дифференциальное уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

Дифференциальные уравнения Фурье, Пуассона и Лапласа могут быть двумерными, когда температура зависит от двух любых координат, и одномерными, когда температура зависит только от одной координаты пространства.

В теплофизике и теплотехнических приложениях наиболее часто встречаются следующие случаи:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right); \qquad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a\,\frac{\partial^2 T}{\partial x^2};$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{W}{\lambda} = 0; \qquad \frac{d^2 T}{dx^2} = 0.$$

Дифференциальные уравнения теплопроводности в декартовой системе координат удобно использовать в тех случаях, когда тело имеет форму параллелепипеда, куба, призмы прямоугольного или квадратного сечения, неограниченной пластины (плоской стенки), толщина которой весьма мала по сравнению с другими размерами.

Для тел цилиндрической формы эти уравнения более удобно использовать в цилиндрической системе координат $x = r\cos\psi$, $y = r\sin\psi$, которые характеризуются осью z, радиусом r и углом поворота ψ. Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\,\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\,\frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{W}{(c\rho)}.$$

В теплофизике и теплотехнике часто встречаются тела, которые имеет форму (или близко к форме) цилиндра конечных размеров, диска конечных размеров, бесконечного цилиндра (тело, длина которого весьма велика по сравнению с диаметром), и они описываются дифференциальными уравнениями Фурье, Пуассона и Лапласа:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\,\frac{\partial T}{\partial r}\right); \qquad \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r}\,\frac{dT}{dr} + \frac{W}{\lambda} = 0; \qquad \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r}\,\frac{dT}{dr} = 0.$$

Для тел шаровой формы дифференциальное уравнение теплопроводности более удобно использовать в сферической системе координат:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right).$$

Если тело жидкое, то элементарный объем движется в пространстве большого объема, принимая температуру той точки, в которой оказывается. Для неподвижного элементарного объема температура изменялась бы по времени. Следовательно, причинами изменения температуры элементарного объема являются его перемещение между точками с разной температурой и его нахождение в большом объеме, температура которого меняется во времени. Дифференциальное уравнение для движущегося элемента жидкости носит название Фурье–Кирхгофа и устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке движущейся среды:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial T}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial T}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial z} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{W}{(c\rho)}.$$

2.5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Конвекция – перемещение макроскопических частей среды (газа, жидкости), приводящее к переносу массы и теплоты. В реальных условиях конвекция всегда сопровождается теплопроводностью или молекулярным переносом теплоты. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *конвективным теплообменом*. Конвективный теплообмен между жидкостью и твердым телом часто называют *теплоотдачей*.

На процесс теплоотдачи конвекцией влияет целый ряд факторов.

1. Характер движения жидкости около твердой стенки. По природе возникновения различают два вида движения – свободное и вынужденное. Свободным называется движение, происходящее вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости в поле тяжести. При соприкосновении с нагретым телом жидкость (воздух) нагревается, становится легче и поднимается вверх. При соприкосновении с холодным телом жидкость охлаждается, становится тяжелее и опускается вниз.

Свободное движение называется также естественной конвекцией и может происходить в ограниченном (канале, щелях) или неограниченном пространстве. Возникновение и интенсивность свободного движения определяются тепловыми условиями процесса и зависят от расположения поверхности (вертикальное или горизонтальное), направления теплоотдающей поверхности (вверх или вниз), рода жидкости, разности температур, напряженности гравитационного поля и объема пространства, в котором протекает процесс.

Вынужденным называется движение, возникающее под действием посторонних возбудителей, например насоса, вентилятора и пр. В общем случае наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное движение жидкости. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Вынужденное движение жидкости может быть ламинарным или турбулентным. При ламинарном режиме (от латинского слова *lamina* – полоса) течение имеет спокойный, струйчатый характер, а при турбулентном (от латинского слова *turbulus* – вихрь) – движение неупорядоченное, вихревое. Для процессов теплоотдачи режим движения жидкости имеет большое значение.

Изменение режима движения жидкости происходит при некоторой «критической» скорости, которая в каждом конкретном случае различна. Однако при любом виде движения в тонком слое у поверхности из-за наличия вязкого трения течение жидкости затормаживается, и скорость падает до нуля. Этот слой принято называть вязким подслоем. Интенсивность теп-

лоотдачи для газов и жидкостей в основном определяется термическим сопротивлением этого подслоя. При ламинарном режиме перенос теплоты в направлении нормали к стенке в основном осуществляется путем теплопроводности пограничного слоя. При турбулентном режиме перенос теплоты сохраняется лишь в вязком малом подслое, а внутри турбулентного потока перенос осуществляется путем интенсивного перемешивания частиц жидкости.

Потеря устойчивости ламинарного течения сопровождается образованием завихрений, которые за счет диффузии заполняют весь поток, вызывая сильное перемешивание жидкости, называемое турбулентным смешением. При турбулентном движении весь поток насыщен беспорядочно движущимися вихрями, которые непрерывно возникают и исчезают. В последующем вследствие вязкости жидкости вихри постепенно затухают и исчезают. Чем больше вихрей, тем интенсивнее перемешивание жидкости, тем больше турбулентность потока и тем выше теплоотдача.

Различают естественную и искусственную турбулентность. Первая образуется естественно в процессе нагрева жидкости и ее движения вдоль стенки, когда вначале имеет место ламинарное, спокойное движение, затем неустойчивое, неупорядоченное, после чего вихревое и турбулентное, с отрывом вихрей от стенки. Вторая вызывается искусственным способом путем установки или наличия в потоке каких-либо закручивающих лопаток, направляющих аппаратов, решеток и других устройств.

Английский физик Осбори Рейнольдс (1842 – 1912 гг.) в результате специальных исследований в 1883 г. установил, что в общем случае режим течения жидкости определяется не только одной скоростью ω, а особым безразмерным комплексом (числом) Рейнольдса $\mathrm{Re} = \omega l/\nu$, включающим и коэффициент кинематической вязкости жидкости ν, и характерный (определяющий) размер l канала или обтекаемого тела.

Переход ламинарного режима в турбулентный происходит при определенном, критическом значении критерия $\mathrm{Re}_{кр}$ и зависит от условий обтекания пластины, движения жидкости внутри труб, коридорного или шахматного расположения труб в пучке и других условий.

Очевидно, что теплоотдача в турбулентном потоке будет больше, чем в ламинарном, и еще больше, чем при свободном движении жидкости. Теплоотдача выше, когда жидкость движется.

2. Физические свойства или род жидкости. В качестве теплоносителей в настоящее время применяются самые разнообразные вещества – воздух, газы, вода, масла, бензол, нефть, бензин, спирты, расплавленные металлы и различные специальные смеси. В зависимости от рода и физических свойств этих веществ теплоотдача протекает различно и своеобразно. На теплоотдачу влияют плотность, теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, кинематическая вязкость жидкости. Кроме того, физические свойства каждого теплоносителя зависят от температуры, а некоторые из них и от давления.

3. Условия теплового режима. Теплообмен может проходить в обычных или специфических условиях, в пограничном или акустическом слое, при изменении агрегатного состояния (кипении или конденсации), в определенных условиях тепломассообмена (при распылении воды в форсунках контактных теплообменников или кондиционеров).

4. Температурный напор ΔT – разность температур между твердой стенкой T_W и жидкостью T_f. Чем выше температура (порядок) температурного напора, тем выше теплоотдача между жидкостью и стенкой. Например, при первом условии $\Delta T_1 = T_W - T_f = 1000 - 900 = 100$ К, а при втором условии $\Delta T_2 = T_W - T_f = 400 - 300 = 100$ К и получается, что температурные напоры равны $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 100$ К.

Однако теплоотдача в первом случае будет выше, чем во втором. Чем больше температура температурного напора, тем больше преобладает турбулентный режим движения жидкости.

5. Направление теплового потока Q: от твердой стенки к жидкости или обратно – от жидкости к стенке. При одинаковых прочих условиях теплоотдача от горячей стенки с температурой T_W к холодной жидкости T_f всегда выше, чем от горячей жидкости к холодной стенке. Например, при

первом условии $\Delta T_1 = T_W - T_f = 400 - 300 = 100$ К, а при втором $\Delta T_2 = T_f - T_W = 400 - 300 = 100$ К.

Получается, что температурные напоры равны $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 100$ К, однако теплоотдача в первом случае будет выше, чем во втором. Влияние температурного напора ΔT и его направления объясняется тем, что в первом случае на поверхности стенки появляется слой, в котором частицы жидкости передвигаются более интенсивно и способствуют улучшению теплообмена, а во втором – не способствуют.

6. Геометрические размеры тела, например шара с малым и большим диаметрами. При одинаковых прочих условиях: температурой стенки шаров T_W и холодной жидкости T_f теплоотдача малого шара больше, чем у большого. В процессе теплоотдачи образуется пограничный слой, толщина которого у малого шара меньше, чем большого.

7. Направление теплоотдающей поверхности. При одинаковой температуре стенки горизонтальной пластины T_W и холодной жидкости T_f теплоотдача поверхности пластины, обращенной вверх, выше, чем плоскости, обращенной вниз. В общем случае коэффициент теплоотдачи может изменяться вдоль поверхности теплообмена, и поэтому различают средний по поверхности коэффициент теплоотдачи и локальный или местный коэффициент теплоотдачи, соответствующий единичному элементу поверхности.

Главная прикладная цель изучения теплоотдачи и ее влияния на энергосбережение заключается в определении количества теплоты, которое передается от твердой поверхности к жидкости или обратно. Картину теплоотдачи можно представить следующим образом. Каждая частица жидкости имеет свою скорость, которая в направлении к стенке убывает, а для частиц, прилипших к стенке, считается равной нулю. Естественно, что от подвижной жидкости к твердой поверхности теплота проходит через неподвижный слой прилипания. Поперек подвижного потока, в направлении к стенке, преобладает молярный перенос теплоты, осуществляемый в основном конвекцией, а у самой стенки превалирующим становится молекулярный перенос теплоты за счет явления теплопроводности, что позволяет определять тепловой поток через слой жидкости у стенки по закону теплопроводности Фурье.

Использование закона теплопроводности для расчета процесса теплоотдачи представляется весьма удобным. Однако требуются предварительные знания вида функций температурного поля в жидкости, которые описываются общим дифференциальным уравнением Фурье–Кирхгофа и уравнениями движения Навье–Стокса [13].

Уравнения Фурье–Кирхгофа, Навье–Стокса и неразрывности потока описывают явление или связь между физическими параметрами в самом общем виде. Для его конкретизации необходимо добавить еще ряд уравнений, называемых условиями однозначности задачи.

Таким образом, процесс конвективного теплообмена описывается весьма сложной системой дифференциальных уравнений, аналитическое решение которой пока не представляется возможным. Поэтому в настоящее время расчеты процесса теплоотдачи производятся по закону английского математика и физика Исаака Ньютона (1643 – 1727 гг.):

$$Q = \alpha F (T_W - T_f), \text{ Вт},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 · К); F – площадь теплообмена, м^2; T_W, T_f – температуры поверхности стенки и жидкости, К.

Коэффициент теплоотдачи α численно равен количеству теплоты (Дж), передаваемому от жидкости к твердой поверхности (или обратно) в единицу времени (с), через единицу поверхности (м^2) при перепаде температур между стенкой и жидкостью в один градус, К.

Вся сложность конвективного теплообмена и трудности расчета переносятся и концентрируются на коэффициенте теплоотдачи. Табулирование коэффициента теплоотдачи оказывается невозможным и его численное значение, в большинстве случаев, определяется опытным путем. Техническое выполнение опыта по определению коэффициента теплоотдачи большой сложности не представляет.

Определение коэффициента теплоотдачи α требует учета большого множества условий теплообмена. Возникает вопрос: как уменьшить число опытов? Нельзя ли результаты одного опыта переносить на другие явления, хотя бы родственные? Ответ на эти вопросы дает теория подобия, по которой результаты одного опыта можно перенести на другие явления, если они подобны.

Теплообмен в специфических условиях включает в себя теплоотдачу в стационарных и нестационарных условиях, в акустическом поле, в неньютоновских жидкостях, при высоких скоростях движения газов, контактный теплообмен в камерах орошения, при изменении агрегатного состояния (при кипении и конденсации пара). Вопросы теплообмена в специфических условиях приведены в [13].

2.6. ТЕОРЕМЫ И КРИТЕРИИ ТЕПЛОВОГО ПОДОБИЯ

Теория подобия – это теория моделирования или учение о подобных явлениях. Сущность теории подобия состоит в создании модели «заместителя» того или иного явления. Существует геометрическое, механическое, тепловое подобие. В основе теории подобия лежат несколько теорем.

Первая теорема подобия (теорема Ньютона). В подобных явлениях критерии подобия одинаковы (равны).

Особенность *теплового подобия процессов теплоотдачи* состоит в том, что числа Нуссельта, составленные для образца и модели (помечено $*$), численно равны: $\alpha\ell/\lambda = \alpha_*\ell_*/\lambda_* = \mathrm{Nu}$, где α и α_* – соответственно коэффициенты теплоотдачи для образца и модели; λ и λ_* – коэффициенты теплопроводности жидкостей; ℓ и ℓ_* – сходственные геометрические отрезки.

Практический выход теплового подобия: зная число Нуссельта Nu из опыта на модели и не производя непосредственных измерений α в системе оригинала, можно определить коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\ell}\mathrm{Nu}\,.$$

Вторая теорема подобия (теорема Бэкингема). Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих физическое явление, может быть представлено в виде зависимости между критериями подобия данного явления. Зависимости между физическими параметрами, характеризующими какое-либо явление, могут быть представлены методами масштабных преобразований, анализа размерностей или др.

Третья теорема подобия (теорема Кирпичева и Гухмана). Необходимым и достаточным условием подобия физических явлений является подобие условий однозначности (заданных условий) при равенстве критериев, составленных из условий однозначности. Более конкретно смысл третьей теоремы подобия формулируется так.

1. Подобные явления происходят в геометрически подобных системах и описываются подобными уравнениями.
2. Для теплового подобия необходимо наличие физического подобия движения жидкостей.
3. При указанных условиях подобны те явления, для которых подобны условия однозначности, а критерии, составленные из условий однозначности, численно равны.

Критерии теплового подобия

Для того чтобы системы были подобны в тепловом отношении, необходимо соблюсти геометрическое и физическое подобие движения жидкостей. После предварительного выполнения этих условий должно быть осуществлено подобие температурных полей в модели и оригинале. Последнее достигается благодаря реализации целого ряда мероприятий, учитывающих равенство критериев подобия, характерных для данного явления. Применяя известную методику к системе дифференциальных уравнений и соответствующие условия однозначности, описывающие явление теплообмена между жидкостью и твердой поверхностью, можно получить следующие зависимости:

$\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Gr};\mathrm{Pr})$, когда движение жидкости свободное, в ограниченном или неограниченном пространстве;

$\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Re};\mathrm{Gr};\mathrm{Pr})$, когда движение жидкости вынужденное ламинарное;

$\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Re};\mathrm{Pr})$, когда движение жидкости вынужденное турбулентное.

Таким образом, физический процесс становится автомодельным относительно какого-либо аргумента, если распределение функции, характеризующее явление, начинает оставаться подобным самому себе при дальнейшем изменении этого аргумента.

Основные безразмерные комплексы теплового подобия

Число Нуссельта $\mathrm{Nu} = \dfrac{\alpha \ell}{\lambda_{ж}}$ – характеризует интенсивность теплоотдачи между твердой стенкой и жидкостью и определяет отношение термического сопротивления теплопроводности слоя жидкости толщиной ℓ к термическому сопротивлению теплоотдачи; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 · К); ℓ – определяющий геометрический размер, м; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м · К).

Число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \dfrac{\omega \ell}{\nu_{ж}}$ – характеризует характер движения жидкости около твердой стенки и определяет соотношение сил инерции и сил вязкости (внутреннего трения) в потоке жидкости; ω – скорость движения жидкости, м/с; ℓ – определяющий геометрический размер, м; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с.

Число Грасгофа $\mathrm{Gr} = \dfrac{g\beta(T_{с} - T_{ж})\ell^3}{\nu_{ж}^2}$ – характеризует отношение подъемных сил к силам вязкости жидкости; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\beta = 1/T_{ж}$ – коэффициент объемного расширения, К$^{-1}$; $T_{с}$, $T_{ж}$ – температуры стенки и жидкости, К; ℓ – определяющий геометрический размер, м; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с.

Число Прандтля $\mathrm{Pr} = \nu_{ж}/a_{ж}$ – характеризует безразмерное теплофизическое свойство жидкости; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с; $a_{ж}$ – коэффициент температуропроводности жидкости, м^2/с.

Зависимости между критериями подобия Nu, Re, Gr, Pr чаще всего представляются как степенные функции:

$$\mathrm{Nu}_w = C\,\mathrm{Re}_f^n\,\mathrm{Gr}_m^p\,\mathrm{Pr}_w^k,$$

где c, n, p, k, m, f, w – постоянные числа, не имеющие размерности, определяемые, как правило, из опытов с моделями.

При расчетах процесса теплообмена критерий Нуссельта необходимо брать сходственным тому, который был принят автором, рекомендовавшим формулу в критериальном виде. Необходимо также учитывать рекомендуемые пределы изменения аргументов, подтверждаемые опытом, ибо такого рода зависимости теоретически не обосновываются.

После вычисления критерия Нуссельта для любого или данного вида теплообмена коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda_{ж}}{\ell}\,\mathrm{Nu}\,.$$

Правила пользования критериальными уравнениями

1. Необходимо выяснить, для какого характера движения жидкости определяется коэффициент теплоотдачи α (движение жидкости свободное

в ограниченном или неограниченном пространстве, вынужденное ламинарное или турбулентное). Характер движения жидкости определяется по критерию Re = (ω*d*)/ν.

Поэтому в критериальном уравнении $\mathrm{Nu}_w = C\,\mathrm{Re}_f^n\,\mathrm{Gr}_m^p\,\mathrm{Pr}_w^k$ для турбулентного режима движения $p = 0$, а для свободного – $n = 0$.

Переход ламинарного режима в турбулентный происходит при определенном критическом значении критерия $\mathrm{Re}_{кр}$. Например, при движении жидкости в трубах $\mathrm{Re}_{кр} = 2300$, при $\mathrm{Re} < 2300$ – поток движении жидкости ламинарный, а при $\mathrm{Re} > 10^4$ – турбулентный. Область значений $2300 < \mathrm{Re} < 10^4$ называется переходной, при таких значениях Re поток может быть как турбулентным, так и ламинарным.

В изотермических условиях обтекания пластины переход ламинарного режима в турбулентный происходит при $\mathrm{Re}_{кр} = 5 \cdot 10^5$, а в неизотермических – при $\mathrm{Re}_{кр} = 4 \cdot 10^4$. При поперечном обтекании труб $\mathrm{Re}_{кр}$ зависит от расположения труб в пучке (коридорное, шахматное).

2. Следует правильно выбрать *определяющий размер* ℓ. В качестве определяющего размера в круглых трубах, а также при поперечном обтекании трубы и пучка труб обычно принимается диаметр цилиндрической трубы. При поперечном обтекании плиты определяющим размером служит ее длина по направлению движения жидкости. При свободном движении для вертикальных поверхностей за определяющий размер берется высота, а для горизонтальных – наименьшая ширина плиты. Для каналов неправильного и сложного сечения надо брать *эквивалентный диаметр* $d_{экв}$, равный учетверенной площади поперечного сечения канала, деленной на полный (смоченный) периметр сечения, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене. Для круглых труб $d_{экв} = d_н$ или $d_{экв} = d_{вн}$, в зависимости от того, для которого определяется α.

3. Виду того, что в процессе теплообмена температура жидкости меняется, нужно обратить внимание на маленькие символы внизу критериев подобия, которые выбираются в зависимости от *определяющей температуры*. Индекс *f* означает, что теплофизические характеристики, входящие в структуру (отмеченного данным индексом) критерия, выбирались из справочника по средней температуре жидкости. Индекс *w* соответствует выбору теплофизических характеристик жидкости по температуре твердой поверхности T_w. Индекс *m* означает, что в качестве определяющей температуры принята средняя температура пограничного слоя $T_m = 0{,}5\,(T_f + T_w)$.

Средний коэффициент теплоотдачи определяется для конкретного режима движения жидкости и состояния поверхности теплообмена [13]: свободное движение жидкости в неограниченном или ограниченном пространстве; ламинарное или турбулентное движение жидкости в трубах; теплоотдача при поперечном обтекании одиночных труб или пучка труб.

2.7. РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПО КРИТЕРИЯМ ПОДОБИЯ

Средний коэффициент теплоотдачи определяется для конкретного режима движения жидкости и состояния поверхности теплообмена:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\ell}\,\mathrm{Nu}\,,$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости; ℓ – определяющий размер; Nu – число Нуссельта.

1. Свободное движение жидкости в неограниченном пространстве:

- для горизонтально расположенных труб (цилиндров, проволок) с наружным диаметром $\ell = d$, при $10^3 < (\mathrm{Gr}_f \mathrm{Pr}_f) < 10^8$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}5\,(\mathrm{Gr}_f\,\mathrm{Pr}_f)^{0{,}25}\,(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25}\,.$$

- для вертикальных поверхностей (труб, пластин):

а) при $10^3 < (\mathrm{Gr}_f \mathrm{Pr}_f) < 10^9$ (ламинарный режим)

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}76(\mathrm{Gr}_f\,\mathrm{Pr}_f)^{0{,}25}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

б) при $(\mathrm{Gr}_f\mathrm{Pr}_f) > 10^9$ (турбулентный режим)

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}15(\mathrm{Gr}_f\,\mathrm{Pr}_f)^{0{,}33}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25}.$$

Причем для горизонтальных плит коэффициент теплоотдачи α увеличивается на 30 %, если теплоотдающая поверхность обращена вверх, и уменьшается на 30 %, если поверхность обращена вниз. Для газов $(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w) = 1$ и поэтому все приведенные выше расчеты упрощаются.

2. Свободное движение жидкости в ограниченном пространстве.

Условия движения жидкости в ограниченном пространстве зависят от формы, геометрических размеров пространства, рода жидкости и интенсивности теплообмена. Характер движения жидкости при естественной конвекции в прослойках показан на рис. 2.1. В прослойках циркуляция жидкости определяется расположением нагретых и холодных поверхностей и расстояниями между ними. В горизонтальных прослойках (схемы *а* и *б*) характер движения жидкости определяется расположением нагретой поверхности: если она сверху – циркуляция отсутствует, а если снизу – чередование восходящих и нисходящих потоков.

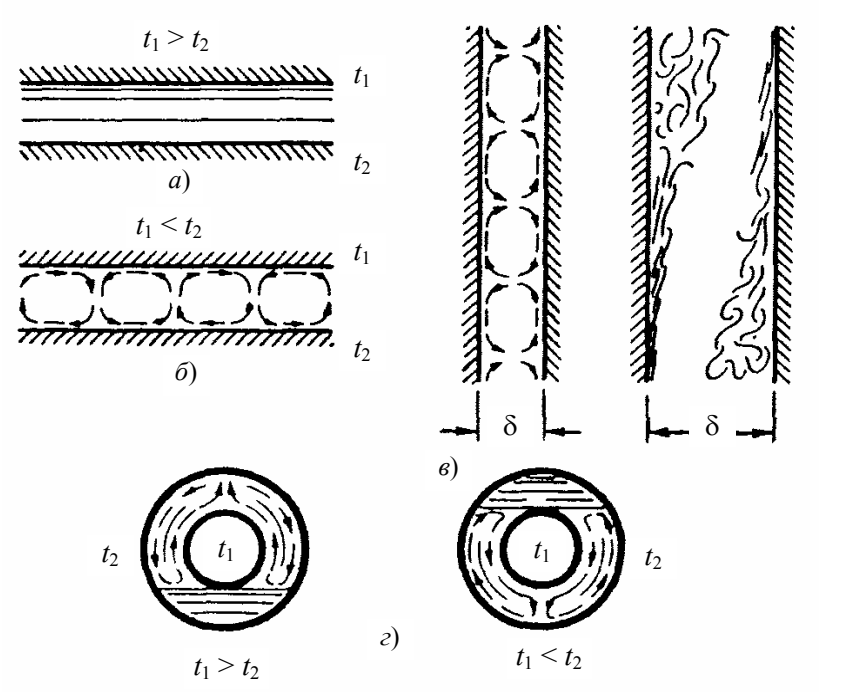


Рис. 2.1. Характер движения жидкости в прослойках при естественной конвекции:

а – горизонтальная прослойка $t_1 > t_2$;
б – горизонтальная прослойка $t_1 < t_2$;
в – вертикальная прослойка;
г – цилиндрическая прослойка

Циркуляция жидкости в вертикальных прослойках зависит от их толщины δ (схема *в*). Когда δ велико, то движение жидкости имеет характер, как вдоль вертикальной поверхности в неограниченном пространстве. Если δ мало, то вследствие взаимных помех восходящих и нисходящих потоков возникают циркуляционные контуры.

В шаровых и горизонтальных цилиндрических прослойках циркуляция жидкости зависит от соотношения диаметров, расположения нагретой поверхности и протекает по схеме *г*.

Процесс сложного конвективного теплообмена в прослойках принято рассматривать как элементарное явление теплопроводности, для чего введено понятие *эквивалентного коэффициента теплопроводности* $\lambda_{экв} = Q/(F\Delta T\delta)$ и *коэффициента конвекции* $\varepsilon_к = \lambda_{экв}/\lambda_ж$.

Плотность теплового потока от горячей поверхности (T_{w1}) к холодной (T_{w2}) через жидкостную прослойку определяется из выражения:

$$q = \frac{\lambda_{экв}}{\delta}(T_{w1} - T_{w2}); \quad \lambda_{экв} = \lambda_ж \varepsilon_к .$$

Для всей области значений $(\mathrm{Gr}_f \mathrm{Pr}_f)$ и приближенной оценки $\varepsilon_к$ плоских (вертикальных и горизонтальных), цилиндрических и шаровых прослоек

$$\varepsilon_к = 0{,}18(\mathrm{Gr}_f \mathrm{Pr}_f)^{0{,}25} .$$

В качестве определяющей принята средняя температура горячей и холодной стенок прослойки, а за определяющий геометрический размер – толщина прослойки δ.

При $(\mathrm{Gr}_f \mathrm{Pr}_f) < 1000$, $\varepsilon_к = 1$, а передача теплоты в прослойках от горячей стенки к холодной осуществляется теплопроводностью прослойки или кондукцией. Коэффициент $\lambda_{экв} = \lambda_ж = \lambda_{кон}$ в прослойке иногда называют коэффициентом кондуктивной теплопроводности.

3. Ламинарное движение жидкости в трубах.

При ламинарном движении любой жидкости, когда $\mathrm{Re}_f < 2300$, для труб любой формы поперечного сечения – круглого, квадратного, прямоугольного, треугольного, кольцевого ($d_2/d_1 = 1…5{,}6$), щелевого ($a/b = 1…40$), а также для продольно омываемых пучков труб, когда отношение длины к диаметру $L/d \geq 50$:

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}17\,\mathrm{Re}_f^{0{,}33}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}43}\,\mathrm{Gr}_f^{0{,}1}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25} .$$

При $L/d < 50$ необходимо учитывать влияние начального участка трубы – зоны стабилизации движения, и тогда $\alpha_\varepsilon = \alpha\varepsilon_L$, где ε_L – поправочный коэффициент, равный 1,9; 1,7; 1,44; 1,28; 1,18; 1,13; 1,05, 1,02 соответственно при L/d – 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40.

В изогнутых трубах с радиусом змеевика R, вследствие центробежного эффекта, по всей длине трубы диаметром d: $\alpha_R = \alpha\varepsilon_R$, где ε_R – поправочный коэффициент, $\varepsilon_R = 1 + 1{,}77\,(d/R)$.

Физические свойства выбираются по средней температуре жидкости и стенки соответственно. В качестве определяющего размера при ламинарном и турбулентном режиме движения жидкости в круглых трубах принимается диаметр цилиндрической трубы. Для каналов сложного сечения берется *эквивалентный диаметр*, равный учетверенной площади поперечного сечения канала, деленной на полный (смоченный) периметр сечения, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене. Для круглых труб эквивалентный диаметр равен геометрическому внутреннему или наружному, для которого определяется коэффициент теплоотдачи.

4. Турбулентное движение жидкости внутри труб.

При турбулентном режиме движения в трубах любой формы поперечного сечения, когда $\mathrm{Re}_f \geq 2300$, для всех упругих и капельных жидкостей

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}021\,\mathrm{Re}_f^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}43}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25}\,\varepsilon_L,$$

где ε_L – поправочный коэффициент, учитывающий влияние начального термического участка трубы.

При отношении длины трубы к диаметру $L/d \geq 50$, $\varepsilon_L = 1$.

При отношении $L/d < 50$, ε_L зависит от Re_f и отношения L/d.

Физические свойства жидкости и стенки, изогнутость труб, определяющий размер и эквивалентный диаметр каналов сложного сечения принимаются соответственно, как и при ламинарном режиме движения жидкости в трубах.

Для воздуха и двухатомных газов:

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}018\,\mathrm{Re}_f^{0{,}8}.$$

5. Теплоотдача при поперечном обтекании одиночных труб.

В лобовой точке труб (стержней, проволок) набегающий поток жидкости имеет наименьшую толщину пограничного слоя и наблюдается максимальное значение коэффициента теплоотдачи α. Затем поток разделяется и обтекает периметр трубы, а пограничный слой нарастает в размерах. Если по периметру цилиндра радиальный угол φ отсчитывается от лобовой части набегающего потока, то при достижении точки $\varphi \approx 90°$ скорость достигает наибольших значений, пограничный слой становится неустойчивым, интенсивность теплообмена резко падает и происходит отрыв потока с образованием вихревой зоны, охватывающей всю кормовую часть трубы. Положение точки отрыва пограничного слоя (миделево сечение) зависит от значения Re и степени турбулентности потока.

В кормовой области движение жидкости имеет неупорядоченный характер, интенсивность перемешивания жидкости с ростом Re увеличивается, а коэффициент теплоотдачи α снова возрастает за счет улучшения отвода теплоты. При малых значениях Re интенсивность теплообмена в вихревой зоне ниже, чем в лобовой точке, но по мере увеличения Re, за счет интенсификации турбулентности, α в кормовой зоне увеличивается.

При поперечном обтекании одиночных, круглых труб, цилиндров и когда угол атаки ψ, составленный направлением движения потока жидкости и осью трубы, равен 90°, средний по периметру коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\psi = 90°}$ определяется из соотношений:

- при $\mathrm{Re}_f < 10^3$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}56\,\mathrm{Re}_f^{0{,}5}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}36}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

для воздуха

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}49\,\mathrm{Re}_f^{0{,}5};$$

- при $\mathrm{Re}_f > 10^3$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}28\,\mathrm{Re}_f^{0{,}6}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}36}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

для воздуха

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}245\,\mathrm{Re}_f^{0{,}6}.$$

Для тел прямоугольного, квадратного, овального и любого другого сечения процесс теплоотдачи более сложен и зависит от формы тела, его ориентировки в потоке, условий обтекания и других факторов.

При угле атаки потока жидкости $\psi < 90°$ необходимо учитывать поправочный коэффициент ξ_ψ, а расчетная формула для коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$\alpha_\psi = \alpha_{\psi = 90°}\,\xi_\psi.$$

6. Теплоотдача при поперечном обтекании пучка труб.

Если в потоке жидкости имеется не одна, а пакет труб, то чаще всего в технических задачах рассматриваются две схемы компоновки пучков – коридорный и шахматный. Характеристиками пучка являются диаметр труб,

а также относительные расстояния между их осями по ширине и глубине пучка.

Теплоотдача первого ряда определяется характером движения жидкости или начальной турбулентностью потока и близка к условиям обтекания одиночной трубки. Со второго ряда теплоотдача постепенно возрастает за счет турбулентности потока при вхождении его в пучок. Начиная с третьего ряда, турбулентность потока принимает стабильный характер, присущий данной компоновке пучка. При одних и тех же условиях или по абсолютному значению теплоотдача в шахматных пучках выше, чем в коридорных, за счет лучшего перемешивания жидкости, омывающей трубу. Для определения среднего значения коэффициента теплоотдачи α_ψ для трубок третьего и всех последующих рядов в пучках, когда поток жидкости перпендикулярен оси пучка (угол атаки $\psi = 90°$) рекомендуются соотношения:

1) коридорные пучки труб

- при $\mathrm{Re}_f < 10^3$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}56\,\mathrm{Re}_f^{0{,}5}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}36}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

для воздуха

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}49\,\mathrm{Re}_f^{0{,}5};$$

- при $\mathrm{Re}_f > 10^3$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}22\,\mathrm{Re}_f^{0{,}65}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}36}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

для воздуха

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}194\,\mathrm{Re}_f^{0{,}65};$$

2) шахматные пучки труб

- при $\mathrm{Re}_f < 10^3$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}56\,\mathrm{Re}_f^{0{,}5}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}36}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

для воздуха

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}49\,\mathrm{Re}_f^{0{,}5};$$

- при $\mathrm{Re}_f > 10^3$

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}4\,\mathrm{Re}_f^{0{,}6}\,\mathrm{Pr}_f^{0{,}36}(\mathrm{Pr}_f/\mathrm{Pr}_w)^{0{,}25};$$

для воздуха

$$\mathrm{Nu}_f = 0{,}35\,\mathrm{Re}_f^{0{,}6}.$$

Значение коэффициента теплоотдачи для трубок первого ряда $\alpha_{1\mathrm{p}}$ пучка определяется путем умножения α_ψ для трубок третьего ряда на поправочный коэффициент $\xi_\alpha = 0{,}6$. Для трубок второго ряда в коридорных пучках $\xi_\alpha = 0{,}9$, а в шахматных пучках $\xi_\alpha = 0{,}7$.

Для многорядных пучков вводится поправочный коэффициент на загрязнение труб, неравномерность скоростей газов на разных участках поверхностей нагрева, переменный угол атаки.

Значение среднего коэффициента теплоотдачи всего пучка в целом

$$\alpha_{\text{пучка}} = \frac{\alpha_{1\mathrm{p}}F_1 + \alpha_{2\mathrm{p}}F_2 + \ldots + \alpha_{m\mathrm{p}}F_m}{F_1 + F_2 + \ldots + F_m},$$

где $\alpha_{1р}$, $\alpha_{2р}$, …, $\alpha_{mр}$ – коэффициенты теплоотдачи по рядам; F_1, F_2, …, F_m – площади поверхностей нагрева всех трубок в каждом ряду.

При угле атаки потока жидкости $\psi < 90°$ вводится поправочный коэффициент ξ_ψ, а расчетная формула для коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$\alpha_\psi = \alpha_{\psi = 90°}\, \xi_\psi.$$

Поправочный коэффициент ξ_ψ имеет значения: 1; 1; 0,98; 0,94; 0,88; 0,78; 0,67; 0,52; 0,42 при соответствующем угле атаки потока ψ: 90; 80; 70; 60; 50; 40; 30; 20; 10°.

Для топочных дымовых газов, при их движении по газоходам коридорного или шахматного пучка, чаще всего используют номограммы с учетом всех поправочных коэффициентов.

7. Теплообмен в нестационарных условиях.

Установлено, что коэффициенты теплообмена в нестационарных $\alpha_н$ и стационарных $\alpha_{ст}$ условиях отличаются. Коэффициент теплоотдачи в нестационарных процессах зависит от теплоемкости, плотности и толщины тела. Температуропроводность металлов на три порядка больше температуропроводности, например, такой среды, как вода, поэтому перестройка распределения температур вблизи границы раздела в этих средах будет проходить с различной скоростью. Нестационарное распределение температуры в капельной жидкости у поверхности тела в каждый момент времени будет иным, нежели стационарное распределение для тех же значений температуры стенки и жидкости вдали от поверхности. Увеличение толщины тела, его теплоемкости и плотности приводит к замедлению скорости изменения температуры на поверхности тела, что ведет к уменьшению расхождения $\alpha_н$ и $\alpha_{ст}$.

2.8. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА

Все тела непрерывно посылают в окружающее их пространство электромагнитные волны различной частоты (длины). Большинство твердых и жидких тел излучают энергию всех длин волн в интервале от нуля до бесконечности, т.е. имеют сплошной спектр излучения. Газы испускают энергию только в определенных интервалах длин волн и имеют селективный спектр излучения. Твердые тела излучают и поглощают энергию поверхностью – поверхностное излучение, а газы объемом – объемное излучение.

Под действием возбуждения колебаний в молекулах и атомах вещества (тела) возникают электромагнитные колебания. Длина волны $\lambda_л$, мкм (микрометр – 10^{-6} м), электромагнитного излучения находится в пределах: для рентгеновских лучей – 10^{-6}…$20 \cdot 10^{-3}$; ультрафиолетовых – 0,02…0,4; видимых (световых) – 0,4…0,8; тепловых (инфракрасных) – 0,8·…800; для радиоволн – 200 мкм…*X* км.

Излучение волн любой длины всегда превращается (трансформируется) в тепловую энергию. Но для световых и инфракрасных лучей с длиной волны от 0,4 до 800 мкм это превращение выражено наиболее сильно, и эти лучи называют *тепловыми*, а процесс их распространения – *тепловым излучением* или *радиацией*. Лучистый теплообмен – широко распространенный в теплоэнергетике вид передачи теплоты.

В отличие от всех других видов тепловое инфракрасное (температурное) излучение определяется тепловым состоянием тела – его температурой. Тепловое излучение свойственно всякому телу, если его абсолютная температура отлична от нуля. Интенсивность теплового излучения резко увеличивается с ростом температуры. Всюду, где в определенных условиях температура достигает порядка 600…700 °С и выше, превалирующим видом теплообмена (по сравнению с конвекцией) является радиация. Свое преимущество она сохраняет и для низких температур при соответствующем расположении поверхностей, обменивающихся лучистой теплотой. При лучистом теплообмене все тела излучают энергию друг на друга. В результате баланса теплоты лучистая энергия всегда переносится от тел с

более высокой температурой к телам с меньшей температурой. Наиболее интенсивна передача теплоты радиацией в условиях вакуума или разрежения. Носителями квантов энергии являются элементарные частицы излучения – фотоны, а излучаемая в единицу времени энергия соответствует очень узкому интервалу изменения длины волн от $\lambda_л$ до ($\lambda_л + d\lambda_л$).

Излучаемая в единицу времени энергия, которую можно характеризовать данным значением длины волн $\lambda_л$, называется *потоком монохроматического излучения* Q_λ. Поток излучения, соответствующий всему спектру, в пределах от нуля до бесконечности, называется *интегральным*, *или полным лучистым потоком* Q (Вт).

Интегральный или полный лучистый поток, излучаемый с единицы поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства, называется *плотностью потока интегрального излучения*, *или излучательной способностью* E (Вт/м^2).

Если излучательная способность E одинакова для всех элементов поверхности F, то $Q = EF$. В этом случае, излучательная способность тела E, численно равна количеству энергии (Дж), выделяемой с единицы поверхности (м^2), в единицу времени (с), Дж/(м^2 · с) = Вт/м^2.

Каждое тело не только излучает, но и поглощает лучистую энергию. Если тепловой луч на своем пути встречает какое-нибудь тело, то из всего общего количества падающей на тело лучистой энергии $E_о$ ($Q_о$), часть ее отражается в окружающее пространство $E_{от}$ ($Q_{от}$), некоторая доля энергии, проникающей в тело, поглощается $E_{пог}$ ($Q_{пог}$) и трансформируется в тепловую энергию, а остальная часть проходит сквозь тело и через окружающее пространство $E_{пр}$ ($Q_{пр}$), после чего попадает на другие тела.

Таким образом, падающий на тело лучистый поток может быть разделен на три части: отраженную, поглощенную и пропущенную. Следовательно: $E_о = E_{от} + E_{пог} + E_{пр}$. Для количественной оценки каждой части лучистой энергии вводят следующие понятия.

1. Отношение отраженной энергии к энергии, падающей на поверхность, называют *отражательной* способностью тела $R = E_{от}/E_о$.

2. Отношение поглощенной энергии к падающей энергии называют *поглощательной* способностью тела $A = E_{пог}/E_о$.

3. Отношение энергии, прошедшей сквозь тело, к падающей энергии называют *пропускательной* способностью тела $D = E_{пр}/E_о$.

В соответствии с законом сохранения энергии: $R + A + D = 1$.

Если $R = 1$, то $A = D = 0$. Это означает, что вся падающая лучистая энергия полностью отражается телом. Когда отражение правильное и определяется законами геометрической оптики, тела называются *зеркальными*. В случае диффузного отражения – *абсолютно белыми*.

Если $A = 1$, то $R = D = 0$. Это означает, что все падающее излучение поглощается телом и такие тела называются *абсолютно черными*.

Если $D = 1$, то $A + R = 0$. Это означает, что вся падающая энергия проходит сквозь тело и такие тела называют *прозрачными или диатермичными*. К ним можно отнести незапыленный сухой воздух, одноатомные и двухатомные газы (азот, кислород, водород).

В природе «абсолютных» тел не существует, хотя имеются близкие. Например, моделью абсолютно черного тела может служить отверстие в стенке полого тела (шара), в котором энергия попадающего в него луча полностью поглощается стенками. Нефтяная сажа поглощает до 96 % падающей энергии, а шероховатый лед или иней – до 98 %. Почти все тепловые лучи отражает тщательно отполированная медь.

В природе подавляющее большинство твердых тел и жидкостей непрозрачно. Тела, для которых пропускательная способность $D = 0$, а сумма поглощательной и отражательной способностей $A + R = 1$. Эти тела называют *серыми или атермичными*. Если серое тело хорошо поглощает лучистую энергию, то оно плохо отражает эту энергию, и наоборот.

Среда, сквозь которую проходит лучистая энергия, по-разному поглощает и, следовательно, пропускает излучение. Трехатомные газы (углекислый и сернистый газ, водяные пары) пропускают тепловые лучи только в узком диапазоне длин волн. Сухой воздух практически прозрачен для тепловых лучей, однако при наличии в нем влаги, пара (тумана) он становится

средой, заметно поглощающей. Поглощение и рассеяние излучения имеет место в запыленных или сажистых газах.

Наиболее интенсивно поглощают энергию твердые тела, слабее – жидкости. Для приближения твердых серых тел к черным их поверхность часто покрывают нефтяной сажей, лаком или краской. Однако поглощательная способность тел в инфракрасном диапазоне излучения определяется не столько цветом, сколько состоянием или качеством (шероховатостью) поверхности.

Поглощательная и пропускательная способности тел и сред зависят от спектра излучения. Например, кварц прозрачен для световых и ультрафиолетовых лучей, но непрозрачен для тепловых лучей. Каменная соль прозрачна для тепловых лучей и непрозрачна для ультрафиолетовых лучей. Оконное стекло прозрачно только для световых лучей, а для инфракрасных и ультрафиолетовых оно почти не прозрачно.

Белая по цвету поверхность хорошо отражает лишь световые лучи, что используется для различных тел и сооружений, где инсоляция нежелательна. Тепловые же лучи невидимого инфракрасного излучения воспринимают поверхность тел только по состоянию ее шероховатости и степени черноты, но не цвета, точно так же как и глаз не «видит» инфракрасные лучи, но воспринимает всю гамму световых лучей.

Следовательно, цвет поверхности тела (его окраска) существенно влияет на поглощение и излучение только видимых лучей в соответствующем интервале длин световых волн. Естественно, что со световыми лучами тоже поступает тепловая энергия, которая используется в различных гелиотехнологических и солнечных установках: теплицах, сушилках, опреснительных установках, солнечных прудах.

Основные законы теплового излучения приведены в [13, 35, 36] и устанавливают следующие положения.

1. *Закон смещения Вина*: с увеличением абсолютной температуры максимальная длина волны смещается к области более коротких волн.

2. *Закон теплового излучения Кирхгофа*: чем больше тело излучает, тем больше оно и поглощает, или излучательная способность тела прямо пропорциональна поглощательной при той же температуре.

3. Закон Стефана–Больцмана для реального тела*: излучательная способность реального тела* E *зависит от степени черноты тела и пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры* T.

4. Для большинства твердых (серых) тел вместо поглощательной способности оперируют понятием степени черноты реального тела. Под *степенью черноты реального тела* ε понимают отношение излучательной способности данного тела E к излучательной способности абсолютно черного тела E_0 при той же температуре: $\varepsilon = (E/E_0)_T$.

5. *Степень черноты полного излучения тел* ε характеризует суммарное лучеиспускание реального тела, определяется экспериментально и для большинства материалов ее значения табулированы и сведены в таблицах. Степень черноты реального тела ε – то же самое, что и поглощательная способность тела: $\varepsilon = A$. Необходимо учитывать, что степени черноты тел ε или их поглощательная способность A зависят от температуры: для металлов они возрастают с повышением температуры, а для неметаллов – понижаются. Степень черноты тел меняется от 0 (для абсолютно белых) до 1 (для абсолютно черных тел).

Наиболее существенно на ε и A в инфракрасном диапазоне излучения влияет шероховатость поверхности, поэтому различают степень черноты металла как вещества (шероховатое или окисленное) и металла после его обработки или полировки, когда степень черноты имеет порядок сотых долей единиц. Для шероховатых поверхностей (строительных материалов), а также при загрязнении или наличии на поверхности оксидной пленки значения ε увеличиваются в несколько раз. Например, медь окисленная имеет $\varepsilon = 0{,}6\ldots0{,}8$; медь слегка полированная – $\varepsilon = 0{,}12$; а медь тщательно полированная имеет $\varepsilon = 0{,}02$.

Значительно степень черноты ε зависит также от состояния поверхности тела. Покрытие гладкой поверхности металла одинарным тонким слоем прозрачного для света лака может привести к многократному увеличению

ε. Необходимо помнить, что видимая окраска поверхности тела в отраженных лучах света не дает никакого представления о степени черноты ε, характеризующей в основном невидимое инфракрасное излучение. Например, бумага, фарфор, асбест, кирпич имеют ε порядка 0,7…0,9, тогда как глазом они воспринимаются как белые тела. Аналогично лак черный матовый имеет ε = 0,96, а лак белый – 0,9; сажа – 0,952, гладкое стекло – 0,937; вода – 0,9, а снег (при отрицательных температурах) – 0,82; краска черная глянцевая – 0,9, а краска белая масляная и различных цветов – 0,92…0,96.

6. Суммарная теплопередача лучеиспусканием между телами:

$$Q_{12} = \varepsilon_{\text{п}} c_0 F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенная степень черноты системы тел; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5{,}67$ Вт/(м^2 · К^4); F – площадь теплопередающей поверхности, м^2.

Приведенная степень черноты $\varepsilon_{\text{п}}$ системы тел с плоскопараллельными поверхностями F_1 и F_2, имеющими соответственно степени черноты ε_1 и ε_2, определяется как:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Приведенная степень черноты $\varepsilon_{\text{п}}$ системы тел, из которых одно с поверхностью F_1 находится в полости другого F_2, имеющими соответственно степени черноты ε_1 и ε_2, определяется как:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

При значительном расхождении $F_1 \leftrightarrow F_2$, в такой системе создаются условия лучистого теплообмена, тождественные тем, которые имеют место в системе тел с плоскопараллельными поверхностями. При $F_2 >> F_1$ явление становится автомодельным относительно параметров поверхности и степени черноты второго тела. Расчетная формула приобретает более простой вид:

$$Q_{12} = \varepsilon_1 c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

Для интенсификации лучистого теплообмена необходимо увеличить температуру излучающего тела и усилить приведенную степень черноты системы. Наоборот, для уменьшения теплообмена необходимо снизить температуру излучающего тела и уменьшить приведенную степень черноты системы. В тех же случаях, когда температуру изменить нельзя, для снижения лучистого теплообмена применяют экраны.

7. Защита от излучения с помощью плоских экранов. В этом случае между горячим 1 и холодным 2 телом ставят тонкостенный экран из непрозрачного вещества. Постановка одного экрана уменьшает при прочих одинаковых условиях количество передаваемой лучистой теплоты в два раза. Постановка n экранов уменьшает количество передаваемой лучистой теплоты Q_{12} в $(n + 1)$ раз, т.е. $Q_{n\,\text{э}} = Q_{12} / (n + 1)$.

Еще больший эффект снижения лучистого теплообмена получается, если применяются экраны с малой степенью черноты. Так, если между двумя плоскими поверхностями со степенью черноты ε_n установлены n *экранов со степенью черноты $\varepsilon_э$, то*

$$Q_э = \frac{Q_{12}}{1 + n\dfrac{2-\varepsilon_э}{2-\varepsilon_п}\dfrac{\varepsilon_п}{\varepsilon_э}}.$$

Следовательно, установка лишь одного экрана со степенью черноты $\varepsilon_э = 0{,}2$ между поверхностями с $\varepsilon = 0{,}7$ дает снижение лучистого потока теплоты Q_{12} в 6 раз. Применение экранов позволяет использовать одновременно в качестве тепловой изоляции и воздушные прослойки.

8. Тепловое излучение в газах происходит во всем объеме, а количество поглощаемой газом энергии зависит от числа находящихся в данном объеме микрочастиц газа.

2.9. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

На теплообмен при изменении агрегатного состояния влияют физико-химические особенности среды и поверхности:

- состояние поверхности – чистая, загрязненная, шероховатая;
- капиллярность и поверхностное натяжение;
- адсорбция – поглощение газов, паров или жидкостей поверхностным слоем твердого тела (адсорбента);
- абсорбция – объемное поглощение газов или паров жидкостью (абсорбентом, с образованием раствора);
- десорбция – удаление из твердых тел и жидкостей веществ, поглощенных при адсорбции или абсорбции.

Конденсацией называется переход вещества из парообразного состояния в жидкое состояние. Конденсаторы, применяемые в турбинных установках, и паровые подогреватели воды, используемые в теплогенерирующих установках, обычно устраиваются в виде пакетов горизонтальных или вертикальных трубок, с внешней стороны омываемых паром, а с внутренней стороны – водой. Когда пар соприкасается с холодной поверхностью, то он конденсируется либо в виде капель, либо в виде пленки. Конденсация пара на поверхности происходит тогда, когда температура поверхности T_w ниже температуры насыщения T_s, отвечающей данному давлению пара.

На поверхности твердых тел различают пленочную и капельную конденсацию, которые при неподвижном паре зависят от угла смачивания β (краевого угла), составленного между поверхностью тела и касательной к капле. Если краевой угол $\beta < 90°$, то твердую поверхность называют *смачиваемой*, и чем β меньше, тем лучше капля растекается на поверхности. При $\beta > 90°$ твердая поверхность *не смачиваема* и капли сохраняют на ней свою каплеобразную форму. Совершенно чистые металлические поверхности почти полностью смачиваются водой, а загрязненные – неполно или вовсе не смачиваются.

Капельная конденсация имеет место при слабой интенсивности конденсации, когда конденсат не смачивает поверхность или металлическая поверхность загрязнена до стойко адсорбированной. Под действием механических сил отдельные капли скатываются по поверхности, образуя ручейки. Преобладающая часть твердой поверхности продолжает при этом непосредственно омываться паром. Искусственно капельную конденсацию можно получить, смазывая поверхность маслом или примешивая жирные кислоты к конденсирующему пару.

Пленочная конденсация имеет место при соприкосновении водяного пара с чистой металлической поверхностью. Капли, выпадающие на поверхности, растекаются и образуют сплошную пленку. Необходимо знать, что любая чистая поверхность металла постепенно покрывается загрязнениями и плохо смачивается, но с течением времени (в процессе старения поверхности) образуется оксидная пленка, на которой конденсация, рано или поздно, приобретает пленочный характер. Поэтому капельная конденсация особого интереса для инженеров не представляет, хотя при капельной конденсации теплообмен между паром и стенкой в 5 – 10 раз больше, чем при пленочной конденсации.

При конденсации пара на чистую поверхность всегда получается сплошная пленка, в результате чего создается дополнительное термическое сопротивление передачи теплоты от пара к стенке. На шероховатой по-

верхности толщина пленки еще выше при одинаковых прочих условиях. Окисленная поверхность также может снизить по этой причине коэффициент теплоотдачи на 30 % и более.

Если конденсация происходит на вертикальной поверхности или трубе, то течение пленки носит ламинарный характер, градиент температуры вдоль пленки конденсата отсутствует, а силы инерции, возникающие в ней, пренебрежимо малы.

Если пар энергично движется сверху вниз и скорость движения пара совпадает по направлению со скоростью течения пленки конденсата, то коэффициент теплоотдачи увеличивается, так как толщина пленки становится меньше. При противоположном направлении скоростей коэффициент теплоотдачи уменьшается, так как толщина пленки вследствие трения становится больше. Если скорость восходящего пара становится выше определенного предела, то конденсатная пленка разрушается и оказывается сорванной с поверхности. Срыв пленки способствует интенсификации и возрастанию теплообмена.

Особое внимание необходимо также уделять расположению поверхности. При прочих одинаковых условиях вопрос компоновки следует решать в пользу горизонтальной трубки. Для горизонтально расположенной трубы, по сравнению с вертикальной, средний коэффициент теплоотдачи выше. Однако это справедливо лишь для одиночных труб, а также верхнего ряда труб в пучке. С верхнего ряда конденсат стекает на нижние ряды, утолщая тем самым пленку конденсата каждого последующего ряда. Поэтому в больших конденсаторах на горизонтальных трубках целесообразно располагать специальные наклонные перегородки (поверхности) для отвода конденсата.

При вертикальном расположении трубок лучше всего пользоваться конденсатоотводными колпачками. Установка таких колпачков через каждые 10 см по высоте трубы прерывает естественное утолщение стекающей пленки конденсата, чем значительно увеличивает среднее значение коэффициента теплоотдачи по высоте трубки.

При конденсации перегретого пара теплоотдача несколько выше. Если же в паре содержится неконденсирующийся газ, воздух, то у стенки наблюдается его наибольшая концентрация, образуется слой термического сопротивления и газовая прослойка при конденсации пара заметно снижает коэффициент теплоотдачи.

2.10. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

Кипением называется процесс образования пара в жидкости, нагретой выше температуры насыщения. Физические условия процесса образования пара при нагреве жидкостей отличаются большой сложностью. Для процесса кипения необходимы три основных условия:

1) перегрев жидкости – нагрев жидкости до температуры насыщения (температуры кипения при соответствующем давлении) и более;

2) наличие центров образования пузырьков пара на поверхности стенки или внутри объема жидкости, каковыми могут служить взвешенные частицы, неровности поверхности стенок, углубления, впадины, трещины, присущие в той или иной мере шероховатой поверхности твердой стенки;

3) постоянный подвод теплоты.

Различают два основных режима кипения: пузырьковое и пленочное.

Пузырьковое кипение имеет наибольшее распространение в практических условиях (паровые котлы, стальные экономайзеры).

Зарождаясь в отдельных точках обогреваемой поверхности, где работа сил адгезии (отрыва жидкости от поверхности) наименьшая, пузырьки пара вначале увеличиваются в размере, затем отрываются от стенки и поднимаются через слой жидкости в паровое пространство. Их рост и движение вызывают интенсивное перемешивание жидкости.

Если кипение происходит в неподвижной жидкости (кипение в большом объеме), то отрыв пузырей от стенки вызывается действием архимедовой силы. При интенсивном вынужденном течении жидкости отрыв пузырей происходит под воздействием динамического потока. Чем выше скорость потока, тем меньшими оказываются отрывные диаметры пузырей.

Если же основная масса жидкости будет недогрета до температуры насыщения, то пузыри пара, выходя из перегретого пристенного слоя твердой поверхности, попадают в более «холодную» среду (жидкость) и там конденсируются. Такой процесс называется поверхностным кипением. При определенных условиях пузырьковый режим переходит в *пленочный режим кипения*, когда жидкость в основном не соприкасается с поверхностью нагрева, а отделена от стенки непрерывно восстанавливающейся паровой пленкой. Такое перерождение режима носит резкий характер и является крайне нежелательным в практическом отношении. Пленочный режим кипения образуется по двум причинам: плохая смачиваемость поверхности нагрева и большая тепловая нагрузка поверхности нагрева.

Паровая пленка, обладающая меньшим коэффициентом теплопроводности, создает наибольшее термическое сопротивление между обогреваемой поверхностью и кипящей жидкостью. Следствием этого является падение значений коэффициента теплоотдачи, а максимальная тепловая нагрузка, предшествующая резкому падению коэффициента теплоотдачи при переходе к пленочному кипению, называется *критической тепловой нагрузкой* $q_{кр}$. Для воды в условиях атмосферного давления и естественной конвекции отмечаются следующие параметры

$$\Delta T_{кр} = 25\ °C;\ \alpha_{кр} = 5{,}85 \cdot 10^4\ Вт/(м^2 \cdot К);\quad q_{кр} = 1{,}46 \cdot 10^6\ Вт/м^2.$$

С повышением давления значения критического температурного напора уменьшаются. Для области пузырькового кипения воды в диапазоне давлений 1…40 кг/см^2 (0,1…4 МПа) применимы зависимости

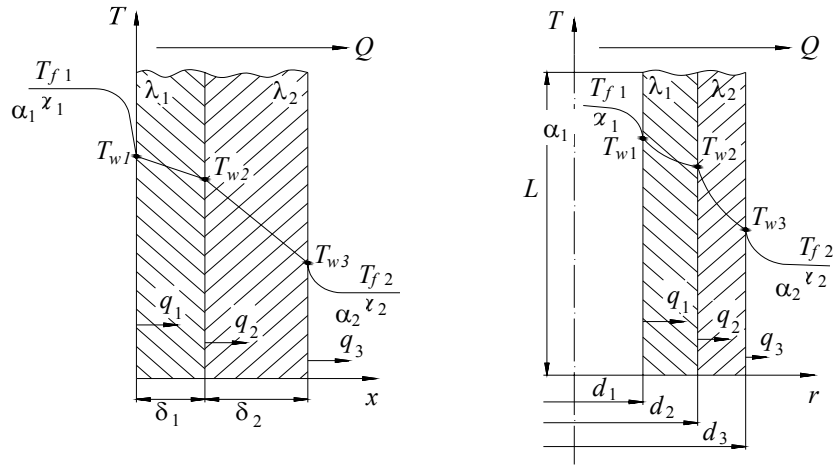
$$\alpha = 3{,}0\, q^{0,7} p^{0,15};\quad \alpha = 38{,}7\, \Delta T^{2,33} p^{0,5},$$

где q и p следует подставлять соответственно в Вт/м^2 и кг/см^2.

Знание критических параметров жидкости при кипении имеет большое практическое значение, ибо превышение критического температурного напора приводит к резкому снижению производительности кипятильных установок. Когда же заданным является тепловой поток и оказывается более критического значения, происходит резкое повышение температуры обогреваемой стенки до недопустимого предела. С увеличением давления критическое значение теплового потока вначале заметно возрастает, затем падает и при некотором критическом давлении становится равным нулю. Большие значения коэффициентов теплоотдачи α, Вт/(м$^2 \cdot$ К) при кипении (500…5000) и конденсации (4000…20 000) воды позволили весьма эффективно использовать эти процессы в промышленных устройствах.

2.11. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ПЛОСКИЕ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Теплопередачей *называется теплообмен между двумя жидкостями-теплоносителями, разделенными стенкой. Формулы стационарной теплопроводности применимы для процессов теплопередачи через однослойные и многослойные плоские и цилиндрические стенки при условии идеального теплового контакта между слоями. Горячая жидкость имеет температуру* $T_{f\,1}$ *и коэффициент теплоотдачи* α_1*, а холодная жидкость – температуру* $T_{f\,2}$ *и коэффициент теплоотдачи* α_2*. Толщина каждого слоя плоской стенки –* δ_1 *и* δ_2*, а диаметры двухслойной цилиндрической стенки –* d_1*,* d_2 *и* d_3*. Коэффициенты теплопроводности материалов соответственно равны –* λ_1 *и* λ_2*. Температуры на границе каждого слоя обозначены –* T_{w1}*,* T_{w2}*,* T_{w3}*. Распределение температуры в двухслойной плоской и цилиндрической системах, омываемых горячей и холодной жидкостями, показано на рис. 2.2. Высота и глубина многослойной плоской стенки (рис. 2.2,* а*), а также длина* L *цилиндрической стенки (рис. 2.2,* б*) намного больше их общей толщины. Тепловой контакт между слоями в стационарном режиме можно считать идеальным.*



а) б)

Рис. 2.2. Распределение температуры в двухслойной плоской (а) и цилиндрической (б) системах, омываемых горячей и холодной жидкостями

Очевидно, что в стационарном тепловом режиме вся теплота вначале передается от горячей жидкости к внутренней стенке за счет конвекции, затем проходит через все слои за счет теплопроводности и в том же количестве за счет конвекции передается холодной жидкости.

1. ***Теплопередача от горячей жидкости к холодной через многослойную плоскую систему*** *(например, для двух слоев) имеет вид:*

$$Q = \alpha_1 F (T_{f1} - T_{w1}) = \frac{F (T_{f1} - T_{w1})}{R_{\alpha 1}};$$

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} F (T_{w1} - T_{w2}) = \frac{F (T_{w1} - T_{w2})}{R_1};$$

$$Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} F (T_{w2} - T_{w3}) = \frac{F (T_{w2} - T_{w3})}{R_2};$$

$$Q = \alpha_2 F (T_{w3} - T_{f2}) = \frac{F (T_{w3} - T_{f2})}{R_{\alpha_2}}.$$

*Следовательно, имеются четыре уравнения, включающие четыре неизвестные (*Q; T_{w1}; T_{w2}; T_{w3}*). Из решения системы уравнений получим общий тепловой поток* Q*, проходящий через плоскую систему:*

$$Q = \frac{F (T_{f1} - T_{f2})}{R_{\alpha 1} + R_1 + R_2 + R_{\alpha 2}}, \; Вт.$$

Когда количество плоских слоев равно n*, тепловой поток*

$$Q = \frac{F (T_{f1} - T_{f2})}{R_{\alpha 1} + \sum_1^n R_i + R_{\alpha 2}} = kF (T_{f1} - T_{f2}) = \frac{F (T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{k}},$$

где k *– коэффициент теплопередачи, характеризующий интенсивность процесса теплопередачи через плоские системы:*

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},\ Вт/(м^2 \cdot К).$$

Коэффициент теплопередачи плоской системы *численно равен количеству теплоты (Дж), передаваемой через единицу поверхности ($м^2$), в единицу времени (с), при разности температур нагретой и холодной жидкости в один градус.*

Обратное значение коэффициента теплопередачи называется термическим сопротивлением теплопередачи многослойной плоской системы *и характеризует температурный напор, приходящийся на единицу удельного расхода теплоты:*

$$R_{пл} = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2},\ (м^2 \cdot К)/Вт,$$

Причем $R_\alpha = 1/\alpha$ *– это термическое сопротивление теплоотдачи плоской стенки;* $R_i = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ *– термическое сопротивление теплопроводности многослойной плоской стенки.*

Температуры на границах двухслойной плоской системы равны:

$$T_{w1} = T_{f1} - k(T_{f1} - T_{f2}) R_{\alpha 1};$$

$$T_{w2} = T_{f1} - k(T_{f1} - T_{f2})(R_{\alpha 1} + R_1);$$

$$T_{w3} = T_{f1} - k(T_{f1} - T_{f2})(R_{\alpha 1} + R_1 + R_2).$$

Когда количество плоских слоев равно n*, то температура на границах любых слоев плоской системы равна:*

$$T_{wi} = T_{f1} - k(T_{f1} - T_{f2}) \sum_1^i (R_{\alpha 1} + R_i).$$

Плотность теплового потока для плоской системы: q = Q/F, *Вт/$м^2$.*

2. ***Теплопередача от горячей жидкости к холодной через многослойную цилиндрическую систему*** *имеет вид:*

$$Q = \alpha_1 \pi d_1 L(T_{f1} - T_{w1}) = \frac{\pi L(T_{f1} - T_{w1})}{R_{\alpha 1}};$$

$$Q = \frac{\pi L(T_{w1} - T_{w2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{\pi L(T_{w1} - T_{w2})}{R_1};$$

$$Q = \frac{\pi L(T_{w2} - T_{w3})}{\frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}} = \frac{\pi L\ (T_{w2} - T_{w3})}{R_2};$$

$$Q = \alpha_2 \pi d_3 L(T_{w3} - T_{f2}) = \frac{\pi L(T_{w3} - T_{f2})}{R_{\alpha 2}}.$$

Из решения системы уравнений получим общий тепловой поток Q*, проходящий через цилиндрическую систему:*

$$Q = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{R_{\alpha 1} + R_1 + R_2 + R_{\alpha 2}}, \; Вт.$$

Когда количество цилиндрических слоев равно n*, тепловой поток:*

$$Q = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{R_{\alpha 1} + \sum_{i=1}^{n} R_{i1} + R_{\alpha 2}} = k_L \pi L (T_{f1} - T_{f2}) = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{k_L}},$$

где k_L *– коэффициент теплопередачи, характеризующий интенсивность процесса теплопередачи через цилиндрические системы:*

$$k_L = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{1}^{n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}, \; Вт/(м \cdot К).$$

Коэффициент теплопередачи цилиндрической системы *численно равен количеству теплоты (Дж) в* π *раз меньше той, которая передается единицей длины цилиндра (м) в единицу времени (с) при разности температур нагретой и холодной жидкости в один градус.*

Обратное значение коэффициента теплопередачи называется термическим сопротивлением теплопередачи многослойной цилиндрической системы*:*

$$R_L = \frac{1}{k_L} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{1}^{n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}, \; (м \cdot К)/Вт.$$

Причем $R_\alpha = 1/\alpha d$ *– термическое сопротивление теплоотдачи цилиндрической стенки;* $R_i = \sum_{1}^{n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$ *– термическое сопротивление теплопроводности многослойной цилиндрической стенки.*

Когда количество цилиндрических слоев равно n*, то температура на границах любых слоев цилиндрической системы равна:*

$$T_{wi} = T_{f1} - k (T_{f1} - T_{f2}) \sum_{1}^{i} (R_{\alpha 1} + R_i).$$

Плотность теплового потока для цилиндрической системы (на один погонный метр) определяется отношением $q_L = Q/L$*, Вт/м.*

2.12. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Для интенсификации или увеличения количества теплоты Q*, передаваемой от горячей жидкости к холодной через стенки, необходимо увеличивать коэффициент теплопередачи* k*, так как поверхность* F *и разность температур* ΔT *зависят только от конструкции системы и физических условий. Термическое сопротивление теплопроводности стенки* $R = \delta/\lambda$ *стремится к нулю, так как у труб теплообменников толщина* δ *мала, а коэффициент теплопроводности* λ *материалов (металлов) велик.*

Следовательно, коэффициент теплопередачи k *будет зависеть в основном от коэффициентов теплоотдачи* α_1 *и* α_2*, а именно:*

$$k = (\alpha_1 \alpha_2)/(\alpha_1 + \alpha_2).$$

Аналитическое исследование предельного значения коэффициента теплопередачи показывает следующие закономерности:

- *коэффициент теплопередачи* k *всегда меньше любого из коэффициентов теплоотдачи:* $k < \alpha_1$ *и* $k < \alpha_2$*;*

• *коэффициент теплопередачи* k *всегда меньше меньшего коэффициента теплоотдачи;*

• *быстрый рост коэффициента теплопередачи* k *наблюдается при увеличении меньшего из коэффициентов теплоотдачи;*

• *при увеличении большего из коэффициентов теплоотдачи рост коэффициента теплопередачи* k *вначале замедляется, а затем и вовсе прекращается.*

На основании этих выводов формулируются правила интенсификации теплопередачи.

1. Если один коэффициент теплоотдачи намного больше или меньше другого: $\alpha_1 << \alpha_2$ *или* $\alpha_1 >> \alpha_2$*, то интенсифицировать теплопередачу необходимо путем увеличения меньшего из коэффициентов теплоотдачи.*

2. Если коэффициенты теплоотдачи примерно равны: $\alpha_1 \approx \alpha_2$*, то интенсифицировать теплопередачу необходимо путем увеличения обоих коэффициентов теплоотдачи.*

3. Интенсификацию теплопередачи путем увеличения большего из коэффициентов теплоотдачи нельзя классифицировать как грамотное инженерное решение – оно всегда экономически невыгодно.

4. Если по физической природе или конструктивным особенностям нельзя увеличить меньший из коэффициентов теплоотдачи, то на поверхности теплопередающей системы со стороны этого меньшего коэффициента теплоотдачи устанавливают ребра (оребряют) и тем самым компенсируют увеличение теплоотдачи более развитой поверхностью нагрева. На поверхность плоской или цилиндрической системы можно плотно насадить (наклепать или приварить) прямоугольные или круглые пластины – ребра, а также цилиндрические или конические шипы. *Коэффициент оребрения системы* φ – отношение площади поверхности системы с ребрами к гладкой поверхности.

Так, если коэффициент теплоотдачи жидкости α_1 = 1000 Вт/(м^2·К), окружающей среды α_2 = 10 Вт/(м^2·К), то оребрение с коэффициентом φ = 25 со стороны меньшего α_2 увеличивает *k* примерно в 20 раз.

5. Увеличение коэффициентов теплоотдачи однофазных жидкостей (масло, вода) может осуществляться также за счет снижения толщины пограничного ламинарного слоя и перехода движения жидкости к турбулентному режиму, что может достигаться путем увеличения скорости движения жидкости или принятия конструктивных решений (например, применить волнистые поверхности, шипы). Однако это приводит к дополнительным гидравлическим сопротивлениям.

Для снижения коэффициента теплопередачи *через конструкции необходимо увеличить термическое сопротивление системы, что достигается путем нанесения на стенку слоя тепловой изоляции.*

2.13. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Теплоизоляционными называют материалы, коэффициент теплопроводности которых при T = + *50…100 °С меньше 0,23 Вт/(м · К). К ним относят: шлаковую вату, совелит, вермекулит, асбест и др. При выборе изоляции необходимо учитывать механические свойства (плотность, прочность), способность поглощать влагу, выдерживать высокую температуру, а также стоимость теплоизоляционного материала.*

Предположим, что горячая жидкость (внутри трубопровода) имеет температуру $T_{f\,1}$ *и коэффициент теплоотдачи* α_1*, а холодная жидкость (окружающая среда) снаружи трубопровода – температуру* $T_{f\,2}$ *и коэффициент теплоотдачи* α_2*. Коэффициенты теплопроводности материала стенки и изоляции соответственно равны –* $\lambda_м$ *и* $\lambda_{из}$*. Диаметры двухслойной цилиндрической системы –* d_1*,* d_2 *и* d_3*, а толщина слоя теплоизоляции –* $\delta_{из}$*. Соответственно соотношения:* $d_3 = d_2 + 2\delta_{из}$ *или* $d_3 - d_2 = 2\delta_{из}$.

Теплопередача и термические сопротивления цилиндрических систем в зоне изолированного трубопровода II и голого трубопровода I определяются по известным формулам:

$$Q_{\text{II}} = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{R_{\text{II}}};$$

$$Q_{\text{I}} = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{R_{\text{I}}};$$

$$R_{\text{II}} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{м}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3};$$

$$R_{\text{I}} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{м}}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}.$$

Разность термических сопротивлений изолированного II и голого I трубопроводов позволяет получить выражение:

$$R_{\text{II}} - R_{\text{I}} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3} - \frac{1}{\alpha_2 d_2}.$$

В полученной формуле приведем к общему знаменателю последние два слагаемых и с учетом этого получим разность термических сопротивлений

$$\begin{aligned} \Delta R = R_{\text{II}} - R_{\text{I}} &= \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \left(\frac{d_2 - d_3}{\alpha_2 d_2 d_3} \right) = \\ &= \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_3}{d_2} - \frac{2\delta_{\text{из}}}{\alpha_2 d_2 d_3} = \text{А} - \text{Б}. \end{aligned} \qquad (a)$$

Из полученного соотношения следует, что разность термических сопротивлений ΔR изолированного и голого трубопровода может быть со знаком (+) или (–). Это означает, что изолированный трубопровод при определенных физических условиях может терять теплоты меньше или больше, чем в этих же условиях теряет голая труба. При больших значениях произведения $\alpha_2 d_3 d_2$ накладка изоляции способствует уменьшению потерь теплоты. И наоборот, при малых значениях произведения $\alpha_2 d_3 d_2$ накладка изоляции приводит к увеличению потерь теплоты по сравнению с неизолированным трубопроводом.

В действительности диаметр d_3 всегда больше d_2, комплекс А и Б изменяется от нуля до бесконечности, а значения толщины изоляции $\delta_{\text{из}}$, диаметров d_3 и d_2 оказывают влияние на изменение и комплекса А, и комплекса Б. Найти значение толщины изоляционного слоя, соответствующего критической точке, когда А = Б, можно, приравняв выражение (а) к нулю.

Очевидно, что для снижения тепловых потерь нужно, чтобы термическое сопротивление R_{II} изолированного трубопровода было выше, чем неизолированного R_{I}, т.е. должно выполняться неравенства $\Delta R > 0$ или А > Б. Подставляя (а) в неравенство $\Delta R > 0$ и решая его относительно значения $\lambda_{\text{из}}$, d_2 и α_2, получим:

$$\lambda_{\text{из}} < \alpha_2 d_2 / 2. \qquad (б)$$

Если коэффициент теплопроводности применяемой тепловой изоляции $\lambda_{\text{из}}$ удовлетворяет неравенству (б), то материал выбран правильно и изоляция рентабельная. Если условие (б) не выполнено и выбран материал теплоизоляции с $\lambda_{\text{из}} > \alpha_2 d_2 / 2$, то при его нанесении на трубопровод тепловые потери будут не снижаться, а наоборот, увеличиваться.

При неправильном выборе материала изоляции $\lambda^*_{\text{из}}$ наибольшие тепловые потери имеют место при значении диаметра изоляции

$$d_{3\text{кр}} = d^*_{\text{из}} = d_{\text{кр}} = 2\lambda^*_{\text{из}} / \alpha_2.$$

Последнее соотношение называют критическим диаметром тепловой изоляции. Критический диаметр тепловой изоляции $d^*_{из}$ должен быть как можно меньше и поэтому в качестве теплоизолятора должен использоваться материал, имеющий минимальное значение коэффициента теплопроводности $\lambda_{из}$. Однако теплоизоляция с малым значением коэффициента теплопроводности обычно имеет высокую стоимость.

Чаще всего для снижения теплопередачи через конструкции используют менее эффективную и дешевую изоляцию, а ее качество компенсируют увеличением толщины слоя $\delta_{из}$. Это совершенно неэкономично, так как при определенной толщине слоя недорогой и малоэффективной теплоизоляции потери теплоты с теплоизоляции достигнут максимума и лишь только при еще более толстом слое изоляции начнут постепенно снижаться. Изолирование объекта (трубопроводов) таким материалом следует считать нерентабельным, а изоляцию с более толстым слоем – абсурдным.

Следует отметить, что в структуру критического диаметра тепловой изоляции $d^*_{из}$ входят только коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{из}$ и коэффициент теплоотдачи α_2, без влияния трубопровода (голого или изолированного) и его диаметра d_2. Это положение не всегда и не сразу воспринимается и поэтому вместо понятия «критический диаметр» для тех же целей можно использовать понятие «критическая толщина слоя» – $d_{кр}$, которая должна быть связана с диаметром d_2 неизолированного трубопровода и коэффициентом теплоотдачи α_2.

Очевидно, что если диаметр оголенного трубопровода d_2 будет меньше критической толщины слоя $d_{кр}$, данной изоляции, то такая изоляция нерентабельна. Если же диаметр оголенного трубопровода d_2 равен или больше критической толщины слоя $d_{кр}$ данной изоляции, то такая изоляция рентабельна. Причем, чем больше диаметр трубопровода d_2, тем больше теплоизоляционных материалов, которые будут рентабельны для него.

Наоборот, для трубопровода малого диаметра труднее найти рентабельную изоляцию, а трубопроводы очень малых диаметров, отдающие теплоту к спокойному воздуху (при естественной конвекции), лучше совсем не изолировать.

Один и тот же теплоизоляционный материал может быть рентабельным для трубопровода диаметром d_2 и оказаться совершенно нерентабельным для трубопровода меньшего диаметра d^*_2. Поэтому для расчетов всегда необходимо сравнивать d_2 и $d_{кр}$.

Рассмотрим пример нанесения возможно предлагаемой изоляции с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из}$ = 0,2 Вт/(м · К) на неизолированный трубопровод с внешним диаметром d_2 = 0,025 м при коэффициенте теплоотдачи системы в окружающую среду α_2 = 8 Вт/(м^2 · К).

Используя условие рентабельности тепловой изоляции, имеем:

$$(\alpha_2 d_2)/2 = 0{,}025 \cdot 8/2 = 0{,}1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Так как коэффициент теплопроводности предлагаемой теплоизоляции $\lambda_{из}$ = 0,2 Вт/(м · К) больше, чем $(\alpha_2 d_2)/2$ = 0,1 Вт/(м · К), то использовать такую изоляцию нецелесообразно. В этом случае необходимо использовать другие теплоизоляционные материалы (с рентабельной изоляцией), для которых $\lambda_{из} < 0{,}1$ Вт/(м · К).

Критическая толщина слоя тепловой изоляции

$$d_{кр} = 2\lambda_{из}/\alpha_2 = 2 \cdot 0{,}2/8 = 0{,}05 \text{ м}.$$

Весь сортамент неизолированных трубопроводов с диаметром d_2 до 0,05 м и нанесением на них предлагаемой изоляции, с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из}$ = 0,2 Вт/(м · К) будет нерентабельным. Причем, наибольшие тепловые потери такого изолированного трубопровода (с любым диаметром до 0,05 м) имеют место при значении наружного диаметра изоляции $d_{3кр}$ = 0,05 м.

Очевидно, что если диаметр d_2 используемых неизолированных трубопроводов будет равен или больше критической толщины слоя изоляции

$d_{кр}$ = 0,05 м, то предлагаемая изоляция, с $\lambda_{из}$ = 0,2 Вт/(м · К) будет всегда рентабельна, при любой толщине слоя изоляции.

Очевидно также, что тепловая изоляция с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из}$ = 0,2 Вт/(м · К), нанесенная на трубопровод диаметром d_2 = 0,025 м, будет иметь наибольшие тепловые потери при толщине изоляции $\delta_{из} = (d_{кр} - d_2) / 2 = (0{,}05 - 0{,}025) / 2 = 0{,}0125$ м, а аналогично с диаметром d_2 = 0,02 м будет иметь наибольшие тепловые потери при толщине изоляции $\delta_{из} = (d_{кр} - d_2) / 2 = (0{,}05 - 0{,}02) / 2 = 0{,}015$ м.

Для плоских систем любая тепловая изоляция будет всегда рентабельна независимо от коэффициента теплопроводности и толщины изоляции.

2.14. ОБЩИЙ ИЛИ СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Разделение общего процесса переноса теплоты на элементарные явления: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение – производится в основном из методологических соображений. В действительности же эти явления протекают одновременно, влияют друг на друга и такое совокупное (совместное) воздействие носит название – *общий* или *сложный теплообмен*. Конвекция, например, часто сопровождается тепловым излучением, теплопроводность в пористых телах – конвекцией и излучением в порах, а тепловое излучение – теплопроводностью и конвекцией. Процесс переноса теплоты между потоком излучающего газа и стенкой также является совместным результатом действия конвективного теплообмена и теплового излучения.

В практических расчетах разделение таких сложных процессов на элементарные явления не всегда возможно и целесообразно. Обычно результат совокупного действия отдельных элементарных явлений приписывается одному из них, которое и считается главным. Влияние же остальных (второстепенных) явлений сказывается лишь на количественной характеристике основного.

Так, например, при распространении теплоты в пористом теле в качестве основного явления принято считать теплопроводность, а влияние конвекции и теплового излучения в порах учитывается соответственным увеличением значения коэффициента теплопроводности.

В топках и газоходах теплогенерирующих и теплотехнологических установок всегда присутствует суммарный (общий) лучистый и конвективный теплообмен. Однако в топках (за счет высоких температур топочных газов) лучистый или радиационный теплообмен преобладает над конвективным теплообменом и поэтому тепловоспринимающие поверхности называют *радиационными поверхностями нагрева*. В газоходах же теплогенерирующих и теплотехнологических установок температура топочных газов ниже, чем в топке, и в них уже конвективный теплообмен преобладает над лучистым теплообменом, и поэтому тепловоспринимающие поверхности называют *конвективными поверхностями нагрева*.

Количественной характеристикой совокупного (суммарного или общего) теплового процесса является общий коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{общ} = \alpha_к + \alpha_л ,$$

где $\alpha_к$ учитывает совместное воздействие конвекции и теплопроводности, а $\alpha_л$ учитывает действие только теплового излучения.

Если принять $T_ж$ – температура газа и $T_с$ – температура тепловоспринимающей стенки, то каждой единице поверхности этой стенки передается теплота путем соприкосновения

$$q_к = \alpha_к (T_ж - T_с)$$

и путем теплового излучения

$$q_л = \varepsilon_{пр} c_0 [(T_ж / 100)^4 - (T_с / 100)^4].$$

Суммируя $q_к$ и $q_л$, имеем:

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{к}} + q_{\text{л}} = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) + \varepsilon_{\text{пр}} c_0 [(T_{\text{ж}} / 100)^4 - (T_{\text{с}} / 100)^4].$$

Вынося разность ($T_{ж} - T_{с}$) за скобки, получим основное выражение для расчета сложного или суммарного теплообмена:

$$q_{\text{общ}} = \left\{ \alpha_{\text{к}} + \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\frac{(T_{\text{ж}} / 100)^4 - (T_{\text{с}} / 100)^4}{T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}} \right] \right\} (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}).$$

Последнее выражение можно записать и в форме:

$$q_{\text{общ}} = (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}) (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) = \alpha_{\text{общ}} (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}),$$

где $\alpha_{\text{к}}$, $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением; $\alpha_{\text{общ}}$ – общий (суммарный) коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \cdot 10^{-8} (T_{\text{ж}}^4 - T_{\text{с}}^4)/(T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \theta,$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы; c_0 = 5,67 Вт/(м^2 · К^4); θ – температурный коэффициент.

Если стенка омывается капельной жидкостью, например водой, тогда $\alpha_{\text{л}} = 0$ и $\alpha_{\text{общ}} = \alpha_{\text{к}}$. Значение θ зависит только от температур $T_{\text{ж}}$ и $T_{\text{с}}$. Значение $\varepsilon_{\text{пр}}$ выбирается согласно степени черноты системы.

Обозначим $(T_{\text{ж}} + T_{\text{с}})/2 = T_m$. Тогда при $0{,}9 < T_{\text{ж}}/T_{\text{с}} < 1{,}1$ температурный коэффициент θ и коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{л}}$ определятся из выражений:

$$\theta \approx 0{,}04 \cdot (T_m/100)^3, \quad \alpha_{\text{л}} = 0{,}04\, \varepsilon_{\text{пр}} c_0 (T_m/100)^3.$$

При таком допущении ошибка расчетов не превышает 1 %.

В случае, если в качестве основного принят процесс теплового излучения, расчетная формула суммарной теплоотдачи будет иметь вид

$$q_{\text{общ}} = (\varepsilon_{\text{к}} + \varepsilon_{\text{пр}}) \cdot c_0 [(T_{\text{ж}}/100)^4 - (T_{\text{с}}/100)^4].$$

Участие в процессе конвективного теплообмена здесь учитывается увеличением приведенной степени черноты системы за счет $\varepsilon_{\text{к}}$, равного

$$\varepsilon_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} / (c_0 \theta).$$

2.15. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

1. Теплообменным аппаратом *называется устройство, в котором передача теплоты осуществляется от одного – горячего теплоносителя к другому – холодному. По принципу действия теплообменные аппараты бывают: рекуперативные, регенеративные и смесительные.*

Рекуперативным *называют теплообменный аппарат, в котором греющий (горячий) и нагреваемый (холодный) теплоносители протекают одновременно, а теплота передается через разделяющую их стенку. К рекуперативным аппаратам поверхностного типа относят: радиаторы и калориферы систем отопления, пароводяные и водоводяные теплообменники типа «труба в трубе», трубчатые, змеевиковые, спиральные, сотовые, с ребристыми и пластинчатыми поверхностями [36].*

Регенеративным *называют теплообменный аппарат, в котором горячий теплоноситель вначале передает теплоту твердому телу (металлической или керамической насадке), а в последующий период холодный теплоноситель воспринимает аккумулированную теплоту за счет соприкосновения с нагретым твердым телом. В результате одна и та же поверхность твердого материала, имеющего высокую теплоемкость, омывается вначале горячим, а затем холодным теплоносителем, т.е. происходит попеременный нагрев или охлаждение поверхности теплоемкого материала.*

К регенеративным аппаратам относят: воздухоподогреватели с вращающейся насадкой, дробепоточные установки.

Смесительным *называют теплообменный аппарат, в котором передача теплоты осуществляется путем непосредственного соприкосновения горячего и холодного теплоносителей, сопровождающегося полным или частичным смешением. К смесительным установкам относят атмосферные деаэраторы (ДСА), камеры кондиционеров, градирни.*

Греющим теплоносителем в теплообменных аппаратах чаще всего служит водяной пар, горячая вода, продукты сгорания органического топлива, горячий воздух и реже масло, различные растворы.

В теплообменных аппаратах происходит непрерывный процесс передачи теплоты: один теплоноситель отдает теплоту, а другой непрерывно ее получает. Температура горячего и холодного теплоносителей, а следовательно, и температурный напор в аппарате постоянно меняются по ходу движения.

При конструктивном расчете теплообменного аппарата (теплообменника) обычно требуется определить необходимую поверхность теплообмена, а при поверочном расчете – температуру горячего и холодного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата.

В основе расчетов теплообменных аппаратов лежат:

- *уравнение теплового баланса:*

$$Q = Q_1 = Q_2 + \Delta Q, \text{ кВт},$$

- *уравнение теплопередачи:*

$$Q = kF\,(t_{1\text{ср}} - t_{2\text{ср}}) = kF\Delta t_{\text{ср}}, \text{ кВт};$$

где Q_1 *– количество теплоты, отданное горячим теплоносителем, кВт;* Q_2 *– количество теплоты, воспринятое холодным теплоносителем, кВт;* ΔQ *– потери теплоты теплообменником в окружающую среду и утечки теплоносителей, кВт;* k *– средний коэффициент теплопередачи, кВт/(м*^{2} *· К);* F *– площадь поверхности теплообмена, м*^{2}*;* $t_{1ср}$ *– средняя температура горячего теплоносителя в теплообменном аппарате, °С;* $t_{2ср}$ *– средняя температура холодного теплоносителя, °С;* $\Delta t_{ср}$ *– средний температурный напор в теплообменном аппарате, °С.*

В уравнении теплового баланса количество теплоты Q *для любых теплоносителей (водяного пара, воды, воздуха, растворов) имеет вид:*

$$Q = G_1 \Delta i_1 = G_2 \Delta i_2, \text{ кВт},$$

где G_1 *и* G_2 *– массовые секундные расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с;* Δi_1, Δi_2 *– изменения энтальпии горячего и холодного теплоносителей в теплообменнике, кДж/кг.*

2. Для теплообменника, в котором агрегатное состояние теплоносителей постоянно и не меняется (вода, воздух, топочные газы), изменение энтальпии, кДж/кг, горячего Δi_1 *и холодного* Δi_2 *теплоносителей*

$$\Delta i_1 = c_{p1}\,(t_1' - t_1'');$$

$$\Delta i_2 = c_{p2}\,(t_2'' - t_2'),$$

где t_1' *и* t_1'' *– температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, °С;* c_{p1} *– средняя массовая, изобарная теплоемкость горячего теплоносителя в интервале температур от* t_1' *до* t_1''*, кДж/(кг · К);* t_2' *и* t_2'' *– температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, °С;* c_{p2} *– средняя массовая, изобарная теплоемкость холодного теплоносителя в интервале температур от* t_2' *до* t_2''*, кДж/(кг · К).*

Соответственно, для водо-водяных теплообменников потоки теплоты от горячего Q_1 *к холодному* Q_2 *теплоносителю определяются из выражения, кВт:*

$$Q_1 = W_1(t_1' - t_1'') = G_1 c_{p1}(t_1' - t_1'');$$

$$Q_2 = W_2(t_2'' - t_2') = G_2 c_{p2}(t_2'' - t_2'),$$

где W_1 *и* W_2 *– водные эквиваленты горячего и холодного теплоносителей, кВт/К.*

3. Для теплообменника, в котором агрегатное состояние теплоносителя меняется при конденсации пара или кипении жидкости (водяной пар), изменение энтальпии теплоносителя Δi*, кДж/кг, зависит от его агрегатного состояния (перегретый, сухой насыщенный или влажный насыщенный пар), давления насыщенного пара или давления и температуры перегретого пара.*

Соответственно для паровых водоподогревателей тепловая нагрузка Q определяется по расходу пара D на нагрев воды или расходу нагреваемой жидкости $G_в$.

$$Q = D(i_п - i_к) = G_в c_в (t_к - t_н),$$

где D – расход пара в теплообменнике, кг/с; $i_п$, $i_к$ – энтальпии пара, поступающего в аппарат, и конденсата после теплообменника, кДж/кг; $G_в$ – расход нагреваемой жидкости, кг/с; $c_в = 4{,}19$ кДж/(кг · К) – теплоемкость воды; $t_н$, $t_к$ – температура нагреваемой воды до и после теплообменника, °С.

4. Для теплообменника, в котором осуществляется процесс тепломассообмена, например, нагрев или охлаждение воздуха водой в камере орошения кондиционера, тепловая нагрузка Q определяется по расходу нагреваемого или охлаждаемого воздуха M или расходу нагреваемой или охлаждаемой жидкости (обычно воды) $G_в$.

$$Q = M(I_1 - I_2) = G_в c_в (t_к - t_н),$$

где M – расход воздуха, кг/с; I_1 и I_2 – начальная и конечная энтальпии влажного воздуха или парогазовой смеси, кДж/кг; $G_в$ – расход жидкости, кг/с; $c_в = 4{,}19$ кДж/(кг · К) – теплоемкость воды; $t_н$, $t_к$ – температура воды до и после тепломассообмена, °С.

5. Теплообменные аппараты классифицируются и по относительному характеру движения теплоносителей:

- *прямоточные – горячий и холодный теплоносители движутся в одинаковом направлении;*
- *противоточные – горячий и холодный теплоносители движутся в противоположном направлении;*
- *перекрестные – теплоносители движутся перекрестным ходом.*

Схема изменения температуры горячего и холодного теплоносителей по сечению F *прямоточного и противоточного теплообменного аппарата, а также характер распределения температур горячего и холодного теплоносителей в зависимости от водных эквивалентов* W_1 *и* W_2 *показаны на рис. 2.3.*

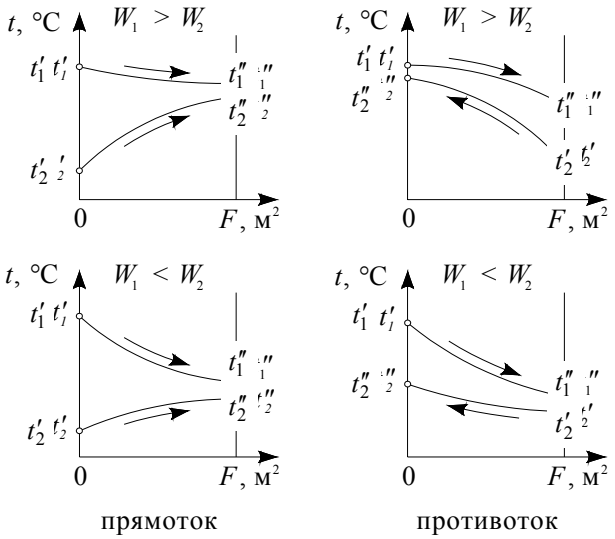


Рис. 2.3. Схема изменения температуры горячего и холодного теплоносителей в прямоточном и противоточном теплообменном аппарате

Очевидно, что наибольшая разность температур $\Delta t_б$ *при прямотоке будет на входе в теплообменник, а наименьшая* $\Delta t_м$ *– на выходе из него. В противоточной схеме место наибольшей и наименьшей разностей температур заранее определить нельзя, оно зависит от соотношений водных эквивалентов:* $W_1 > W_2$ *или* $W_1 < W_2$.

6. Средний температурный напор $\Delta t_{ср}$ *в теплообменном аппарате определяется исходя из математических представлений о среднем значении температуры* Δt_* *на участке* dF_**:*

$$\Delta t_* = \frac{1}{F_*}\int_0^{F_*} \Delta t_* dF_* \ .$$

Если при противотоке для обоих теплоносителей $W_1 = W_2$, то

$$\Delta t_б = \Delta t_м = \Delta t_{ср}.$$

Если температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева F меняются незначительно, когда $(\Delta t_б / \Delta t_м) < 1{,}8$, средний температурный напор $\Delta t_{ср}$ можно считать как средний арифметический:

$$\Delta t_{ср} = 0{,}5(\Delta t_б + \Delta t_м).$$

Во всех остальных случаях средний температурный напор $\Delta t_{ср}$ при противотоке и прямотоке считают как средний логарифмический. Значение среднеарифметического температурного напора всегда больше среднелогарифмического.

Среднелогарифмический температурный напор $\Delta t_{ср}$ в прямоточных и противоточных аппаратах примет вид:

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \dfrac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}.$$

Температурный напор $\Delta t_{ср}$ вдоль поверхности F при прямотоке изменяется сильнее, чем при противотоке. Вместе с тем среднее значение температурного напора при противотоке больше, чем при прямотоке. За счет этого фактора при противотоке теплообменник получается более компактным. Поэтому в противоточных аппаратах, при прочих одинаковых усло-

виях, либо меньше площадь теплообмена, либо передается большее количество теплоты.

Очевидно, что при противотоке можно получить температуру нагреваемой жидкости выше, чем конечная температура горячего теплоносителя. В то же время при весьма высоких температурах горячего теплоносителя прямоточная схема оказывается предпочтительнее, ибо материал аппарата работает в более благоприятных термических условиях и менее подвержен разрушению.

7. Паровые водоподогреватели подбираются по поверхности нагрева F*, м², из уравнения теплопередачи*

$$F = 10^3 Q/(k \Delta t \eta),$$

где Q – тепловая нагрузка, кВт; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К), при расчетах принимается 2500…3000; Δt – температурный напор, °С; η – коэффициент, учитывающий потери теплоты от наружного охлаждения, утечки теплоносителей, и принимается равным 0,98.

Тепловая нагрузка Q определяется по расходу пара D на нагрев воды или расходу нагреваемой жидкости $G_в$:

$$Q = D(i_п - i_к) = G_в c_в (t_к - t_н).$$

Водо-водяные теплообменники подбирают по поверхности нагрева F, м², из уравнения теплопередачи

$$F = 10^3 Q/(k \Delta t \eta_1),$$

где Q – тепловая нагрузка, кВт; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К), при расчетах принимается 1500…2000; Δt – температурный напор, °С; η_1 – коэффициент, учитывающий накипь и загрязнение трубок, утечки теплоносителей, а также потери теплоты от наружного охлаждения, принимается 0,8…0,9.

Тепловая нагрузка Q определяется по максимальному значению расхода греющей или нагреваемой жидкости $G_в$, кг/с, и разности температур этой жидкости $\Delta t_в$, °С, на входе и выходе из теплообменника:

$$Q = G_в c_в \Delta t_в.$$

При выборе теплообменников необходимо проверять допустимую скорость теплоносителя ω, м/с, или уточнять требуемое живое сечение f, м², для пропуска заданного расхода G, кг/с. Во всех случаях используют уравнение неразрывности потока, согласно которому массовый секундный расход $G = \rho \omega f$, где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³.

3. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

3.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ТОПЛИВА И ГОРЕНИЯ

Топливом называют вещество, выделяющее при определенных условиях большое количество тепловой энергии, которую используют в различных отраслях народного хозяйства для получения водяного пара или горячей воды для систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и производства электроэнергии. В теплогенерирующих котельных установках (ТГУ) применяют органическое топливо, которое выделяет теплоту при взаимодействии с окислителем (воздухом).

Органическое топливо по агрегатному состоянию делят на твердое, жидкое, газообразное, а по способу получения – на естественное: уголь, торф, сланцы, природный газ и искусственное (синтетическое и композиционные): топливные брикеты, дизельное и соляровое топливо, мазут топочный и бытовой, топливные эмульсии и суспензии.

Горением называется быстрый процесс экзотермического окисления горючего вещества, сопровождающегося выделением значительного количества тепловой энергии. Особенности процесса горения, отличающие его от родственных процессов окисления: высокая температура; быстротечность по времени; неизотермичность; изменение концентрации компонентов, структуры поверхности реагирования во времени.

По своей природе горение – процесс, протекающий при непрерывном подводе горючего и окислителя в зону горения и отводе газообразных продуктов сгорания. В основе процесса горения лежат экзотермические и эндотермические реакции, которые описываются стехиометрическими уравнениями и принципиальной особенностью которых является их обратимость (принцип Ле-Шателье). Для протекания реакции горения необходимо перемешивание компонентов на молекулярном уровне или процесс массопереноса реагирующих компонентов.

Процесс массопереноса осуществляется в турбулентном потоке за счет турбулентной диффузии, а в ламинарном потоке, неподвижной среде и в пограничном слое – за счет молекулярной диффузии, которые при постоянной температуре и давлении описываются законом Фика. Если реакция горения протекает мгновенно, то это явление называется *взрывом*.

В зависимости от фазового состояния реагирующих веществ химические реакции горения делят на:

1) *гомогенные* – протекающие в объеме между компонентами, находящимися в одной фазе (газ и воздух);

2) *гетерогенные* – протекающие на поверхности раздела фаз (уголь или капля мазута и воздух).

3.2. СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

В состав твердого и жидкого топлива входят горючие элементы: углерод C, водород H, сера S, а также негорючие элементы (внутренний и внешний балласт) – кислород O, азот N, влага W и зола A. Топливо, которое используется для сжигания, называется рабочим.

Жидкое топливо получается из нефти методом термической разгонки либо термического крекинга. В зависимости от температуры получают фракции: бензин (200…225 °C), керосин (140…300 °C), дизельные топлива (190…350 °C), мазутные (более 350 °C).

Мазуты для котельных делятся на:

- флотские Ф-5 и Ф-12 – для использования в судовых котлах, газотурбинных установках и двигателях;
- топочные мазуты М-40, М-100 и другие, которые в зависимости от содержания серы делятся на малосернистые (S < 0,5 %), сернистые (S = 0,5…2 %), высокосернистые (S > 2 %);
- топочные печные бытовые (ТПБ).

Физические свойства жидких топлив приведены в [30, табл. 2.8]:

- теплота сгорания 39…42 МДж/кг;
- относительная плотность – отношение плотности нефтепродукта при 20 °C к плотности дистиллированной воды при 4 °C (0,9…1,02);
- вязкость условная (ВУ) – отношение времени истечения 200 $см^3$ нефтепродукта при определенной (50, 80, 100 °C) температуре ко времени истечения этого же объема дистиллированной воды при 20 °C; для обеспечения перекачки и сжигания топочного мазута (кроме ТПБ) в котлах его подогревают до 70…115 °C, для того чтобы ВУ = 3…6°;
- температура вспышки (80…110 °C) – температура, при которой нагретое топливо выделяет пары, которые в смеси с воздухом могут вспыхнуть при подносе к ним пламени;
- температура застывания (от –10 до + 42 °C) – температура, при которой топливо загустевает настолько, что при наклоне пробирки с топливом на 45 ° к горизонту его уровень остается неподвижным в течение 1 мин.

Газообразное топливо газовых месторождений содержит метан CH_4 (80…98 %), тяжелые углеводороды (этан, пропан, бутан и т.д.), водород, сероводород, в небольших количествах кислород, азот, углекислый газ и

водяные пары. Состав газообразного топлива дается в процентах по объему [30], а расчеты ведут исходя из единиц объема сухого газа, взятого при нормальных условиях.

При окислении 1 м^3 метана образуются углекислый газ, водяные пары и 36 МДж теплоты; этана – 63,8 МДж, пропана – 91,4 МДж, бутана – 120 МДж и т.д.

Природный газ не имеет цвета, запаха, вкуса, легче воздуха (плотность 0,75 кг/м^3). Теплота сгорания 33…40 МДж/м^3. Природный газ на человека действует удушающе, а смертельная доза – 25 % от объема помещения. *Температура воспламенения* в воздухе – это температура, которую должен иметь газ или газовое топливо, чтобы начался самопроизвольный процесс горения за счет выделения теплоты горящими частицами газа без подвода теплоты извне. Для метана температура воспламенения в воздухе 654…790 °С. При концентрации природного газа более 17 % – он огнеопасен.

Для того чтобы своевременно обнаружить утечки газа, горючие газы подвергают *одоризации*, т.е. придают им резкий специфический запах. Газы одорируют после их очистки и осушки перед поступлением в магистральный газопровод при помощи одоранта – этилмеркаптана, в количестве 16 г на 1000 м^3 природного газа.

Объемное содержание горючего газа в газовоздушной смеси, ниже (или выше) которого пламя не может самопроизвольно распространяться в этой смеси при наличии или внесении в нее источника высокой температуры, называется нижним (верхним) пределом воспламенения, или нижним (верхним) пределом взрываемости данного газа. Пределы взрываемости газов в зависимости от объема воздуха помещения приведены в [29].

Содержание вредных примесей регламентируется ГОСТ 5542–87.

Сжиженный газ имеет плотность 2,6 кг/м^3 (т.е. тяжелее воздуха в 1,5 раза), теплоту сгорания 110…120 МДж/м^3, предел взрываемости 1,5…9,5 % от объема помещения (при наличии искры), температуру вспышки 750…850 °С. Зимняя смесь состоит из 75 % пропана и 25 % бутана, летняя – 25 % пропана и 75 % бутана. Одорант (этилмеркаптан) используется в количестве 40 г на 1000 м^3 газа, для того чтобы ощутить запах при концентрации 0,5 % от объема помещения.

3.3. ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Количество теплоты, выделяемое при полном сгорании единицы топлива, называется его теплотворностью, или *теплотой сгорания* и измеряется в кДж/кг или кДж/м^3. Теплота сгорания – основной параметр органического топлива, характеризующий его энергетическую ценность, и для расчетов определяется по [30, табл. 2.1, 2.8, 2.9].

Различают высшую и низшую теплоту сгорания.

Высшей теплотой сгорания топлива $Q_{\text{в}}^{\text{р}}$ называют количество теплоты в кДж, выделяемое 1 кг (или 1 м^3) рабочего топлива при условии, что все водяные пары, образующиеся от окисления водорода и испарения влаги топлива, конденсируются. В реальных условиях все водяные пары уходят в атмосферу, не сконденсировавшись, и поэтому для расчетов используют низшую теплоту сгорания топлива.

Низшей теплотой сгорания топлива $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ называют количество теплоты в кДж, выделенное 1 кг (или 1 м^3) рабочего топлива, без учета конденсации водяных паров. Теплота $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ меньше $Q_{\text{в}}^{\text{р}}$ на теплоту парообразования водяных паров (2460 кДж/кг).

Учет запасов разных видов топлива ведут в пересчете на *условное топливо*, теплота сгорания которого принимается равным 29 308 кДж/кг (7000 ккал/кг). Для перевода натурального топлива $B_{\text{н}}$ в условное – $B_{\text{у}}$, используют тепловой эквивалент Э = $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ / 29308, и тогда $B_{\text{у}} = B_{\text{н}}$ Э.

Удельная теплота сгорания твердого и жидкого топлива определяется сжиганием 1 г топлива в калориметрической бомбе, заполненной кислородом, которая помещается в сосуд (калориметр) с водой, а приращение температуры воды измеряется метастатическим термометром. Удельная теплота сгорания газообразного топлива определяется в калориметре путем сжигания исследуемого газа в воздушной среде. Расход газа измеряется счет-

чиком, а выделившаяся при этом теплота передается потоку проточной воды, расход которой определяется взвешиванием, а приращение температуры – термометрами.

3.4. СПОСОБЫ СЖИГАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Если за определяющий параметр взять скорость движения воздуха $w_в$ относительно скорости движения частиц топлива $v_т$, то по этому параметру выделяют четыре технологии сжигания топлива.

1. *В плотном фильтрующем слое* ($w_в >> v_т$).

Применяется только для кускового твердого топлива, которое распределяется на колосниковой решетке. Слой топлива продувается воздухом со скоростью, при которой устойчивость слоя не нарушается.

Видимое тепловое напряжение колосниковой решетки составляет Q_R = 1,1…1,8 МВт/м^2.

2. *В кипящем или псевдоожиженным слое* ($w_в > v_т$).

При увеличении скорости воздуха динамический напор может достигнуть, а затем и превысить гравитационную силу частиц. Устойчивость слоя нарушится и начнется беспорядочное движение частиц, которые будут подниматься над решеткой, а затем совершать возвратно-поступательное движение вверх и вниз. Скорость потока, при которой нарушается устойчивость слоя, называется критической. Увеличение ее возможно до скорости витания частиц, когда они выносятся потоком газов из слоя.

Значительная часть воздуха проходит через кипящий слой в виде «пузырей» (газовых объемов), сильно перемешивающих мелкозернистый материал слоя, в результате процесс горения по высоте протекает практически при постоянной температуре, что обеспечивает полноту выгорания топлива.

Для кипящего псевдоожиженного слоя характерна скорость воздуха 0,5…4 м/с, размер частиц топлива 3…10 мм, высота слоя не более 0,3…0,5 м. Тепловое напряжение объема топки Q_V = 3,0…3,5 МВт/м^3.

В кипящий слой вводят негорючий заполнитель: мелкий кварцевый песок, шамотную крошку и др. Концентрация топлива в слое не превышает 5 %, что позволяет сжигать любое топливо (твердое, жидкое, газообразное, включая горючие отходы). Негорючий наполнитель в кипящем слое может быть активным по отношению к вредным газам, образующимся при горении. Введение наполнителя (известняка, извести или доломита) дает возможность перевести в твердое состояние до 95 % сернистого газа.

3. *В потоке воздуха* ($w_в \approx v_т$) или факельный прямоточный процесс. Частицы топлива оказываются взвешенными в газовоздушном потоке и начинают перемещаться вместе с ним, сгорая во время движения в пределах топочного объема. Способ отличается слабой интенсивностью, растянутой зоной горения, резкой неизотермичностью; требуется высокая температура среды в зоне воспламенения и тщательная подготовка топлива (распыливание и предварительное перемешивание с воздухом). Тепловое напряжение объема топки $Q_V \approx$ 0,5 МВт/м^3.

4. *Циклонное сжигание топлива* ($w_в \le v_т$). Частица или капля топлива циркулирует по организованному контуру потока столько раз, сколько необходимо для ее полного сгорания. При этом достигается наибольшая скорость сгорания с одновременной интенсификацией массопереноса. Тепловое напряжение объема топки $Q_V \approx$ 1,3 МВт/м^3.

3.5. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Расчет сводится к определению количества воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, продуктов горения, а также температуры и энтальпии дымовых газов. Расчет твердого и жидкого топлива ведут по соотношениям масс веществ, участвующих в реакциях, а для газообразного топлива – по объемным соотношениям.

Для полного сжигания 1 кг углерода С требуется 1,866 м^3 кислорода O_2, в результате чего образуется 1,866 м^3 двуокиси углерода CO_2 и выделяется 34 МДж (34 000 кДж) теплоты: $C + O_2 = CO_2 + Q$.

Для полного сгорания 1 кг серы S требуется 0,7 м^3 кислорода O_2, в результате образуется 0,7 м^3 сернистого газа SO_2 и выделяется 10,5 МДж теплоты: $S + O_2 = SO_2 + Q$.

Для полного сгорания 1 кг водорода H_2 требуется 5,6 м^3 кислорода O_2, образуется 11,2 м^3 водяного пара H_2O и выделяется 121,5 МДж теплоты: $2H_2 + O_2 = 2H_2O + Q$.

Для полного сгорания 1 м^3 метана CH_4 требуется 9,52 м^3 воздуха V^o, образуется 10,52 м^3 дымовых газов, содержащих CO_2 и водяные пары H_2O, и выделяется 36,5 МДж теплоты: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + Q$.

При полном сгорании топлива дымовые газы содержат углекислый газ CO_2, сернистый газ SO_2, азот топлива и воздуха N_2, неиспользованный при горении кислород O_2 воздуха, водяной пар H_2O, полученный за счет окисления водорода топлива, испарения влаги, содержащейся в топливе и внесенной с влажным воздухом. Для полного горения топлива необходимы: достаточное количество воздуха; хорошее перемешивание воздуха с топливом; высокая температура в топке (не менее 700 °С на выходе); достаточное время пребывания топлива и окислителя в топке; постоянный отвод продуктов сгорания из топки.

При неполном сгорании топлива образуются вредные для человека и окружающей среды оксиды азота (NO, NO_2), серы (SO_2), углерода CO (угарный газ), а также сажа, которая осаждается на экранных и конвективных трубах, снижает теплопередачу от топочных газов к теплоносителю, что приводит к уменьшению КПД и перерасходу топлива. Кроме того, сажа может самовозгораться, что приводит к авариям.

Полнота сгорания топлива определяется двумя способами:

1) с помощью газоанализаторов – по показаниям состава уходящих топочных газов оценивается полнота сгорания и избыток воздуха;

2) визуально – по цвету пламени и дыма. При полном сгорании цвет пламени в разогретой топке голубовато-фиолетовый или прозрачно-соломенный, а цвет дыма: бесцветный, прозрачный, невидимый для глаза – летом и светло-серый или белый – зимой. При неполном сгорании цвет пламени оранжево-красный, с темными язычками, непрозрачный, а цвет дыма – серый, ближе к темному, непрозрачный.

3.6. КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Для обеспечения полного сгорания топлива в топочное устройство подводят воздуха больше, чем теоретически необходимо. Отношение действительно поступившего количества воздуха $V_д$ к теоретически необходимому V^o, называется *коэффициентом избытка воздуха* $\alpha_т$.

Топки паровых и водогрейных котлов, как правило, работают с разрежением 2…3 мм вод. ст., в связи с чем происходит подсос воздуха и в топку и во все элементы котельной установки по ходу газового тракта, вплоть до дымососа. Присосы воздуха для каждого элемента котла определяются по [25] и ориентировочно могут быть приняты:

- 0,05 – для первого конвективного пучка (газохода), фестона (с камерой догорания), пароперегревателя, воздухоподогревателя;
- 0,1 – для второго конвективного пучка (газохода), конвективной шахты, чугунного и стального экономайзера с обшивкой;
- 0,15…0,2 – для чугунного экономайзера без обшивки.

Поэтому коэффициент избытка воздуха в уходящих топочных газах $\alpha_{ух}$ больше, чем в топке, на суммарное значение присосов воздуха $\Sigma\Delta\alpha$ и составляет: $\alpha_{ух} = \alpha_т + \Sigma\Delta\alpha$.

Разрежение в топке замеряется тягонапоромером ТНЖ. При разрежении менее 1 мм вод. ст. топочные газы могут выбиваться в помещение котельной, что недопустимо по технике безопасности. При разрежении более 8 мм вод. ст. будет происходить значительный подсос холодного наружного воздуха, что приведет к снижению температуры топочных газов, увеличению потерь теплоты, снижению КПД и др.

Таблицы расчета коэффициентов избытка воздуха, объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания приведены в [10, 11].

3.7. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

Расход сжигаемого топлива должен обеспечивать получение необходимого количество полезной теплоты, а также восполнение тепловых потерь, сопровождающих работу теплогенерирующей установки. Полезно используемая теплота в котельной установке Q_1 идет на подогрев воды, ее испарение, получение и перегрев пара. Соотношение, связывающее приход и расход теплоты, носит название *теплового баланса*.

Тепловой баланс составляется на 1 кг твердого или жидкого топлива, на 1 м^3 газообразного топлива или в процентах от введенной теплоты.

Суммарное количество введенной в топку теплоты называется располагаемой теплотой $Q_р^р$ и соответственно включает в себя:

- $Q_н^р$ – низшую рабочую теплоту сгорания топлива;
- $Q_{ф.т}$ – физическую теплоту, вводимую в теплогенератор с топливом, если топливо предварительно нагревается (мазут);
- $Q_{ф.в}$ – физическую теплоту, вводимую в теплогенератор с воздухом, если нагрев воздуха происходит вне котельного агрегата (воздухоподогреватель);
- $Q_{пар}$ – физическую теплоту, вводимую в теплогенератор с паром, при паровом распылении топлива (паромеханические форсунки).

Следовательно: $Q_р^р = Q_н^р + Q_{ф.т} + Q_{ф.в} + Q_{пар}$.

Расходная часть теплового баланса $Q_{расх}$ включает в себя полезно использованную теплоту Q_1, а также потери теплоты с уходящими топочными газами Q_2, химической Q_3 и механической Q_4 неполнотой сгорания топлива, от наружного охлаждения Q_5, с физической теплотой шлаков Q_6, на аккумуляцию ограждающих конструкций $Q_{ак}$ (при нестационарных условиях работы установки).

Следовательно: $Q_{расх} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{ак}$.

Уравнение теплового баланса имеет вид $Q_р^р = Q_{расх}$.

Разделив каждый член уравнения теплового баланса на $Q_р^р$ и умножив на 100 %, получим другую запись уравнения теплового баланса:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6.$$

3.8. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И РАСХОД ТОПЛИВА ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

Коэффициентом полезного действия брутто $\eta_{бр}$, %, называется отношение полезно используемой теплоты Q_1 к располагаемой $Q_р^р$:

$$\eta_{бр} = (Q_1 / Q_р^р) \cdot 100, \%.$$

Доля полезно используемой теплоты $q_1 = (Q_1 / Q_р^р) \cdot 100, \%$.

Тогда имеем, что $q_1 = \eta_{бр}$.

Следовательно, коэффициент полезного действия брутто

$$\eta_{бр} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \%.$$

При выработке тепловой энергии следует учитывать расход тепловой энергии на собственные нужды $q_{с.н}$ (привод насосов, тягодутьевых устройств, на обдувку, деаэрацию, мазутное хозяйство и т.д.). В связи с этим введено понятие КПД нетто:

$$\eta_{нетто} = \eta_{бр} - q_{с.н}, \%.$$

Натуральный расход топлива $B_н$, кг/с, $м^3$/с, при нормальных условиях сжигания (при t = 0 °С и P = 760 мм рт. ст), в паровом и водогрейном котельном агрегате определяется по формулам:

- для парового теплогенератора

$$B_н = (D\,\Delta i_п) / (Q^р_р\,\eta_{бр}),$$

- для водогрейного теплогенератора

$$B_н = (G\,\Delta i_в) / (Q^р_р\,\eta_{бр}),$$

где D – паропроизводительность теплогенератора, кг/с; $\Delta i_п$ – прирост энтальпии пара и питательной воды, кДж/кг; $Q^р_р$ – располагаемая теплота, кДж/кг, кДж/$м^3$; $\eta_{бр}$ – КПД брутто; G – расход воды через водогрейный котел, кг/с; $\Delta i_в$ – прирост энтальпии горячей и холодной воды, кДж/кг.

При сжигании газа и мазута расчетный расход топлива $B_р$ равен натуральному расходу $B_н$, так как потери теплоты от механической неполноты сгорания q_4 = 0.

3.9. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Работа теплогенерирующей установки сопровождается потерями теплоты, выраженными обычно в долях, %:

$$q_i = (Q_i / Q^р_р) \cdot 100.$$

1. *Потери теплоты с уходящими топочными газами теплогенератора* $q_2 = (Q_2 / Q^р_р) \cdot 100$, %.

В котельной установке это, чаще всего, наибольшая часть тепловых потерь. Потери теплоты с уходящими топочными газами можно понизить за счет:

- снижения объема дымовых топочных газов, путем поддержания требуемого коэффициента избытка воздуха в топке $\alpha_т$ и уменьшения присосов воздуха;
- снижения температуры уходящих топочных газов, для чего применяют хвостовые поверхности нагрева: водяной экономайзер, воздухоподогреватель, контактный теплообменник.

Температура уходящих топочных газов (140…180 °С) считается рентабельной и во многом зависит от состояния внутренней и внешней поверхности нагрева труб котла, экономайзера. Отложение накипи на внутренней поверхности стенок труб котла, а также сажи (летучей золы) на внешней поверхности нагрева существенно ухудшают коэффициент теплопередачи от топочных газов к воде и пару. Увеличение поверхности экономайзера, воздухоподогревателя для более глубокого охлаждения дымовых газов не является целесообразным, так как при этом уменьшается температурный напор и увеличивается металлоемкость.

Повышение температуры уходящих топочных газов может произойти в результате неправильного процесса эксплуатации и сжигания топлива: большой тяги (топливо догорает в кипятильном пучке); наличия неплотности в газовых перегородках (газы напрямую идут по газоходам, не отдавая теплоты трубам), а также при большом гидравлическом сопротивлении внутри труб (за счет отложения накипи и шлама).

2. *Химический недожог* $q_3 = (Q_3 / Q^р_р) \cdot 100$, %.

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива определяются по результатам анализа летучих горючих веществ H_2, CO, CH_4 в уходящих дымовых топочных газах. Причины химической неполноты сгорания: плохое смесеобразование, недостаток воздуха, низкая температура в топке.

3. *Механический недожог* $q_4 = (Q_4 / Q_{\text{р}}^{\text{р}}) \cdot 100$, %.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, характерны для твердого топлива и зависят от доли провала топлива через колосниковую решетку в систему шлакозолоудаления, уноса частичек несгоревшего топлива с дымовыми газами и шлаком, который может оплавить частицу твердого топлива и не дать ей сгореть.

4. *Потери теплоты от наружного охлаждения ограждающих конструкций* $q_5 = (Q_5 / Q_{\text{р}}^{\text{р}}) \cdot 100$, %.

Они возникают ввиду разности температуры наружной поверхности теплогенератора и окружающего наружного воздуха. Они зависят от качества изолирующих материалов, их толщины. Для поддержания q_5 в заданных пределах необходимо чтобы температура наружной поверхности теплогенератора – его обмуровки, не превышала 50 °С.

Потери теплоты q_5 уменьшаются по ходу движения топочных газов по газовому тракту, поэтому в теплогенераторе введено понятие коэффициента сохранения теплоты $\varphi = 1 - 0{,}01 q_5$.

5. *Потери с физической теплотой шлака* $q_6 = (Q_6 / Q_{\text{р}}^{\text{р}}) \cdot 100$, %.

Они возникают за счет высокой температуры шлаков около 650 °С и характерны только при сжигании твердого топлива.

Таблицы расчета теплового баланса, тепловых потерь, коэффициента полезного действия брутто, натурального, расчетного и условного расхода топлива теплогенератора приведены в [10, 11].

3.10. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

Основные мероприятия по энергосбережению в теплогенерирующих установках включают в себя: увеличение $\eta_{\text{бр}}$ теплогенерирующих установок, экономию топлива, снижение потерь теплоты и качественную подготовку воды для питания котлов и подпитки тепловой сети:

1. Перевод котельных агрегатов с твердого топлива на газообразное позволяет экономить до 12 % сжигаемого топлива.

2. Работа по режимной карте, температурному графику, с наименьшим коэффициентом избытка воздуха: 1,05…1,1 – для природного газа; 1,1…1,15 – для мазута; 1,4…1,8 – для твердого топлива.

3. Автоматизация процессов горения топлива и питания котельных агрегатов водой обеспечивает экономию топлива до 1,7 %.

4. Снижение температуры уходящих топочных газов за счет установки хвостовых утилизационных поверхностей нагрева (экономайзера, воздухоподогревателя, контактного теплообменника). Утилизация теплоты уходящих газов позволяет экономить до 15 % топлива.

5. Снижение присосов в топку и газоходы котельных агрегатов за счет плотной и качественной обмуровки. Снижение присоса воздуха на 0,1 позволяет экономить до 0,5 % сжигаемого топлива и до 20 % электроэнергии на привод дымососа за счет снижения объема уходящих топочных газов.

6. Установка обдувочных аппаратов для очистки внешних поверхностей нагрева кипятильного пучка или конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов от летучей золы и сажистых отложений позволяет экономить до 1,5 % сжигаемого топлива.

7. Снижение накипи с внутренней поверхности нагрева радиационных и конвективных труб достигается умягчением питательной воды. Устранение накипи осуществляется и при ремонте котла – химическим способом или щелочной промывкой, в процессе последовательного разрыхления накипи, промывкой водой от шлама и механической очисткой. Наличие каждого миллиметра накипи вызывает перерасход топлива до 2 % в зависимости от качества котловой и питательной воды.

8. Проведение режимно-наладочных испытаний котельных агрегатов, выбор оптимальных режимов работы основного и вспомогательного оборудования, составление режимной карты для обслуживающего персонала, разработка рекомендаций, направленных на повышение экономичности

работы котельной установки позволяет экономить топливо в размере 3…5 %.

3.11. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОТЛОВ

Эксплуатационные испытания котельных агрегатов разделяют на последовательное проведение пусконаладочных работ и приемочных испытаний, режимно-наладочных и контрольно-балансовых работ.

Пусконаладочные работы выполняются сразу после монтажа оборудования. В объем пусконаладочных работ входит комплексное опробование всех элементов котельной установки, включая горелки, тягодутьевые установки и хвостовые поверхности нагрева с целью проверки надежности и безопасности их работы, а также достижения проектных параметров. Пусконаладочные работы выполняются специализированными организациями в соответствии с хозяйственными договорами, заключенными с предприятиями.

Инженерно-технический персонал наладочной организации должен пройти обучение, сдать экзамен квалифицированной комиссии (инспектору Ростехнадзора) и иметь допуск на выполнение работ. Результаты экзамена оформляются протоколом с выдачей удостоверения, дающего право на выполнение наладочных работ. Повторной проверке знаний инженерно-технические работники подвергаются 1 раз в 3 года, а рабочие ежегодно.

По результатам проведения наладочных работ составляется технический отчет, который является основным документом, характеризующим объем выполненных работ и их эффективность. Опыт работы различных наладочных организаций показал, что затраты, связанные с выполнением наладочных работ, окупаются в течение нескольких месяцев. Сравнительные испытания и расчеты показывают, что в результате выполнения наладочных работ достигается экономия топлива в размере 3…5 %. Однако на практике проведению наладочных работ для отопительных котельных уделяется еще мало внимания, в связи с чем, возможная экономия топлива не реализуется.

Приемочные испытания котельных агрегатов выполняются для проверки соответствия экономических показателей оборудования гарантийным показателям завода-изготовителя.

Режимно-наладочные испытания котельных агрегатов выполняются для выбора оптимальных режимов работы основного и вспомогательного оборудования, составления режимной карты для обслуживающего персонала, разработки рекомендаций, направленных на повышение экономичности работы котельной установки. Режимно-наладочные испытания выполняются после окончания пусконаладочных работ и освоения персоналом методов надежной и безопасной эксплуатации оборудования. При режимной наладке котельной установки производятся замеры расходов, скоростей, давления сжигаемого топлива, температуры и состава продуктов горения и других параметров, характеризующих физические процессы.

После испытаний и обработки опытных данных рассчитываются показатели котельной установки, характеризующие экономичность сжигания топлива, интенсивность работы топки и поверхностей нагрева, аэродинамическое сопротивление газового тракта. Выполняется целый ряд теплотехнических расчетов, характеризующих топливо и продукты сгорания, определяются коэффициенты избытка воздуха и присосы воздуха в газоходы котла, составляется тепловой баланс котельного агрегата с определением тепловых потерь и КПД. Наладочные испытания обычно проводятся по II классу точности с определением КПД котельной установки с точностью до ± 2 %.

Основные этапы режимно-наладочных испытаний котлов:

- ознакомление с работой и с проектными данными установки;
- составление программы и методики испытаний;
- проведение подготовительных и пробных работ для проверки работы оборудования и контрольно-измерительных приборов;
- проведение основных программных работ, обработка результатов измерений и составление сводных таблиц и графиков;

• составление технического отчета, режимных карт и мероприятий, направленных на повышение экономичности установки.

Контрольно-балансовые испытания котельных агрегатов выполняются для проверки работы установки в эксплуатационных условиях с целью контроля основных показателей и качества работы эксплуатационного персонала. Контрольно-балансовые испытания следует производить систематически после каждого капитального ремонта или внесения конструктивных изменений в отдельные узлы оборудования.

Режимная карта водогрейного котла на газообразном топливе включает: расход топлива; давление газа и воздуха перед горелками; содержание за котлом RO_2 и O_2; температуру уходящих газов; разрежение в топке и за котлом. Указанные показатели обычно приводятся при различной тепловой мощности котла (40, 60, 90, 100 % мощности).

Титульный лист режимной карты водогрейного котла приведен ниже, а сама режимная карта – в табл. 3.1. При изменении теплоты сгорания топлива (природного газа) более чем на 10 %, а также после капитального ремонта, реконструкции или отклонения рабочих параметров от нормальных значений необходимо проведение повторных испытаний котельного агрегата для корректировки режимной карты.

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер _____
"____" _____ 200 ___ г.

РЕЖИМНАЯ КАРТА

водогрейного котельного агрегата типа _____, установленного в котельной _____ рег. № _____ ст. № _____, номинальная мощность _____,
разрешенное рабочее давление _____,
топливо (природный газ), поставляемый _____
газосбытовой организацией,
объемная низшая теплота сгорания _____кДж/нм³,
горелки типа _____, шт. _____

Таблица 3.1.

№п/п	№поз.	Наименование показателей		Обозначение	Единица измерения
1	2	3		4	5
1	1.1	**1. ЗАДАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ** Мощность котельного агрегата		$Q_ф$	МВт
2	1.2	Температура воды	на входе в котлоагрегат	$t_{вх}$	°С
3	1.3		на выходе из котлоагрегата	$t_{вых}$	°С
4	1.4	Избыточное давление	на входе в котлоагрегат	$P_{вх}$	кгс/см²
5	1.5		на выходе из котлоагрегата	$P_{вых}$	кгс/см²
6	1.6	Массовый расход воды через котлоагрегат		$G_к$	т/ч
7	2.1	**2. ОПЕРАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ** Количество работающих горелок		n	шт.
8	2.2	Режим работы		№	–
9	2.3	Избыточное давление газа	на котлоагрегат (за регулят.)	$P_{гк}$	кПа
10	2.4		перед горелкой № 1	$P_{г1}$	кПа
11	2.5		– " – № 2	$P_{г2}$	кПа
12	2.6	Избыточное давление воздуха	за вентилятором	$P_{вент}$	кПа
13	2.7		перед горелкой № 1	$P_{в1}$	кПа
14	2.8		– " – № 2	$P_{в2}$	кПа
15	2.9	Разрежение в топке		$H_т$	кПа
		3. КОНТРОЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ			

16	3.1	Компоненты уходящих газов (по объему)	диоксид углерода	CO_2	%
17	3.2		кислород	O_2	%
18	3.3		водород	H_2	%
19	3.4		метан	CH_4	%
20	3.5		оксид углерода	CO	%
21	3.6	Температура уходящих газов за котлом		$\vartheta_{ух}$	°C
22	3.7	Коэффициент избытка воздуха за котлом		$\alpha_{ух}$	–
23	3.8	Разрежение за котлом (или наддув)		$H_к$	кПа
		4. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА			
24	4.1	Потери теплоты	с уходящими газами	q_2	%
25	4.2		от хим. неполноты сгорания	q_3	%
26	4.3		в окружающую среду	q_5	%
27	4.4	Сумма потерь теплоты		Σq	%
		5. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ (ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ)			
28	5.1	Коэффициент полезного действия, брутто		$\eta_{брутто}$	%
29	5.2	Массовый расход топлива – газа		$B_г$	нм³/ч
30	5.3	Удельный объемный расход газа		$B_{уд}$	нм³/МВт
31	5.4	Удельный расход условного топлива		$B_{усл}$	кг/МВт

Карту составил: инженер наладчик /……./ «___» _____ 200__ г. Роспись

4. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В КОТЕЛЬНЫХ И СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ КОТЕЛЬНЫХ

Тепловая схема представляет собой графическое изображение оборудования котельной, соединяемого линиями различных трубопроводов. В *принципиальной* тепловой схеме основное оборудование и трубопроводы показывают условно, не учитывая их количество и расположение. *Развернутая* тепловая схема содержит все оборудование, трубопроводы и арматуру. На *рабочей, или монтажной,* схеме показываются все отметки расположения оборудования и трубопроводов, их уклоны, размеры, марка арматуры, тип креплений. Развернутую тепловую схему составляют после разработки и расчета принципиальной тепловой схемы, затем определяют тепловую производительность котельной, тип теплогенераторов и их необходимое количество.

По характеру тепловых нагрузок котельные подразделяются на производственные, производственно-отопительные и отопительные.

1. *Производственные котельные* – предназначены для получения пара или горячей воды, используемых в технологических процессах предприятий, заводов и фабрик. Для технологических процессов и систем теплоснабжения производственных корпусов и административных зданий отпуск пара зависит от характера производства, количества смен работы, времени года, расхода пара на собственные нужды, потерь конденсата и энергоносителя и других причин. Производственные котельные установки до 58 МВт обычно проектируются с паровыми котлами, а при больших технологических нагрузках и систем теплоснабжения могут включать как паровые, так и водогрейные агрегаты.

2. *Производственно-отопительные котельные* – предназначены для обеспечения тепловой энергией технологических потребителей предприятий, а также систем теплоснабжения промышленных, общественных и жилых зданий и сооружений. При общей тепловой нагрузке котельной менее 58 МВт рекомендуется устанавливать только паровые котлы одинаковой тепловой мощности, и в этом случае горячая вода теплосети подготавливается в паровых сетевых подогревателях. В более мощных котельных целесообразно устанавливать паровые котлы для получения пара для технологических нужд, а также водогрейные котлы (работающие по самостоя-

тельному контуру) для получения горячей воды на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение.

Для технологических целей требуется обычно сухой насыщенный пар давлением 0,6…1,2 МПа, потребление которого зависит от мощности и режима работы предприятия. В летнее время расход пара на производственные нужды обычно уменьшается, что обусловлено повышением температуры исходного сырья, воды, воздуха, используемых в технологическом процессе, а также снижением тепловых потерь в окружающую среду от ограждающих конструкций теплотехнического оборудования.

В нижеприведенных расчетах тепловых схем технологическая нагрузка условно принята с коэффициентами 0,8…0,9 в зимнем режиме и 0,7…0,8 в летнем режиме от максимальной технологической нагрузки $Q_{тн}$ в максимально-зимнем режиме.

Расход теплоты на отопление и вентиляцию $Q_{ов}$ зависит от температуры наружного воздуха $t_{нв}$, а потребление теплоты на горячее водоснабжение $Q_{гв}$ – от суточного графика (максимум расхода утром и вечером) и от дня недели (в последние дни недели расход увеличивается в два раза).

Годовой график нагрузок строится путем сложения годовых нагрузок отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, технологического производства, и суточная неравномерность потребления теплоты при этом не учитывается. В этом случае для каждого конкретного города выстраивается температурный график регулирования температуры воды в подающей и обратной магистралях теплосети в зависимости от наружной температуры воздуха.

При расчетной температуре наружного воздуха $t_{нв}$ для максимально-зимнего режима (холодной пятидневки) температура воды в подающем и обратном трубопроводах теплосети принимается максимальной (соответственно +150 и +70 °С). При температуре наружного воздуха, отличной от расчетной, температура воды в подающем трубопроводе регулируется регулятором температуры.

Продолжительность отопительного периода и расчетные температуры наружного воздуха наиболее холодной пятидневки $t_{о}^{р}$, средняя наиболее холодного месяца $t_{х}^{ср}$, средняя отопительного сезона $t_{о}^{ср}$ для конкретного города принимают в соответствии со СНиП 23-01–99 [38]. Отопительный период заканчивается (и начинается) при температуре наружного воздуха $t_{л}$ = +8 °С. Температура воздуха в отапливаемом помещении принимается +18 °С. Точка излома температурного графика $t_{изл}$ определяется после построения температурного графика.

Пример построения температурного графика тепловой сети для города с $t_{о}^{р}$ = – 22 °С приведен на рис. 4.1.

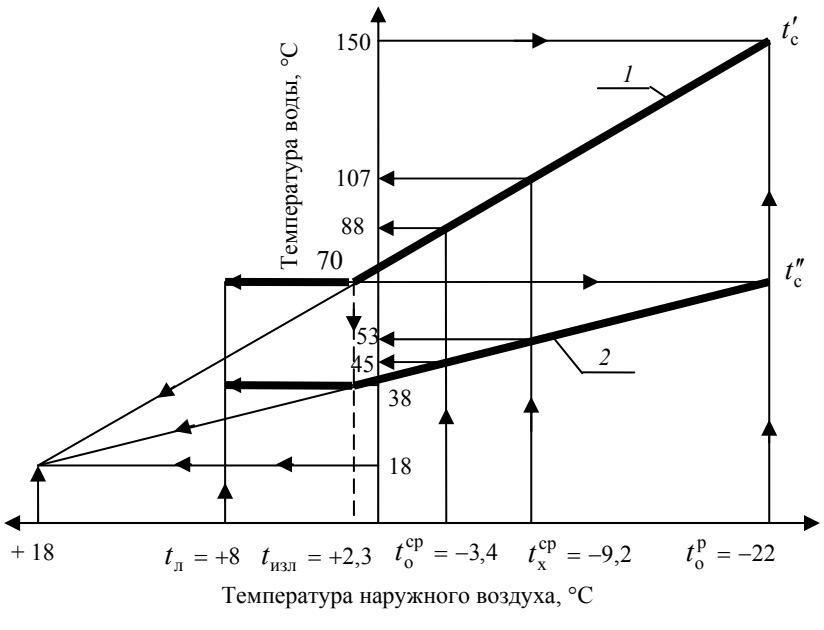


Рис. 4.1. Температурный график тепловой сети:
1, *2* – подающий и обратный трубопроводы

Тепловые нагрузки для расчета и выбора оборудования производственно-отопительной котельной должны определяться для трех характерных режимов: максимально-зимнего (при расчетной температуре наружного воздуха наиболее холодной пятидневки), наиболее холодного месяца и летнего (расчетные параметры А) [38].

При построении годового графика нагрузка отопления и вентиляции $Q_{ов}$ (кВт) рассчитывается для заданных температур наружного воздуха $t_{нв}$:

$$Q_{ов} = [\, Q^{р}_{ов}\,(t_{вн} - t_{нв})] \,/\, (t_{вн} - t^{р}_{о}),$$

где $Q^{р}_{ов}$ – расчетная нагрузка отопления и вентиляции в максимально-зимнем режиме, кВт; $t_{вн}$ – температура воздуха в отапливаемом помещении (в расчетах принимается +18 °С); $t^{р}_{о}$ – расчетная температура наружного воздуха отопительного периода (для нижеприведенных расчетных тепловых схем в качестве примера принимается –22 °С).

Расход сетевой воды для отопления и вентиляции в зимнем отопительном режиме составляет

$$G_{ов} = Q_{о.в} \,/\, [4{,}19(\, t'_{с} \,-\, t''_{с}\,)],$$

где $t'_{с}$, $t''_{с}$ – температура воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах теплосети, °С.

Нагрузка горячего водоснабжения (при построении годового графика) принимается постоянной, не зависящей от температуры наружного воздуха (для отопительного и летнего периода) и составляет:

$$Q_{гв} \;=\; G^{потр}_{гв}\, c_{в}\,(t_{гв} - t_{исх}),$$

где $G^{потр}_{гв}$ – расход горячей воды у потребителя, кг/с; $c_{в}$ – теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/(кг·К); $t_{гв}$ – температура горячей воды в водоразборном кране у потребителя, принимается +60...70 °С; $t_{исх}$ – температура исходной воды, поступающей в тепловой пункт из водопровода, принимается зимой +5, а летом +15 °С;

Однако в летнее время расчетная нагрузка на горячее водоснабжение $Q^{л}_{гв}$ меньше, чем в зимний период $Q^{з}_{гв}$, так как расчетная температура исходной воды из водопровода $t_{исх}$ меняется, а температура воды, поступающей на горячее водоснабжение $t_{гв}$, остается постоянной. Следовательно, отношение нагрузок составит $Q^{л}_{гв} / Q^{з}_{гв} = 0{,}82$.

Подогреватели системы горячего водоснабжения могут быть подключены по независимой (параллельной) схеме включения теплообменников горячего водоснабжения и системы отопления, а также по зависимой (последовательной или смешанной) схеме. Основное преимущество последовательной и смешанной схем теплового пункта заключается в более глубоком охлаждении обратной сетевой воды, что обеспечивает снижение ее расчетных расходов. Однако в рассматриваемых тепловых схемах расчет выполнен для независимой (параллельной) схемы включения теплообменников.

Если в системе теплоснабжения не используются аккумулирующие емкости (обычно закрытые системы теплоснабжения), то за расчетный расход теплоты на горячее водоснабжение принимают максимальный часовой (пиковый), а расход сетевой воды на горячее водоснабжение $Q^{с}_{гв}$ (при параллельном включении теплообменников горячего водоснабжения) составит: $G^{с}_{гв} = Q^{с}_{гв} \,/\, [4{,}19\cdot(\, t'_{с} \,-\, t''_{с}\,)]$.

Если в системе теплоснабжения установлены баки-аккумуляторы (обычно открытые системы теплоснабжения), то за расчетный расход теп-

лоты на горячее водоснабжение принимают средний часовой за сутки, а расход воды, поступающей к потребителю $G_{гв}^{потр}$ на горячее водоснабжение, является расчетным постоянным параметром, не зависящим от сезона и режима работы, и определяется исходя из нагрузки горячего водоснабжения $Q_{гв}$: $G_{гв}^{потр} = Q_{гв} / [4{,}19 \cdot (t_{гв} - t_{исх})]$.

3. *Отопительные котельные* предназначены только для обеспечения нагрузки на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение коммунально-бытовых потребителей. Отопительные котельные установки имеют паровые или водогрейные котлы. Разработаны и применяются в основном три схемы котельных: отопительная с паровыми котлами, теплофикационная и отопительная с водогрейными котлами.

Теплофикационная котельная имеет подогреватель-бойлер, устанавливаемый над паровым котлом, на высоте 1,5…2 м от горизонтальной оси верхнего барабана парового котла. Пар из верхнего барабана поступает непосредственно в бойлер, где отдает теплоту сетевой воде, а образующийся конденсат самотеком стекает в нижний барабан котла. Малый расход питательной воды и постоянный возврат конденсата из бойлера позволяют резко уменьшить процент непрерывной продувки и расход продувочной воды. В результате отпадает необходимость в установке сепаратора (расширителя) непрерывной продувки, а вся продувка производится непосредственно в барботер.

Особенностью теплофикационной котельной является, наряду с малым расходом воды на питание парового котла, возможное закипание воды при прохождении через чугунный водяной экономайзер, что недопустимо, так как это будет сопровождаться гидравлическими ударами, которые могут повредить экономайзер. Поэтому через экономайзер прокачивается не питательная вода, а вода тепловой сети. Теплофикационный экономайзер в этом случае и определяет название «теплофикационная котельная» и при одинаковых прочих условиях (например, при одинаковом количестве сжигаемого топлива) через них будет проходить воды примерно в десятки раз больше, чем через питательные экономайзеры. Сетевую воду в этих случаях следует пропускать по трубам экономайзера параллельными потоками.

Отопительная котельная с паровыми котлами работает так же, как и производственно-отопительная, за исключением нагрузки на технологическое производство. Установки включают паровые водонагреватели (или бойлеры) для подготовки сетевой воды.

Расчет тепловых нагрузок и выбор оборудования в теплофикационных и отопительных котельных с паровыми котлами должны определяться для трех характерных режимов: максимально-зимнего, наиболее холодного месяца и летнего.

В *отопительных котельных с водогрейными котлами* подогрев сетевой воды осуществляют непосредственно в водогрейных котельных агрегатах. Благодаря этому капитальные затраты ниже, чем в отопительных котельных с паровыми котельными агрегатами, а тепловые схемы проще. Однако отсутствие пара усложняет процессы нагрева мазута, требуется вакуумная деаэрация воды. Особенности работы водогрейных котельных агрегатов описаны в [10, 11].

Для определения расхода воды через котел, характеристик вспомогательного оборудования водогрейные котельные агрегаты рассчитываются на пять режимов [2, 39]: максимально-зимний – при температуре наружного воздуха в наиболее холодную пятидневку; наиболее холодного месяца – при температуре наружного воздуха в холодном месяце; средней температуры за отопительный период; в точке излома температурного графика; летний.

Результаты расчета пяти режимов тепловой схемы позволяют определить рациональное количество, единичную производительность и другие характеристики оборудования котельной. Значительное влияние на выбор тепловой схемы и оборудования котельной оказывает тип системы теплоснабжения (открытая или закрытая) и соотношение нагрузок на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение.

Расчет принципиальной тепловой схемы состоит из нескольких этапов и производится для характерных режимов работы. Для каждого элемента

тепловой схемы составляется уравнение теплового и материального баланса, решение которого позволяет определить неизвестные расходы, температуры и энтальпии теплоносителей. Сложность тепловых схем и большое количество единиц оборудования, входящих в схему, расчет нескольких режимов работы приводят к необходимости задаваться некоторыми параметрами (расход теплоты на собственные нужды, потери в тепловых сетях и т.д.) с последующим их уточнением.

Подбор оборудования котельной производится по максимальному значению параметров из расчетных режимов: минимально-зимнего; наиболее холодного месяца; среднего за отопительный период; в точке излома температурного графика; летнего. Выполняя энергосберегающие мероприятия и теплотехнический расчет тепловой схемы, возможно и необходимо разработать и принять такую тепловую схему котельной, в которой в конечном итоге будет минимальная себестоимость тепловой энергии и наименьший расход топлива [12].

4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

По способу подачи воды системы теплоснабжения разделяются на закрытые и открытые, двух- и четырехтрубные и другие.

В *закрытых* системах теплоснабжения вода из теплосети не отбирается, а используется только как теплоноситель в водо-водяных теплообменниках для подогрева холодной водопроводной воды, поступающей в систему горячего водоснабжения.

Главные преимущества закрытой системы теплоснабжения: стабильное качество горячей воды и простота контроля плотности системы. Основные недостатки – сложность оборудования и эксплуатации абонентских вводов горячего водоснабжения; коррозия установок из-за поступления в них водопроводной воды, а также образование накипи и шлама в трубопроводах горячего водоснабжения.

В *открытых* системах теплоснабжения вода забирается непосредственно из тепловой сети и подается в систему горячего водоснабжения. Котельная установка в этом случае имеет дополнительные элементы: бак-аккумулятор для создания запаса воды на горячее водоснабжение в часы максимального потребления, перекачивающие насосы и др.

Основные преимущества открытых систем теплоснабжения: простые и недорогие абонентские вводы горячего водоснабжения, их долговечность; возможность использования однотрубных линий.

Недостатки открытых систем теплоснабжения: усложнение и удорожание оборудования водоподготовки и подпиточных устройств; нестабильность воды, поступающей на горячее водоснабжение по санитарным показателям (цветность, запах); усложнение контроля утечек теплоносителя и герметичности системы.

Двухтрубные системы теплоснабжения имеют общий подающий трубопровод горячей воды для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения и общий обратный трубопровод и применяются в основном при тепловых нагрузках более 58 МВт.

Четырехтрубные системы теплоснабжения применяются при нагрузках до 58 МВт и при небольшом радиусе расположения потребителей. Котельная имеет две водонагревательные установки: одна – для подогрева воды системы отопления и вентиляции, другая – для подогрева воды системы горячего водоснабжения.

Тепловые потребители могут присоединяться непосредственно к тепловым сетям через центральные тепловые пункты (ЦТП) или индивидуальные тепловые пункты (абонентские вводы), в которых осуществляется приготовление и подача горячей воды нужных параметров для целей отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.

В закрытых системах теплоснабжения подача холодной воды на *горячее водоснабжение* осуществляется через водо-водяные теплообменники, в которых водопроводная вода подогревается до температуры +60...65 °С. В открытых системах теплоснабжения вода на горячее водоснабжение отбирается непосредственно из тепловой сети.

Системы отопления присоединяют к теплосети по одной из схем:

- независимой – нагрев воды осуществляется в теплообменнике;

- зависимой, при непосредственном подключении к теплосети;
- с подключением через элеватор, в котором смешивается вода из подающего и обратного трубопроводов и достигается нужная температура воды, идущей на отопление;
- с установкой подмешивающего насоса на перемычке между подающей и обратной линией.

Тепловые нагрузки отопления, вентиляции, горячего водоснабжения в теплосетях регулируют централизованно с помощью изменения:

- температуры воды в подающем трубопроводе теплосети без регулирования расхода воды (*качественное регулирование*);
- расхода сетевой воды при сохранении постоянной температуры воды в подающем трубопроводе (*количественное регулирование*);
- температуры воды в подающем трубопроводе теплосети с соответствующим изменением расхода воды (*качественно-количественное регулирование*).

Для корректирования регулирования (центрального) в тепловых сетях проводится дополнительно групповое местное регулирование на центральных тепловых пунктах, тепловых пунктах зданий, а также местное, индивидуальное регулирование на отдельных приборах. В рассматриваемых тепловых схемах котельных в тепловых сетях принято качественное регулирование тепловой нагрузки.

Потребителей теплоты по надежности теплоснабжения делят на потребителей первой и второй категорий. К первой категории относятся потребители, нарушение теплоснабжения которых связано с опасностью для жизни людей или со значительным ущербом народному хозяйству, ко второй категории – все остальные потребители [39].

Котельные по надежности отпуска теплоты потребителям разделяются также на две категории. К первой категории относятся котельные, являющиеся единственным источником теплоты системы теплоснабжения и обеспечивающие потребителей первой категории, не имеющих индивидуальных источников теплоты, ко второй – все остальные котельные [39].

4.3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ С ПАРОВЫМИ КОТЕЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Для технологических процессов и нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения производственных корпусов и административных зданий отпуск пара зависит от характера производства, количества смен работы, времени года, количества возвращаемого конденсата и его температуры, расхода пара на собственные нужды, потерь энергоносителя и других причин.

Закрытая двухтрубная система теплоснабжения. По этой схеме сетевая вода из подающего трубопровода поступает в подогреватели системы горячего водоснабжения, где охлаждается и возвращается в обратный трубопровод тепловой сети. Холодная вода из водопровода нагревается в подогревателе и поступает к водоразборным кранам потребителей горячего водоснабжения.

Отсутствие отбора воды из теплосети значительно уменьшает расход подпиточной воды, проходящей предварительно полную водоподготовку и идущей для восполнения потерь воды (теплоносителя) в тепловой сети. Поэтому экономически целесообразно не устанавливать дополнительный узел водоподготовки для подпиточной воды, а готовить ее в системе химводоподготовки (ХВО) питательной воды котельных агрегатов, несмотря на то, что стоимость питательной воды выше, поскольку она проходит две ступени умягчения, в то время как для подпиточной воды теплосети достаточно одной ступени. Расход подпиточной воды $G_{\text{подп}}$ для закрытых систем теплоснабжения принимается в размере 1,5…2 % от расхода сетевой воды.

На рис. 4.2 приведена принципиальная тепловая схема производственно-отопительной котельной для закрытой двухтрубной системы теплоснабжения с независимой (параллельной) схемой подключения к тепловой сети потребителей горячего водоснабжения ГВ, отопления и вентиляции ОВ. Сырая вода поступает из водопровода с давлением 1…4 МПа, а если напор воды недостаточен, предусматривается насос исходной воды НИ,

которым создается напор, необходимый для преодоления гидравлических сопротивлений в подогревателях, фильтрах ХВО и трубопроводах. Температура исходной воды $t_{исх}$ принимается + 15 °С летом и + 5 °С зимой, а расход $G_{исх}$ должен обеспечивать питание котельных агрегатов КА, подпитку тепловой сети, компенсацию расхода пара на собственные нужды и потерь теплоносителя в тепловой схеме, тепловых сетях и у потребителя.

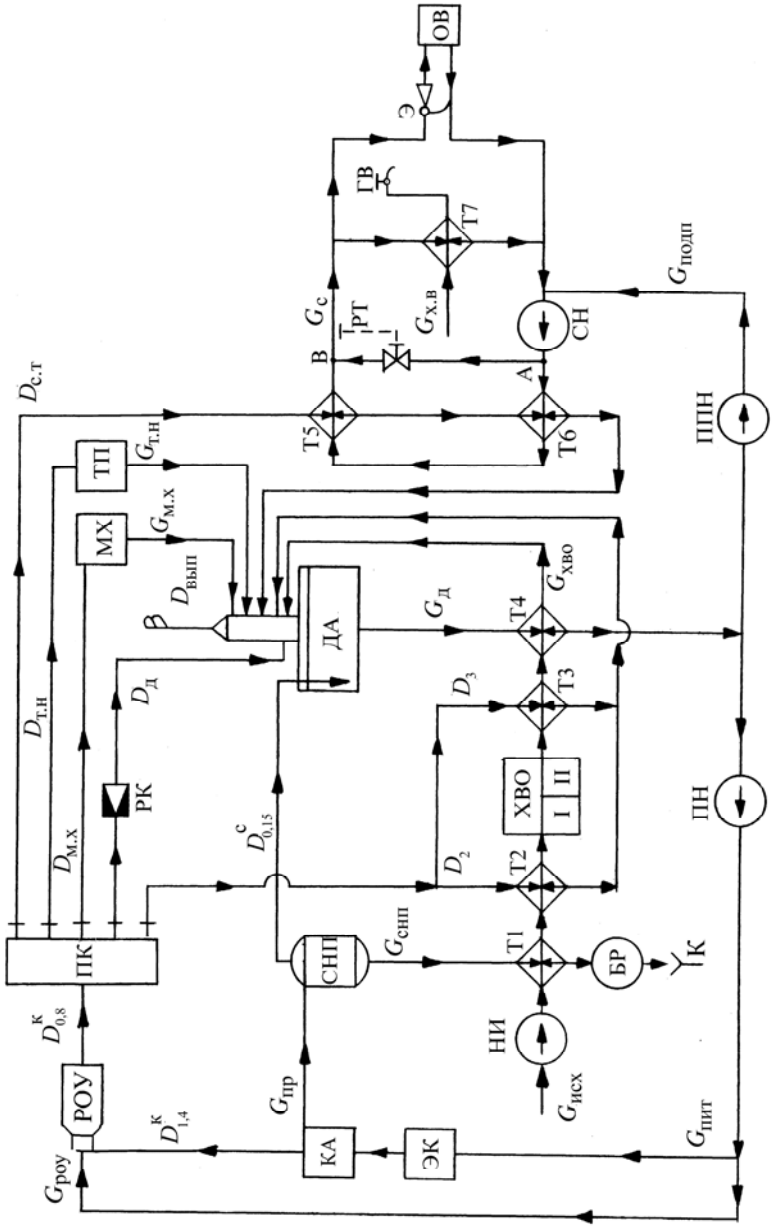


Рис. 4.2. Принципиальная тепловая схема производственно-отопительной котельной с закрытой двухтрубной системой теплоснабжения

Вода нагревается в охладителе непрерывной продувки Т1 и в паровом водоподогревателе Т2 до температуры + 25...35 °С. Указанный диапазон температур исключает конденсации водяных паров из воздуха на внешней поверхности трубопроводов и оборудования водоподготовки и обеспечивает стабильную работу катионита. Часть исходной, сырой воды используется на собственные нужды химводоподготовки (взрыхление, регенерация, отмывка и др.) и составляет 15…20 % расхода $G_{хво}$, или $G_{исх} = 1{,}2\ G_{хво}$. Далее вода проходит через водоподготовительную установку ХВО**,** где из воды удаляются соли жесткости кальция и магния, а температура воды при этом снижается на 2…3 °С.

Затем умягченная вода нагревается в паровом водоподогревателе Т3 и водо-водяном подогревателе Т4 до температуры + 60…90 °С и направляется в верхнюю часть колонки деаэратора, куда также поступает конденсат от всех паровых подогревателей и от технологического производства ТП. В нижнюю часть колонки деаэратора и в водный объем питательного бака ДА (через барботажное устройство) подается пар давлением 0,12 МПа для

подогрева умягченной воды до температуры кипения + 102…104 °С. При использовании деаэратора атмосферного типа (ДСА или ДА) рекомендуемая температура воды на входе в деаэратор + 60…90 °С, а при использовании вакуумного деаэратора + 65…70 °С. Чем ниже температура воды и конденсата, поступающих в деаэратор, тем больше расход пара на деаэрацию $D_д$.

Выделившиеся из воды газы O_2 и CO_2 вместе с паром $D_{вып}$ удаляются в атмосферу или поступают в охладитель выпара (на схеме не показан). Теплота выпара используется для нагрева умягченной воды $G_{хво}$, поступающей в деаэратор; при этом газы из охладителя выпара уходят в атмосферу, а конденсат – в дренаж. Удельный расход выпара d из деаэратора составляет 0,002 кг пара/кг воды.

Вместимость питательного бака-деаэратора $G_д$ рассчитывается исходя из 1…2-часового запаса воды, достаточного для обеспечения питания всех котлов в случае прекращения подачи конденсата или воды. Питательный бак-деаэратор ДА должен иметь тепловую изоляцию, а геодезическую высоту иметь не менее 8…10 м для создания подпора во всасывающем патрубке питательного ПН и подпиточного насоса ППН. При несоблюдении этого условия перед питательным насосом или внутри него произойдет изменение (снижение) давления и парообразование: это явление называется *кавитацией*. Насос будет работать на двухфазной среде, а сплошность потока нарушится, что приведет к уменьшению производительности и напора насоса; кроме того, появятся гидравлические удары и осложнения в работе.

Из бака деаэратора ДА питательная вода с температурой + 102 °С поступает в теплообменник Т4, где охлаждается до + 70…90 °С при сжигании природного газа или малосернистого мазута и до + 90…100 °С – сернистого или высокосернистого мазута. Это условие необходимо для предотвращения низкотемпературной коррозии внешних поверхностей нагрева водяного экономайзера (т.е. конденсации водяных паров из топочных газов на внешней поверхности труб экономайзера).

Одна (большая) часть питательной воды $G_{пит}$ питательным насосом ПН нагнетается в водяной экономайзер ЭК, где нагревается за счет теплоты уходящих топочных газов. Другая (меньшая) часть воды $G_{под}$ подпиточным насосом ППН нагнетается в обратный трубопровод теплосети, перед сетевым насосом СН, для компенсации потерь теплоносителя в тепловых сетях. Расход подпиточной воды для закрытых систем теплоснабжения принимается равным 1,5…2 % от расхода сетевой воды, т.е. $G_{подп} = 0{,}02\ G_с$.

В водяном экономайзере (некипящего типа) питательная вода нагревается до температуры + 140…160 °С, но не догревается до температуры насыщения на 20…40 °С и по питательной линии поступает в водный объем верхнего барабана парового котельного агрегата КА, где вырабатывается сухой насыщенный (или перегретый) пар. Из КА по паропроводу пар поступает в редукционно-охладительную установку РОУ, где путем дросселирования (редуцирования) давление пара снижается, например, с 1,4 до 0,8 МПа или до давления, необходимого для технологического производства (0,7…1,2 МПа). В результате дросселирования (при i = const) получается перегретый пар, и поэтому в РОУ (минуя экономайзер и паровой котел) подается необходимое количество питательной воды $G_{РОУ}$ с температурой + 70…100 °С для охлаждения перегретого пара и получения сухого насыщенного пара.

Далее сухой насыщенный пар $D^к_{0,8}$ поступает в парораспределительный коллектор ПК (гребенку), откуда расходуется на:

- технологическое производство ТП в количестве $D_{тн}$; конденсат возвращается в конденсатный бак (на схеме не показан) или непосредственно в колонку деаэратора, и его количество $G_{тн}$ зависит от процента возврата μ, т.е. $G_{тн} = 0{,}01\ \mu\ D_{тн}$; потери технологического конденсата $G^{пот}_{тн} = D_{тн} - G_{тн}$; если в котельной установлен конденсатный бак, то конденсат из бака подается в колонку деаэратора с помощью конденсатного насоса КН;
- подогреватели сетевой воды Т5, Т6 в количестве $D_{ст}$, где передает теплоту воде теплосети $G_с$, а конденсат ($G_{ст}$ равен $D_{ст}$) после теплообмен-

ников возвращается в колонку деаэратора, так как он не загрязнен и находится под большим давлением, чем давление в деаэраторе;

- собственные нужды котельной в количестве $D_{сн}$ предва-рительно принимаются в размере 7…15 % от потребления пара, т.е. $D_{сн} \approx 0{,}1\ (D_{тн} + D_{ст})$;
- компенсацию потерь пара $D_{пот}$ в тепловой схеме, потерь теплоты подогревателями в окружающую среду и другие неучтенные расходы пара; принимаются в размере 2…3 % от потребления пара, т.е. $D_{пот} = 0{,}03\ (D_{тн} + D_{ст})$.

Такая форма учета потерь пара (и теплоты) упрощает тепловой расчет и позволяет в уравнения теплового баланса оборудования не вводить коэффициент сохранения теплоты η, учитывающий потери от внешнего охлаждения и другие потери.

Предварительно принятые параметры уточняются на заключительном этапе расчета при сопоставлении $D_{сн}$ и полученных в результате расчета расходов пара на собственные нужды $D^{р}_{сн}$. Собственные нужды котельной включают в себя расход пара:

- D_2 – на подогреватель исходной воды Т2 и расход пара D_3 на подогреватель Т3 умягченной воды; конденсат от подогревателей (G_2 равный D_2 и G_3 равный D_3) с температурой + 60…90 °С возвращается в колонку деаэратора;
- $D_д$ – на деаэрацию воды, причем давление пара после редукционного клапана РК снижается до 0,12…0,15 МПа, путем дросселирования (при i = const);
- $D_{мх}$ – на мазутное хозяйство МХ и зависит от расхода, теплоемкости, температуры мазута, горелки, удельного расхода пара на распыление мазута в форсунках и условно можно принять 1…3 % от внешнего потребления пара, т.е. $D_{мх} \approx 0{,}01\ (D_{тн} + D_{ст})$; конденсат от подогревателей мазута в количестве $G_{мх}$, равном $D_{мх}$, в количестве 50…60 % и температурой + 50…80 °С возвращается в колонку деаэратора или конденсатный бак;
- на обдувку внешних поверхностей нагрева труб кипятильного пучка котла и водяного экономайзера, а также на паровые, питательные насосы (в расчете не учитывается и входит в $D_{пот}$).

Из парового котельного агрегата по продувочной линии котловая вода в количестве $G_{пр}$ поступает в сепаратор (расширитель) непрерывной продувки СНП, где происходит снижение давления продувочной воды от рабочего в котельном агрегате до 0,12…0,15 МПа. За счет снижения давления котловая вода с высоким содержанием солей и щелочи в СНП вскипает и разделяется на остаточную воду $G_{снп}$ и пар вторичного вскипания $D^{С}_{0,15}$. Пар из СНП используется в колонке деаэратора ДА, а вода направляется в охладитель выпара Т1, где, отдавая теплоту исходной воде, охлаждается до температуры + 40…60 °С и сбрасывается в барботер БР, а затем в канализационную сеть (дренаж).

Сепаратор непрерывной продувки устанавливают с целью уменьшения потерь теплоты с продувочной водой, а его использование экономически обосновано при расходе продувочной воды $G_{пр} \geq 0{,}14$ кг/с. При $G_{пр} \geq 0{,}28$ кг/с экономически целесообразно использовать не только теплоту, содержащуюся в паре вторичного вскипания, но и теплоту воды $G_{снп}$, удаляемой из сепаратора.

Процент продувки зависит от сухого остатка исходной воды, солесодержания и щелочности котловой воды (зависит от типа КА) и качества питательной воды после водоподготовки или принимается равным 2…10 % от паропроизводительности котельных агрегатов.

Следовательно, полная паропроизводительность котельной установки с учетом расхода пара на технологию, сетевые подогреватели, собственные нужды и потерь теплоты

$$D_к = D_{тн} + D_{ст} + D_{сн} + D_{пот},$$

а суммарные потери пара и конденсата

$$G_{\text{пот}} = G_{\text{тн}}^{\text{пот}} + D_{\text{вып}} + D_{\text{пот}} + G_{\text{снп}} + G_{\text{подп}} + D_{\text{мх}}^{\text{пот}}.$$

Работа тепловой сети. Обратная сетевая вода с температурой + 70 °С (в максимально-зимнем режиме) сетевым насосом СН нагнетается в паровые водоподогреватели Т5 и Т6, где нагревается паром до температуры + 150 °С и поступает в теплосеть в количестве

$$G_{\text{с}}^{'} = (Q_{\text{ов}} + Q_{\text{гв}}) / c_{\text{в}} (t_{\text{с}}' - t_{\text{с}}''),$$

где $Q_{\text{ов}}$ и $Q_{\text{гв}}$ – тепловая нагрузка на отопление, вентиляцию и горя-чее водоснабжение, кВт; $c_{\text{в}} = 4{,}19$ – теплоемкость воды, кДж/(кг · К); $t_{\text{с}}'$, $t_{\text{с}}''$ – соответственно температура сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе, °С.

Температура воды, поступающей в систему отопления и вентиляции потребителя ОВ, регулируется с помощью элеваторного узла Э путем смешивания прямой сетевой воды ($t_{\text{с}}' = + 150$ °С в максимально-зимнем режиме) с обратной из системы отопления ($t_{\text{ов}}'' = + 70$ °С) для получения воды с температурой $t_{\text{ов}}' = + 95$ °С, поступающей в систему отопления ОВ коммунально-бытового потребителя.

Температура воды $t_{\text{гв}}' = + 60$ °С, поступающей в водоразборные краны системы горячего водоснабжения ГВ, регулируется изменением расхода прямой сетевой воды через подогреватели горячего водоснабжения Т7, установленные в тепловом пункте.

При температуре наружного воздуха, отличной от расчетной (холодной пятидневки), температура сетевой воды в подающем трубопроводе регулируется в соответствии с температурным графиком (рис. 4.1) путем перепуска части воды из обратного трубопровода в подающий, минуя сетевые подогреватели Т5 и Т6, по перемычке *AB*, на которой установлен регулятор температуры РТ.

В табл. П1 приведен расчет принципиальной тепловой схемы производственно-отопительной котельной для закрытой двухтрубной системы теплоснабжения с независимой (параллельной) схемой подключения к тепловой сети потребителей горячего водоснабжения, отопления и вентиляции и работе на мазуте. При работе на природном газе отсутствует нагрузка на мазутное хозяйство $D_{\text{мх}}$. В табл. П1 расчетные формулы в графе 4 выполнены для максимально-зимнего режима. Расчет зимнего и летнего режимов работы производится аналогично.

По результатам расчета принципиальной тепловой схемы производственно-отопительной котельной (табл. П1) определяют суммарную максимальную потребность в паре $D_{1,4}^{\text{к}}$, выбирают тип котельных агрегатов (Е, ДЕ, ДКВР, КЕ и др.), а число паровых котельных агрегатов рассчитывают по формуле:

$$n = D_{1,4}^{\text{к}} / D_{\text{ном}},$$

где $D_{\text{ном}}$ – номинальная паропроизводительность котельного агрегата (2,5; 4; 6,5; 10, 16, 25, т/ч, и т.д.).

Выполняя энергосберегающие мероприятия и теплотехнический расчет тепловой схемы, возможно и необходимо разработать и принять такую тепловую схему котельной, в которой в конечном итоге будет минимальная себестоимость тепловой энергии и наименьший расход топлива [12].

4.4. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ С ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЕЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Принципиальная тепловая схема отопительной котельной с водогрейными котельными агрегатами для закрытой системы теплоснабжения приведена на рис. 4.3.

Вода из водопровода насосом исходной воды НИ подается в теплообменник Т1, где нагревается до + 25…35 °С и поступает на химводоподго-

товку ХВО. Указанный диапазон температур исключает конденсацию водяных паров из воздуха на внешней поверхности трубопроводов и оборудования водоподготовки и обеспечивает стабильную работу катионита. В процессе химводоочистки (обычно одна ступень умягчения) из воды удаляются накипеобразующие соли жесткости кальция и магния, а температура воды при этом снижается на 2…3 °С.

Умягченная вода нагревается в теплообменнике Т2 до температуры + 60…65 °С и подается в колонку вакуумного деаэратора ВД, в баке которого собирается деаэрированная вода, где дополнительно нагревается до + 70 °С горячей водой из котельного агрегата. В вакуумном деаэраторе создается разрежение 0,03 МПа, которое и обеспечивает вскипание воды при температурах ниже + 100 °С, а именно + 68,7 °С. Разрежение в вакуумном деаэраторе ВД поддерживается водоструйным эжектором ЭЖ или водокольцевым насосом (реже вакуумным), через который циркулирует вода по замкнутому контуру: из бака рабочей воды БРВ насосом НР вода подводится в эжектор ЭЖ. После эжектора вода совместно с откачиваемой паровоздушной смесью и конденсатом обратно возвращается в бак БРВ. Напор воды, эжектирующей смесь, составляет 0,4…0,5 МПа. Выпар (газы и пар) с коррозионно-активными газами выводится из бака БРВ в атмосферу. Теплоту, выносимую с выпаром, в расчетах обычно не учитывают с целью их упрощения и ввиду относительно малого расхода $D_{\text{вып}}$.

Из бака деаэратора ВД вода поступает самотеком в бак деаэрированной подпиточной воды БД, откуда подпиточным насосом ППН подается во всасывающий коллектор сетевых насосов СН. Бак деаэрированной воды БД, как правило, должен размещаться на нулевой отметке котельной, а колонка вакуумного деаэратора ВД устанавливается на отметке 7,5…8 м, что обеспечивает давление в баке деаэрированной воды, равное атмосферному. Атмосферное давление бака БД создает подпор во всасывающем патрубке подпиточного насоса ППН для избежания явления «кавитации». Вакуумный деаэратор ВД и бак деаэрированной воды БД должны иметь тепловую изоляцию.

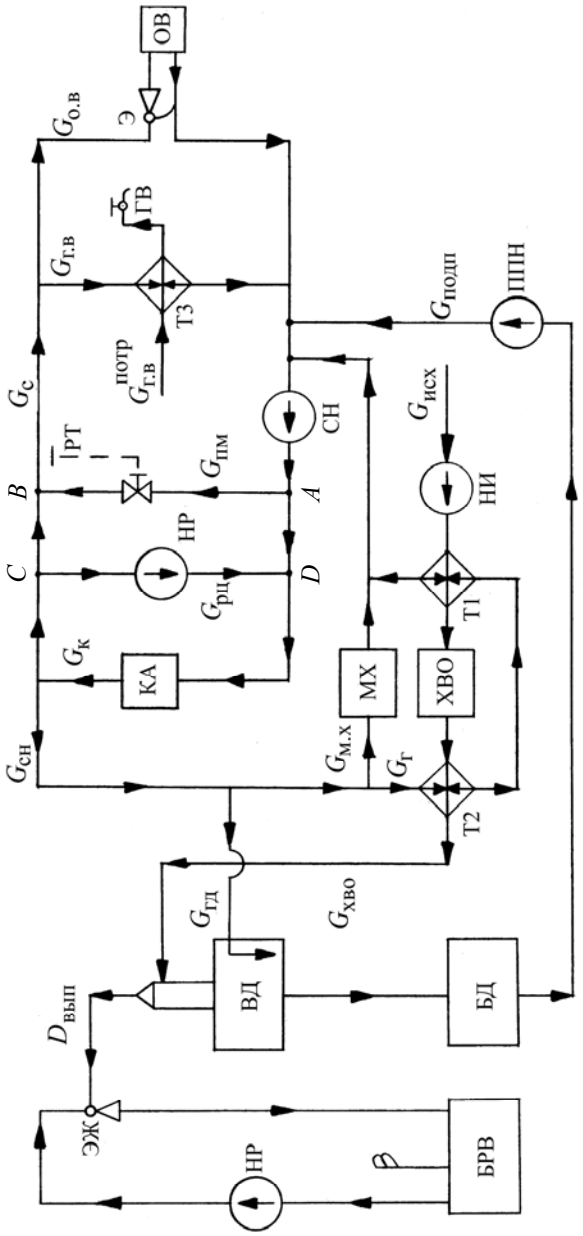


Рис. 4.3. Принципиальная тепловая схема отопительной котельной с закрытой системой теплоснабжения

Расход подпиточной воды $G_{подп}$ принимается в размере 2…2,5 % от расхода сетевой воды $G_с$, что компенсирует утечки воды в тепловой сети и тепловой схеме.

Вода из обратного трубопровода тепловой сети с напором, примерно 0,4 МПа, подводится во всасывающий коллектор сетевых насосов СН. Туда же подаются вода от подпиточного насоса ППН и охлажденная сетевая вода от теплообменников умягченной воды Т2 и исходной воды Т1.

Обратная сетевая вода сетевыми насосами СН нагнетается в водогрейный котельный агрегат КА, где нагревается до температуры + 150 °С и на выходе из котла разделяется на три потока:

1) в тепловую сеть в количестве $G_с$, причем, согласно температурному графику (рис. 4.1), температура воды в подающем трубопроводе регулируется путем перепуска части воды $G_{пм}$ из обратного трубопровода в подающий (минуя котельный агрегат) по подмешивающей перемычке *AB*, на которой установлен регулятор температуры РТ;

2) на рециркуляцию путем подачи рециркуляционным насосом НР расчетного количества уже подогретой в котельном агрегате воды $G_{рц}$ на ввод обратной сетевой воды по линии *CD*;

3) на собственные нужды котельной $G_{сн}$, которые включают расходы горячей воды на: мазутное хозяйство $G_{мх}$ в теплообменниках подогрева мазута МХ; подогрев воды в вакуумном деаэраторе $G_{гд}$; теплообменники Т2 и Т1 для нагрева умягченной и исходной воды $G_г$, а охлажденная вода

от теплообменников поступает во всасывающий коллектор сетевых насосов СН.

Расход воды через котельные агрегаты $G_к$ по условиям их работы принимается постоянным при всех различных режимах: $G_к$ = const. При сжигании природного газа и малосернистого мазута $G_к$ может быть определен для максимального зимнего режима, так как температура воды в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети соответствует номинальным параметрам теплоносителя в котельном агрегате $t''_к = t'_с = +150$ °С, $t'_к = t''_с = +70$ °С, поэтому расходы по линии рециркуляции $G_{рц} = 0$, а по подмешивающей перемычке $G_{пм} = 0$.

При сжигании высокосернистого мазута расход воды через котельные агрегаты определяется из условия температуры воды на входе в котел $t'_к = +110$ °С, а на выходе $t''_к = t'_с = +150$ °С, поэтому для максимального зимнего режима расход воды по линии рециркуляции определяется расчетом, а по подмешивающей перемычке $G_{пм} = 0$.

При работе котельной на природном газе отсутствует нагрузка на мазутное хозяйство $G_{мх}$, а температура воды на входе в котельные агрегаты должна быть не ниже + 70 °С.

Температура воды, поступающей в систему отопления и вентиляции потребителя ОВ, примерно 95 °С и регулируется с помощью элеваторного узла Э путем смешивания прямой сетевой воды с обратной из системы отопления. Температура воды, поступающей в водоразборные краны $G_{гв}^{потр}$ системы горячего водоснабжения ГВ, примерно 65 °С, регулируется изменением расхода прямой сетевой воды через подогреватели горячего водоснабжения Т3, установленные в тепловом пункте.

При сжигании мазута для предотвращения низкотемпературной коррозии необходимо выдерживать температуру воды на входе в котельные агрегаты не менее + 110 °С, т.е. они должны работать в пиковом режиме. Тепловые сети работают по отопительному повышенному температурному графику. Для горячего водоснабжения принимается параллельная схема подогрева воды у абонентов. Расчетные температуры наружного воздуха для пяти характерных режимов работы приведены на рис. 4.1.

В табл. П2 приведен расчет принципиальной тепловой схемы отопительной котельной с закрытой системой теплоснабжения при установке водогрейных котельных агрегатов, работающих на высокосернистом мазуте.

Контроль правильности выполненного расчета режимов работы тепловой схемы осуществляется проверкой соответствия принятых расходов теплоносителя и полученных в результате расчета. При расхождении невязки более 2 % расчет повторяется. Определив расчетный расход воды, выбирают тип и число котельных агрегатов.

Для водогрейных котельных агрегатов тепловая мощность и другие параметры приведены в справочной литературе [2, 3, 4, 6, 10, 11, 29, 30, 34]. Зная расход воды через котельные агрегаты $G_к$, установленные в котельной, определяется единичная теплопроизводительность водогрейного котла и расход воды через каждый из агрегатов. Если теплопроизводительность всех подобранных водогрейных котлоагрегатов больше или равна общей тепловой мощности котельной $Q_к$ и если расход воды через каждый котел больше или равен расходу воды завода-изготовителя, расчет можно считать законченным. После этого проверяется, какое число водогрейных котлов должно работать при среднем зимнем и летнем режимах, а в некоторых случаях и при среднем режиме в наиболее холодный месяц года.

Описание работы котельных с водогрейными котельными агрегатами для открытых систем теплоснабжения приведено в [12].

4.5. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В КОТЕЛЬНЫХ С ПАРОВЫМИ И ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЕЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Котельные установки с паровыми и водогрейными котлами, несмотря на кажущуюся сложность, достаточно надежны в эксплуатации и обладают большой маневренностью. На рис. 4.4 приведена принципиальная тепловая

схема котельной с паровыми и водогрейными котельными агрегатами для закрытой системы теплоснабжения.

Сырая вода из водопровода насосом НИ подается в охладитель непрерывной продувки Т1 и паровой водоподогреватель Т2, где нагревается до температуры + 25…35 °С и поступает на химводоочистку ХВО. Одна часть воды после первой ступени умягчения нагревается в паровом подогревателе Т5, водоводяном подогревателе Т6 и охладителе выпара Т7 до температуры + 60…90 °С и поступает в деаэратор подпиточной воды ДА2, откуда используется на подпитку тепловой сети и на горячее водоснабжение (при открытой системе теплоснабжения).

Другая часть воды проходит две ступени умягчения ХВО и, нагреваясь в паровом водоподогревателе Т3 и водоводяном подогревателе Т4 до температуры + 60…90 °С, поступает в деаэратор питательной воды ДА1. В верхнюю часть колонки деаэратора ДА1 также поступает конденсат от всех паровых подогревателей Т2, Т3, Т5, Т10, Т11, от технологического производства ТП и от мазутного хозяйства МХ. В нижнюю часть колонки деаэратора ДА1 и ДА2 и в водной объем питательного бака подается пар давлением 0,12 МПа для нагрева воды до кипения + 102…104 °С; давление пара снижается в редукционном клапане РК. Выделившиеся из воды коррозионно-активные газы вместе с выпаром удаляются в атмосферу или поступают в охладитель выпара Т7.

Из деаэратора питательной воды ДА1 вода поступает в теплообменник Т4, где охлаждается до + 70…90 °С и питательным насосом ПН нагнетается в водяной экономайзер ЭК, а затем в паровой котельный агрегат ПКА. Сухой насыщенный пар по паропроводу из котла направляется в редукционно-охладительную установку РОУ, где путем дросселирования снижается его давление, а для охлаждения пара используется часть питательной воды. Пар поступает в парораспределительный коллектор ПК, откуда расходуется на:

- технологическое производство ТП;
- подогреватели сетевой воды Т10 и Т11;
- подогреватели воды Т2, Т3, Т5;
- деаэрацию питательной воды в ДА1 и ДА2;
- мазутное хозяйство МХ и собственные нужды котельной.

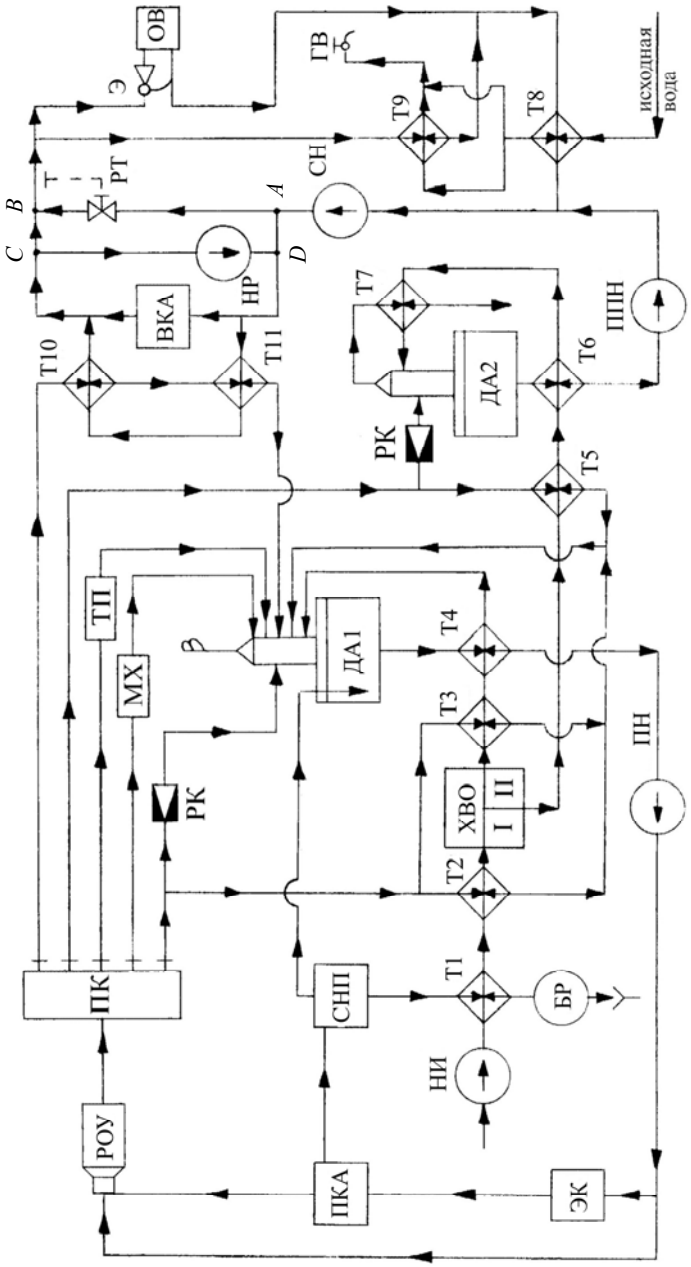


Рис. 4.4. Принципиальная тепловая схема котельной с паровыми и водогрейными котельными агрегатами для закрытой системы теплоснабжения

Непрерывная продувка из парового котельного агрегата производится в расширитель (сепаратор) непрерывной продувки. Пар из СНП используется в деаэраторе ДА1, а вода – в охладителе выпара Т1, после которого сбрасывается в барботер БР.

Из деаэратора ДА2 подпиточная вода поступает в водоводяной теплообменник Т6, где охлаждается до + 65…75 °С и подпиточным насосом ППН нагнетается во всасывающий коллектор сетевого насоса СН. В открытой системе теплоснабжения между Т6 и ППН устанавливается бак-аккумулятор воды для покрытия пиковых нагрузок горячего водоснабжения.

Работа тепловой сети. ***Обратная сетевая вода сетевым насосом СН нагнетается в водогрейный котельный агрегат ВКА. Часть воды из обратной линии тепловых сетей, после сетевых насосов, перепускается в подающую линию по подмешивающей перемычке*** **АВ*, на которой установлен регулятор температуры РТ, где она смешивается с горячей водой из водогрейного котла для поддержания требуемой температуры в тепловой сети, согласно температурному графику города или района (рис. 4.1).***

Для получения расчетной температуры воды на входе в водогрейный котельный агрегат ВКА часть горячей воды из подающего трубопровода по линии *CD* рециркуляционным насосом НР подается на ввод обратной сетевой воды.

В летнее время, когда водогрейные котлы не работают, для подогрева сетевой воды для нужд горячего водоснабжения используется пар в пароводяных подогревателях Т10 и Т11, что позволяет не подавать воду с низкой температурой в стальные водогрейные котлы.

Температура воды, поступающей в систему отопления и вентиляции ОВ, регулируется с помощью элеваторного узла Э, путем смешения прямой сетевой воды с обратной из системы отопления.

При *смешанном* включении подогревателей горячего водоснабжения с системой отопления сетевая вода после системы отопления и вентиляции поступает в подогреватели горячего водоснабжения первой ступени Т8, а уже затем в обратный трубопровод тепловой сети. Температура обратной сетевой воды после первой ступени будет ниже, чем температура, определяемая по температурному отопительному графику. При необходимости догрев воды горячего водоснабжения (до + 65 °С) осуществляется прямой сетевой водой в подогревателях второй ступени Т9. Основное преимущество смешанной схемы теплового пункта (рис. 4.4) заключается в более глубоком охлаждении обратной сетевой воды, что обеспечивает снижение ее расчетных расходов.

При разработке принципиальной тепловой схемы котельной с паровыми и водогрейными котлами для *открытых* систем теплоснабжения может быть использована схема (рис. 4.4) с добавлением только бака-аккумулятора, необходимого для выравнивания расхода воды на горячее водоснабжение, а также узла смешения с циркуляционным трубопроводом, подогреватели Т8 и Т9 при этом не устанавливаются.

Особенностями котельной установки с паровыми и водогрейными агрегатами являются:

- допустимость остановки в летний период водогрейных котлов и перевод подогрева сетевой воды для горячего водоснабжения в блок подогревателей Т10 и Т11;
- возможность работы паровой и водогрейной частей котельной при поломке одного из барботажных деаэраторов ДА1 или ДА2 (с перегрузкой другого);
- возможность использования блока паровых подогревателей Т10 и Т11 в отопительный период в качестве пиковых, при наличии резервной паровой мощности;
- применение двухступенчатой схемы подогрева сетевой воды, в которой первой ступенью служат пароводяные подогреватели, второй – водогрейные котлы, что обеспечивает подачу в них воды, нагретой до + 90…100 °С, т.е. вводит водогрейные котлы в пиковый режим работы;
- возможность при сравнительно небольших отопительных и вентиляционных нагрузках работать только паровым котлам и сетевым пароводяным подогревателям, а при росте тепловых нагрузок горячего водоснабжения водогрейные котлы могут быть легко и быстро включены в работу и доведены до расчетной теплопроизводительности;
- возможность для открытых систем теплоснабжения подогрева сетевой воды в зимнее время в пароводяных подогревателях и водогрейных котлах, особенно в максимально-зимнем режиме работы.

При разработке тепловых схем котельных с паровыми и водогрейными агрегатами следует определять расходы теплоты и параметры теплоносителей для всех пяти возможных режимов работы системы теплоснабжения. По известным суммарным расходам пара и горячей воды производится выбор типа, количества и производительности котельных агрегатов.

В котельной, как правило, устанавливают три-четыре однотипных котельных агрегата одинаковой тепловой мощности.

4.6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В КОТЕЛЬНЫХ

Основные мероприятия по энергосбережению в котельных полностью совпадают с мероприятиями по энергосбережению в теплогенерирующих установках (п. 3.10) и включают в себя: увеличение КПД котельных установок, экономию топлива, снижение потерь теплоты, качественную подготовку воды для питания паровых котельных агрегатов и подпитки теплосети, снижение присосов в топку и газоходы, работа по режимной карте и температурному графику с наименьшим коэффициентом избытка воздуха,

проведение режимно-наладочных испытаний, автоматизация процессов горения топлива и питания котельных агрегатов и другие.

При проектировании котельных следует производить сравнение технико-экономических показателей, вариантов выбора основного и вспомогательного оборудования, степени автоматизации, компоновочных и схемных решений, а также размещения котельной на генплане [2, 3, 6]. Сравнение технико-экономических показателей следует производить по приведенным затратам: экономически целесообразным признается вариант с наименьшими приведенными затратами, а при равных приведенных затратах предпочтение отдается варианту с наименьшими, капитальными вложениями (или сметной стоимостью).

При выполнении расчетов определяют себестоимость тепловой энергии, отпущенной потребителям, которая отражает техническую вооруженность котельной, степень механизации и автоматизации процессов, расходование материальных ресурсов. Для расчета себестоимости вычисляют годовые эксплуатационные расходы, которые включают следующие статьи: топливо, электроэнергию, воду, амортизацию, текущий ремонт, заработную плату персонала и прочие (на охрану труда, технику безопасности, пожарную и сторожевую охрану, приобретение спецодежды, реактивов для химической очистки воды).

Предлагаемые в монографии методики расчета тепловых схем котельных позволяют, задаваясь определенными параметрами, получать параметры различного уровня: требуемую или необходимую температуру любого теплоносителя (воды или пара), расход теплоносителя, расход топлива и тем самым выбрать наиболее экономичный и энергосберегающий вариант работы котельной. Разработанные методики обладают новизной и оригинальностью и поэтому являются перспективными для использования в информационно-измерительных системах, компьютерных технологиях и программах.

Кроме того, для экономии тепловой и электрической энергии в котельных установках могут быть использованы комбинированные пароводогрейные агрегаты, контактные теплообменники, различные схемы циркуляции теплоносителя для собственных нужд котельной.

В котельных с пароводогрейными котлами от одного агрегата получают два теплоносителя: пар и воду с разными параметрами (давлением и температурой), что позволяет сократить число устанавливаемых котлов и вспомогательного оборудования. Общее количество работающих комбинированных котлов для максимально-зимнего режима выбирается из расчета, что один или два комбинированных котла переводятся в чисто водогрейный режим работы, а остальные котлы покрывают всю паровую и часть водогрейной нагрузок. В некоторых проектах котельных с водогрейными котлами предусмотрена шунтирующая линия, где устанавливается дроссельная шайба, для выравнивания гидравлических сопротивлений и другие мероприятия [6].

При выполнении развернутых тепловых схем котельных с водогрейными котлами применяют общестанционную или агрегатную схему компоновки оборудования. *Общестанционная схема* характеризуется присоединением сетевых и рециркуляционных насосов, при котором вода из обратной линии тепловых сетей может поступать к любому из сетевых насосов, подключенных к магистральному трубопроводу, питающему водой все котлы котельной (рис. 4.3). Рециркуляционные насосы подают горячую воду из общей линии за котлами в общую линию, питающую водой все водогрейные котлы.

При *агрегатной схеме* компоновки оборудования котельной для каждого котла устанавливаются сетевые и рециркуляционные насосы. Вода из обратной магистрали поступает параллельно ко всем сетевым насосам, а нагнетательный трубопровод каждого насоса подключен только к одному из водогрейных котлов. К рециркуляционному насосу горячая вода поступает из трубопровода за каждым котлом до включения его в общую подающую магистраль и направляется в питательную линию того же котлоагрегата. Также предусматривается установка одного резервного сетевого насоса для всех водогрейных котлов.

Выбор общестанционного или агрегатного способа компоновки оборудования котельных с водогрейными котлами определяется, исходя из эксплуатационных соображений, а именно, учета и регулирования расхода и параметров теплоносителя, протяженности в пределах котельной магистральных трубопроводов, ввода в эксплуатацию каждого котельного агрегата и т.д.

5. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ

5.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

Теплотехнологический процесс (теплотехнология) – это технологический процесс получения продукции, осуществляемый при регламентированном тепловом воздействии на исходный материал, сырье, полуфабрикаты посредством тепломассообмена [29].

Теплотехнологическая установка – устройство, в котором осуществляется теплотехнологический процесс или его отдельные стадии.

Теплотехнологическая система – совокупность теплотехнологической установки и технологического, теплотехнического, энергетического, транспортного, распределительно-приемного и другого оборудования, непосредственно обеспечивающего реализацию данного теплотехнологического процесса или его отдельной стадии.

Теплотехнологический комплекс – совокупность теплотехнологических систем и производственно связанных технологических, энергетических, транспортных, распределительно-приемных и других систем, агрегатов, устройств, обеспечивающих всю последовательность технологических стадий преобразования исходных сырьевых материалов в данную реализуемую продукцию.

Промышленный теплотехнологический комплекс – совокупность отдельных тепло-технологических комплексов, являющихся технической базой основных производств народного хозяйства (производство стали, цветных металлов, строительных материалов, продуктов химии и нефтехимии, целлюлозно-бумажной, легкой и пищевой промышленности). Промышленный теплотехнологический комплекс включает:

- высокотемпературные теплотехнологические системы и комплексы (промышленные топливные печи, реакторы, конвертеры, электрические печи);
- теплотехнологические системы и комплексы умеренных температур (установки для тепловлажностной обработки материалов, сушильные, выпарные).

Комбинированная технологическая система – система, органически связывающая две или несколько теплотехнологических систем с целью обеспечения наиболее высокой экономической эффективности выработки заданных видов продукции и уровней их производства.

Комбинированная энерготехнологическая система – система, органически связывающая энергетическую и теплотехнологическую (технологическую) системы с целью обеспечения наиболее высокой экономической эффективности выработки заданных уровней энергетической и технологической продукции.

Комбинированный технологический агрегат – агрегат двух- или многоцелевого назначения, обеспечивающий конструктивную связь отдельных теплотехнологических (технологических) систем.

Комбинированный энерготехнологический агрегат – агрегат двух- или многоцелевого назначения, обеспечивающий конструктивную связь в комбинированной системе энергетической и теплотехнологической систем.

Камера рабочего пространства – основная (технологическая) часть высокотемпературной теплотехнологической установки, в пределах которой осуществляются стадии технологически необходимой тепловой обработки исходных материалов.

Теплотехнический принцип организации технологического процесса

(или отдельной стадии) – характерная совокупность аэродинамических, механических, тепловых и других особенностей реализации термической обработки сырьевых материалов, полуфабрикатов, изделий в камерах рабочего пространства теплотехнологической установки.

Тепловая схема технологической установки – графическая иллюстрация системы источников энергии и их размещения, состава теплоносителей и последовательности перемещения их и рабочих тел по камерам рабочего пространства, последовательности перемещения теплоносителей по другим элементам установки. Тепловая схема качественно характеризует совершенство общей организации использования теплоты источников энергии [29].

Теплотехническая схема – тепловая схема, в которой дополнительно иллюстрируются теплотехнические принципы организации технологического процесса и использования теплоты.

Ступень теплотехнологического процесса – часть технологического процесса, которая для реализации требует своих специфических условий, т.е. когда переход от одной ступени к другой требует изменения в соответствующей камере или зоне рабочего пространства теплового режима, газовой атмосферы, теплотехнического принципа, источника энергии и т. п.

Температурный и тепловой график технологического процесса – графическая иллюстрация изменения температуры обрабатываемого материала и его теплопоглощения во времени в камерах рабочего пространства.

Энергетика теплотехнологии (энергетика теплотехнологических процессов) – область промышленной энергетики, призванная обеспечивать для действующей и новой технологии разработку, исследование, отбор и внедрение [29]:

- рациональных и новых источников энергии;
- эффективных способов и оборудования для генерации теплоты;
- прогрессивных теплотехнических принципов реализации теплотехнологического процесса и организации тепломассообмена;
- совершенных тепловых схем, формирующих основу экономного и эффективного использования топлива и других энергетических ресурсов в технологических установках;
- новых схем комбинирования технологических, а также технологических и энергетических комплексов, реализуемых на принципах безотходной технологии;
- радикальных путей снижения энергетических отходов и использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР);
- оптимальных схем конструктивного оформления и компоновок теплотехнологических установок и систем и режимов их эксплуатации;
- обоснованных мероприятий по дальнейшей энергетической и общей модернизации теплотехнологических установок и систем.

Технологические процессы, реализуемые в высокотемпературных теплотехнологических установках, отличаются большим многообразием [29] и в основном определяются:

- интенсивностью подвода теплоты к поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего теплообмена) и переноса теплоты внутри обрабатываемого материала;
- интенсивностью подвода массы извне к реагирующей поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего массообмена) и интенсивностью молекулярного переноса массы внутри обрабатываемого материала;
- интенсивностью перемешивания фаз (твердых, жидких) в зоне их термической обработки;
- скоростью собственно химического реагирования и разделения целевых и сопутствующих продуктов;
- совокупностью двух или более из перечисленных факторов.

Такая классификация позволяет рассматривать и анализировать целые классы технологических процессов с единых позиций и едиными методами, облегчает заимствование результатов исследования одних видов технологических процессов для организации других, используя физические и математические аналогии.

5.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, СХЕМ И ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В зависимости от числа камер, в которых реализуются все ступени (стадии) технологического процесса, выделяют установки [29] с однокамерным и многокамерным рабочим пространством. Установки с однокамерным или однозонным рабочим пространством (например, топливные, мартеновские и нагревательные печи) характеризуются относительно равномерным температурным полем греющих газов в объеме и, как правило, цикличностью их действия. Установки с таким рабочим пространством и циклическим действием в наименьшей мере удовлетворяют современным требованиям [29].

При однокамерном, но многозонном рабочем пространстве, установки отличаются непрерывностью работы и неравномерным полем температур газов в объеме (например, методические нагревательные печи, шахтные печи, вращающиеся печи). Установки с таким рабочим пространством более прогрессивны, чем первые.

Наиболее широкие возможности удовлетворения современным требованиям открывают варианты высокотемпературных теплотехнологических установок с многокамерным комбинированным рабочим пространством, если при этом обеспечивается набор эффективных теплотехнических принципов и источников энергии, а также реализуется совершенная тепловая схема. В многозонном и многокамерном рабочем пространстве можно выделить соответственно следующие зоны и камеры [29]:

- предварительной тепловой или тепловой и физико-химической обработки исходных материалов;
- основной технологической обработки материалов, где или завершается технологический процесс в целом, или проводится его решающая стадия;
- технологической дообработки материалов;
- технологически регламентированного охлаждения технологического продукта.

В отличие от этих технологических зон и камер устройства, в которых осуществляется технологически не регламентированное охлаждение продукта, относятся к теплотехническим элементам установки.

В общем случае теплотехнологическая установка содержит от одной до нескольких зон или камер рабочего пространства.

В высокотемпературных теплотехнологических установках используются следующие источники энергии [29]:

- топливо с воздушным окислителем (ТВ);
- топливо с обогащенным кислородом воздухом (ТОВ);
- топливо с технологическим кислородом (ТК);
- продукты горения топлива от смежных установок;
- электроэнергия (ЭЭ), способы реализация которой могут быть различными, в том числе и через низкотемпературную плазму;
- комбинированные источники энергии, которые включают совместное использование в печи источников ТВ и ТК; совместное использование ТВ (ТК) и электроэнергии (ЭЭ); другие варианты сочетания источников энергии.

Применение комбинированных источников энергии с расширяющимся использованием кислорода и электроэнергии является одной из особенностей новых теплотехнологических систем.

В высокотемпературных теплотехнологических установках с газовым теплоносителем наиболее широко используются следующие теплотехнические схемы и принципы [29]:

1) плотного фильтруемого слоя – тепловая обработка свободной засыпки дробленых материалов, мелких изделий и других тел;

2) кипящего или псевдоожиженного слоя – тепловая обработка зернистых или грубо измельченных материалов;

3) взвешенного слоя – тепловая обработка измельченных материалов в условиях газовой смеси;

4) пересыпающегося слоя – тепловая обработка сыпучего материала,

перемещаемого различными способами;

5) уложенных загрузок – тепловая обработка кладки изделий или полуфабрикатов;

6) излучающего факела или излучающего газового потока;

7) поверхностного излучателя;

8) погруженного факела – тепловая обработка материала в ванне расплава, продуваемой газовым теплоносителем;

9) комбинированная – тепловая обработка материалов в условиях последовательного применения двух или нескольких теплотехнических способов.

В соответствии с этими принципами можно выделить девять типов высокотемпературных теплотехнологических установок с газовым теплоносителем, имеющим аналогичное название (например, установка с кипящим слоем, установка с погруженным факелом и т.д.).

Применение комбинированных теплотехнических принципов является характерной особенностью многих новых и радикально модернизируемых действующих теплотехнологических установок.

Классификация теплотехнологических установок с электрическим источником энергии и способам электрического нагрева [29]:

- косвенного нагрева (например, печи сопротивления);
- прямого (контактного) нагрева;
- индукционного нагрева;
- электродугового нагрева;
- электронно-лучевого нагрева;
- плазменного нагрева.

В установках без внешнего теплоиспользования теплота компонентов горения используется на нагрев исходных материалов или эндотермическую обработку топлива (химическая регенерация). Такие установки могут иметь высокий КПД использования топлива только при глубокой регенерации теплоты.

В установках с внешним (дополнительным) замыкающим теплоиспользованием теплоту после регенерации направляют на производство другой технологической или энергетической продукции. Такое теплоиспользование непосредственно не решает каких-либо технологических задач данной теплотехнологической установки (почему и называется внешним), но может выступать как средство экономии топлива в замещаемых (по дополнительной продукции) установках.

Примером тепловых схем высокотемпературных теплотехнологических установок с пристроенными элементами установок внешнего теплоиспользования являются традиционные промышленные печи, дополняемые без изменения структурной схемы собственно технологической установки котлами-утилизаторами, испарительным охлаждением элементов ограждения камер рабочего пространства, низкотемпературными технологическими аппаратами.

Теплотехнологические установки с органически встроенными элементами установок внешнего теплоиспользования отличаются тем, что последние внедряются в структурную схему основной установки, изменяя ее так, чтобы обеспечить наиболее благоприятные условия работы камер рабочего пространства и всей установки в целом.

Теплотехнологические установки с внешним замыкающим теплоиспользованием, предназначенные для одноцелевой выработки заданной технологической продукции, отличаются от комбинированных агрегатов технологического или энерготехнологического назначения.

Например, комбинированный энерготехнологический агрегат предназначается для выработки энергетической и технологической продукции при заданных для каждой из них уровнях производства, являясь альтернативным решением раздельного варианта выработки этих видов продукции.

5.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

Котлы-утилизаторы предназначены для утилизации тепловых отходов различных технологических установок (мартеновских, нагревательных, обжиговых печей) и получения дополнительной продукции в виде пара или горячей воды, что приводит к экономии топлива и энергоресурсов. Произ-

водительность агрегата зависит от температуры и количества технологических газов, теплота которых утилизируется. При встраивании в технологическую цепь котел называют энерготехнологическим агрегатом. Характерной отличительной особенностью котлов-утилизаторов является отсутствие топки для сжигания топлива.

На рис. 5.1 приведена принципиальная схема котла-утилизатора с естественной циркуляцией и дымогарными трубками.

Высокотемпературные газы от технологического процесса *1* проходят внутри дымогарных трубок *2*, где отдают теплоту воде, откуда охлажденные по газоходу *9* покидают котел. Питательная вода *4* подается в водную часть котла, где нагревается газами до кипения, а образовавшийся пар проходит паросепарационные устройства *5*. Полученный сухой насыщенный пар по паропроводу *6* идет в пароперегреватель *7*, откуда перегретый пар по паропроводу *8* идет к потребителю.

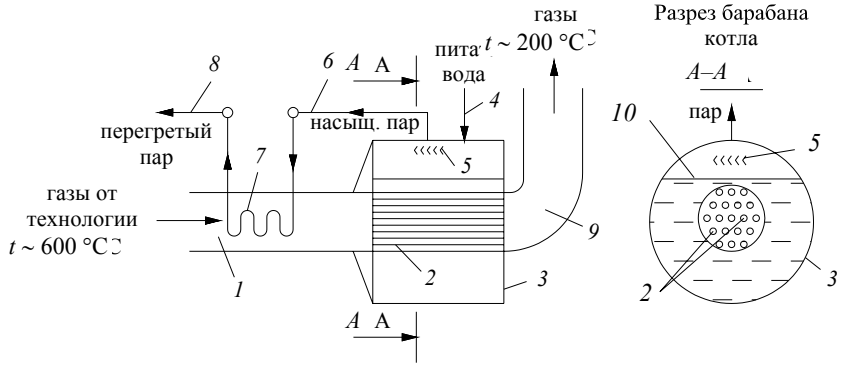


Рис. 5.1. Принципиальная схема технологического котла-утилизатора: *1* – высокотемпературные технологические газы; *2* – дымогарные трубки; *3* – барабан котла; *4* – питательная линия; *5* – устройство сепарации пара; *6* – паропровод сухого насыщенного пара; *7* – пароперегреватель; *8* – паропровод перегретого пара; *9* – газоход; *10* – зеркало испарения

5.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Промышленный теплотехнологический комплекс является одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) страны. Одни только высокотемпературные теплотехнологические системы, по уровню прямого потребления топлива, конкурируют с ТЭС страны [29]. Теплотехнологические системы имеют низкий КПД использования топлива (не более 15…35 %), но в то же время обладают исключительно большими потенциальными возможностями экономии топлива. Так, повышение среднего КПД топливных печей в 2 раза (что еще существенно ниже принципиально возможного) приведет к годовой экономии топлива, примерно в 35 – 40 раз превышающей плановую экономию топлива в производстве электроэнергии на ТЭС [29].

Недостатки промышленных теплотехнологических систем:

- низкая интенсивность процессов тепло- и массообмена и эффективность применяемых теплотехнических принципов;
- значительные материальные потери из-за несовершенства тепловых схем;
- несовершенство конструктивных схем ограждения технологических камер и установок;
- ограниченность применения прогрессивных источников энергии;
- отсутствие органической увязки технологического, энергетического, эксплуатационного аспектов теплотехнологических систем с задачами охраны окружающей среды.

Преодоление перечисленных недостатков возможно только путем разработки новых научно-методологических, научно-организационных, технологических, энергетических основ. Это особенно актуально при реализа-

ции новых и коренной модернизации действующих теплотехнологических систем.

Идеальная теплотехнологическая систем – установка, в основе которой лежит полная и одновременная реализация принципов безотходной технологии, которая характеризуется [29]:

- полным товарным извлечением всех компонентов исходного сырья, полуфабрикатов, материалов;
- экономным и высокоэффективным использованием ТЭР;
- применением замкнутых циклов промышленного использования воды, пара, конденсата;
- благоприятным производственным комфортом для человека;
- обеспеченной охраной окружающей среды.

Выбор эффективных направлений энергетической модернизации действующих установок существенным образом зависит от значения отношения потока теплоты через ограждения технологической камеры (зоны) $Q_{\text{о.с}}$ к потоку теплоты, поглощаемому обрабатываемым материалом в этой камере (зоне) $Q_{\text{м}}$, т.е. от значения отношения $Q_{\text{о.с}}/Q_{\text{м}}$. Наивысший результат по экономии топлива и подъему КПД может иметь место только при одновременном глубоком снижении $Q_{\text{о.с}}/Q_{\text{м}}$ и наиболее полной регенерации теплоты уходящих газов.

В настоящее время особое значение приобретают научно-организационные мероприятия, направленные на развитие научно-исследовательских работ по безотходным технологиям и новым прогрессивным теплотехнологическим процессам, на развертывание научно-исследовательских работ по энергетическому обеспечению, теплотехническому и конструктивному оформлению новых технологий и их отдельных процессов.

Совокупность общих современных требований может быть сформулирована на базе важнейших научно-методологических, технологических, эксплуатационных, экономических, экологических и научно-технических мероприятий, нацеленных на обеспечение [29]:

- высокой устойчивости новых технических решений от быстрого морального их старения;
- технологического комфорта – благоприятных условий проведения заданного технологического процесса;
- эксплуатационного комфорта – благоприятных условий обслуживания установок и систем;
- высоких энергоэкономических показателей и низких общих издержек производства и природы.

При таком подходе любые новые теплотехнологические установки или системы будут конкурентоспособными с действующими крупными системами и откроют путь дальнейшего их совершенствования на базе роста единичной мощности.

1. Основные мероприятия, способствующие обеспечению высокой устойчивости новых теплотехнологических установок от быстрого морального старения, включают в себя [29]:

- реализацию перспективной и высокой удельной производительности установки;
- новые технические решения теплотехнических принципов, открывающих пути оптимизации работы отдельных зон (камер) установок (систем), чтобы иметь возможность и далее радикально улучшать их работу на базе как традиционных, так и новых источников энергии;
- реализацию в данной установке (или системе) значительно большого числа технологических процессов, что способствует достижению большей устойчивости новых идей и новых решений при отдельных неудачах их освоения, создает более прочную основу универсального, и следовательно, экономически более выгодного их применения, стимулирует формирование большей убежденности и настойчивости научных коллективов в реализации новых решений;

2. Основные мероприятия, способствующие обеспечению соответствующего технологического комфорта в установках и системах, включают в себя [29]:

• достижение высокого уровня температур теплотехнического процесса и обеспечение широкого диапазона их регулирования, что создает наиболее благоприятные условия проведения физико-химических стадий многих технологических процессов;

• достижение высокой термической, физической и химической однородности готового продукта и наличие средств управления процессами, определяющими эти виды однородности, что создает предпосылки наиболее качественного завершения технологического процесса;

• обеспечение высокой степени удержания в готовом продукте заданных компонентов исходных материалов, полуфабрикатов, шихт, что в ряде случаев является решающим фактором в определении перспективности того или иного варианта теплотехнологического процесса.

3. Основные мероприятия, способствующие обеспечению соответствующего эксплуатационного комфорта обслуживания теплотехнологических установок и систем, включают в себя [29]:

• непрерывность технологического процесса, что и открывает путь к наиболее совершенным схемам комплексной автоматизации и механизации, к прогрессивным схемам управления и созданию крупнотоннажных поточных линий производства;

• наличие относительно небольшой массы обрабатываемого материала, одновременно находящегося в рабочей камере теплотехнологической установки, что позволяет обеспечить более высокую чувствительность ее к изменениям определяющих параметров, снизить длительность пусковых и остановочных периодов и уменьшить расход материалов на «промывку» технологических зон установки, системы;

• органическое сочетание технологических зон (камер) установки без технических и теплотехнических сложных транспортных переходов между ними, а также органическое сочетание технологических зон и теплотехнических элементов, что в итоге приводит как к компактности установок и систем, так и к повышению надежности их работы;

• высокую герметичность технологических камер и теплотехнических элементов технологической установки.

4. Основные мероприятия, способствующие достижению высоких энергоэкономических показателей теплотехнологических установок и малых общих издержек производства и природы, включают в себя [29]:

• эффективную переработку исходных материалов, полуфабрикатов, шихт при минимальной предварительной их подготовке, что во многих случаях существенно снижает их потери, загрязнение территории, затраты на подготовительные операции;

• низкие потери технологического сырья и продуктов в рабочих зонах установок и систем;

• длительную и непрерывную рабочую кампанию (корпорацию) технологических установок и систем;

• высокую тепловую герметичность ограждений, особенно высокотемпературных технологических камер и зон;

• организацию глубокого регенеративного использования тепловых отходов технологических зон (камер) установок для обеспечения наиболее низкого уровня видимого расхода топлива и возможность организации в необходимых случаях глубокого внешнего теплоиспользования, которым реализуются дополнительные косвенные пути снижения расхода топлива (энергии).

При разработке новых технологических процессов и оборудования для них, когда проведение предварительных расчетных оценок основных конструктивных и режимных характеристик новых образцов на заданные параметры встречает большие затруднения, большой практический интерес представляет метод аффинных физических моделей [29].

Аффинное преобразование (от лат. *affinis* – родственный) – преобразование плоскости или пространства, которое можно получить комбинируя движения и гомотетии в направлениях координатных осей. Гомотетия (от греч. *homos* – равный, взаимный, общий, одинаковый и от греч. *thetos* – расположенный) – преобразование подобия, преобразование плоскости или пространства.

Аффинные физические модели не являются точными или строго подобными физическими моделями и характеризуются наличием одного или нескольких нереализованных существенных требований подобия с образцом, например, подобие модели касательно образца в отношении тепловой нагрузки, тепловых потерь в окружающую среду и неподобие модели образцу в геометрическом отношении. Метод аффинных физических моделей, как экспериментально-расчетный метод, позволяет прогнозировать отдельные параметры [29].

1. Прогнозирование параметров промышленных установок на основе опытных устройств в условиях ограниченных проектно-расчетных возможностей и переход от экспериментальных стендов, пилотных установок к проектируемым промышленным агрегатам и установкам.

2. Прогнозирование параметров крупных проектируемых промышленных установок, агрегатов на основе действующих, но менее мощных, в условиях ограниченных проектно-расчетных возможностей. Надежный и достаточно обоснованный переход от эксплуатируемых промышленных агрегатов к новым, более мощным агрегатам этого же технологического назначения.

3. Прогнозирование параметров действующих установок на основе единичного опыта на одной из ряда действующих установок или обобщение единичного опыта. Перенос результатов часто сложных и трудоемких экспериментальных исследований (например, по оптимизации) единичного промышленного образца на другие, технологически тождественные промышленные образцы, отличающиеся производительностью и находящиеся в аффинном ряду.

Метод аффинных физических моделей предусматривает математическое описание процессов изучаемого объекта и последующий анализ методами теории подобия. Но при этом круг решаемых задач, последовательность и содержание операций метода аффинных моделей отличаются от традиционного метода физического (прямого) моделирования. Метод аффинных моделей, как и метод подобных моделей, предусматривает пересчет данных исследования модели по равенствам однородных инвариантов (чисел) подобия на образец, подобный этой модели. Но этот образец, называемый условным, в общем случае, как и модель, находится в аффинном ряду по отношению к прогнозируемому образцу и может иметь нереальные расчетные параметры [29].

Поэтому метод аффинных моделей предусматривает необходимость и возможность расчетной корректировки условного образца на основе имеющихся методик расчета, чтобы привести его отдельные показатели в соответствие с предполагаемыми условиями работы прогнозируемого образца (например, корректировка теплового баланса установки вследствие нетождественности потерь в окружающую среду). После расчетной корректировки производится сравнительная количественная оценка организации процессов в условном и скорректированном образцах, чтобы установить принципиальную возможность реализации заданной производительности в условиях скорректированного образца. При установлении такой возможности данные скорректированного образца могут служить основой для оценки параметров прогнозируемого образца.

5.5. ПРОГРЕССИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В настоящее время к числу прогрессивных источников энергии теплотехнологии следует отнести топливно-кислородный, а также комбинированный топливно-электрический и электрический (в разных формах реализации) источники энергии [29].

Топливно-кислородный источник энергии по праву рассматривается как мощный рычаг технического прогресса высокотемпературных теплотехнологических систем и открывает следующие возможности:

- резкое снижение удельного (на единицу технологической продукции) выхода продуктов сгорания топлива;
- снижение расхода топлива;
- снижение выноса технологических материалов и загрязнения окружающей среды, снижение общих строительных габаритов и во многих слу-

чаях упрощение конструктивных схем установок;

- повышение удельной производительности систем и единичной мощности, существенное снижение затрат на извлечение полезных компонентов из газовой фазы.

Топливно-кислородный источник энергии обеспечивает наиболее высокий темп снижения удельного расхода топлива по сравнению с топливно-воздушным источником энергии. Причем это положение в наиболее полной мере может проявляться [29]:

- в условиях высокого температурного уровня технологического процесса и при реализации систем большой единичной мощности;
- при переходе к топливно-кислородному источнику энергии обеспечивается резкое снижение параметра $Q_{\text{о.с}}$ /$Q_{\text{м}}$ в сравнении с топливно-воздушным источником энергии;
- при организации регенеративного теплоиспользования.

Топливно-электрический источник энергии открывает еще более широкие технические и экономические возможности для повышения качества технологической продукции в топливно-энергоемких производствах. При этом превращение электрической энергии в теплоту может осуществляться одним из способов:

- прямой, когда тепловыделение происходит непосредственно в термически обрабатываемом изделии при прохождении по нему тока;
- косвенный, когда тепловыделение исходит от специальных нагревательных элементов (ТЭН), по которым проходит ток;
- индукционный, когда тепловыделение в обрабатываемом материале проистекает за счет трансформации магнитного потока;
- дуговой, когда тепловыделение идет от факела электрической дуги (от плазмы из частиц газа и неподвижной окружающей среды);
- плазменный, когда тепловыделение проходит в плазме движущегося с определенной скоростью газа;
- электронный, когда обрабатываемый материал подвергается электронной бомбардировке.

Наиболее эффективно использование в высокотемпературных теплотехнологических установках комбинированного топливно-электрического источника энергии, когда начальные, наиболее теплоемкие стадии технологического процесса реализуются на топливно-воздушном или топливно-кислородном источнике энергии, а заключительные («чистовые», рафинировочные) и обычно наименее теплоемкие технологические стадии могут проводиться на высококачественном электрическом источнике энергии. Топливно-электрический источник энергии повышает качество технологической продукции и существенно снижает удельный расход органического топлива.

5.6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОПОК ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Топки входят в состав многих тепловых, теплотехнологических и теплогенерирующих установок. Расчет и проектирование топок обычно составляет одно целое с проектированием установки – сушилки, печи, теплогенератора. Топки котлов и печей по размерам должны вписываться в габариты котла или печи и иметь общую обмуровку. Топки для сушилок располагают на некотором расстоянии от них в самостоятельной обмуровке и присоединяют к сушилке специальным подземным каналом-боровом через смесительную камеру, в которой поточные газы разбавляются воздухом (выносные топки). Применяемые в современной технике топки можно разделить на три вида:

- тепловые (топки стационарных установок);
- силовые (топки турбокомпрессоров и реактивных двигателей);
- специального назначения (термотехнологических устройств) – устройства, предназначенные для получения газообразного теплоносителя с необходимыми параметрами (объем, температура, давление, химический состав), который используется в различных теплотехнологических устройствах.

Топки классифицируются по следующим признакам:

- по месту расположения – отдельно стоящие, встроенные, откатные, переносные;
- по гидравлическому режиму – работающие под давлением или под разрежением;
- по температуре получаемого теплоносителя – с низкотемпературным (до 500 °С), среднетемпературным (до 1000 °С) и высокотемпературным (выше 1000 °С) теплоносителем;
- по химической активности получаемого теплоносителя – с инертным, окислительным или восстановительным теплоносителем;
- по виду топлива – с твердым, жидким или газовым топливом;
- по конструкции – прямоугольные, цилиндрические и цилиндроконические, а также вертикальные или горизонтальные;
- по форме пламени – со спокойным пламенем или циклонные с закрученным потоком;
- по использованию теплоносителя – проходные или с рециркуляцией использованного теплоносителя.

Топки должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- полное сгорание топлива в пределах камеры горения;
- устойчивость процесса горения;
- хорошее смешение продуктов сгорания с первичным и вторичным воздухом или нагреваемым инертным газом в пределах топки;
- возможность регулирования процесса горения;
- минимальные потери давления в топке;
- быстрый пуск и выход на рабочий режим;
- безопасность эксплуатации;
- технологичность конструкции;
- относительно низкая стоимость.

Основными критериями оценки топок являются количественные и качественные характеристики топок и топочных процессов.

Энергетическую эффективность топок оценивают по их тепловой мощности, расходу и роду сжигаемого топлива, определению основных ее размеров, тягодутьевых устройств (дутьевых вентиляторов и дымососов), расчету горения топлива и составлению баланса теплоты с целью определения термического КПД. Исходными данными для составления баланса теплоты топок служат: характеристика сжигаемого топлива (состав, теплота сгорания) и часовой расход теплоты потребителем – сушилкой, печью, котельной установкой.

Качественной характеристикой топок служит коэффициент полезного использования теплоты, который показывает отношение потерь теплоты $Q_{\text{п}}$ в окружающую среду к общему количеству теплоты Q, получаемому в топке и поступающему в топку, и определяется по формуле: $\xi = Q_{\text{п}} / Q$.

5.7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ограждающие конструкции теплотехнологических установок выполняют теплотехнические, технологические и строительные функции. Строительные функции заключаются в том, что обмуровка (кладка) должна обладать необходимой прочностью при рабочих температурах и под воздействием постоянных и переменных тепловых нагрузок. Технологические функции кладки определяются степенью участия в технологическом процессе, т.е. взаимодействием с нагреваемым материалом и температурным уровнем процесса.

Теплотехнические функции связаны с теплофизическими свойствами обмуровки. С внутренней стороны обмуровка участвует в теплообменных процессах, совершающихся в печи, а с внешней поверхности обмуровки (кладки) происходит теплообмен в окружающую среду. Таким образом, кладка участвует в двух взаимосвязанных системах теплообмена: внутренней и внешней. Для того чтобы свести это взаимное влияние к минимуму, кладку выполняют из материала, обеспечивающего ее надлежащее термическое сопротивление. Комбинируя в обмуровке материалы с различными коэффициентами теплопроводности, можно получить кладку принципи-

ально различных типов, для каждого из которых существует своя область применения.

Однослойная обмуровка или кладка из нескольких слоев с близкими коэффициентами теплопроводности применяется в тех случаях, когда тепловые потери обмуровки теплопроводностью соизмеримы с потерями теплоты на аккумуляцию. Кладка с внешней тепловой изоляцией применяется в печах непрерывного действия, когда потери теплоты за счет аккумулирования обмуровкой малы по сравнению с теплотой, теряемой в результате теплопроводности кладки. Кладка с внутренней тепловой изоляцией применяется в печах периодического действия, длительность цикла которых мала.

Однослойная (тяжелая) кирпичная кладка выполняется из штучных огнеупорных изделий, наиболее проста конструктивно, но отличается большой толщиной и массой, высокой теплоаккумулирующей способностью и потерей теплоты в окружающую среду. Значительные напряжения сжатия основания конструкции ограничивают ее высоту и рабочую температуру [29]. Облегченная кирпичная кладка выполняется в один слой из легковеса, а снаружи рабочего огнеупора располагаются 1-2 слоя теплоизоляционных материалов. Облегченная кладка используется наиболее часто, стоит дешевле, обеспечивает меньшие потери теплоты из рабочего пространства [29].

Кирпичная кладка для продления межремонтной кампании с огневой стороны может быть покрыта защитным огнеупорным слоем – футеровкой, а снаружи для повышения газоплотности – слоем уплотняющей обмазки или металлической обшивкой. Качество кладки определяется толщиной швов между штучными изделиями. Чем ответственней кладка, тем тоньше швы. Связывание штучных изделий в кладке можно производить различными способами:

- кладка всухую – наиболее трудоемка, но дает наиболее тонкий шов и высокую плотность («под» ванных печей);
- прокладка между кирпичами тонких (0,5…1 мм) железных пластин, которые при высоких температурах окисляются и прочно связывают огнеупорные изделия в монолит (магнезитохромитовые своды печей), применяется для скрепления основных огнеупоров;
- кладка на мергельных растворах наиболее распространена, а изделия из углеродистых огнеупоров скрепляют с помощью пасты из смолы с коксовым порошком.

Потери теплоты через футеровки и обмуровки находятся в прямой зависимости от температуры внутри топки и окружающей среды, а также от конструкции обмуровки и футеровки. Температура наружной поверхности топки, исходя из требований техники безопасности, не должна превышать 60 °С. Экранизация наружной поверхности топки металлическим листом на высоту 1,8 м над обслуживаемой площадкой позволяет работать при температуре наружной поверхности топки до 120 °С, что позволяет значительно уменьшить толщину огнеупорной футеровки и массу топки. Обычно это относится к топкам с жидким топливом. Круглые топки с тепловой изоляцией, создаваемой движущейся воздушной прослойкой, имеют температуру наружной поверхности 60 °С за счет изменения скорости движения газов, подаваемых в кольцевой зазор между наружным и внутренним кожухами топки.

При конструировании элементов футеровки следует учитывать современные прогрессивные тенденции: широкое использование монолитных и принудительно охлаждаемых футеровок, использование принципа согласованной (желательно равной) стойкости отдельных частей рабочей камеры, применение оптимальных решений. Для выполнения футеровки топки применяют огнеупорные, теплоизоляционные и общестроительные материалы. Огнеупорные материалы применяются для футеровки внутренних поверхностей камер горения и смешения. К ним относятся штучные огнеупорные кирпичи из шамота, хромомагнезитовые кирпичи, огнеупорные массы и бетоны. Вид используемого для отдельных частей футеровки огнеупорного материала зависит главным образом от температуры в этих частях топки.

Огнеупорный материал подбирают и по устойчивости к главному раз-

рушающему фактору в конкретных условиях. При стабильном тепловом режиме и отсутствии расплава на футеровку воздействуют только механические нагрузки при высоких температурах. При эрозионном и механическом воздействиях требуется огнеупор с повышенной механической прочностью – электроплавленный или плотный спеченный. При небольших механических нагрузках подбор рабочего огнеупора производят по температурам огнеупорности и деформации [29].

При воздействии расплавленного технологического материала (наиболее частая причина разрушения футеровки) подбор огнеупора производится по устойчивости к шлаку. При резко переменном температурном режиме печи и отсутствии минерального расплава подбор огнеупора производится по термостойкости.

При сочетании переменного теплового режима с воздействием расплавленного минерального материала выбор рабочего огнеупора производится с одновременным учетом шлакоустойчивости и термостойкости. Здесь целесообразно применение набивных масс на основе шлакоустойчивого огнеупорного порошка. Эффективно использование защитного слоя, наносимого на поверхность рабочего огнеупора.

Повышенной термостойкостью обладают огнеупоры с однородной крупнокристаллической макроструктурой на кристаллической связке (минимум стекловидной фазы) и при оптимальной общей пористости (10…18 %). При наличии значительных температурных напряжений противопоказано использование крупноблочных или фасонных изделий [29]. При достижении пластического состояния и жидкой фазы термостойкость огнеупора возрастает. Высокой термостойкостью обладают футеровки из набивных масс и гарниссажные [29, 36, 37].

Монолитные футеровки дешевле кирпичной кладки, позволяют ускорить строительство и ремонт, могут изготовляться любых размеров и формы. Современные монолитные футеровки по свойствам близки к соответствующим штучным огнеупорным изделиям или превосходят их, выполняются в виде огнеупорных бетонов и набивных масс. Огнеупорные бетоны приобретают прочность в холодном состоянии.

Набивные массы состоят из огнеупорного порошка (размер частиц до 10…15 мм) и 3…8 % связки, плавящейся при высоких температурах (окалина, огнеупорная глина, металлургический шлак). Набивные массы приобретают рабочие свойства только в процессе обжига, когда порошок спекается в монолит. Набивные массы используются для горячего ремонта печей. Футеровка из набивной массы может быть выполнена любой формы и размеров в виде монолита без температурных швов, так как в процессе работы она находится в пластическом состоянии.

Принудительно охлаждаемые футеровки позволяют сократить расход огнеупоров, форсировать технологический процесс, увеличить межремонтную кампанию в тяжелых условиях службы футеровки. Однако при этом существенно увеличивается плотность теплового потока через футеровку (с 5…20 до 40…200 кВт/м^2). Принудительное наружное охлаждение футеровки производится сжатым воздухом, водой, пароводяной смесью или расплавленными солями и металлами.

Гарниссажная футеровка образуется при застывании слоя расплава на охлаждаемой металлической стенке. Гарниссажные футеровки имеют малую тепловую инерцию, практически не требуют расхода огнеупоров, дешевы и обеспечивают длительную межремонтную кампанию. Для современных печей с высокой форсировкой процесса наиболее эффективна гарниссажная футеровка на слое огнеупорной набивки, нанесенной на ошипованную металлическую поверхность.

Для уменьшения потерь теплоты через стенки и свод топки огнеупорную футеровку защищают теплоизоляционными материалами. К ним относятся: легковесный шамотный кирпич, диатомовый кирпич, минеральная вата, асбест, котельный или доменный гранулированный шлак и другие теплоизоляционные изделия. Легковесный шамотный кирпич применяется, когда температура на границе огнеупорного и теплоизоляционного слоев выше 800 °С или если необходимо создание легкой и прочной конструкции топки. При применении необходимо учитывать его высокую стоимость и ограниченное производство.

Основным теплоизоляционным материалом для топок является диатомовый кирпич. Его изготовляют из смеси трепела или диатомита с древесными опилками. При обжиге опилки выгорают, кирпич получается пористым, с меньшим коэффициентом теплопроводности. Диатомовый кирпич может применяться в местах, где температура не превышает 800 °С. Недостатком диатомового кирпича является его малая механическая прочность. Асбестовые листы применяются в качестве прокладки между металлическим кожухом и огнеупорной футеровкой для уменьшения газопроницаемости и для теплоизоляции.

Минеральная вата применяется в виде листов, накладываемых на наружную поверхность огнеупорной футеровки в том случае, если после их укладки температура в пограничном слое будет не выше 75 °С. Внешнюю поверхность матов желательно покрыть алюминиевыми листами для улучшения внешнего вида топки. Гранулированный, котельный, доменный шлак, порошок и асбозурит применяются в качестве насыпной тепловой изоляции для сводов топок.

Основные свойства теплоизоляционных материалов и изделий топок, необходимая толщина обмуровок приведены в [29, 30, 35 – 37].

5.8. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ И НОМОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

1. *Графоаналитический метод определения тепловых потерь*.

Для расчета плотности теплового потока в зависимости от температуры наружной поверхности ограждающих конструкций теплотехнологических и тепловых установок, топок, зданий, сооружений, оконных блоков, строительных материалов и изделий были произведены теплотехнические расчеты в определенных интервалах температур. Расчеты проводились на основе закона теплопроводности Фурье, конвективного, лучистого и суммарного теплообмена, исходя из стандартных решений [13]. Математическая обработка коэффициентов теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием позволила получить расчетные зависимости суммарного коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока. Все расчетные формулы представлены в зависимости от температурного напора ΔT и действительны только в определенном диапазоне температур, близких к реальным условиям.

Коэффициент теплоотдачи от нагретой поверхности материала ограждения к воздуху и окружающим предметам имеет следующую зависимость:

$$\alpha_{\text{общ}} = 4{,}6 + 0{,}035\Delta T + 1{,}5\Delta T^{0{,}333}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где $\Delta T = T_{\text{пов}} - T_{\text{воз}}$; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности ограждения менялась от –10 до + 100 °С; $T_{\text{воз}}$ – температура воздуха менялась от –10 до + 30 °С.

Удельный тепловой поток q, Вт/м^2, от нагретой поверхности ограждения к воздуху может быть представлен трехчленом вида:

$$q = 4{,}6\,\Delta T + 0{,}035\,\Delta T^2 + 1{,}5\,\Delta T^{1{,}333}, \text{ Вт/м}^2.$$

На рис. 5.2 представлен график для определения плотности теплового потока q, Вт/м^2, от нагретых наружных поверхностей ограждения зданий и сооружений к воздуху в зависимости от температурного напора ΔT, °С. Все эти математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ. В таблицу программы Excel вводятся только значения температурного напора ΔT, °С, или непосредственно измеренных температур наружной поверхности ограждения здания и сооружения, материала, образца, изделия, стекла окна, а также воздуха.

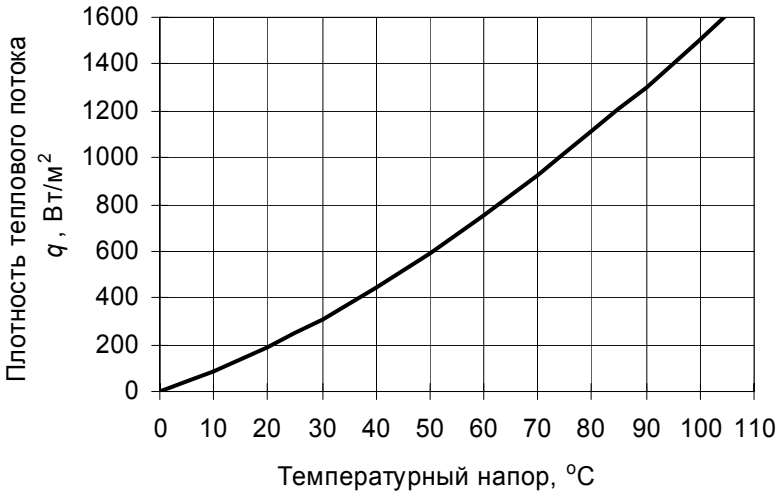


Рис. 5.2. Зависимость удельного теплового потока q, Вт/м^2, от температурного напора ΔT, °С, нагретой поверхности ограждающих конструкций и воздуха

Результаты математических расчетов и графических построений плотности теплового потока q, Вт/м^2, служат теоретической и прикладной основой для разработки и конструирования переносных приборов с автономным источником питания и без него для ускоренного определения удельного теплового потока и потерь теплоты через остекление, а также от наружных ограждений зданий и сооружений.

2. *Номографический метод определения тепловых потерь*.

Для определения тепловых потерь в окружающую среду через двухслойную футеровку нагревательной печи возможно использование законов теплопроводности. При этом учитывалось, что основное время нагревательная печь работает в стационарном режиме. Разработанный алгоритм расчета тепловых потерь в окружающую среду позволил составить программу для ЭВМ, которая охватила различные варианты по сочетаниям кладки (огнеупорного и теплоизоляционного слоев), их толщины, температур на внутренней поверхности нагревательной печи. Расчеты проводились для постоянных и изменяющихся теплофизических характеристик материалов обмуровки. На рис. 5.3 и 5.4 приведены численные расчеты тепловых потерь в окружающую среду.

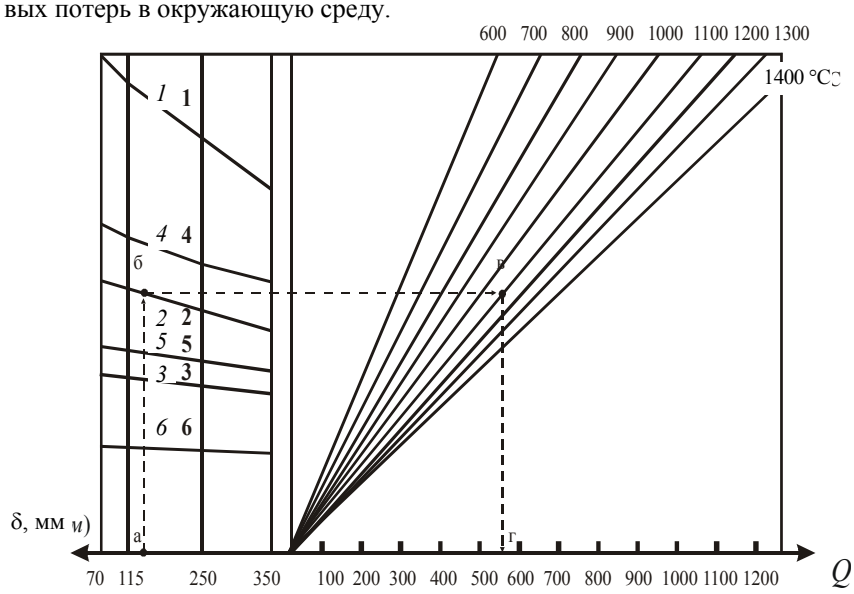


Рис. 5.3. График определения потерь теплоты Q (Вт/м^2) через двухслойную футеровку:

первый слой – шамотный кирпич толщиной δ = 70…350 мм;

второй слой: *1* – диатомовый кирпич δ = 115 мм;
2 – диатомовый кирпич δ = 230 мм; *3* – диатомовый кирпич δ = 350 мм;
4 – минеральная вата δ = 70 мм; *5* – минеральная вата δ = 115 мм;
6 – минеральная вата δ = 230 мм

П р и м е р . Требуется определить потери теплоты через двухслойную футеровку: 1 слой – шамотный кирпич толщиной δ = 130 мм, 2 слой – диатомовый кирпич толщиной δ = 230 мм, температура внутренней поверхности печи T =1100 °С. Для решения задачи воспользуемся графиком для определения потерь теплоты через двухслойную футеровку (рис. 5.3). Находим точку "а", соответствующую толщине шамотного кирпича δ = 130 мм. Поднимаемся вверх до пересечения со слоем диатомового кирпича толщиной δ = 230 мм (точка "б"). Затем смещаемся вправо до пересечения с температурой внутренней поверхности футеровки T = 1100 °С (точка "в") и, спускаясь вниз на ось абсцисс, определяем потери теплоты через кладку с одного квадратного метра печи (точка "г"). В результате имеем $Q_{кл}$ = 550 Вт/м^2.

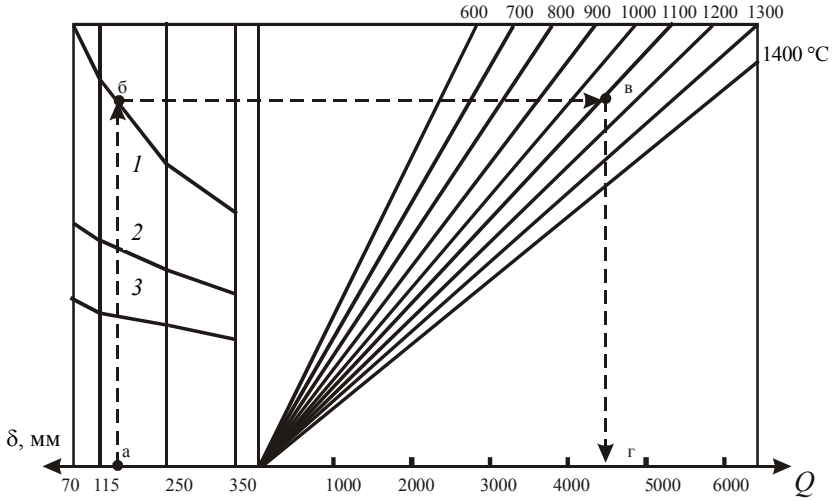


Рис. 5.4. График определения потерь теплоты Q (Вт/м^2) через двухслойную футеровку:
первый слой – хромомагнезитовый кирпич δ = 70…350 мм;
второй слой – легковесный шамотный кирпич:
1 – δ = 115 мм; *2* – δ = 230 мм; *3* – δ = 350 мм

5.9. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Теплотехнические расчеты проводятся для определения расхода топлива, окислителя и дополнительно вводимых газов (используемых для снижения температуры продуктов горения) с целью получения теплоносителя заданной температуры (за счет создания смеси с продуктами горения), количества и химического состава.

В зависимости от типа, режима и технологии, применяемых в теплотехнологических установках, тепловой баланс составляется на 1 час работы или за весь цикл (или отдельные периоды времени внутри цикла). Для теплотехнологических установок непрерывного действия тепловой баланс составляется за 1 час работы при установившемся режиме. Для теплотехнологических установок периодического действия тепловой баланс обычно составляется за весь цикл работы. Тепловые балансы теплотехнологических установок непрерывного и периодического действия несколько различаются в расходной части.

Тепловой баланс составляется обычно для всей установки, но может составляться только для рабочей камеры. Тепловой баланс теплотехнологических установок представляет собой равенство:

$$\Sigma Q_{\text{прих}} = \Sigma Q_{\text{расх}},$$

где $\Sigma Q_{\text{прих}}$ – приходная часть теплового баланса, воспринимаемая теплоту, поступающую в тепловую установку с топливом, воздушной смесью, нагретым материалом и технологическим оборудованием; $\Sigma Q_{\text{расх}}$ – расходная часть теплового баланса, включающая теплоту, расходуемую на нагрев материала до требуемой температуры, теплоту с уходящими продуктами сгорания, с химической и механической неполнотой сгорания топлива, теплоту, теряемую поверхностью установки в окружающую среду и др.

В зависимости от конструкции теплотехнологических установок, ее назначения, вида используемого топлива и условий эксплуатации в тепловом балансе могут участвовать и другие статьи прихода и расхода теплоты. Из уравнения теплового баланса определяется расход топлива или подача пара (теплоносителя), необходимого для теплотехнологического процесса. Тепловой баланс позволяет судить об экономичности процесса нагрева материала или вещества, эффективности использования топлива, а также показывает возможности и направления совершенствования работы теплотехнологических установок.

Приходная часть баланса теплоты

1. Химическая теплота сгорания топлива

$$Q_{\text{хим}} = B\, Q_{\text{н}}^{\text{р}}\text{, кДж/ч,}$$

где B – расход топлива, м^3/ч, кг/ч; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м^3, кДж/кг.

Расход топлива B и требуется определить из уравнения теплового баланса. В расчетах баланса теплоты используется низшая теплота сгорания топлива, так как продукты горения выбрасываются в атмосферу и скрытая теплота парообразования водяных паров не используется.

2. Физическая теплота подогретого воздуха в топках машиностроительной промышленности, которая поступает в тепловую установку обычно с нагретым воздухом $Q_{\text{ф.в.}}$ – и редко с нагретым газом $Q_{\text{ф.г}}$:

$$Q_{\text{ф.в.}} = B\, c_{\text{в}}\, t_{\text{в}}\, V^0\, \alpha_{\text{т}}\text{, кДж/ч;}$$

$$Q_{\text{ф.г}} = B\, c_{\text{г}}\, t_{\text{г}}\text{, кДж/ч,}$$

где $t_{\text{в}}$, $t_{\text{г}}$ – температура воздуха и газа соответственно, °С; $c_{\text{в}}$, $c_{\text{г}}$ – удельная объемная изобарная теплоемкость воздуха при $t_{\text{в}}$ и газа при $t_{\text{г}}$ соответственно, кДж/(м^3 · К); V^0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания единицы топлива, м^3/м^3 (м^3/кг); $\alpha_{\text{т}}$ – коэффициент избытка воздуха в топке.

При расчете следует учитывать, что в теплотехнологических установках через неплотности в обмуровке подсасывается холодный воздух, поэтому под температурой воздуха $t_{\text{в}}$ понимают средневзвешенную (по объему) температуру подогретого и подсасываемого воздуха.

3. Теплота экзотермических реакций $Q_{\text{экз}}$.

Тепловой эффект экзотермической реакции металлов, строительных и других материалов приведен в [29, 36, 37]. При нагреве стальных изделий, форм их поверхность окисляется и для стали можно принять:

$$Q_{\text{экз}} = 5670\, M_{\text{о}}\text{, кДж/ч;}$$

$$M_{\text{о}} = 0{,}01\, M_{\text{м}}\, \delta,$$

где 5670 – удельная теплота окисления, кДж/кг; M_0 – масса окалины, образовавшейся на металле, кг/ч; $M_{\text{м}}$ – производительность печи, кг/ч; δ – угар при нагреве, % (для стали δ = 0,2…0,4).

4. Физическая теплота, вносимая в установку с транспортирующими устройствами, тарой $Q_{\text{т}}$ и самим материалом $Q_{\text{ф.м}}$:

$$Q_т = M_т c_т t_т, \text{ кДж/ч;}$$

$$Q_{ф.м} = M_м c_м t_м, \text{ кДж/ч,}$$

где $M_т$, $M_м$ – масса транспортирующих устройств, тары и материала, вносимых в печь, кг/ч; $c_т$, $c_м$ – удельная теплоемкость транспортирующих устройств, тары и материала при $t_т$ и $t_м$ соответственно, кДж/(кг · К); $t_т$, $t_м$ – температура транспортирующих устройств, тары и материала, °С.

5. Теплота, вводимая в топку теплотехнологической установки с паром при паровом распыливании мазута или под колосниковую решетку для улучшения процесса горения при слоевом сжигании угля:

$$Q_{пар} = G_ф (i_{пар} – 2510), \text{ кДж/кг,}$$

где $G_ф$ – расход пара на 1 кг топлива (при паровом распыливании мазута $G_ф$ = 0,3…0,35 кг/кг; при подаче пара под колосниковую решетку $G_ф$ = 0,2…0,4 кг/кг); $i_{пар}$ – энтальпия пара, кДж/кг, 2510 – энтальпия пара, сбрасываемого с продуктами сгорания в атмосферу.

Расходная часть баланса теплоты

1. Теплота для нагрева материала до конечной температуры:

$$Q_м = G_м c_м (t_к – t_н), \text{ кДж/ч,}$$

где $G_м$ – производительность установки, кг/ч; $c_м$ – теплоемкость материала при $t_к$, кДж/(кг · К); $t_н$, $t_к$ – начальная и конечная температуры материала, °С.

2. Потери теплоты с уходящими продуктами горения:

а) в котельных агрегатах:

$$Q_{ух} = B V_{ух} c_{ух} t_{ух} , \text{ кДж/ч,}$$

где B – расход топлива, $м^3$/ч, кг/ч; $V_{ух}$ – объем топочных газов, $м^3$/кг, $м^3/м^3$, образовавшихся от сжигания 1 $м^3$, 1 кг топлива при коэффициенте избытка воздуха в уходящих топочных газах $\alpha_{ух}$; $c_{ух}$ – теплоемкость уходящих газов, кДж/(кг · К) при температуре $t_{ух}$.

В теплотехнологических установках, работающих под разрежением, в связи с присосом воздуха $\Sigma\Delta\alpha$ по газовому тракту, коэффициент избытка воздуха в уходящих газах $\alpha_{ух}$ увеличивается и на выходе равен:

$$\alpha_{ух} = \alpha_т + \Sigma\Delta\alpha.$$

б) в установках для нагрева и обжига кусковых, порошкообразных материалов и суспензий (гипса, извести, глины, доломита, магнезита, цемента и т.п.) потери теплоты с уходящими газами и с присосом воздуха через неплотности печи складываются из теплосодержания газов, образовавшихся при сгорании топлива и выделившихся при разложении сырьевых материалов:

$$Q_{ух} = (B V_{ух} c_{ух} + G_м V_{г1} c_{г1}) t_{ух} , \text{ кДж/ч,}$$

где $V_{г1}$ – объем газов, образовавшихся при разложении 1 кг обожженного материала, $м^3$/кг; $c_{г1}$ – теплоемкость газов, выделившихся из материала, кДж/($м^3$ · К).

Если из материала происходит выделение разнородных газов (CO_2, N_2 и др.), отличных по своей теплоемкости, то в скобках будет соответственно большее число слагаемых. Обжиг керамических изделий обычно происходит без значительного выделения газов и поэтому в потерю теплоты с уходящими газами газовыделение из материала можно не включать.

в) в нагревательных печах, у которых происходит выбивание продуктов горения из рабочего пространства печи, потери теплоты с уходящими продуктами горения определяются:

$$Q_{ух} = (B\,V_{ух} - V_{выб})\,t_{ух}\,c_{ух},\ кДж/ч,$$

где $V_{выб}$ – объем продуктов горения, выбивающихся из рабочего пространства, $м^3/ч$ (см. расходную статью 5).

3. Потери теплоты через каждый участок кладки определяются из выражения:

$$Q_{кл} = \sigma_{кл}\,[(T_{кл}/100)^4 - (T_в/100)^4]\,F + \alpha_к\,(t_{кл} - t_в)\,F,\ кДж/ч,$$

где $\sigma_{кл}$ – коэффициент излучения наружной поверхности кладки, $кДж/(м^2 \cdot ч \cdot К^4)$, для кирпичной кладки $\sigma_{кл} = 20{,}1$, для металлической обшивки $\sigma_{кл} = 18$; $t_{кл}$ – температура наружной поверхности кладки расчетного участка, °С; $T_{кл} = t_{кл} + 273$, К; $T_в$, $t_в$ – температура окружающего воздуха, К, °С, $T_в = t_в + 273$ К; F – площадь поверхности расчетного участка, $м^2$; $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности кладки к окружающему воздуху, $кДж/(м^2 \cdot ч \cdot К)$.

Для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности кладки к окружающему воздуху $\alpha_к$ можно использовать выражение:

$$\alpha_к = 4{,}18\,A_1\,A_2\,[(t_{кл}\,t_в)/l]^{0{,}25},$$

где A_1 – коэффициент, зависящий от положения стен, равный 1,0 для вертикальной поверхности, 1,3 – для горизонтальной поверхности, обращенной вверх, 0,7 – для горизонтальной поверхности, обращенной вниз; A_2 – коэффициент, зависящий от температуры кладки и окружающего воздуха; l – определяющий размер, м, принимается равным высоте участка, расположенного в вертикальной плоскости, или меньшей стороне участка, расположенного в горизонтальной плоскости.

Коэффициент A_2 зависит от средней арифметической температуры наружной кладки и окружающего воздуха $t_{ср} = 0{,}5(t_{кл} + t_в)$, °С, и численно может быть принят равным $A_2 = 1{,}14$ при $t_{ср} = 50$; $A_2 = 1{,}09$ при $t_{ср} = 100$; $A_2 = 1{,}05$ при $t_{ср} = 200$; $A_2 = 0{,}95$ при $t_{ср} = 300$ °С.

4. Потери теплоты излучением через окна установки:

$$Q_{изл} = \varphi\,c_о\,F\,\tau_0\,[(T_п/100)^4 - (T_в/100)^4],\ кДж/ч,$$

где φ – коэффициент диафрагмирования открытого отверстия, зависящего от его формы и отношения ширины отверстия a к толщине стенки δ; $c_о = 20{,}5$ $кДж/(м^2 \cdot К^4)$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; F – площадь открытого отверстия, $м^2$; τ_0 – время, в течение которого отверстие открыто, ч.

Значения коэффициента диафрагмирования открытого отверстия φ можно принять из нижеприведенной таблицы:

Формаотверстия	a/δ								
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0
Круглое (цилиндр)	0,1	0,24	0,36	0,44	0,51	0,52	0,68	0,75	0,81
Квадратное	0,1	0,26	0,38	0,46	0,52	0,54	0,7	0,77	0,83
Прямоугольник с отношением сторон 1 : 2	0,13	0,3	0,43	0,52	0,58	0,6	0,73	0,81	0,85
Прямоугольник вытянутый	0,1	0,4	0,53	0,61	0,67	0,63	0,8	0,86	0,9

5) Потери теплоты с продуктами горения, выбивающимися из рабочего пространства. Вследствие разности давлений топочных газов и наружно-

го воздуха через открытые проемы топки происходит выброс продуктов горения в окружающую среду.

$$Q_{\text{выб}} = V_{\text{выб}}\, t_{\text{выб}}\, c_{\text{ух}}\ , \text{кДж/ч},$$

где $V_{\text{выб}}$ – объем выбивающихся продуктов горения, м^3/ч; $t_{\text{выб}}$ – температура выбивающихся из топки продуктов сгорания, °С; $c_{\text{ух}}$ – средняя изобарная объемная теплоемкость продуктов горения, выбивающихся из топки, кДж/(м^3 · К).

Объем $V_{\text{выб}}$ определяется из выражения:

$$V_{\text{выб}} = 3600 f \omega,\ \text{м}^3/\text{ч},$$

где f – площадь открытого отверстия (или щели), через которое происходит выбивание топочных газов, м^2; ω – скорость вылета продуктов горения из отверстия, м/с.

При полном сгорании топлива для приближенных расчетов $c_{\text{ух}}$ можно пользоваться значениями средней теплоемкости из таблицы:

$t_{\text{выб}}$, °С	0 – 200	200 – 400	400 – 700	700 – 1000	1000 – 2000
$c_{\text{ух}}$, кДж/(м^3·К)	1,38	1,42	1,47	1,51	1,55

6. Потери теплоты с охлаждающей водой. В нагревательных и других тепловых установках очень часто устанавливают объемные металлические экраны, заполненные проточной водой. Такой экран снижает потери теплоты через загрузочные дверцы и окна топочной камеры.

Металлические экраны также снижают лучистый теплообмен в рабочей зоне установки. Тепловые потери с охлаждающей водой

$$G_{\text{охл.в}} = G\, c_{\text{в}}(t_{\text{г}} - t_{\text{х}}),\ \text{кДж/ч},$$

где G – расход воды на охлаждение данного элемента (объемного металлического экрана), кг/ч; $t_{\text{г}}$, $t_{\text{х}}$ – температура охлаждающей воды на выходе и входе в элемент, °С; $c_{\text{м}}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг · К).

7. Потери теплоты с транспортирующими устройствами и тарой

$$Q_{\text{тт}} = \text{М}_{\text{тт}}\, t_{\text{тк}}\, c_{\text{тт}},\ \text{кДж/ч},$$

где $\text{М}_{\text{тт}}$ – масса транспортирующих устройств и тары, кг, выходящих из печи за 1 ч; $t_{\text{тк}}$ – температура материала транспортирующих устройств и тары конечная, °С; $c_{\text{тт}}$ – удельная теплоемкость материала транспортирующих устройств и тары при $t_{\text{тк}}$, кДж/(кг·К).

8. Потери теплоты с окалиной (только при нагреве металла)

$$Q_{\text{ок}} = 0{,}01\ \text{М}_{\text{м}}\, \delta\, m_{\text{ок}}\, t_{\text{ок}}\, c_{\text{ок}},\ \text{кДж/ч},$$

где $\text{М}_{\text{м}}$ – производительность печи, кг/ч; δ – угар при нагреве металла, % (для железа δ = 1…3 %); $m_{\text{ок}}$ – масса окалины, образующейся от окисления 1 кг металла (≈ 1,4 для железа); $t_{\text{ок}}$ – температура окалины при выдаче из печи, °С; $c_{\text{ок}}$ – удельная теплоемкость окалины при $t_{\text{ок}}$, кДж/(кг·К), ($c_{\text{ок}}$ ≈ 1,05…1,25).

9. Потери теплоты от химического недожога топлива зависят от содержания в уходящих газах CO, H_2, CH_4 и пр. Связанная с недожогом потеря теплоты определяется для каждого из компонентов.

Например, для CO

$$Q_{\text{х.н}} = 0{,}01 \cdot 12\,600\, B\, V_{\text{сг}}\, \text{М}_{\text{CO}},\ \text{кДж/ч},$$

где 12 600 – теплота сгорания CO, кДж/м^3; $V_{\text{сг}}$ – объем сухих продуктов горения на единицу топлива при фактическом α; М_{CO} – содержание CO в

продуктах горения, %.

Аналогично подсчитываются потери теплоты с другими продуктами неполного сгорания: теплота сгорания для H_2 составляет 10 900 кДж/м^3; для CH_4 – 35 800 кДж/м^3. Содержание в уходящих газах CO, H_2, CH_4 и пр. определяется путем химического анализа топочных газов. При полном сжигании топлива потери теплоты с химическим недожогом топлива принимают по практическим данным в зависимости от рода топлива.

$$Q_{\text{х.н}} = 0{,}01 q_3 B Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \text{ кДж/ч},$$

где q_3 – химический недожог, %, от прихода теплоты при сгорании топлива (для экранированных топок можно принять q_3 = 1,6 %; для неэкранированных камерных топок q_3 = 1,8…4 %).

10. Потери теплоты на химические реакции в нагреваемом материале при его обжиге

$$Q_{\text{энд}} = q_{\text{х}} G_{\text{ч}}, \text{ кДж/ч},$$

где $q_{\text{х}}$ – расход теплоты на химические реакции с учетом эндотермических процессов на 1 кг обожженного материала, кДж/кг; $G_{\text{ч}}$ – часовая производительность печи по массе обожженого материала, кг/ч.

11. Потери теплоты на испарение влаги из необожженного материала и перегрев паров до температуры уходящих газов

$$Q_{\text{исп}} = 0{,}01 G_{\text{ч1}} \omega_0 (2487 + 1{,}96\, t_{\text{ух}}), \text{ кДж/ч},$$

где $G_{\text{ч1}}$ – часовая производительность печи по абсолютно сухому сырью, кг/ч; ω_0 – влажность сырьевого материала, %, на абсолютную сухую массу; 2487 кДж/кг – скрытая теплота парообразования; 1,96 – массовая теплоемкость водяного пара, кДж/(кг · К); $t_{\text{ух}}$ – температура уходящих газов, °С.

12. Потери теплоты с механическим недожогом топлива принимают по практическим данным в зависимости от рода твердого топлива и условий его сжигания.

$$Q_{\text{м.н}} = 0{,}01 q_4 B Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \text{ кДж/кг},$$

где q_4 – потери теплоты с механическим недожогом, % (из характеристики показателя топки).

13. Потери теплоты на аккумуляцию ограждающих конструкций (только для аппаратов и печей периодического действия)

$$Q_{\text{ак}} = G_{\text{ст}} c_{\text{ст}} (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}) \cdot 10^3, \text{ кДж/ч},$$

где $G_{\text{ст}}$ – масса ограждения или стен, перекрытия, пола, т; $c_{\text{ст}}$ – массовая теплоемкость материала ограждения, кДж/(кг · К); $t_{\text{ст1}}$, $t_{\text{ст2}}$ – температура нагретого и холодного ограждения.

Таким образом, приходная часть баланса имеет вид:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{хим}} + Q_{\text{ф.в}} + Q_{\text{ф.г}} + Q_{\text{экз}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{ф.м}} + Q_{\text{пар}}.$$

Расходная часть теплового баланса для тепловых и теплотехнологических установок непрерывного действия имеет вид:

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{выб}} + Q_{\text{охл.в}} + Q_{\text{тт}} +$$

$$+ Q_{\text{ок}} + Q_{\text{х.н}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{м.н}} + Q_{\text{ак}}.$$

5.1. Сводная таблица баланса теплоты

Наименование статей	Количество теплоты	
	кДж/ч	%
Часовой приход теплоты		
1. С теплотой сгорания топлива		
2. С теплотой подогретого воздуха		

3. С теплотой нагретого газа 4. С теплотой экзотермических реакций 5. С транспортирующими устройствами и тарой 6. С материалом 7. С паром		
Всего с приходом теплоты		100
Часовой расход теплоты 1. На нагрев материала 2. С уходящими газами 3. Через кладку 4. Излучение через окна 5. С выбивающимися продуктами горения 6. С охлаждающей водой 7. С транспортирующими устройствами и тарой 8. С окалиной 9. От химической неполноты сгорания 10.С эндотермическими реакциями 11.На испарение влаги 12.С механической неполнотой сгорания 13.На аккумуляцию		
Всего с расходом теплоты		100
Невязка расчета		

При решении уравнения баланса теплоты $Q_{пр} = Q_{расх}$ определяется часовой расход топлива B, м^3/ч или кг/ч. После определения расхода топлива составляется сводная таблица баланса теплоты (табл. 5.1).

Учет топлива ведут в перерасчете на условное топливо (теплота сгорания 29 308 кДж/кг). Для сравнения полученного расхода топлива B с нормами производят также пересчет расхода условного топлива на единицу получаемого материала (кг условного топлива / кг материала).

6. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

6.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по созданию ограждающих конструкций зданий и сооружений с минимальными тепловыми потерями. Большую роль в этом играют создание новых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий, а также разработка новых методов определения теплофизических свойств (ТФС) материалов. Новые методы расчета ТФС материалов и изделий позволят эффективно оценить тепловой и воздушный режим зданий различного назначения.

Проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты строительных объектов. При производстве материалов или в ходе строительства на объекте необходимо уметь определять ТФС строительных, теплоизоляционных и облицовочных материалов, так как фактические характеристики изделий могут не соответствовать сертификату или паспорту. Кардинальный ответ на запросы техники – развитие методов расчета и прогнозирования теплофизических характеристик на основе фундаментальных научных обобщений.

Теплотехнические характеристики ограждающих конструкций зданий и сооружений существенно влияют на работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии.

Оценка энергоэффективности зданий и сооружений проводится на основании энергетического паспорта здания или сооружения. Типовой энергетический паспорт здания или сооружения должен включать:

- климатологические характеристики города (района) объекта, длительность отопительного периода, расчетную температуру внутреннего и наружного воздуха помещений [38];
- геометрические размеры здания или сооружения и его ориентацию по сторонам света, его этажность и объем, площадь наружных ограждающих конструкций, внутренних помещений, а также пола первого этажа и потолка последнего этажа отапливаемых помещений;
- сведения о теплотехнических свойствах ограждающих конструкций здания или сооружения, термическом сопротивлении теплопередачи отдельных элементов многослойной системы ограждений и здания в целом;
- сведения о системах водоснабжения, отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, кондиционирования воздуха – системах обеспечения микроклимата помещений и способах их регулирования;
- данные о системах электроснабжения и освещения здания;
- нормативные характеристики удельных расходов энергии.

При составлении энергетического паспорта здания или сооружения замеряются: коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи, теплопередачи стен, перекрытий, пола, оконных проемов. Замеряются: средняя кратность воздухообмена за отопительный период, фактическая температура наружного воздуха и помещений, расходы электроэнергии, тепловой энергии, газа, горячей и холодной воды за сутки. Выполняют замеры люксметром уровней освещенности на рабочих местах, проходах и уровней напряжения в течение суток на вводах щитов питания освещения.

6.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха создают в закрытых помещениях зданий и сооружений микроклимат, обеспечивающий благоприятные условия для труда и отдыха людей, а также для ведения технологического производственного процесса. Основными параметрами, определяющими состояние воздуха, являются его температура, влажность, чистота, скорость движения. Нормы метеорологических условий в производственных помещениях, общественных и жилых зданиях, расчетные параметры наружного воздуха для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха приведены в [31, 32, 38].

Системы отопления и горячего водоснабжения по виду источников тепловой энергии могут быть с собственной котельной или с питанием тепловой энергии от тепловых пунктов. Тепловые пункты могут быть индивидуальными (ИТП), обслуживающими одно здание, и центральными (ЦТП), обслуживающими группу зданий и сооружений. На тепловых пунктах обычно устанавливаются теплообменники, насосы (подкачивающие, подмешивающие), системы управления, регулирования, учета и измерения параметров.

Эффективность систем отопления и горячего водоснабжения определяется схемой присоединения абонентов к тепловой сети. Схемы присоединения бывают зависимые, когда теплоноситель непосредственно поступает в систему горячего водоснабжения из тепловой сети, а также независимые, когда теплоноситель из тепловой сети поступает в подогреватель, в котором его теплота передается вторичному теплоносителю, который и поступает в приборы горячего водоснабжения. Независимые схемы также применяются для подключения абонентов к тепловой сети в высотных зданиях.

При наличии ЦТП в зданиях для систем отопления должны предусматриваться узлы смешения, в которых устанавливаются элеваторы или насосы смешения.

Центральные системы отопления подразделяются: по виду теплоносителя – на водяные, паровые, воздушные и комбинированные; по способу перемещения теплоносителя – на системы с естественной циркуляцией (гравитационные) и насосные; по начальным параметрам теплоносителя – на низкотемпературные водяные (при температуре воды меньше 105 °С), высокотемпературные водяные (при температуре воды больше 105 °С), паровые низкого давления (для пара при избыточном давлении $p_{изб}$ = 5…70

кПа) и паровые высокого давления (для пара избыточного давления $p_{изб} \geq$ 70 кПа).

Паровые системы отопления бывают открытые (сообщающиеся с атмосферой) и закрытые, одно- и двухтрубные, с верхней, нижней и средней разводкой. Системы отопления, где конденсат возвращается самотеком в котел, называются замкнутыми. В разомкнутых системах конденсат сначала поступает в конденсатный бак и оттуда насосом перекачивается в котел. В закрытых системах парового отопления, в отличие от открытых, конденсатный бак находится под избыточным давлением ($p_{изб}$ = 5…15 кПа). Возврат конденсата может осуществляться за счет избыточного давления или с помощью насоса. Применение парового отопления низкого или высокого давления регламентируются нормами [29, 31, 41].

Системы панельно-лучистого отопления осуществляют обогрев помещений за счет излучения теплоты поверхностями гладких греющих панелей, установленных в полу, потолке или стенах. Для обогрева панелей используются пар, горячая вода и воздух. Температура на поверхности панели принимается с учетом места установки панелей и направления теплового потока излучения. Подбор отопительных панелей и расчет теплоотдачи в системах панельно-лучистого отопления рассмотрен в [29, 31, 41].

Системы воздушного отопления (обычно децентрализованные) следует применять для больших помещений, в которых допустима рециркуляция воздуха. Подогретый в местных воздушно-отопительных агрегатах воздух с большой скоростью (до 20 м/с) распространяется по помещению.

Вентиляционные установки делятся на: вытяжные и приточные (с естественной или принудительной циркуляцией); отопительно-циркуляционные и тепловые завесы (для производственных или общественных зданий и сооружений). Вытяжные вентиляционные установки с естественной циркуляцией оборудованы дефлекторами, а с принудительной циркуляцией – вентилятором с электродвигателем. Приточные вентиляционные установки должны компенсировать количество воздуха, удаляемого вытяжной вентиляцией, или разность количества воздуха, удаляемого местными отсосами, и количества воздуха, подаваемого местной приточной вентиляцией.

Воздушные завесы с подогревом воздуха устраивают у ворот дверей и технологических проемов отапливаемых зданий, когда исключена возможность устройства шлюзов и тамбуров. Отопительно-циркуляционные вентиляционные установки и тепловые воздушные завесы, кроме электродвигателя вентилятора, имеется теплообменник, который потребляет тепловую или электрическую энергию.

Системы кондиционирования воздуха предназначены для создания комфортных условий в жилых и общественных помещениях. Системы кондиционирования состоят из следующих элементов: вентилятор подачи воздуха, теплообменники для нагрева (охлаждения) воздуха, фильтры очистки воздуха, увлажнители, приборы контроля и регулирования и системы распределения воздуха. Однако системы кондиционирования требуют больших капитальных и энергетических затрат. Для определения фактических режимов работы и соответствия выбранной системы кондиционирования воздуха производят замеры: размеров помещений, температуры и относительной влажности воздуха, скорости воздуха, температуры подаваемого летом и зимой воздуха, температуры наружного воздуха, воздухообмена, инфильтрации воздуха.

Нагревательными приборами в системах отопления и вентиляции служат: радиаторы чугунные или штампованные из листовой стали; регистры из гладких труб (гнутые или сварные); трубы чугунные ребристые; конвекторы с нагревательными элементами из оребренных стальных труб. Имеют распространение греющие бетонные панели с вмонтированными в них змеевиками из стальных труб, по которым циркулирует горячая вода или нагретый воздух.

6.3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

При разработке мероприятий по энергосбережению или проведению энергоаудита из проекта здания определяют параметры всех элементов

систем отопления, вентиляции и кондиционирования и их расчетные характеристики. Необходимо также уточнение годового режима работы систем управления и измерения параметров воздуха.

Расчетную нагрузку установок вентиляции и кондиционирования определяют из проекта предприятия или организации. При отсутствии таких данных ее можно определить аналитическими методами, с учетом требований [29, 32, 41], наружного и внутреннего объема зданий, удельной вентиляционной характеристики и температуры воздуха внутри и вне здания по методике [32, 41]. Основными характеристиками, которые должны определяться при обследовании систем вентиляции, являются: фактические коэффициенты загрузки, время работы установок в течение суток, температура воздуха внутри помещения и средняя температура наружного воздуха, кратность воздухообмена.

Мероприятия по энергосбережению в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха сводятся к следующему.

1. *Применение экономически целесообразного сопротивления теплопередачи наружных ограждений* при строительстве и дополнительного утепления наружных стен при реконструкции зданий.

Мероприятие предназначено для увеличения сопротивления теплопередачи наружных стен и снижения тепловых потерь здания за счет улучшения его теплозащитных свойств и применения эффективных теплоизоляционных материалов.

Наиболее эффективна теплозащита стен с наружной стороны. Применяют, как правило, напыление какого-либо утеплителя (раствора пенопласта, пенополиуретана), либо наклейку плиточного утеплителя (пенополистирола), либо обивка теплоизоляционным материалом. Работа должна выполняться без нарушения функционирования здания.

Перед нанесением утепляющих растворов или наклейкой наружные поверхности стен очищают от пыли и грязи с последующей промывкой. Напыление выполняется слоями 1…2 см. Последующий слой наносят после затвердения предыдущего. Наклейку плит к стенам производят клеем ПВА или бустилатом. Затем крепят к дюбелям сетку с ячейками от 2 до 4 см с антикоррозийным покрытием и наносят слой цементно-известковой штукатурки. Через два дня поверхность покрывают кремнеорганическим составом или окрашивают гидрофобной краской.

2. *Устройство вентилируемых наружных стен*.

Мероприятие предназначено для повышения уровня тепловой защиты наружных стен. В стенах вблизи наружной поверхности устраивают вертикальные щелевые каналы шириной 2…3 см, через которые под воздействием естественной тяги проходит наружный воздух. В холодный период воздух нагревается от внутренней стены и подается в помещение. В теплый период каналы перекрываются заслонками и превращаются в замкнутые воздушные прослойки, которые увеличивают термическое сопротивление стены и препятствуют нагреву ограждения. Высоту каналов обычно принимают в один этаж.

Энергосбережение достигается за счет возврата в помещение части теряемой теплоты от наружных ограждений в зимнее время и за счет увеличения сопротивления теплопередачи наружного ограждения при устройстве замкнутых воздушных прослоек летом.

3. *Тепловая защита наружной стены в месте установки отопительного прибора*.

Мероприятие предназначено для снижения тепловых потерь от наружных ограждений (стены), к которым прилегают отопительные приборы. Отопительные приборы обычно устанавливаются у наружных ограждающих стен. При этом температура внутренней поверхности стены за прибором выше, чем в остальной части, что приводит к увеличению теплового потока и является причиной повышенных тепловых потерь через ограждения. При установке отопительных приборов в нише стенка за прибором тоньше, а ее сопротивление теплопередачи меньше, чем у стены без ниш, что еще больше увеличивает потери теплоты через ограждающие конструкции.

Для снижения тепловых потерь за счет лучистого теплообмена необходимо установить защиту в виде экрана с низкой степенью черноты. Для

снижения тепловых потерь за счет теплопроводности необходимо установить теплоизоляционный слой с низким коэффициентом теплопроводности на участке всей ниши наружной стены. Теплоизоляцию желательно располагать ближе к поверхности стены.

4. *Устройство вентилируемых окон*.

Мероприятие предназначено для сокращения воздухопроницаемости и увеличения сопротивления теплопередачи оконных блоков. Снижение потерь теплоты осуществляется при использовании тройных вентилируемых окон. Возможно два варианта таких окон: принудительное удаление воздуха, прошедшего через окна, в воздуховоды вытяжной естественной вентиляции и удаление нагретого воздуха в атмосферу. Между стеклами могут располагаться солнцезащитные жалюзи. Воздухопроницаемость окна так же сокращается.

В теплый период движущийся воздух охлаждает нагретые стекла и переплеты, уменьшая теплопоступления снаружи внутрь помещения. В холодный период года через вентилируемое окно проходит удаляемый воздух из помещения, а окно служит теплоизолятором от холодного наружного воздуха. Температура стекла, обращенного в помещение, повышается, а тепловые потери через остекление снижаются. В холодный период года возможно образование конденсата на наружном стекле за счет эффекта точки росы воздуха, а для удаления конденсата предусматривают специальные устройства – конденсатоотводчики.

Энергосбережение достигается за счет увеличения сопротивления теплопередачи, которое прямо пропорционально зависит от удельного расхода воздуха, проходящего через вентилируемое окно.

5. *Установка дополнительного* (*тройного*) *остекления*.

Мероприятие предназначено для сокращения воздухопроницаемости и увеличения сопротивления теплопередачи оконных блоков. Между стеклами возможно расположение солнцезащитных жалюзи, а на стеклах теплопоглощающих и теплоотражающих пленок.

Двойные окна в спаренных и раздельных переплетах, которые устанавливают до сих пор в массовом строительстве, имеют малое сопротивление теплопередачи, что приводит к дискомфорту в помещении и большим тепловым потерям. При реконструкции здания такие окна могут быть заменены на трехслойные, а при отсутствии необходимости в замене переплетов может быть установлен дополнительно третий съемный переплет, закрепляющийся с помощью фиксаторов. При спаренных переплетах третий устанавливается со стороны помещения, а при раздельных – между рамами на внутреннем переплете.

6. *Применение теплопоглощающего и теплоотражающего остекления*.

Мероприятие предназначено для сокращения теплопоступлений в помещения от солнечной радиации, что приводит к комфорту в помещениях. Теплопоглощающие стекла в структуре имеют металлическую основу, которая поглощает лучи в инфракрасном диапазоне излучения (тепловые лучи). Коэффициент пропуска оконным стеклом тепловых лучей 0,3…0,75. При поглощении солнечных и инфракрасных лучей стекло нагревается, его температура повышается до 50…60 °С, что приводит к образованию естественных восходящих конвективных потоков от нагретых поверхностей стекла и между стеклами. Тепловая активность остекления во многом зависит от угла падения солнечных лучей и толщины стекла. Для отвода теплоты в летнее время целесообразно обдувать остекленные поверхности воздухом. Теплопоглощающее стекло следует устанавливать снаружи оконного блока.

Теплоотражающие стекла покрывают селективными или полимерными пленками на металлической основе, которые отражают лучи в инфракрасном диапазоне излучения (тепловые лучи). Коэффициент пропуска тепловых лучей у таких стекол составляет 0,2…0,6. Стекло монтируют в одном пакете с простым стеклом так, чтобы отражающая пленка находилась внутри пакета. Теплоотражающее стекло следует устанавливать всегда снаружи, при этом внутреннее простое стекло (без пленки) нагревается меньше.

Наибольшую эффективность имеют двойные или тройные стекла с толщиной воздушной прослойки между ними 10…15 мм. В этом случае естественная конвекция между стеклами дестабилизирована, а воздушная прослойка служит теплоизолятором, так как передача теплоты через оконный блок осуществляется только за счет кондуктивной теплопроводности воздуха. Применяют и многослойные теплоотражающие пленки, приклеиваемые к стеклам после окончания работ по остеклению, и тогда удается снизить пропуск тепловых лучей до 0,2.

В вечернее время пленка отражает в помещение искусственный свет. В холодный период года отражающее стекло уменьшает тепловые потери через окна. Применение теплоотражающих стекол позволяет снизить теплопоступления и затраты энергии на системы кондиционирования на 15…20 %.

Наилучшие результаты получаются при покрытии стекла золотом, наносимым распылением при глубоком вакууме. Толщина слоя золота 0,1…0,2 мкм. Такое остекление дорого, но только золоту свойственно селективное отражение инфракрасных лучей и хорошая проводимость видимых световых лучей.

7. *Устройство застекленных лоджий*.

Мероприятие предназначено для сокращения расхода проникающего в помещение наружного холодного воздуха в зимний период и повышения температуры в лоджии (за наружной стеной помещения).

Лоджии выполняют с однослойным остеклением и реже двухслойным в спаренных переплетах. В лоджии формируется собственный тепловой микроклимат, снижающий тепловые потери от наружных ограждений и через остекление. Нижнюю часть лоджии следует утеплить слоем досок или утеплителем из плит. Для уменьшения естественной освещенности в помещении за лоджией необходимо, чтобы рамы и крепления остекления занимали возможно меньшую площадь, не имели выступов, чтобы не создавать тени при боковом солнечном освещении. Кроме того, должна быть обеспечена возможность периодической очистки остекления.

Энергосбережение достигается за счет сокращения воздухопроницаемости окон, уменьшения потребности в теплоте на нагревание воздуха за счет инфильтрации (притока), а также за счет увеличения температуры за наружной стеной и окном помещения, что приводит к снижению тепловых потерь от наружных ограждений зданий.

6.4. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Основное требование к состоянию воздушной среды в жилых, общественных, производственных помещениях, в промышленных зданиях и сооружения, а также организации воздухообмена в помещениях с вредными выделениями заключается в том, что воздушные завесы должны быть обеспечены системами отопления, вентиляции (приточной и вытяжной) и кондиционирования воздуха в пределах расчетных параметров наружного воздуха [29, 31, 41].

1. *Периодический режим работы системы отопления*.

Периодический режим работы системы отопления применяют в производственных, гражданских, учебных, спортивных, торговых, административных зданиях, используемых для работы неполные сутки и дни недели, в которых допускается снижение температуры внутри помещений в нерабочее время. В режиме работы системы отопления в течение суток наблюдаются три характерных промежутка времени:

- основной рабочий режим, когда в помещении поддерживаются заданные параметры температуры и влажности;
- дежурный режим, когда после основного режима система отопления переводится на режим поддержания пониженной температуры в помещении;
- режим форсированного нагрева помещения, в течение которого система отопления переводится на возможно быстрый разогрев помещения после охлаждения.

В помещениях наблюдается и недельный цикл, когда в выходные и праздничные дни в течение полных суток может поддерживаться дежурный режим отопления и сниженная температура в помещении. Для поддержания дежурного режима используется водяное отопление, которое выполняет функцию поддержания минимального уровня температуры. Но в результате некоторого охлаждения помещения понижается не только температура внутреннего воздуха, но и температура ограждений.

Нагрев ограждений и внутреннего воздуха к началу нового рабочего дня требует времени и дополнительной мощности. Продолжительность и темп нагрева помещения зависят от: термического сопротивления наружных ограждений, влияющего на снижение температуры в нерабочее время; тепловой активности ограждающих конструкций к тепловому воздействию; интенсивности теплоотдачи от источника системы отопления к внутреннему воздуху помещений и от воздуха к поверхности ограждений; температурного напора в дежурном и рабочем режиме, а также перепада температур наружного воздуха. Нагрев помещений должен осуществляться форсированно с высоким темпом, с большей мощностью, в отличие от отопления в рабочем режиме, так как теплота в режиме нагрева расходуется на восполнение тепловых потерь и разогрев ограждений и воздуха до требуемого уровня.

Наиболее гибким режимом эксплуатации служит комбинированная система отопления. Она состоит из базовой системы водяного отопления и дополнительной системы воздушного отопления. Воздушное отопление совмещается с приточной вентиляцией и в режиме форсированного нагрева работает в режиме полной рециркуляции воздуха.

Работа систем периодического отопления поддается автоматизации и программному управлению поддержания расчетного режима. На случай неожиданного резкого понижения температуры наружного воздуха в контрольных помещениях устанавливают датчики допустимой минимальной температуры внутреннего воздуха. По сигналу от них включается система отопления в дополнительном режиме. Экономия энергии тем больше, чем продолжительнее период охлаждения. Для уменьшения продолжительности форсированного нагрева следует увеличить теплоустойчивость ограждений, максимально интенсифицировать теплоотдачу к ограждениям, применяя, например, направленные струи воздушного отопления или используя источники лучистой энергии (излучатели), направленные на ограждения.

2. *Отопление помещений теплотой рециркуляционного воздуха*.

Теплоту рециркуляционного воздуха рекомендуется использовать для производств, в которых допускается рециркуляция воздуха, а также при температуре воздуха в верхней зоне более 30 °С и подачи воздуха на расстояние не более 15 м. Нагретый воздух забирается из верхней зоны производственного помещения, очищается от пыли и вентилятором по воздуховодам нагнетается в приточный насадок (цилиндрической или щелевой формы). Энергосбережение обеспечивается за счет утилизации теплоты удаляемого воздуха.

3. *Применение вращающихся регенеративных воздухо-воздушных утилизаторов теплоты* рассмотрено в гл. 7.

4. *Системы воздушного отопления*.

Системы воздушного отопления применяют для жилых, общественных, производственных, сельскохозяйственных зданий и сооружений, а также гостиниц, в которых функция отопления совмещается с вентиляцией. В системе воздушного отопления возможна полная или частичная рециркуляция воздуха.

Воздух для отопления нагревается в калориферах или воздухоподогревателях горячей водой, паром, горячим воздухом или другим теплоносителем. Процесс тепломассообмена может осуществляться двумя путями: 1) нагретый воздух по специальным каналам через воздухораспределительные решетки поступает в помещение и смешивается с внутренним воздухом; 2) нагретый воздух перемещается во внутренних каналах, окружающих помещение, нагревая при этом стенки помещения, теплота от которых передается внутреннему воздуху помещения.

Охладившийся воздух по другим каналам возвращается в калорифер для повторного нагрева или выбрасывается частично в атмосферу, когда температура воздуха в помещении высокая. Таким образом, система воздушного отопления может быть с полной рециркуляцией, когда воздух полностью возвращается для повторного нагрева, или частичной рециркуляцией, когда воздух частично выбрасывается в атмосферу и частично повторно нагревается. Системы воздушного отопления фактически являются комбинированными системами отопления и вентиляции.

Преимущества систем воздушного отопления: обеспечение равномерности температуры по объему помещения, возможность очистки и увлажнения воздуха, отсутствие отопительных приборов в помещении. Недостатки систем воздушного отопления: большие поперечные сечения воздуховодов по сравнению с трубами водяного и парового отопления, меньший радиус действия по сравнению с теми же системами, потери теплоты при недостаточной теплоизоляции воздуховодов.

Для снижения энергетических затрат на подогрев наружного воздуха возможно использование регенеративных теплообменников, позволяющих утилизировать теплоту горячего вытяжного воздуха. В системах воздушного отопления сокращаются потери теплоты за счет отсутствия радиаторных ниш – участков наружных ограждений, имеющих место в водяных и паровых системах отопления. Энергосбережение при применении воздушного отопления достигается и за счет автоматизации системы при малой теплоемкости воздуха, а также за счет возможного поддержания в нерабочее время в помещении более низкой температуры воздуха и быстром нагреве помещения перед началом рабочего дня.

5. *Периодический режим работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха*.

Периодические режимы работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха применяют для стабилизации температуры, влагосодержания и газового состава воздуха. Они наиболее эффективны при обслуживании помещений большого объема в общественных зданиях с переменным заполнением (зрительные, торговые, спортивные залы, залы ожидания), где одновременно изменяются температура, влажность и состав воздуха (содержание углекислого газа и кислорода).

Снижение энергопотребления системами вентиляции и кондиционирования воздуха обеспечивается изменением расхода воздуха требуемых параметров, применением сложных и дорогостоящих воздухораспределителей, использованием совершенных методов регулирования работы вентилятора, сложной системы автоматизации. Альтернативным способом регулирования систем может служить периодическое вентилирование помещений в зависимости от состояния воздуха помещения, чем и обеспечивается экономия электрической и тепловой энергии. Продолжительность перерыва зависит от кратности воздухообмена, объема помещения, состава воздуха. Функциональные схемы автоматического управления контролируют концентрацию углекислого газа, изменения влажности и температуры воздуха.

6. *Устройство воздушных завес*.

Воздушные завесы устанавливают при входе, у открытых проемов в общественных и промышленных зданиях и сооружениях, цехах, торговых центрах, магазинах, в многоэтажных жилых зданиях при часто открывающихся входных дверях или со значительными по площади воротами. Мероприятие направлено на снижение затрат теплоты на нагрев воздуха, поступающего через входы, въезды и проемы.

Применяют комбинированные воздушно-тепловые завесы с тамбуром и без него, а забор воздуха осуществляется из помещения или снаружи. Воздушная завеса состоит из двух, симметрично расположенных пар, вертикальных воздухораспределительных стояков, установленных внутри помещения. Внутренняя пара стояков, расположенная ближе к помещению, подает подогретый (до 60 °С) в калориферах воздух, а наружная пара стояков подает не подогретый воздух, забираемый из помещения. При закрытых воротах наружная пара стояков отключается, а внутренняя завеса работает в режиме отопления. При открывании ворот к работе подключается и наружная пара стояков.

Энергосбережение достигается за счет снижения потребности в теплоте на нагрев приточного воздуха и затрат электроэнергии на его перемещение.

7. *Система отопления помещений с применением газовых инфракрасных излучателей*.

Система предназначена для обогрева постоянных и временных рабочих мест производственных и вспомогательных помещений; помещений и конструкций на открытых и полуоткрытых площадках в процессе строительства зданий и сооружений; систем снеготаяния, на кровлях зданий и сооружений. Отопительными приборами служат горелки инфракрасного излучения. В горелке используется газ низкого давления с предварительным смешением газа и воздуха, а температура излучающей поверхности достигает примерно 850 °С. При такой температуре около 60 % теплоты, выделяющейся при сгорании газа, передается излучением в виде инфракрасных (тепловых) лучей. Размещение горелок в помещении или на открытой площадке, число их рядов, расстояние между горелками в ряду, высоту их подвески над полом, угол наклона горелок, определяется исходя из норм облученности и типа горелок.

Энергосбережение достигается за счет уменьшения отапливаемого объема помещения, отсутствия перегрева верхней зоны помещения, малой тепловой инерции и применения автоматики управления.

8. *Газовоздушное лучистое отопление*.

Газовоздушное отопление применяется для производственных помещений, сборочных, механических, ремонтных цехов, депо, гаражей, ангаров. Функцию отопительных приборов выполняют трубопроводы с высокой температурой, проложенные в верхней зоне помещения, не ниже 4,5 м от пола. Внутри труб циркулирует смесь нагретого воздуха с продуктами сгорания топлива, чем обеспечивается высокая температура трубопроводов. Передача теплоты с поверхности труб к воздуху помещения происходит за счет суммарного теплообмена – конвекцией и лучеиспусканием. Однако, чем выше температура трубопровода, тем больше доля передачи теплоты за счет лучистого теплообмена. Теплоизлучающие трубы имеют диаметр до 0,4 м и собирают на фланцах. Для уменьшения потерь теплоты в верхнюю часть или неработающую зону помещения трубы закрывают сверху эффективной тепловой изоляцией, а сбоку вдоль труб устанавливают продольные металлические экраны (козырьки), желательно с высокой степенью черноты (окрашенные козырьки). Температура теплоносителя, циркулирующего по трубопроводам, должна исключать эффект точки росы на внутренней поверхности труб и низкотемпературной коррозии. Энергосбережение достигается за счет отсутствия перегрева верхней зоны и сохранения условий теплового комфорта в рабочей зоне.

9. *Применение теплонасосных установок* и энергии низкого потенциала (конденсата, воздуха) рассмотрено в гл. 7.

6.5. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ТРУБКАМИ

В промышленности находят применение тепловые трубки, действие которых основано на процессах испарения и конденсации. Значения коэффициентов теплоотдачи α, Вт/(м^2 · К), при кипении (500…5000) и конденсации (4000…20 000) воды (и других жидких веществ) позволили весьма эффективно использовать процессы кипения и конденсации для систем отопления и горячего водоснабжения.

Тепловая трубка представляет собой устройство для переноса теплоты из одной зоны (горячей, греющей) в другую (холодную, нагреваемую) при малом градиенте температуры. Тепловая трубка является наиболее совершенным из всех разнообразных устройств для передачи теплоты (более 90 %) из зоны испарения в зону конденсации.

Конструктивно тепловая трубка представляет собой герметически закрытую камеру самой разнообразной формы, иногда, в зависимости от условий применения, внутренняя поверхность которой выложена капиллярно-пористым фитилем. Часть объема камеры заполняется рабочей жидкостью – теплоносителем. Теплота, поступающая от внешнего источника к испарителю, вызывает испарение теплоносителя на этом участке трубки – скрытую теплоту парообразования. Сконденсировавшаяся жидкость воз-

вращается обратно по фитилю или по стенкам корпуса тепловой трубы в испаритель для последующего испарения.

В тепловой трубе используется цикл «испарение – конденсация» и непрерывно осуществляется перенос скрытой теплоты парообразования от испарителя к конденсатору. Количество теплоты, которое может быть перенесено в виде скрытой теплоты парообразования, обычно в несколько раз выше количества, которое может быть перенесено в виде энтальпии рабочей жидкости в обычной конвективной системе. Поэтому тепловая труба может передавать большее количество теплоты при малом размере установки. Температурный напор в тепловой трубе равен сумме температурных напоров в испарителе, паровом канале и конденсаторе.

В зоне подвода теплоты L_1 происходит процесс образования пара, и затрачивается теплота в количестве $Q_{\text{пт}}$. Со скоростью несколько сот метров в секунду пар проходит зону переноса теплоты L и попадает на противоположную часть тепловой трубки, в зону отвода теплоты L_2. Здесь пар конденсируется и отдает теплоту в количестве $Q_{\text{от}}$.

При эффективной тепловой изоляции тепловой трубки $Q_{\text{от}} \approx Q_{\text{пт}}$. В тех случаях, когда потери теплоты на участке переноса существенны, вводится понятие КПД тепловой трубки: $\eta = Q_{\text{от}} / Q_{\text{пт}}$.

Зона переноса теплоты L может быть различной протяженности, теоретически от нуля до бесконечности, а зоны подвода L_1 и отвода теплоты L_2 могут быть равны между собой, и тогда плотности тепловых потоков равны: $q_1 = q_2$. Если зона подвода в два раза больше зоны отвода теплоты, то имеет место трансформация плотности теплового потока с двукратным увеличением концентрации. Регулированием соотношения между площадями подвода и отвода теплоты можно добиться трансформации теплового потока с уменьшением его концентрации.

Характеристики тепловых труб зависят не только от размера, формы и материала, но также от конструкции, теплоносителя и коэффициента теплоотдачи. Следует заметить, что критические значения температурного напора ΔT и q меньше при переходе процесса от пленочного кипения жидкости к пузырьковому кипению.

Большое практическое применение тепловые трубки нашли благодаря их высокой надежности, простоте устройства, малому весу, отсутствию движущихся механических деталей и ненужности перекачки теплоносителя. Тепловые трубы практически изотермичны по всей длине. Но главным достоинством их остается сверхпроводимость теплоты при малом перепаде температур: эффективная теплопроводность в десятки тысяч раз больше, чем теплопроводность серебра и меди.

Коэффициент теплопередачи для различных тепловых трубок и условий их эксплуатации может принимать различные значения. При вертикальном расположении и оптимальном заполнении (теплоноситель в количестве, обеспечивающем только смачивание всей поверхности) коэффициент теплопередачи выше. При наклонном расположении тепловой трубки и заполнении тем же теплоносителем коэффициент теплопередачи ниже. Перепад температуры на трубке при этом более значительный. Для достижения максимального коэффициента теплопередачи необходимо брать жидкость с наивысшим значением скрытой теплоты испарения и малой вязкостью, которая ускоряет круговорот в тепловой трубке.

В качестве наполнителя тепловой трубки берутся цезий, литий, серебро, теллур. Для корпуса трубок используют сталь, тантал, вольфрам и другие материалы. Такие металлы, как титан, молибден, хромоникель, рекомендуются для изготовления капиллярной структуры (для более эффективного возвращения конденсата к точке парообразования). В большинстве случаев сборку (наполнение и герметизацию тепловой трубы) можно проводить только в вакууме. При заполнении труб водой удаление воздуха из внутреннего объема можно производить путем подогрева всей конструкции до начала интенсивного кипения, после чего наполнительные отверстия герметично закрываются.

7. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

7.1. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

1. Использование теплоты пара вторичного вскипания конденсата.

Энергосбережение тепловой энергии обеспечивается за счет использования теплоты от паров вторичного вскипания конденсата или от продувочной воды из паровых котельных агрегатов. При конденсации водяных паров образующаяся теплота передается другому теплоносителю – воде систем горячего водоснабжения или воздуху в калориферах.

2. Использование тепловой энергии конденсата.

Тепловая энергия конденсата может использоваться для подогрева водопроводной, питательной, химически очищенной воды. Существуют схемы использования тепловой энергии конденсата с пароструйными компрессорами, сепараторами и теплообменниками.

3. Использование регенеративных воздухоподогревателей.

Вращающиеся регенеративные воздухоподогреватели предназначены для утилизации теплоты от нагретого воздуха, удаляемого из систем вытяжной естественной или принудительной циркуляции. Вращающиеся регенеративные теплообменники имеют форму цилиндра, разделенного на секторы. Внутри цилиндра установлены вращающиеся вокруг оси регенератора насадки, заполненные гладкими или гофрированными металлическими листами разной конфигурации, сетками, чугунными или керамическими шариками и т.д. Поперечное сечение теплообменника разделено на три постоянно меняющие свое положение части: через одну проходит теплый воздух, через другую – холодный нагреваемый воздух, а третья, небольшая часть, представляет собой продувочную камеру, шлюз, для удаления некоторого количества загрязненного воздуха, увлекаемого массой насадки при переходе его из одной камеры в другую. Насадки попеременно омываются то горячим, то холодным воздухом. Передача теплоты приточному воздуху осуществляется аккумулирующей (с высокой теплоемкостью) массой, находящейся последовательно в потоках теплого и холодного воздуха.

4. Использование рекуперативных воздухоподогревателей.

Рекуперативный утилизатор – это теплообменник, в котором теплота от одного теплоносителя к другому передается через разделяющую их стенку. Воздухоподогреватели по ходу движения теплоносителя разделяют на прямоточные, противоточные и перекрестного хода, а по конструктивным признакам на пластинчатые и трубчатые. Пластинчатые теплообменники собираются из пластин (треугольного, U- или П-образного профиля), образующих плоские или щелевые каналы. Трубчатый воздухоподогреватель выполнен в виде пучка вертикальных труб, в форме параллелепипеда с кожухом. Внутри труб проходит холодный приточный воздух, а в межтрубном пространстве – вытяжной нагретый воздух. Интенсификация теплообмена достигается также путем образования многоходового движения вытяжного воздуха. Энергосбережение достигается за счет передачи теплоты от вытяжного воздуха к приточному воздуху.

Все рекуперативные и регенеративные воздухоподогреватели подвержены коррозии от конденсации за счет эффекта точки росы воздуха. Поэтому в нижней части корпуса предусматривают штуцер для удаления конденсата, выпадающего из вытяжного воздуха при охлаждении ниже точки росы. Температуру приточного воздуха при отсутствии необходимости дополнительного подогрева можно регулировать, изменяя расход приточного или вытяжного воздуха путем рециркуляции. При необходимости дополнительного подогрева регулирование может осуществляться в дополнительном электрическом калорифере.

5. Использование тепловой энергии уходящих топочных газов.

Мероприятие предназначено для уменьшения расхода топлива за счет снижения тепловых потерь с уходящими топочными газами путем подогрева в рекуператорах или регенераторах воздуха, используемого для горения топлива в теплотехнологических процессах. Нагретый воздух после

воздухоподогревателя также способствует ускорению нагрева материала в установках и снижению химического недожога.

6. Контактный подогреватель воздуха.

Горячая вода из системы охлаждения любого технологического оборудования по основному трубопроводу подается в градирню, где охлаждается и по трубопроводу возвращается обратно. Часть потока горячей воды из основного трубопровода поступает в воздухоподогреватель. Наружный воздух вначале нагревается в градирне, а затем поступает в воздухоподогреватель, где подсушивается.

7. Утилизация теплоты низкого потенциала от воздуха или конденсата с применением теплового насоса приведена ниже в разд. 7.3.

7.2. ГЕЛИОУСТАНОВКИ С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ ДЛЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Гелиоустановки предназначены для получения горячей воды или нагретого воздуха и включают в себя коллектор солнечной энергии (КСЭ), теплообменники, бак-аккумулятор, тепловые насосы и трубопроводы. Рабочим телом (теплоносителем) в КСЭ могут быть вода, воздух, органические низкокипящие жидкости. Важным условием применения рассматриваемых схем является обеспечение бесперебойной работы систем отопления и горячего водоснабжения независимо от временных и погодных условий путем введения в схему емкостей, аккумулирующих тепловую энергию в солнечное время суток и отдающих накопленную теплоту во время отключения КСЭ.

Наиболее эффективная схема системы теплоснабжения с использованием КСЭ приведена на рис. 7.1 и имеет несколько контуров.

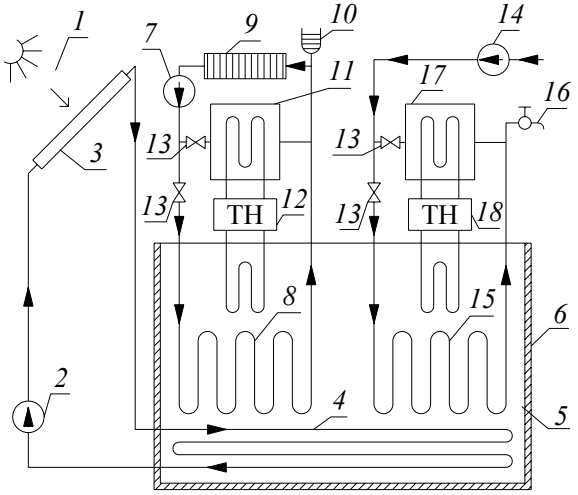


Рис. 7.1. Принципиальная схема гелиоустановки и системы теплоснабжения с тепловым насосом:

1 – энергия Солнца; *2* – насос; *3* – коллектор солнечной энергии; *4* – теплообменник; *5* – бак-аккумулятор; *6* – тепловая изоляция; *7* – насос системы отопления; *8*, *15* – теплоприемники; *9* – радиаторы; *10* – воздухосборник; *11*, *17* – промежуточный бак; *12*, *18* – тепловой насос; *13* – вентили; *14* – насос горячего водоснабжения; *16* – кран горячей воды

Охлажденная вода первого контура насосом *2* подается в коллектор солнечной энергии *3*, где нагревается и направляется в теплообменник *4* водяного бака-аккумулятора *5*, в котором охлаждается и вновь возвращается в КСЭ.

Работа системы отопления. Охлажденная вода после радиаторов циркуляционным насосом *7* прокачивается через теплоприемник *8*, установленный в баке-аккумуляторе, где нагревается, и затем идет в радиаторы *9* системы отопления. При недостатке солнечной энергии (пасмурные дни, ночное время) вода после радиаторов циркуляционным насосом *7* прокачивается через промежуточный бак *11*, где нагревается, и возвращается в радиаторы *9* системы отопления.

Переключение движения воды производится закрытием или открытием вентилей *13*. Нагрев воды в промежуточном баке *11* осуществляется в этом случае с помощью теплового насоса *12*, который использует воду бака аккумулятора как низкопотенциальную энергию.

Работа системы горячего водоснабжения. Вода из водопровода или насосом *14* подается в теплоприемник *15*, где нагревается, и идет в кран *16* на горячее водоснабжение. В случае недостатка солнечной энергии включается тепловой насос *18*, который нагревает воду в теплообменнике *17* за счет энергии воды бака-аккумулятора. В этом случае вода из водопровода проходит через теплообменник *17*, нагревается и идет в кран *16* горячей воды.

Для поддержания расчетных тепловых условий системы отопления и горячего водоснабжения возможно размещение электрических тепловых насосов *12* и *18*, включаемых в сеть при понижении температуры в баке-аккумуляторе *5* ниже предельной и использующих бак-аккумулятор как низкопотенциальный источник тепловой энергии.

В периоды наибольшего похолодания или прекращения поступления солнечной энергии для нагрева воды систем отопления и горячего водоснабжения в схему трубопроводов включают дополнительный газовый или электрический источник энергии, который подогревает воду до заданной температуры потребителя.

При воздушном солнечном отоплении здания или сооружения холодный воздух забирается из окружающей среды и вентилятором подается в КСЭ, где он нагревается и через блок управления вводится либо в помещение здания, либо в тепловой аккумулятор, расположенный, как правило, под зданием. Когда КСЭ не работает, предусмотрена возможность рециркуляции охлажденного комнатного воздуха через тепловой аккумулятор.

Аккумуляторы тепловой энергии гелиосистем. Аккумулирование теплоты вызвано периодичностью поступления солнечной энергии в течение суток и года, а также несовпадением графиков выработки теплоты в гелиосистемах и ее потреблением в системах теплоснабжения. Максимум солнечной радиации приходится на полдень, а минимум на вечер и ночь, потребность же в теплоносителе для отопления и горячего водоснабжения сохраняется в течение суток. Аналогично и сезонное несоответствие выработки и использования солнечной энергии. Поэтому при превышении выработки энергии над потреблением ее избыток накапливают в аккумуляторах теплоты.

Аккумуляторы теплоты гелиосистем относятся к регенеративным теплообменникам, для которых характерен циклический характер работы, включающий в себя два периода: зарядки аккумулятора тепловой энергией и его разрядки. В зависимости от длительности цикла различают часовые, суточные и сезонные аккумуляторы теплоты, а по температурному диапазону: для систем воздушного отопления – рабочая температура аккумулятора составляет 30 °С, горячего водоснабжения – 45...60 °С, водяного отопления – до 90 °С.

Для гелиосистем применяют тепловые аккумуляторы емкостные, имеющие резервуар (бак, емкость), заполненный теплоаккумулирующим материалом (ТАМ). В качестве ТАМ используют воду, водные растворы солей, воздух, природный камень, гальку. Основными характеристиками аккумулятора являются энергоемкость и продолжительность нагрева или охлаждения теплоаккумулирующего материала. *Энергоемкость аккумулятора* – это количество теплоты $Q_{ак}$, Дж, которое поглощает ТАМ массой $M_{ак}$, кг, теплоемкостью $c_{ак}$, Дж/(кг · К), при его нагреве от $T_{1ак}$ до $T_{2ак}$, °С:

$$Q_{ак} = M_{ак}\, c_{ак}\, (T_{1ак} - T_{2ак}).$$

Отношение энергоемкости аккумулятора $Q_{ак}$ к объему ТАМ $V_{ак}$, м^3, называется *удельной энергоемкостью*: $q_v = Q_{ак} / V_{ак}$, Дж/м^3.

Продолжительность зарядки $\tau_{зар}$, с, зависит от конструкции аккумулятора, вида и массы ТАМ, а также тепловой производительности $Q_т$ солнечного коллектора:

$$\tau_{зар} = \frac{Q_{ак}}{Q_т \eta_{ксэ} \eta_{ак} \eta_{тр}},$$

где $\eta_{ксэ}$, $\eta_{ак}$, $\eta_{тр}$ – КПД, характеризующие тепловые потери соответственно в КСЭ, аккумуляторе и соединяющих их трубопроводах.

Тепловым аккумулятором воздушного отопления может служить любой твердый наполнитель с высокой удельной теплоемкостью (каменная галька, керамические сосуды, металлические листы).

По конструкции и принципу действия аккумуляторы тепловой энергии для гелиосистем могут быть с твердой насадкой, с жидкостным ТАМ и легкоплавким ТАМ. Движение теплоносителей осуществляется принудительно (с использованием насосов) или за счет естественной циркуляции (термосифон). Аккумуляторы бывают:

- рекуперативные – накопление теплоты происходит путем теплопередачи через разделительную (металлическую) стенку и нагрева жидкого ТАМ без изменения его агрегатного состояния (рис. 7.1);
- регенеративные – накопление теплоты и разрядка ТАМ происходят путем попеременного нагрева и охлаждения твердого теплоаккумулирующего материала;
- подводимая теплота расходуется на плавление (осуществление фазового перехода) твердого теплоаккумулирующего материала.

При использовании твердого теплоаккумулирующего материала продолжительность нагрева или охлаждения рассчитывается по формулам нестационарной теплопроводности [13], учитывающим размеры и форму элементов насадки, их теплофизические свойства и взаимодействия с потоком воздуха.

В аккумуляторах с твердым ТАМ пористая насадка выполнена из дробленого камня, гальки, керамических шариков или сосудов, а теплоносителем в них является воздух. В процессе зарядки аккумулятора через насадку продувается воздух, прошедший предварительно через КСЭ и воспринявший там энергию солнечного излучения. После нагрева насадки до температуры, близкой к температуре горячего воздуха, его подача в аккумулятор прекращается, зарядка на этом заканчивается, а теплота, отданная воздухом, хранится в насадке. Для передачи аккумулированной теплоты потребителю через насадку пропускается холодный воздух из системы воздушного отопления, подводимый к аккумулятору по воздуховоду. Воздух нагревается, а насадка охлаждается, после чего требуется новая зарядка (восстановление аккумулятора).

В аккумуляторах с легкоплавким ТАМ основное количество теплоты поглощается веществом при его плавлении. Перед зарядкой аккумулятора ТАМ находится в твердом виде. При подводе теплоты в аккумулятор вначале легкоплавкий ТАМ, массой $M_{ак}$, нагревается от начальной температуры $T_{1ак}$ до температуры плавления $T_{пл}$, затем плавится, а после, уже в жидком виде, нагревается до конечной температуры $T_{2ак} > T_{пл}$. Энергоемкость такого аккумулятора равна

$$Q_{ак} = M_{ак} [c_{тв} (T_{пл} - T_{1ак}) + r + c_{ж} (T_{1ак} - T_{пл})],$$

где $c_{тв}$, $c_{ж}$ – теплоемкость вещества в твердом и жидком состояниях, Дж/(кг·К); r – теплота фазового перехода (плавления) ТАМ, Дж/кг.

В качестве ТАМ используют парафин ($T_{пл}$ = 47 °С, r = 209 кДж/кг), глауберову соль ($T_{пл}$ = 32 °С, r = 251 кДж/кг) и другие вещества.

При разрядке аккумулятора теплота от теплоаккумулирующего материала отводится теплоносителем (водой), циркулирующей по змеевику, установленному в аккумуляторе и связанному соответствующими трубопроводами с потребителями тепловой энергии – системой отопления, вентиляции или горячего водоснабжения.

В аккумуляторах с легкоплавким ТАМ возможно применение одного теплообменника путем поочередного его присоединения к КСЭ или двух теплообменников, из которых один предназначен только для зарядки аккумулятора, а другой только его разрядки. Аккумулятор с легкоплавким ТАМ, при одном и том же объеме, поглощает в 5 – 10 раз теплоты больше, чем аккумулятор с неплавящимся веществом.

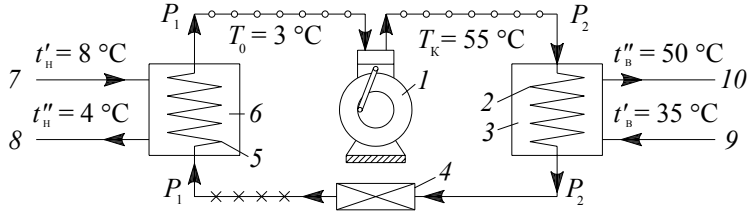
7.3. ТЕПЛОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ

Теплонасосные установки (ТНУ) используют естественную возобновляемую низкопотенциальную тепловую энергию окружающей среды (воды, воздуха, грунта) и повышают потенциал основного теплоносителя до более высокого уровня, затрачивая при этом в несколько раз меньше первичной энергии или органического топлива. Теплонасосные установки работают по термодинамическому циклу Карно, в котором рабочей жидкостью служат низкотемпературные жидкости (аммиак, фреон и др.). Перенос теплоты от источника низкого потенциала на более высокий температурный уровень осуществляется подводом механической энергии в компрессоре (парокомпрессионные ТНУ) или дополнительным подводом теплоты (в абсорбционных ТНУ).

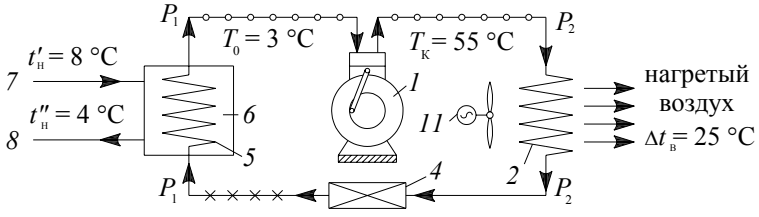
Применение ТНУ в системах теплоснабжения – одно из важнейших пересечений техники низких температур с теплоэнергетикой, что приводит к энергосбережению невозобновляемых источников энергии и защите окружающей среды за счет сокращения выбросов CO_2 и NO_x в атмосферу. Применение ТНУ весьма перспективно в комбинированных системах теплоснабжения в сочетании с другими технологиями использования возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой, биоэнергии) и позволяет оптимизировать параметры сопрягаемых систем и достигать наиболее высоких экономических показателей.

Выберем в качестве рабочего хладагента – *R* 22, имеющего следующие параметры: расход хладагента $G_а$ = 0,06 кг/с; температура кипения T_0 = 3 °С; температура конденсации $T_к$ = 55 °С; температура теплоносителя на входе в испаритель от источника низкого потенциала $t'_н$ = 8 °С; температура теплоносителя (воды) на выходе из конденсатора $t''_в$ = 50 °С; расход теплоносителя в конденсаторе $G_к$ = 0,25 кг/с; перепад температур теплоносителя в конденсаторе $\Delta t_в$ = 15 °С; мощность, потребляемая компрессором, $N_э$ = 3,5 кВт; теплопроизводительность ТНУ $Q_{тн}$ = 15,7 кВт; коэффициент преобразования $\mu_{тн}$ = 4,5.

Принципиальная схема парокомпрессионной ТНУ приведена на рис. 7.2 и включает испаритель, компрессор, конденсатор и дроссель.



а)



б)

Рис. 7.2. Принципиальная схема ТНУ с электроприводом:

а – схема ТНУ для системы горячего водоснабжения;

б – схема ТНУ для воздушного отопления или сушки;

—○—○—○— пар; —×—×—×— смесь пара и жидкости; ———— жидкость;

1 – компрессор; *2* – змеевик конденсации хладагента; *3* – бак конденсации;

4 – расширительный дроссельный клапан; *5* – змеевик испарения хладагента;
6 – бак испарения; *7* – вода низкопотенциального источника энергии (НИЭ);
8 – сток к НИЭ; *9* – вода из системы отопления или водопровода;
10 – вода на отопление или горячее водоснабжение; *11* – вентилятор

В бак испарения *6* поступает тепловая энергия низкого потенциала Q_0 из окружающей среды при $t'_н = 8$ °С. Преобразование рабочей жидкости *R* 22 (аммиака или фреона) теплового насоса в пар происходит в змеевике испарения хладагента *5* при пониженном давлении P_1 и пониженной температуре $T_0 = 3$ °С. Компрессор *1* всасывает из испарителя насыщенный пар со степенью сухости $x_1 \approx 1$ и сжимает пар до давления P_2. При сжатии хладагента энтальпия *i* и температура пара повышаются до $T_к = 55$ °С, а затрачиваемая работа $Al = \Delta i$, кДж/кг.

Пар с температурой $T_к = 55$ °С подается в змеевик конденсации хладагента *2*, где тепловая энергия пара передается другому теплоносителю (воде) бака конденсации *3* (схема *а*) или воздуху (схема *б*), после чего пар конденсируется при неизменном давлении P_2.

Коэффициент трансформации этого идеального цикла:

$$\mu_с = q_к / Al = T_к /(T_к - T_0) = 328/(328 - 276) = 6{,}3,$$

где $q_к$ – теплота конденсации, кДж/кг; *Al* – работа сжатия, кДж/кг; $T_к$ и T_0 – температура конденсации и испарения хладагента, °С.

В дроссельном клапане *4* происходит понижение давления от P_2 до P_1, жидкий хладагент частично испаряется и образуется парожидкостная смесь со степенью сухости $x_0 \approx 0{,}05$, а в процессе дросселирования (при $i = \text{const}$) температура хладагента снижается от $T_к = 55$ °С до $T_0 = 3$ °С. Парожидкостная смесь поступает в змеевик испарения хладагента *5*, где, получая теплоту от источника с низким потенциалом, вновь испаряется, и цикл повторяется. Таким образом, в ТНУ реализуется непрерывный круговой процесс переноса теплоты с более низкого температурного уровня на более высокий (к теплоносителю). Для этого подводится энергия извне, которая затрачивается на повышение давления парообразного рабочего вещества (хладагента). Причем затраченная энергия может быть электрическая, тепловая и любая другая.

Количество теплоты, отнятой от источника с низким потенциалом (НИЭ), в идеальном цикле ТНУ равно теплоте испарения жидкого хладагента, поступившего в испаритель: $q_и = r(x_1 - x_0)$, кДж/кг, где *r* – теплота парообразования. Холодильный коэффициент этого цикла

$$\varepsilon_с = q_и / Al = T_0 /(T_к - T_0) = 276/(328 - 276) = 5{,}3,$$

где $q_и$ – теплота испарения хладагента, кДж/кг.

Для идеального (теоретического) цикла ТНУ и без учета потерь теплоты выполняется соотношение $\mu_с = \varepsilon_с + 1$.

Мерой энергетической эффективности реальной ТНУ служит коэффициент преобразования энергии $\mu_{тн}$, характеризующий отношение отданной потребителю теплоты $Q_к$ к затраченной (механической или электрической) энергии $N_э$. Оценки показывают, что для удачно спроектированных систем теплоснабжения коэффициент $\mu_{тн}$ изменяется от 2,5 до 6…8, а при $\mu_{тн} >$ 2,5…3 использование ТНУ может оказаться выгоднее, чем теплоснабжение от ТЭЦ и индивидуальных котельных.

Количество переданной потребителю полезной теплоты, или теплопроизводительность ТНУ зависит от расхода теплоносителя $G_к$, кг/с, средней массовой изобарной теплоемкости $c_к$, кДж/(кг·К) и перепада температур $\Delta t_в$, °С. Так, при нагреве воды по схеме *а* (рис. 7.2)

$$Q_к = G_к c_к \Delta t_в = 0{,}25 \cdot 4{,}19 \cdot 15 = 15{,}7 \text{ кВт}.$$

При нагреве воздуха по схеме *б* (рис. 7.2), когда расход холодного воздуха $G_к$ = 0,5 кг/с, теплоемкость $c_к$ = 1 кДж/(кг · К) и перепад температур $\Delta t_в$ = 25 °С, теплопроизводительность ТНУ составит

$$Q_к = G_к c_к \Delta t_в = 0{,}5 \cdot 1 \cdot 25 = 12{,}5 \text{ кВт}.$$

Коэффициент преобразования энергии $\mu_{тн}$, характеризующий отношение отданной потребителю теплоты $Q_к$ к потребляемой компрессором электрической энергии $N_э$ = 3,5 кВт, составит соответственно:

- для воды $\mu_{тн} = Q_к/N_к = 15{,}7/3{,}5 = 4{,}5$;
- для воздуха $\mu_{тн} = Q_к/N_к = 12{,}5/3{,}5 = 3{,}6$.

Следовательно, если на механическую работу компрессора расходуется 1 кВт электроэнергии, то в систему теплоснабжения передается 4,5 кВт теплоты, т.е. в несколько раз больше, чем при чисто электрическом отоплении. Работа электрического компрессора теплового насоса позволяет потреблять в несколько раз меньше электрической энергии, если бы нагревали теплоноситель системы теплоснабжения в теплообменнике простым электрическим нагревателем.

Парокомпрессионные тепловые насосы (ПТН) с приводом от теплового двигателя (газовой турбины или дизеля) оказываются еще более экономичными. Хотя КПД этих двигателей не превышает 35 %, при работе в составе ТНУ может быть утилизирована и направлена в общий поток нагреваемой ТНУ среды большая часть потерь, которые воспринимаются охлаждающей двигатель жидкостью и выхлопными газами. В результате коэффициент использования первичной энергии привода возрастает в 1,5 раза, а экономичность ТНУ обеспечивается при $\mu_{тн} > 2$.

По конструкции, принципу действия, составу оборудования, используемым рабочим телам ТНУ практически не отличаются от широко распространенных холодильных машин. Тепловые насосы в сравнении с холодильными машинами работают в диапазоне более высоких рабочих температур. Особенно выгодно применение тепловых насосов (ТН) при одновременной выработке теплоты и холода, что может быть реализовано в ряде промышленных и сельскохозяйственных производств, а также в системах кондиционирования воздуха.

В условиях реальной рыночной экономики тепловые насосы имеют перспективу теплоэнергоснабжения в основных областях хозяйства: жилищно-коммунальном секторе, на промышленных предприятиях, в курортно-оздоровительных и спортивных комплексах, сельскохозяйственном производстве.

7.4. ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ БИОМАССЫ

Биомасса – органическое вещество, генерируемое растениями в процессе фотосинтеза, при подводе солнечной (световой) энергии. Биомасса является как бы аккумулятором солнечной энергии. Энергия биомассы используется двумя способами: путем непосредственного сжигания (отходов сельскохозяйственной продукции) и путем глубокой переработки исходной биомассы с целью получения из нее более ценных сортов топлива – твердого, жидкого или газообразного, которое сжигается с высоким КПД при минимальном загрязнении окружающей среды. Второй способ перспективен и позволяет использовать в качестве первичных энергоносителей такие биомассы, которые не поддаются утилизации путем прямого сжигания в топочных устройствах. Эти биомассы представляют собой бытовые и промышленные отходы, ухудшающие состояние среды обитания человека. Поэтому их переработка, проводимая в целях получения энергии, позволяет одновременно решить и экологическую задачу. Основными источниками биомассы служат городские и промышленные отходы, отходы животноводства, сельского и лесного хозяйства и водоросли.

Твердые городские отходы представляют собой домашние отходы, отходы легкой промышленности и строительства. В зависимости от времени года и района сбора отходы в среднем состоят на 80 % из горючих материалов, из которых 65 % имеют биологическое происхождение: бумага, пищевые и животные отходы, тряпье, пластмасса. Горючими компонента-

ми являются углерод (~ 25 %), водород (~ 3 %) и сера (~ 0,2 %), поэтому теплота сгорания городских отходов составляет 9...15 МДж/кг.

Небольшое содержание азота (~ 0,3 %) и невысокие температуры горения отходов сводят к минимуму образование вредных окислов азота и обеспечивают экологическую чистоту отходов как топлива, ввиду образования незначительного количества оксидов серы. Предприятия по переработке отходов следует размещать в городах с населением численностью 150...200 тыс. человек, а производство энергии из отходов рентабельно, если их в сутки перерабатывается не менее 270 т. Утилизация твердых отходов также дает положительный эффект из-за улучшения экологической обстановки в городе и уменьшения площадей, необходимых для складирования отходов.

Промышленные отходы, используемые как биоэнергоресурсы, присущи пищевой промышленности, которая специализируется на переработке плодов и овощей, а для выработки энергии используют отходы семян, плодов, шелуху семечек подсолнечника и другие подобные отходы, непригодные для применения в качестве корма.

Отходы животноводства заслуживают внимания как энергоресурсы только при содержании скота и птиц в закрытых помещениях, таких как откормочные хозяйства промышленного типа. Оптимальным способом обработки отходов животноводства является анаэробная ферментация или биогазификация.

Отходы сельского и лесного хозяйства образуются на месте их заготовки или на предприятиях по их переработке. К ним относят растительные остатки после сбора урожая (солома, стебли кукурузы или подсолнечника, мякина, кожура овощей и плодов), ветви и корни заготавливаемых деревьев, погибшие и отбракованные деревья, а также отходы при производстве пиломатериалов и бумаги (опилки, стружки, горбыль, кора). Однако опилки и стружки целесообразнее использовать для производства древесностружечных и древесноволокнистых плит (ДСП и ДВП), а сжигать их в топках котлов и печей следует только при отсутствии такого производства.

При *непосредственном сжигании биомассы* химическая энергия горючих компонентов преобразуется в тепловую энергию высокотемпературного теплоносителя – газообразных продуктов горения (дымовых газов), которые из топочного устройства подаются в то или иное теплоиспользующее устройство: водонагреватель, парогенератор, воздушный калорифер, сушильную установку. При предварительной обработке из твердых городских отходов выделяют фракции черных и цветных металлов, негорючие твердые компоненты, стекло. Крупные куски измельчают до получения однородной массы, которую затем обезвоживают в специальных сушильных установках, а сжигание производят в топках котельных агрегатов.

При *термохимической обработке биомассы* отходы подвергают тепловому и химическому воздействию, при котором органическая часть биомассы разлагается с образованием твердого горючего вещества, горючих газов или жидкого топлива. Каждый из этих продуктов представляет собой высококачественное, эффективное и экологически чистое топливо, которое сжигается в обычных топочных устройствах. Основу термохимической обработки составляет пиролиз – термическое разложение органической массы отходов при ее нагревании.

Пиролиз осуществляется в различных аппаратах: конвертерах, где происходит конверсия (преобразование) вещества; реакторах, где идут химические реакции; газификаторах или газогенераторах, где образуются газообразные продукты разложения органики. Некоторые методы термохимической обработки твердых отходов предусматривают предварительное выделение фракций негорючей части биомассы, их очистку и механическую обработку с целью повторного хозяйственного использования. Комплексность утилизации отходов и исключение необходимости складирования и захоронения конечных продуктов их переработки придает таким методам особую привлекательность.

В результате термохимической обработки биомассы получают топливный газ, жидкое пиротопливо и твердое топливо – углистое вещество. Общий энергетический КПД газификации составляет 50...70 %. Помимо

неизбежных потерь теплоты через ограждения и от недожога топлива значительная часть энергии тратится на сушку сырья.

Анаэробная ферментация биомассы представляет собой микробиологический процесс разложения сложных органических веществ без доступа воздуха. При ферментации происходит превращение углеводородов (брожение) и белков (гниение) в биогаз – смесь метана CH_4 (до 60...70 %), диоксида углерода CO_4, азота N_2, водорода H_2 и кислорода (вместе 1...6 %), и образуется стабилизированный осадок исходной биомассы. Биогаз является высококалорийным, удобным для практического использования топливом, а стабилизированный осадок – органическим удобрением. В процессе ферментации биомасса теряет неприятный запах и при этом погибает патогенная микрофлора. При анаэробной ферментации решаются энергетические и экологические вопросы, в том числе проблема складирования и хранения отходов.

К веществам для анаэробной ферментации относят осадки городских сточных вод, стоки животноводческих и птицеводческих ферм, твердые бытовые отходы, остатки перерабатываемого растительного сырья, опилки. Не требуется увлажнения и разделения материала по гранулометрическому составу. Исходное сырье предварительно увлажняют, но размеры частиц биомассы не должны превышать 5 мм.

На интенсивность образования биогаза существенно влияет температурный режим процесса. Начальная температура биомассы обычно меньше оптимальной, поэтому ее подогревают перед поступлением в метантенк либо в самом ферментере. *Метантенк* – резервуар для биологической переработки (сбраживания при температуре 20…65 °С) с помощью бактерий и микроорганизмов. Оптимальные значения температур ферментации зависят от вида метаногенных бактерий. Греющей средой является горячая вода или водяной пар. Площадь теплообменной поверхности аппарата выбирается такой, чтобы биомасса была нагрета до верхнего значения температуры в рекомендуемом температурном интервале. Тогда при остывании биомассы в метантенке ее температура не выйдет за допустимые пределы. Технология получения биогаза из сельскохозяйственных отходов изображена на рис. 7.3.

Технология переработки сводится к разбавлению отходов животноводства водой в приемном резервуаре *1*, выделению из них песка и других минеральных примесей, сбраживанию обводненных отходов в метатенке *2* в условиях их постоянного перемешивания при температуре до 60 °С. Образующийся газ сжимается в компрессоре *3* и направляется в аппарат *4* для разделения CH_4 и CO_2. Метан направляется в котельный агрегат *5* для производства тепловой энергии путем его сжигания, а двуокись углерода – на питание водорослей в бассейне *6*. Стоки, обработанные в метатенке *2*, подаются на центрифугу *7*, откуда обезвоженный осадок и водоросли направляются на приготовление корма *8*, а жидкие стоки из центрифуги – в бассейн *6* для выращивания водорослей и на разбавление исходных отходов в приемный резервуар *1*. Таким образом, утилизируются все побочные продукты процесса сбраживания отходов: метан, двуокись углерода и твердый остаток. Аналогично происходит переработка растительных отходов.

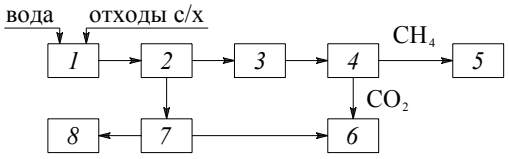


Рис.7.3. Технологическая блок-схема получения биогаза из сельскохозяйственных отходов:

1 – приемный резервуар; *2* – метантенк; *3* – компрессор; *4* – аппарат разделения CH_4 и CO_2; *5* – котельный агрегат; *6* – бассейн; *7* – центрифуга; *8* – цех приготовления корма

Биогаз имеет теплоту сгорания 17...21 МДж/м^3 и широко применяется в различных энергоустановках для выработки электрической и тепловой энергии. Особенно перспективно производство биогаза в сельском хозяйстве, где из-за резкого роста цен на традиционные энергоносители появление

всевозможных производств из отходов животноводства и растениеводства есть естественное следствие производственной деятельности. Кроме того, при производстве метана из отходов животноводческих ферм в качестве побочного продукта образуются водоросли, содержащие до 45…50 % ценных кормовых ингредиентов (протеина и аминокислот). В случае необходимости метан легко перерабатывается в спирты, являющиеся присадкой к моторному топливу.

Этанол (этиловый спирт C_2H_5OH) получается из биомассы при спиртовом анаэробном сбраживании и используется как жидкое топливо, способное в определенной мере заменить дорогостоящий бензин.

Городские отходы для производства тепловой энергии используют по мере концентрации населения в городах и крупных поселках. Сжигание отходов осуществляется в специальных мусоросжигательных установках, а также в топках обычных котлов в качестве присадки (до 10 %) к основному топливу. Схема энергетического использования городских бытовых отходов на мусоросжигательном заводе или установке реализуется в одном здании, что обеспечивает соблюдение санитарно-гигиенических норм, установленных для города.

Она включает: отделение приемки и складирования отходов, систему подачи отходов в загрузочную воронку, сжигание отходов в топке котла с наклонной колосниковой решеткой. Установка позволяет также утилизировать параллельно с твердыми отходами городской шлам (влажные тонкоизмельченные твердые отходы). Шлам предварительно обезвоживается механически в центрифугах и затем через мельницу-сушилку в подсушенном виде вводится в виде пыли над слоем горящих твердых отходов.

Сушильным агентом в мельнице-сушилке служат высокотемпературные продукты сгорания, которые отбираются в верхней части топочного объема, обеспечивая тем самым их рециркуляцию, что снижает образование вредных газообразных веществ при сжигании отходов. Продукты сгорания, выводимые из котла, подвергаются тщательной очистке, в том числе в электро- или тканевых сепараторах (фильтрах) с последующей мокрой очисткой в скруббере. Из скруббера они выбрасываются в дымовую трубу. Котел может быть паровым и водогрейным. Зола и шлак, образующиеся после сгорания отходов, собираются в шлакоприемник и затем отводятся в шлаковый бункер, из которого вывозятся за пределы завода.

7.5. ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Нагрев воздуха в поле силы земного тяготения приводит к возникновению свободного движения атмосферы. Использование кинетической энергии движения воздушных масс и определяет работу ветроэнергетических установок (ВЭУ). Мощность воздушного потока зависит от его кинематических характеристик: скорости и направления движения, продолжительности ветреной и штилевой погоды, характера изменения скорости ветра во времени, площади поперечного сечения струй воздуха. На эти характеристики влияет ряд не зависящих от человека факторов: метеоусловия, колебания температуры и атмосферного давления, рельеф местности, период суток и года, что обусловливает их непредсказуемость и изменение по случайному закону. Поэтому определить заранее, какими будут скорость и направление ветра в данный момент времени, не представляется возможным. Вместе с тем, их значения, усредненные для каждого периода времени, допустим, лета или зимы, остаются стабильными в течение многих лет. Это позволяет оценить ветроэнергетические ресурсы конкретного района и принять обоснованное решение о выборе оптимальной мощности ВЭУ [9].

При использовании энергии ветра различают ветродвигатели, ветроэнергетические агрегаты и ветроэнергетические установки. *Ветродвигатель* – устройство, предназначенное для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию. *Ветроэнергетический агрегат* – совокупность ветродвигателя и технологической машины (электрогенератора, насоса, компрессора), привод которой осуществляется с помощью ветродвигателя. *Ветроэнергетическая установка* включает в себя ветроэнергетический агрегат и ряд дополнительных устройств, необходимых для бесперебойной работы технологических машин в период безветрия и обес-

печения высокого КПД эксплуатации ветродвигателя при любом направлении и силе ветра. К таким устройствам относятся резервный (дублирующий) двигатель, включаемый в штилевую погоду, аккумулятор энергии, системы автоматического регулирования ориентации ветродвигателя в потоке воздуха при различном направлении ветра и частоте вращения ротора.

Мощность ветродвигателя N (Вт) прямо пропорциональна плотности воздушного потока ρ (кг/м^3), площади поперечного сечения потока воздуха F (м^2), охватываемой лопастями ветродвигателя, а также скорости потока ветра в третьей степени w^3 (м^3/с^3): $N = \rho F w^3$. Выработка электроэнергии Э (кВт · ч) воздушным потоком за τ часов работы ветроэнергетической установки составит: $Э = 3{,}6\ N\tau$.

Существует несколько модификаций ветродвигателей, однако наиболее широко распространены ветродвигатели лопастного типа. Лопасти имеют определенный профиль, и при обтекании их потоком воздуха на передней кромке лопасти возникает избыточное давление, а на кормовой кромке лопасти – разрежение. Разность давлений и создает силу, под действием которой вращается ротор ветродвигателя.

Трехлопастные ветродвигатели имеют лопасти, которые вращаются в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси, на которой установлен электрогенератор, вырабатывающий электроэнергию. Щит управления агрегата расположен в отдельном здании, находящемся обычно под башней, на которой смонтирован ветродвигатель. Ветродвигатель должен свободно поворачиваться относительно вертикальной оси, проходящей через центр башни. Поворот осуществляется автоматически с помощью стабилизатора, который устанавливает ветродвигатель так, что при любом направлении ветра плоскость вращения лопастей перпендикулярна вектору скорости набегающего воздушного потока. Ветродвигатель работает при этом с максимальным КПД.

Ветродвигатель немецкого инженера Вагнера состоит из двух лопастей с углом между ними 110°. Лопасти укреплены на валу под углом 55° к горизонту и поэтому попеременно находятся внизу, занимая горизонтальное положение, что обеспечивает размещение ветродвигателя на земле, а значит, необходимость в башне отпадает. С помощью стабилизатора ветровой агрегат автоматически принимает выгоднейшее положение относительно потока воздуха.

Ветродвигатель французского инженера Дарье по форме лопастей напоминает миксер – воздушная турбина с вертикальной осью вращения. На валу турбины закреплено эллипсовидное алюминиевое кольцо из двух полуколец в виде ленты шириной 5 м, длиной 27 м. Во время вращения на лопасть, движущуюся в направлении обдува, ветер оказывает большее, а на встречную лопасть меньшее давление. Разность этих давлений и заставляет вращаться воздушную турбину. Электрогенератор, приводимый во вращение валом турбины, располагается на земле. Это упрощает его монтаж и обслуживание. Ветровой агрегат не нуждается в башне, не требуется и стабилизатор для слежения и фиксации положения турбины в потоке воздуха: лопасти ветродвигателя одинаково хорошо воспринимают силовое воздействие ветра независимо от направления его движения. Ветродвигатель создает незначительное динамическое сопротивление воздушному потоку, что обеспечивает должную механическую прочность установки в штормовую погоду. Недостаток: для пуска ротор ВЭУ необходимо раскрутить каким-либо вспомогательным двигателем (обычно, электромотором).

Ветродвигатель вихревого типа выполнен в виде полой вертикальной цилиндрической башни с верхним коническим основанием, в котором расположена воздушная турбина. По высоте башни на ее боковой поверхности сделаны продольные щелевые вырезы. Каждый вырез снабжен створкой, с помощью которой при необходимости вырез может быть закрыт. При работе ветродвигателя открыты вырезы, расположенные на поверхности башни со стороны набегающего потока воздуха. При штормовой погоде открыты все вырезы, и воздух свободно продувает башню, оказывая на нее минимальное силовое воздействие. Вырезы являются входными каналами для воздуха, поступающего в башню. Они устроены так, что воздух входит в башню тангенциально, начинает в ней вращаться и образует вихрь, который под действием центробежной силы прижимается к стенкам башни и

отбрасывается от ее оси, где возникает область пониженного давления. Поднимаясь вверх, воздух входит в коническое основание, где благодаря уменьшению радиуса вращения центробежная сила в направлении движения потока возрастает и достигает максимального значения в горловине башни. За счет центробежных сил в центре горловины разрежение становится наибольшим, и сюда, через проемы, устремляется воздух, который затем идет в воздушную турбину, где его кинетическая энергия преобразуется в механическую энергию вращения ротора двигателя. Эта энергия с помощью вала передается на приводимую ветродвигателем технологическую машину или электрогенератор.

Вихревые ветродвигатели просты по конструкции, не нуждаются в специальной ориентации башни относительно направления ветра, управление работой створок может быть автоматизировано. Вихревые ветродвигатели работают и в безветренную погоду, если перепад температур воздуха в нижней и верхней части башни будет более 10 °С. Такой перепад температур легко создать за счет солнечной энергии.

Основным недостатком всех ВЭУ является зависимость от погодных условий и невозможность в связи с этим прогнозирования графика выработки энергии. Если же в состав ВЭУ входит аккумулятор энергии, то ветровой агрегат работает непрерывно с максимальной мощностью: при ее недостатке включается дополнительный двигатель, а при избытке излишки вырабатываемой энергии поступают в аккумулятор. В качестве дублирующих двигателей чаще всего используют дизельные установки и гидроаккумулирующие электростанции. К недостаткам ВЭУ относятся также значительные (на единицу выработанной энергии) площади, занимаемые ВЭУ, шум, создаваемый вращающимися лопастями ветродвигателя, часть спектра звукового излучения которого может приходиться на опасную инфразвуковую область.

7.6. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

В фотоэлектрических установках осуществляется непосредственное преобразование солнечного излучения в электрическую энергию. Достигается это путем реализации фотоэффекта физического явления, состоящего в возникновении ЭДС в полупроводниковом материале при попадании на него электромагнитного излучения – световых лучей и инфракрасных лучей в ближней к световым лучам области спектра. Устройства, где происходит фотоэффект, называются фотоэлектропреобразователями (ФЭП). ФЭП изготовляется из полупроводниковых материалов, обладающих *p*- и *n*-проводимостью. Основными полупроводниковыми материалами для ФЭП является кремний и германий. В чистом виде это диэлектрики, но при добавке некоторых примесей они становятся полупроводниками *p*- и *n*-типа. В последнее время для производства ФЭП начинают использовать и другие полупроводники – арсенид галлия и антимонид галлия. ФЭП с этими полупроводниками выполняются двухслойными. В наружном, арсенидо-галлиевом, слое преобразуется в электричество видимый свет, а в антимонидно-галлиевом – инфракрасное излучение, поэтому КПД выше, чем у кремниевых и германиевых [9].

Конструкция ФЭП изготавливается в виде тонкопленочных элементов (при толщине слоя полупроводника 50 мкм) и состоит из двух пластинок: кремния *n*-типа и кремния *p*-типа, которые закрыты с облучаемой стороны пленкой диоксида кремния. С противоположной стороны к полупроводниковым пластинам присоединены электроды. Элементы ФЭП соединяются в стандартные модули, из которых удобно монтировать солнечные батареи любой мощности и конфигурации. Солнечные батареи отличаются высокой надежностью и стабильностью, они не имеют движущихся деталей, срок их службы практически не ограничен. Их масса мала, а обслуживание отличается простотой [9].

Совокупность таких преимуществ делает ФЭП весьма привлекательными для их применения в энергетике. К недостаткам солнечных батарей обычно относят их низкий КПД и высокую стоимость. Высокая стоимость производимой солнечными батареями электроэнергии действительно существенно превышает стоимость электричества, вырабатываемого на традиционных энергоустановках. Но этот недостаток не всегда является опре-

деляющим. Например, для энергоснабжения объектов, находящихся вдали от источников традиционных энергоресурсов (в том числе, в космосе), альтернативы солнечным батареям нет [9].

7.7. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Термоэлектрический метод позволяет преобразовать тепловую энергию морской воды непосредственно в электрическую энергию. Достигается это с помощью термобатарей – устройств, состоящих из нескольких параллельно или последовательно соединенных термопар. Каждая термопара выполняется из двух металлических или полупроводниковых электродов, изготовленных из разнородных материалов. В качестве термоэлектродных материалов используют платину, медь и различные сплавы – хромель, алюмель, копель и др. Концы электродов присоединяются друг к другу и образуют спаи, а в один из электродов включается потребитель электроэнергии. Принцип действия термопары основан на том, что если температура спаев термопары неодинакова, то в ее цепи возникает электрический ток, который и подается потребителю электроэнергии. Напряжение, развиваемое единичной термопарой, очень невелико, оно исчисляется единицами милливольт. Соответственно незначительна и сила тока в цепи термопары [9].

Для увеличения рабочей мощности термоэлектрогенератора термопары соединяют последовательно или параллельно. В первом случае увеличивается напряжение, а во втором случае сила тока в цепи создаваемой термобатареи. При этом значение соответствующего электрического параметра увеличивается пропорционально числу термопар в термобатарее. Практически число термопар в термобатарее может достигать нескольких сот и даже тысяч штук. Для выработки электроэнергии необходимо поддерживать неравенство температур спаев термобатареи. Одни спаи термопар (горячие) располагаются в поверхностном слое воды, где температура около 28 °С, а другие спаи термопар (холодные) опускаются в придонный слой воды, где температура воды около 5 °С.

Для покрытия нагрузки объектов общепромышленного назначения эти установки не пригодны, однако они могут найти применение для электропитания маломощных потребителей энергии – радиоаппаратуры, автономных приборов, контролирующих состояние окружающей среды в отдаленных районах, и других подобных установок. Термоэлектрические установки просты по конструкции, надежны в работе, не имеют движущихся деталей.

Следовательно, энергоресурсы Солнца, ветра, биомассы, океана и других источников огромны и обеспечивают экологическую чистоту окружающей среды, однако современный уровень использования энергии альтернативных источников явно не соответствует реальным возможностям ее производства и потребностям.

8. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

8.1. ОСНОВНЫЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

В системы электроснабжения предприятия входят электрические сети напряжением 0,4 кВ, 6 или 10 кВ, понижающие трансформаторы, электродвигатели, электропривод, осветительные комплексы, системы автоматизации и др.

Вопросы сбережения и экономии электроэнергии содержат организационные и технические мероприятия. Организационные мероприятия включают:

- разработку планов потребления электроэнергии и удельных норм ее расходования;
- упорядочение потребления электроэнергии в электросиловых установках;

- поддержание рационального режима пользования электроосвещением;
- учет расхода электроэнергии;
- правильность взаиморасчетов с энергосберегающими организациями и сторонними потребителями;
- подведение итогов работы по экономии электроэнергии.

Технические мероприятия включают:

- снижение потерь электроэнергии в сетях и линиях электропередачи;
- реконструкцию сетей без изменения напряжений;
- перевод сетей на повышенное напряжение;
- включение под нагрузку резервных линий электропередачи;
- снижение потерь в силовых трансформаторах;
- применение экономически целесообразного режима одновременной работы трансформаторов.

Основные энергосберегающие направления в электроэнергетике:

- рациональный выбор мощности электродвигателей, приводов механизмов и трансформаторов, при которых обеспечиваются высокие коэффициенты мощности и коэффициенты полезного действия;
- автоматизация электроприводов и осветительных сетей, направленных на экономное расходование электроэнергии;
- применение частотно-регулируемого электропривода на механизмах с переменной производительностью;
- разработка производственно-технологических процессов с учетом норм расхода электроэнергии.

8.2. ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Энергосбережение в системах электроснабжения предприятия включает следующие основные мероприятия.

1. Модернизация систем возбуждения синхронных двигателей (СД) путем замены аналоговых на цифровые возбудительные устройства (ЦВУ). ЦВУ позволяют повысить надежность возбудителя, улучшить условия пуска СД, обеспечивают оперативный анализ работы СД в переходных и нагрузочных режимах, обеспечить защиту от неправильных действий персонала, снизить потери в примыкающей сети, повысить статическую и динамическую устойчивость работы СД.

2. Применение гидродинамических муфт (ГМД) для регулирования производительности синхронных двигателей, что позволяет экономить до 15 % электроэнергии, повысить качество регулирования параметров технологических процессов, повысить срок службы, пуск двигателя без нагрузки.

3. Установка полупроводниковых пусковых устройств для синхронных двигателей.

4. Использование современных осветительных комплексов с металлогалогенными лампами. Замена ламп ДРЛ-400 на лампы НЛВД-300. Замена ламп накаливания на компактные люминесцентные Е-27.

5. Внедрение современных автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов на базе микропроцессорной техники.

6. Внедрение частотно-регулируемого электропривода и систем автоматического регулирования на основном и вспомогательном оборудовании.

7. Оптимизация режимов работы систем электроснабжения по реактивной мощности путем автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей и автоматического включения батарей статических конденсаторов.

8. Применение современных высокотехнологичных уплотняющих материалов для электрических насосов.

9. Автоматизация управления освещением путем установки фотореле, а также регулярная (по графику) очистка светильников.

8.3. ОСНОВЫ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Основные пути экономии электроэнергии при проектировании и эксплуатации электроустановок строительных площадок, предприятий и коммунально-бытовых сооружений включают организационные мероприятия, нормирование расходов электроэнергии, контроль потребления электроэнергии. Наряду с организационными мероприятиями по экономии электроэнергии, сбережение энергоресурсов достигается за счет технических мероприятий, осуществляемых в процессе проектирования, монтажа и эксплуатации электроустановок.

Экономия электроэнергии при проектировании и монтаже может быть достигнута путем снижения ее потерь:

- в сетях – за счет рационального выбора сечений проводов; применения способов соединения, обладающих малыми переходными сопротивлениями; равномерного распределения нагрузки по фазам;
- в электрических приводах – за счет оптимального (по коэффициенту загрузки) выбора мощности электрических машин; установки автоматических ограничителей холостого хода электрических машин;
- в трансформаторах – за счет их оптимальной загрузки; обеспечения возможности создания экономичных режимов для параллельно работающих трансформаторов;
- в компрессорных установках – за счет регулирования производительности компрессора при колебаниях расхода сжатого воздуха; автоматизацией открытия всасывающих клапанов; использованием компрессоров с малым номинальным рабочим давлением; подогревом сжатого воздуха перед приемниками; осуществлением резонансного наддува поршневых воздушных компрессоров, заменой (там, где это целесообразно) пневматического инструмента на электроинструмент;
- в насосных установках – за счет автоматизации работы насосных агрегатов и применения насосов с высоким КПД;
- в вентиляционных установках – за счет автоматизации и применения экономичных вентиляторов; внедрения экономичных способов регулирования производительности; блокировки вентиляторов тепловых завес с устройствами открывания и закрывания ворот;
- в осветительных электроустановках – за счет правильного выбора типа ламп и светильников; применения различных устройств автоматического включения и отключения светильников; поддержания номинального уровня напряжения в сети.

Экономия электроэнергии при эксплуатации электроустановок может быть достигнута за счет:

- контроля работы сети и своевременности включения резервных линий, а также за равномерностью нагрузки по фазам;
- ведения экономичного режима работы трансформаторов;
- увеличения нагрузки рабочих технологических машин;
- установки ограничителей холостого хода на крупных электромашинах;
- выявления и замены ненагруженных электродвигателей электродвигателями меньшей мощности.

При эксплуатации компрессоров экономия электроэнергии достигается применением резонансного наддува поршневых воздушных компрессоров, систематического контроля утечек сжатого воздуха, отключения участков или всей сети сжатого воздуха в нерабочее время.

При эксплуатации насосных установок экономия электроэнергии обеспечивается за счет улучшения загрузки насосов и совершенствования регулирования их работы, сокращения расхода и потерь воды.

При эксплуатации вентиляционных установок экономия электроэнергии обеспечивается за счет замены старых вентиляторов новыми; внедрения современных способов регулирования производительности вентиляторов; внедрения автоматического управления установками.

При эксплуатации осветительных установок экономия электроэнергии достигается за счет замены светильников с лампами накаливания на светильники с газоразрядными лампами; своевременной очистки ламп и светильников; поддержания номинального уровня напряжения в сети; автоматизации управления осветительными установками.

При эксплуатации станков, имеющих межоперационное время (время холостого хода) более 10 с, сбережение электроэнергии обеспечивается за счет применения ограничителей холостого хода. Когда межоперационное время менее 10 с, вопрос об эффективности ограничителей холостого хода решается путем контрольного расчета.

При эксплуатации незагруженных электродвигателей экономия электроэнергии достигается за счет замены электродвигателями меньшей мощности. Если средняя нагрузка электродвигателя составляет менее 45 % номинальной мощности, то замена его менее мощным электродвигателем всегда целесообразна. При нагрузке электродвигателя более 70 % номинальной мощности можно считать, что замена его нецелесообразна. При нагрузке электродвигателя в пределах 45…70 % номинальной мощности целесообразность его замены должна быть подтверждена уменьшением суммарных потерь активной мощности в электрической системе и в электродвигателе.

9. ОСНОВЫ ЭНЕРГОАУДИТА

9.1. СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГОАУДИТА

Энергоаудиту и энергетическому обследованию подлежат все предприятия, организации и фирмы независимо от организационно-правовых форм и форм собственности не реже одного раза в 5 лет, а по их результатам составляется или обновляется энергетический паспорт.

Затраты на проведение энергоаудита бюджетных, муниципальных предприятий и унитарных предприятий и организаций оплачиваются за счет средств, выделяемых из федерального бюджета, бюджета области или бюджета органов самоуправления.

Энергоаудиторские фирмы должны обладать правами юридического лица, иметь лицензию на право проведения энергетических обследований, необходимое метрологическое (инструментальное), приборное и методологическое оборудование, опыт выполнения работ, располагать квалифицированным и аттестованным персоналом. Однако энергоаудит и энергетические обследования не вошли в перечень видов деятельности, на осуществление которых требуется лицензия (закон «О лицензировании отдельных видов деятельности»).

В настоящее время нет конкретных требований, какое минимально необходимое метрологическое (инструментальное) и методическое обеспечение должно быть в энергоаудиторской фирме для того, чтобы она имела право проводить энергетические обследования; какую квалификацию должен иметь персонал и кем он должен быть аттестован; какой опыт должен иметь персонал для выполнения работ.

К настоящему времени энергоаудиторские фирмы реализуют на практике, как правило, свои методики проведения обследования энергетического хозяйства в целом и его отдельных систем, участков, агрегатов (топлива, тепловой и электрической энергии, горячей и холодной воды, воздуха, пара, холода). Правила проведения энергетических обследований организаций предполагают шесть видов: предпусковое и первичное (перед эксплуатацией); периодическое (повторное); внеочередное; локальное; экспресс-обследование. Однако практика проведения энергоаудита в нашей стране и за рубежом показала, что при решении проблем энергосбережения и лимита потребления энергоресурсов, энергоаудит достаточно проводить в два этапа: экспресс-обследование и углубленные энергетические обследования.

Предварительно составляется программа энергоаудита, для чего собирают основные характеристики обследуемого предприятия: общие сведения, организационная структура; схема и состав основных потребителей (зданий) по видам энергоресурсов; установленные мощности подразделений, ассортимент выпускаемой или продаваемой продукции (пара, электроэнергии, горячей воды); цены (тарифы) на энергоресурсы. В оценке степени достоверности информации на предварительном этапе участвуют обследующая организация и предприятие.

Источниками информации являются:

- беседы с руководством и техническим персоналом;
- схемы энергосбережения и учета энергоресурсов;
- отчетная документация и счета по учету энергоресурсов;
- суточные, недельные и месячные графики нагрузки;
- данные по объему произведенной продукции, ценам и тарифам;
- техническая документация на технологическое и вспомогательное оборудование (технологические схемы, спецификации, режимные карты, регламенты и т.д.);
- отчетная документация по ремонтным, наладочным, испытательным и энергосберегающим мероприятиям;
- перспективные программы энергосбережения, проектная документация на технологические или организационные усовершенствования, планы развития предприятия.

Предприятие должно предоставить энергоаудиторам всю имеющуюся документальную информацию за последний год (или 24 месяца) и должно отвечать за достоверность предоставленной информации.

В конце предварительного этапа составляется программа основного этапа энергоаудита, которая согласовывается с руководством предприятия и подписывается двумя сторонами. При составлении программы учитывается мнение обследуемого предприятия о порядке и приоритетности проведения работ на различных объектах.

По результатам экспресс-обследования определяют состояние энергетического хозяйства предприятия и нерациональные потери энергии, оценивают по укрупненным показателям энергетический баланс предприятия, определяют основные направления снижения энергетических затрат.

При проведении углубленных обследований помимо указанного выше проводят сравнение фактических и нормируемых затрат энергии на технологию, отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение, собственные нужды, оценивают возможный потенциал энергосбережения при использовании различных энергосберегающих мероприятий.

9.2. ЦЕЛИ И ЭТАПЫ ЭНЕРГОАУДИТА

Цель энергоаудита: определение эффективности использования тепловой и электрической энергии, оценка потенциала предприятий, разработки эффективных схем и мероприятий рационального и эффективного использования энергетических ресурсов. Энергоаудит позволяет сделать заключения об эффективности использования различных видов энергии, контролировать или лимитировать потребности в топливно-энергетических ресурсах предприятий и организаций и тем самым реализует идею энергосбережения.

Энергоаудит предполагает следующие методологические этапы:

1) первичный обзор статистической, документальной и технической информации по всем видам энергетической деятельности предприятия и составление программы энергоаудита;

2) метрологическое (инструментальное) и термографическое обследование всех потребителей тепловой и электрической энергии;

3) исследование теплового и эксергетического баланса предприятия;

4) обработка полученной или собранной информации и аналитический обзор по всем видам энергетической деятельности предприятия;

5) оценка энергоэффективности теплотехнического, теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, теплогенерирующих установок, систем отопления и вентиляции, горячего водоснабжения, пароснабжения, сбора и возврата конденсата, холодоснабжения, электроснабжения, использования вторичных энергоресурсов;

6) разработка основных рекомендаций и мероприятий по энергосбережению, учету топлива, воды, электрической и тепловой энергии;

7) оформление отчета и составление энергетического паспорта.

Следует отметить, что каждый методологический этап энергоаудита имеет свои стадии (ступени или периоды).

Обзор статистической, документальной и технической информации всех потребителей тепловой и электрической энергии, углубленное метрологическое (или инструментальное) и термографическое обследование, –

энергоаудит может завершаться составлением или обновлением энергетического паспорта [56].

Энергетический паспорт устанавливает основные требования к построению, изложению и содержанию промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) с целью определения фактического баланса потребления ТЭР, оценки показателей энергетической эффективности и формирования мероприятий по энергосбережению.

9.3. ОБЗОР СТАТИСТИЧЕСКОЙ, ДОКУМЕНТАЛЬНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Первичный обзор статистической, документальной и технической информации по всем видам энергетической деятельности проводит энергоаудиторская организация совместно с представителями обследуемого предприятия. Сведения фиксируются в типовых формах [56].

Статистическая информация включает в себя:

- общие сведения, информацию об организационной структуре предприятия и его подразделений;
- генеральный план, местоположение зданий, сооружений, цехов, линий, котельных, технологических и производственных процессов;
- ассортимент выпускаемой продукции;
- состав потребляемых энергоресурсов и системы управления энергоресурсами предприятия и его подразделений;
- основные потребители по видам энергоресурсов;
- установленные мощности подразделений;
- наличие учета энергоресурсов и планы развития предприятия.

Документальная информация включает в себя:

- паспорта оборудования, режимные карты установок и агрегатов;
- графики нагрузки оборудования;
- цены (тарифы) на энергоресурсы;
- бухгалтерскую и техническую документацию по энергетическим показателям; коммерческий и технический учет расходования ТЭР;
- документацию по ремонтным, наладочным, испытательным и энергосберегающим мероприятиям;
- программы и проектную документацию на технологические или организационные усовершенствования.

Техническая информация включает в себя:

- технологические и электрические схемы различных систем энергоснабжения, электроснабжения в сетях до 1 кВ и свыше 1 кВ, электроосвещения, трансформаторных подстанций;
- тепловые и аксонометрические схемы систем теплоснабжения, отопления, горячего водоснабжения, пароснабжения, кондесатопроводов, приточной и вытяжной вентиляции, кондиционирования воздуха;
- технологические и аксонометрические схемы систем газоснабжения, холодоснабжения, водоснабжения и водоотведения;
- тепловые и технологические схемы котельных, топливопотребляющих установок, технологического потребления газа и использования моторного топлива, схемы использования ВЭР.

9.4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ И ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Метрологическое (или инструментальное) и термографическое обследование всех потребителей тепловой и электрической энергии проводится для дополнения статистической, документальной и технической информации, недостающей для оценки эффективности энергоиспользования, или при возникновении сомнения в достоверности при обзоре информации.

Метрология (от греч. *metron* – мера) – наука об измерениях, методах достижения их единства и требуемой точности. Метрологическое обследование – измерение требуемых параметров с заданной точностью. Для проведения метрологического обследования могут применяться стационарные или переносные контрольно-измерительные приборы (КИП) с определенными метрологическими характеристиками [47].

Энергетические и теплотехнологические процессы на предприятиях могут осуществляться различными энергоносителями и сопровождаться многообразными энергетическими процессами: силовыми, тепловыми, электротехническими, электрохимическими, электрофизическими и другими.

1. **Измерение освещенности, электрических параметров трехфазных, однофазных и высоковольтных систем**.

Замеры осуществляются приборами для измерения, регистрации и анализа параметров электрооборудования и электрических сетей, которые могут включать следующие элементы:

- цифровой люксметр RS 180-7133 – переносной прибор для измерения освещенности с цифровым отсчетом и фиксацией результатов;
- трехфазный анализатор параметров электропотребления AR.4M – микропроцессорный анализатор параметров одно- и трехфазных электрических сетей, предназначенный для измерения, регистрации и анализа тока, напряжения, частоты, активной мощности, реактивной энергии, cos φ, гармоник тока и напряжения;
- анализатор электропотребления AR.5 – переносной программируемый прибор для измерения, регистрации и анализа одно- и трехфазных электрических сетей до 850 В, предназначенный для измерения тока, напряжения, активной и реактивной мощности и энергии, частоты, cos φ, спектра гармоник тока и напряжения;
- монитор напряжения сети (типа МНС 1) – прибор для контроля напряжения однофазной (220 В, 50 Гц), трехфазной (220/380 В, 50 Гц) сети с нулевым проводом.

2. **Измерение температуры, влажности и скорости**.

Для измерений температуры, влажности и скорости среды, веществ, теплоносителей, материалов, изделий необходимо иметь измерительный комплекс, функциональная схема которого включает датчики, блок обработки данных, термоэлектродные провода.

Датчики находятся в контакте с исследуемой средой (телом) и служат своего рода «преобразователями» температуры, влажности и скорости в иной физический параметр, подлежащий измерению.

Для измерения температуры, влажности и скорости используют:

- термопары определенной градуировки (типа ТХК, ТХА);
- измерители – регуляторы температуры (ТРМ1, ТРМ10, ТРМ12);
- термопреобразователи сопротивления (ТСП, ТСМ);
- термопреобразователи многоканальные – измерители и регуляторы температуры (типа УКТ 38, ТРМ 138);
- контроллеры технологического оборудования – регуляторы температуры и влажности, программируемые по времени (БКМ, МПР 51);
- контроллеры для регулирования температуры в системах отопления и горячего водоснабжения (типа ТРМ 32-Щ4);
- контроллеры для регулирования температуры в системах отопления и приточной вентиляции (типа ТРМ 33-Щ4);
- цифровой измеритель температуры и влажности КМ 8004 – комбинированный прибор с цифровой индикацией;
- цифровой миниатюрный термометр КМ 42 или КМ 43 – прибор для контактного измерения температуры с цифровой индикацией (от минус 200 до + 1372 °С);
- миниатюрный цифровой дифференциальный термометр КМ 44 или КМ 45 – прибор для контактного измерения температуры с цифровым отображением результатов измерений;
- бесконтактные цифровые термометры КМ 822/824/826 или INFRATRACE 801/1000/2000 – приборы для бесконтактного измерения температуры по инфракрасному излучению объектов;
- цифровой термоанемометр КМ 4007 – комбинированный прибор с цифровой индикацией измерения скорости и температуры воздушного потока;
- цифровой фотоконтактный тахометр КМ 6002 – прибор для бесконтактного измерения частоты и линейной скорости вращения с цифровым отсчетом результатов измерения на дисплее.

Термопары с термочувствительным элементом, термоэлектрические преобразователи или термоприемники подключают к входам прибора – блока обработки данных.

Блок обработки данных может включать в себя регистрирующие или показывающие приборы, цифровые фильтры, вычислители или логические устройства, аналого-цифровые преобразователи, аналоговые модули входа, адаптеры интерфейса, а также ЭВМ.

Действие *манометрических и ртутных термометров* основано на измерении температуры рабочего тела, когда в трубопровод вваривают гильзу из нержавеющей стали, конец которой должен доходить до центра трубопровода, заполняют ее маслом и опускают в нее термометр.

Действие *термометров сопротивления* (платиновых ТСП и медных ТСМ) основано на использовании зависимости электрического сопротивления вещества от температуры.

Действие *термоэлектрического термометра* основано на использовании зависимости термоЭДС термопары от температуры. Термопара как чувствительный элемент термометра состоит из двух разнородных проводников (термоэлектродов), одни концы которых (рабочие) соединены друг с другом, а другие (свободные) подключены к измерительному прибору. При различной температуре рабочих и свободных концов в цепи термоэлектрического термометра возникает ЭДС.

Наибольшее распространение имеют термопары типов ТХА (хромель-алюмель), ТХК (хромель-копель). Термопары для высоких температур помещают в защитную (стальную или фарфоровую) трубку, нижняя часть которой защищена чехлом и крышкой. У термопар высокая чувствительность, малая инерционность, возможность установки самопишущих приборов на большом расстоянии. Присоединение термопары к прибору производится компенсационными проводами.

Термоэлектродные или компенсационные провода, передающие сигналы от термопар к прибору, изготовлены из тех же материалов (либо с аналогичными термоэлектрическими характеристиками), что и термопара.

3. **Измерение давления**.

Для измерения давления используются барометры, манометры, вакуумметры, тягомеры и др., которые измеряют барометрическое или избыточное давления, а также разрежение в мм вод. ст., мм рт. ст., МПа, кгс/см^2, кгс/м^2 и др. Для контроля работы топок (при сжигании газа и мазута) могут быть использованы следующие приборы:

- манометры (жидкостные, мембранные, пружинные) – показывают давление топлива на горелке после рабочего крана;
- манометры (U-образные, мембранные, дифференциальные) – показывают давление воздуха на горелке после регулирующей заслонки;
- тягомеры (ТНЖ, мембранные) – показывают разрежение в топке.

4. **Измерение расхода**. Для измерения расхода жидкостей (воды, нефтепродуктов), газов и пара применяют расходомеры или ротаметры.

Скоростные объемные расходомеры измеряют объем жидкости или газа по скорости потока и суммируют эти результаты. В рабочей камере скоростного объемного расходомера (водомера) установлена крыльчатая или спиральная вертушка, которая вращается от поступающей в прибор жидкости и передает расход счетному механизму.

Объемный ротационный счетчик (РГ) измеряет суммарный расход газа до 1000 м^3/ч, для чего в рабочей камере размещены два взаимно перпендикулярных ротора, которые под действием давления протекающего газа приводятся во вращение, каждый оборот которого передается через зубчатые колеса и редуктор счетному механизму.

Ультразвуковые измерители расхода жидкостей (типа FORTAFLOW 204, 208, 300 или МКII-R) – портативные расходомеры жидкостей без нарушения целостности трубопроводов, с выводом информации на цифровой дисплей.

Дроссельные расходомеры с переменным перепадом давления имеют сужающие устройства – нормальные диафрагмы (шайбы) камерные и бескамерные с отверстием, меньшим сечения трубопровода. При прохождении потока среды через отверстие шайбы скорость ее повышается, давление за шайбой уменьшается, а перепад давления до и после дроссельного устрой-

ства зависит от расхода измеряемой среды: чем больше количество вещества, тем больше перепад.

Разность давлений до и после диафрагмы измеряется дифференциальным манометром, по данным которого можно вычислить скорость протекания жидкости через отверстие шайбы. Нормальная диафрагма выполняется в виде диска (из нержавеющей стали) толщиной 3…6 мм с центральным отверстием, имеющим острую кромку, и должна располагаться со стороны входа жидкости или газа и устанавливаться между фланцами на прямом участке трубопровода. Импульс давления к дифманометру производится через отверстия из кольцевых камер или через отверстие с обеих сторон диафрагмы.

Для измерения расхода пара на импульсных трубках к дифманометру устанавливают уравнительные (конденсационные) сосуды, предназначенные для поддержания постоянства уровней конденсата в обеих линиях. При измерении расхода газа дифманометр следует устанавливать выше сужающего устройства, чтобы конденсат, образовавшийся в импульсных трубках, мог стекать в трубопровод, а импульсные трубки по всей длине должны иметь уклон к газопроводу (трубопроводу) и подключаться к верхней половине шайбы. Расчет диафрагм и монтаж на трубопроводах производят в соответствии с правилами [18].

5. **Газоанализаторы** предназначены для контроля полноты сгорания топлива, избытка воздуха и определения в продуктах сгорания объемной доли углекислого газа, кислорода, окиси углерода, водорода, метана. По принципу действия газоанализаторы делятся на:

- *химические* (ГХП, Орса, ВТИ), основанные на последовательном поглощении газов, входящих в состав анализируемой пробы – для измерения содержания O_2, CO_2, CO, H_2, CH_4;
- *физические* – работающие по принципу измерения физических параметров (плотности газа и воздуха, их теплопроводности), в частности переносной однокомпонентный газоанализатор КМ 82 – прибор для измерения концентрации NO_x;
- *хроматографические* – основанные на адсорбции (поглощении) компонентов газовой смеси определенным адсорбентом (активированным углем) и последовательной десорбции (выделении) их при прохождении колонки с адсорбентом газом.

Термографическое обследование проводится с помощью автоматических приборов (или самописцев) для регистрации аналоговых, цифровых и других входных сигналов от датчиков, на которых фиксируются в течение определенного или длительного времени (минут, часов, суток, периода обработки) отдельные параметры: температура, расход или давление теплоносителя, влажность, содержание газов или его компонентов. Термографическое обследование обеспечивает накопление, хранение и обработку параметров и может включать в себя адаптеры и преобразователи интерфейса RS-232/RS-485. Термографическое обследование обеспечивает также супервизорный контроль на дисплее ЭВМ программами типа ОРМ (OWEN PROCESS MANAGER) или SCADA-система (Supervisory, Control and Data Acquisition).

9.5. ПОГРЕШНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Любые измерительные системы не могут обеспечить действительного значения температуры, расхода или давления теплоносителя, влажности, содержания газов или компонентов, поскольку физические принципы и исходные условия проведения измерений в той или иной степени оказываются нарушенными. Результат метрологического и термографического измерения значений температуры, влажности, расхода или давления теплоносителя будет отличаться от их действительного значения на характеристику метода или прибора, называемую абсолютной погрешностью измерения параметра.

Любая погрешность измерения может выражаться в долях действительного значения измеряемого параметра и называется относительной погрешностью измерения. Погрешность измерения определяется прибли-

женно с определенной точностью в зависимости от метода, условий и применяемых средств измерений, способа фиксации результата, числа наблюдений и методов обработки полученных данных.

Абсолютную погрешность измерения разделяют на три составляющие: методическую, инструментальную и погрешность наблюдения. *Методическая погрешность* измерения возникает из-за неточности выполнения методики измерений, недостаточной изученности явлений и неточности реализации теоретических предпосылок.

Инструментальная (приборная) *погрешность* измерения возникает из-за несовершенства средств измерения и использования этих средств в условиях, отличающихся от нормальных. Инструментальную погрешность разделяют на две составляющие: основную и дополнительную. Основная характеризует возможности средств измерений в нормальных условиях, а дополнительная учитывает влияние отклонений от этих условий. Паспорт или сертификат каждого прибора должен нормировать и регламентировать метрологические характеристики измерений в известных рабочих условиях. Приборную погрешность снижают путем применения современных контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, а также ЭВМ.

Погрешность регистрации наблюдения определяется квалификацией и особенностями наблюдателя и возникает в результате неправильного отсчета и снятия показаний, расшифровки записей и результатов регистрации.

Систематической погрешностью измерения параметра называют составляющую погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется в процессе измерений (либо при их повторении). Систематическую погрешность оценивают расчетным путем или экспериментально, а затем вводят соответствующую поправку в результат измерения параметра либо самого метода.

Случайной погрешностью измерения называют составляющую погрешности измерения, которая заранее не предсказуема и изменяется случайным образом при повторных измерениях параметра теми же средствами измерения. Закономерности проявления случайной погрешности и оценка ее могут быть выявлены при многократных наблюдениях с последующей статистической обработкой результатов измерений. В полученное значение случайной погрешности войдет и та часть систематической погрешности, которая из-за сложности и приближенности оценки не могла быть ранее учтена.

Измеряемые параметры среды, веществ, материалов и изделий могут быть стационарными (постоянными) или нестационарными (изменяться во времени). В зависимости от этого погрешность измерения подразделяют на статическую и динамическую. Например: погрешность измерения нестационарной температуры включает в себя статическую и динамическую составляющую. Погрешность измерения стационарной температуры включает в себя только статическую, а динамическая составляющая равна нулю.

Статическая составляющая погрешности зависит от многих факторов: измерения параметров твердых тел, жидкостей, газов, движущихся сред или высокоскоростных потоков, монтажа датчика на поверхности или внутри тела (материала, изделия, массива), с высокой или низкой теплопроводностью, при установке в пазу, цилиндрическом канале или с использованием защитных экранов, применения контактных или бесконтактных способов. Существенно влияют на статическую составляющую погрешности направление теплового воздействия на исследуемый объект (нагрев или охлаждение), теплообмен между отдельными элементами, теплоотдача излучением и его окружением в газообразных, частично прозрачных и других объектах, влияние внутренних источников теплоты, характер изменения температуры и др.

Динамическая составляющая погрешности вызвана скоростью изменения исследуемого параметра от времени и невозможностью из-за инерционных свойств регистрации мгновенных значений средствами измерения. В результате каждый из применяемых приборов вносит в результат измерения дополнительную инструментальную погрешность, зависящую от конструкции и принципа действия.

Результирующая погрешность всего измерительного комплекса определяется суммой погрешностей каждого отдельного элемента, который может иметь свои погрешности. Суммирование всех составляющих погрешностей определяет *методическую погрешность измерительного комплекса*. Принимая меры защиты (хороший контакт, увеличение числа измерений, применение совершенных измерительных приборов), можно уменьшить инструментальную, случайную и статическую погрешности до необходимого минимального значения.

Анализ источников погрешностей [35, 36] показывает, что быстродействие современных регистрирующих приборов, особенно электронных, исчисляется долями секунд, а процессы между датчиком и средой могут занимать значительно большее время. Количественный анализ методических погрешностей в конечном итоге заключается в обосновании и выборе математической модели методологического и термографического обследования.

9.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Статистическая, документальная и техническая информация, а также метрологические и термографические обследования всех потребителей тепловой и электрической энергии являются исходным материалом для анализа эффективности энергоиспользования предприятия.

Тепловой баланс позволяет определить КПД установки, расход топлива или электроэнергии для получения единицы тепловой энергии, расход пара (или другого теплоносителя) для получения единичной продукции. Тепловой баланс это соотношение, связывающее приход и расход теплоты и составляется на единицу выпускаемой продукции, на 1 кг твердого или жидкого топлива, на 1 $м^3$ газообразного топлива или в процентах, %, от введенной (суммарной) располагаемой теплоты.

Эксергетический баланс теплотехнической схемы позволяет определить КПД системы, суммарную зксергию на входе и суммарную эксергию на выходе из нее. *Эксергия* служит обобщенной качественной и количественной характеристикой для потока теплоты и потока вещества, зависящих одновременно от параметров системы и окружающей среды. Эксергетический КПД системы оценивает преобразование энергии как во всей системе, так и на отдельных ее участках.

Полученная информация теплового и эксергетического баланса предприятия используется для исследования либо отдельного объекта, либо предприятия в целом. Исследование информации включают в себя физические и финансовые методы.

Физический метод исследования оперирует с физическими или натуральными параметрами и имеет целью определение характеристик эффективности энергоиспользования.

Физический метод исследования включает следующие этапы.

1. Все данные энергопотребления приводятся к единой международной системе измерения – СИ.

2. Определяется состав объектов: отдельные потребители, подразделения, технологические линии, цеха или предприятие в целом.

3. Производится распределение потребляемой энергии по отдельным объектам, а также видам энергоресурсов и энергоносителей: электроэнергия, пар, горячая вода, топливо (твердое, жидкое, газообразное).

4. Определяются факторы, влияющие на потребление энергии: температура наружного воздуха (для систем отопления и вентиляции), расход топлива в паровых теплогенераторах (для систем пароснабжения) и водогрейных котлах (для систем теплоснабжения), электрической энергии (для технологического оборудования, холодильников).

5. Вычисляется удельное энергопотребление по отдельным видам энергоресурсов и объектам, которое определяется отношением энергопотребления к выпуску продукции (Вт или 1 кг топлива/на единицу продукции). Значение полученного удельного энергопотребления сравнивается с нормативными значениями, после чего делается вывод об эффективности энергоиспользования как по отдельным объектам, так и по предприятию в

целом. Нормативные значения могут быть заданы, рассчитаны или взяты из периодической литературы.

6. Определяются прямые потери различных энергоносителей за счет потерь электроэнергии, утечек воды или конденсата, недогрузки или простоев оборудования, потерь теплоты (с уходящими топочными газами, химический и механический недожог, от наружных ограждений в окружающую среду), неквалифицированной эксплуатации и других выявленных нарушений.

7. Выявляются наиболее неблагоприятные объекты с точки зрения эффективности энергоиспользования.

Финансовый метод исследования оценивает прямые потери в денежном выражении и проводится параллельно с физическим методом исследования. Он придает экономическое обоснование выводам, полученным на основании физического метода исследования и позволяет вычислить распределение затрат на энергоресурсы по всем объектам энергопотребления и видам энергоресурсов. Финансово-экономические критерии имеют важное значение при исследовании энергосберегающих рекомендаций и проектов.

9.7. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Обработка полученной или собранной информации, анализ и аналитический обзор проводятся по всем видам энергетической деятельности предприятий.

Анализ полученной или собранной информации необходим:

- для определения приоритетных направлений энергетических обследований;
- для согласования технического задания, календарного плана и программы проведения энергетического обследования;
- для доработки и утверждения форм энергетического паспорта предприятия.
- для финансовой оценки прямых потерь в денежном выражении.

Эффективность систем энергоснабжения и анализ их работы определяются и проводятся для различных схем и режимов и охватывают:

- электроснабжение в сетях до 1 кВ;
- электроснабжение в сетях свыше 1 кВ;
- электроосвещение;
- электроснабжение трансформаторных подстанций;
- компенсирующие устройства, установленные на подстанции;
- степень загруженности трансформаторов;
- потери активной и реактивной электроэнергии в трансформаторах;
- баланс электрических нагрузок.

Эффективность тепловых потребителей и систем теплоснабжения, а также анализ их работы определяются и проводятся для различных технологических и тепловых схем и режимов и охватывают:

- котельные агрегаты и котельные установки;
- тепловые сети, паропроводы и конденсатопроводы;
- тепловые и гидравлические потери тепловых сетей;
- системы отопления, приточной и вытяжной вентиляции, горячего водоснабжения, кондиционирования воздуха;
- системы утилизации теплоты;
- системы ВЭР;
- системы водоснабжения и водоотведения;
- системы технологического потребления газа;
- системы использования моторного топлива;
- тепловой и эксергетический баланс предприятия;
- баланс прихода, расхода и учета тепловой энергии.

Аналитический обзор проводится по всем видам энергетической деятельности предприятия и охватывает следующие вопросы:

- эффективное использование топлива котельными и топливопотребляющими установками;

- нормативные и фактические удельные расходы топлива и электроэнергии котельными на отпуск теплоты;
- рациональный расход топлива на собственные нужды;
- рациональный расход топлива, отнесенного на единицу продукции теплотехнологического процесса;
- тарифы и цены на топливо, электроэнергию, воду;
- тарифы и цены за активную и реактивную мощности;
- рационализация режимов электропотребления;
- наличие договора с энергоснабжающими организациями;
- наличие договорной документации на пользование тепловой и электрической энергии;
- наличие отчетной документации по ремонтным, наладочным и испытательным работам в системах электроснабжения, теплоснабжения, водоснабжения, водоотведения и теплотехнологиях;
- наличие отчетной документации по энергосберегающим мероприятиям в системах электроснабжения, теплоснабжения, водоснабжения, водоотведения и теплотехнологиях;
- наличие штрафных санкций за превышение потребления электроэнергии, за недобор, за превышение заявленного максимума нагрузки, неиспользование заявленного максимума нагрузки;
- сравнение фактических и нормативных значений показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов;
- выявление причин несоответствия фактических и нормативных значений показателей эффективности использования энергоресурсов;
- обобщение результатов анализа использования топлива, электрической и тепловой энергии по группам оборудования, технологическим процессам, видам топлива и энергоносителей.

9.8. ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

Оценка энергоэффективности теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, теплогенерирующих установок, систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, пароснабжения, сбора и возврата конденсата, холодоснабжения, электроснабжения, использования вторичных энергоресурсов сводится к следующим основным мероприятиям.

1. *Энергоэффективность систем электроснабжения* включает эффективность системы освещения, электротехники и электроники, электрические сети, электрические машины и аппараты промышленных предприятий и объектов жилищно-коммунального хозяйства (разд. 8).

2. *Энергоэффективность в вопросах теплообмена* базируется на законах теплопроводности, конвективного, лучистого и сложного теплообмена, а также затрагивает вопросы интенсификации теплопередачи в теплообменных аппаратах, теплообмена излучением между телами и в газах, при кипении и конденсации, теорию использования теплоты для отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, технологических нужд промышленности и ЖКХ (разд. 2).

3. *Энергоэффективность теплогенерирующих установок* затрагивает вопросы расчета паровых и водогрейных котельных агрегатов, гелиоустановок, геотермальных установок, котлов-утилизаторов, теплонасосных установок. Разработка методик расчета ТГУ, горения, теплового баланса, топочных камер, конвективных поверхностей нагрева, расхода топлива позволяет выбрать наиболее экономичный и энергосберегающий вариант работы теплогенератора (разд. 3).

4. *Энергоэффективность производственных и отопительных котельных* основывается на проектировании и расчете рациональных тепловых схем котельных для закрытых и открытых систем теплоснабжения, экономии энергоресурсов при работе паровых и водогрейных котельных установок, экономии и сбережении воды в котельной, использовании современных приборов регулирования, контроля, управления и экономии энергоресурсов при эксплуатации котельных.

Разработка совершенных методик работы тепловых схем производственно-отопительных котельных, с паровыми и водогрейными котлами, расчета и подбора теплоэнергетического оборудования (теплообменников, насосов, тягодутьевых машин и др.), определения тепловых нагрузок и расхода топлива позволяет выбрать наиболее экономичный и энергосберегающий вариант их работы (разд. 4).

5. *Энергоэффективность тепловых сетей* касается вопросов повышения качества воды для систем теплоснабжения, использования современных теплообменников на тепловых пунктах, установки приборов расхода воды и учета теплоты, применения современных технологий тепловой изоляции, замены элеваторных узлов на смесительные установки с датчиками температуры и расхода (разд. 4).

6. *Энергоэффективность теплотехнологий* охватывает разработку критериев энергетической оптимизации при производстве, передаче или сбережении тепловой энергии, баланса теплоты, интенсификации процессов теплопередачи, современных способов сжигания топлива, использования холодильных установок, тепловых насосов и тепловых трубок, эффективной тепловой изоляции, разработке методик расчета технико-экономических показателей (разд. 5).

7. *Энергоэффективность зданий и сооружений* строится на сбережении теплоты в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Энергосбережение в зданиях и сооружениях включает в себя различные устройства: вентилируемых наружных стен, вентилируемых окон, трехслойного или теплоотражающего (в инфракрасном излучении) остекления, дополнительного утепления наружных ограждений, теплоизоляции стен за отопительным прибором, устройств застекленных лоджий (разд. 6).

Кроме того, для энергосбережения в зданиях и сооружениях возможно применение воздушного отопления от гелиоустановок, а также с использованием теплонасосных установок и энергии низкого потенциала (конденсата, воды, воздуха).

В промышленных зданиях и сооружения в дополнении к этому возможно применение газовых инфракрасных излучателей, периодического режима отопления, локального обогрева рабочих площадок теплотой рециркуляционного воздуха из верхней зоны помещения, прямое испарительное охлаждение воздуха, использование вращающихся регенеративных воздухо-воздушных утилизаторов теплоты.

8. *Энергоэффективность альтернативных* (*нетрадиционных и возобновляемых*) *источников энергии* опирается на применении солнечных коллекторов и электростанций, тепловых насосов, гелиоустановок, фотоэлектрических и ветроэнергетических установок (разд. 7).

9. *Энергоэффективность вторичных энергоресурсов* (ВЭР) требует использования горючих, тепловых и ВЭР избыточного давления. Энергосбережение за счет использования ВЭР включает утилизацию теплоты уходящих топочных газов и воздуха, установки контактных теплообменников, использование холодильных установок в качестве нагревателей воды, использование теплоты сепараторов пара и пара вторичного вскипания конденсата, рециркуляцию сушильного агента (разд. 7).

10. *Энергоэффективность систем сжатого воздуха* на предприятиях оценивается отношением мощности компрессора, необходимой для поддержания давления в системе сжатого воздуха при неработающем предприятии, к средней мощности компрессора в период работы. На предприятии должен быть список потребителей и схема распределения сжатого воздуха с указанием давления и размеров, а также временные графики работы. Энергоэффективность оценивается по объемам потребления сжатого воздуха и возможных мест утечек, работой клапанов на компрессорах, систем охлаждения компрессоров, систем регулирования воздухоснабжения в зависимости от нагрузок, температуры всасываемого воздуха и температуры сжатого воздуха [33, 34].

11. *Энергоэффективность систем водоснабжения и водоотведения* предприятия оценивается по каждому виду используемой на предприятии воды (питьевой, технической), с указанием размеров труб, насосов и их характеристик (КПД, коэффициентов загрузки и мощности, наличия систем регулирования, режим работы). Энергоэффективность систем водоснабже-

ния оценивается по утечкам, потерям давления и расходу воды. Энергоэффективность систем водоотведения оценивается количеством дренажных, ливневых и фекальных стоков [31, 33].

12. *Энергоэффективность холодильных установок* на предприятиях оценивается путем исследования: характеристик электроприводов компрессоров, вентиляторов и насосов (КПД, коэффициент загрузки, cos φ), системы регулирования температуры у потребителя, соблюдения параметров холодильного агента, состояния теплоизоляции трубопроводов и камер, расхода охлаждающей воды и ее температуры на входе и выходе. На предприятиях наибольшее распространение имеют компрессионные и абсорбционные холодильные установки. Причем абсорбционные установки более энергоемкие, чем компрессионные. При энергоаудите определяют параметры холодильных установок, их режим работы и загрузку и следует знать, что все холодильные установки должны работать при возможно максимальной загрузке [29, 33].

13. *Энергоэффективность систем топливоснабжения* предприятия определяется отдельно по каждому виду топлива (газ, мазут), в зависимости от давления, температуры и режимов работы систем топливоснабжения. Энергобаланс составляется по каждому виду топлива.

9.9. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ

Конкретные методы и способы энергосбережения для различных систем, отраслей и предприятий изложены ранее. Разрабатываемые мероприятия должны соответствовать нормативным документам в части обеспечения надежности, безопасности, охраны труда, охраны окружающей среды, качества топлива и энергии. При разработке рекомендаций необходимо выполнить следующие мероприятия.

1. Обосновать техническую суть предлагаемого усовершенствования, а также принципы получения экономии тепловой и электрической энергии в денежном эквиваленте.
2. Предопределить состав оборудования, необходимого для реализации рекомендации, его примерную стоимость, стоимость доставки, установки и ввода в эксплуатацию.
3. Рассчитать фактические показатели энергоэффективности и выявить причины их несоответствия нормативным показателям.
4. Рассчитать потенциальную экономию в физическом и денежном выражении на год и, возможно, на несколько лет вперед.
5. Рассмотреть все возможные формы снижения затрат, например изготовление и монтаж оборудования силами самого предприятия.
6. Найти возможные побочные эффекты от внедрения рекомендаций, влияющих на реальную экономическую эффективность.
7. Разработать организационно-технические мероприятия, направленные на повышение эффективности использования ТЭР по каждому показателю.
8. Провести ранжирование мероприятий по их энергетической эффективности, требуемым затратам и срокам окупаемости.
9. Провести оценку требуемых затрат для реализации энергосберегающих мероприятий, определить их технико-экономическую эффективность, сроки окупаемости.
10. Установить перечень работ, необходимых для реализации конкретных энергосберегающих мероприятий.
11. Дать оценку общего эффекта от предлагаемых рекомендаций с учетом всех вышеперечисленных пунктов.

Этап согласования отчетной документации по энергосбережению включает следующие мероприятия.

1. Акт (отчет) о выполненном энергетическом обследовании.
2. Выбор методики определения потенциала энергосбережения.
3. Результаты определения потенциала энергосбережения.
4. Выбор экономически обоснованной программы, рекомендаций и мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР, снижению затрат на топливо и энергоснабжение.

5. Мероприятия по энергосбережению.
6. Топливно-энергетический баланс предприятия.
7. Энергетический паспорт предприятия.

Для оценки экономической эффективности предприятия следует применить методики и расчеты, приведенные ранее. Все рекомендации и мероприятия по оценке экономической эффективности следует классифицировать по трем основным категориям:

1) малозатратные – воплощаются в порядке текущей деятельности предприятия;

2) среднезатратные – осуществляются за счет средств предприятия;

3) высокозатратные – требуют дополнительных денежных средств или инвестиций и реализуются привлечением кредитов и займов.

В заключение все энергосберегающие рекомендации сводятся в одну таблицу, в которой они располагаются по трем категориям, перечисленным выше. В каждой из категорий рекомендации располагаются в порядке понижения их экономической эффективности. Такой порядок рекомендаций соответствует наиболее оптимальной очередности их выполнения.

9.10. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА И СОСТАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПАСПОРТА

Отчет по энергосбережению включает в себя информационный и аналитический обзор по всем видам энергетической деятельности предприятия. В пояснительной записке представляется вся информация об обследуемом предприятии, имеющая отношение к вопросам энергоиспользования, а также общая характеристика предприятия.

В аналитической части приводится физический и финансово-экономический анализ эффективности энергоиспользования, обосновываются энергосберегающие рекомендации и порядок их выполнения. Сводная таблица энергосберегающих рекомендаций выносится в начало или конец отчета и оформляется в виде общих выводов (резюме).

Отчет должен быть кратким и конкретным, все таблицы, расчеты, материалы обследования следует выносить в приложения. Основные числовые данные (состав энергоресурсов, ассортимент выпускаемой продукции, структуру энергопотребления, структуру затрат на энергоносители и ряд других) необходимо представлять в виде таблиц, графиков и круговых диаграмм. Суточные, недельные и годовые графики потребления различных видов энергоресурсов следует представлять в виде линейных или столбчатых графиков.

Энергетический паспорт потребителя ТЭР включает [57]:

- титульный лист энергетического паспорта потребителя ТЭР;
- общие сведения о потребителе ТЭР;
- сведения об общем потреблении энергоносителей;
- информацию о трансформаторных подстанциях;
- информацию о собственном производстве электрической и тепловой энергии, а также годовой баланс потребления электроэнергии;
- сведения о потреблении (производстве) тепловой энергии;
- информацию о составе и работе котельных;
- сведения о теплотехнологическом оборудовании;
- годовой баланс потребления тепловой энергии;
- сведения о потреблении котельно-печного и моторного топлива;
- сведения об использовании вторичных энергоресурсов, альтернативных топлив, возобновляемых источников энергии;
- сведения о показателях эффективности использования ТЭР;
- сведения об энергосберегающих мероприятиях по каждому виду ТЭР.

Типовые формы энергетического паспорта могут быть дополнены и утверждены в составе соответствующего нормативного документа.

10. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

10.1. СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОТДЕЛА ПРЕДПРИЯТИЯ

Общая структура энергетического отдела предприятия включает:

- функциональную структуру основных подразделений по административно-хозяйственному принципу, по характеру производственных процессов, по виду конечной продукции;
- функциональную структуру энергетической службы (главного энергетика), обеспечивающей прием, преобразование, распределение, передачу, эксплуатацию и использование всех видов ТЭР;
- функциональную структуру производственных подразделений (цехов), содержащих все звенья технологических процессов;
- перечень энергоносителей, таблично-графическую форму энергобалансов, технологических процессов по всем видам продукции.

10.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Цели энергетического обследования предусматривают:

- контроль рационального и эффективного использования топливно-энергетических ресурсов (природного газа, жидкого, твердого или моторного топлива, электрической и тепловой энергии, воды, конденсата и других теплоносителей);
- соответствие расходов топливно-энергетических ресурсов (природного газа, жидкого, твердого или моторного топлива, электрической и тепловой энергии, воды) установленным нормам;
- определение затрат на реализацию энергоэффективных мероприятий и программ энергосбережения.

Задачи энергетического обследования предусматривают:

- оценку фактического состояния использования ТЭР;
- сравнение показателей энергоиспользования с нормативными значениями;
- выявление причин нерационального расходования ТЭР и определение резервов экономии топлива, электрической и тепловой энергии, воды;
- разработку и контроль программ по энергосбережению и ведению энергетического паспорта.

10.3. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Энергетическое обследование предприятия включает 5 стадий.

1. *Предэксплуатационное энергетическое обследование* проводится перед пуском и вводом в эксплуатацию топливо- и энергопотребляющего оборудования (объекта, технологического процесса) с целью проверки соответствия законченных монтажных и наладочных работ требованиям Государственных стандартов, СНиПов и проектной документации по показателям энергоэффективности.

По результатам обследования составляется акт обследования, делаются выводы о соответствии (или несоответствии) подготовленного к пуску и эксплуатации топливо- и энергопотребляющего оборудования (объекта, технологического процесса) нормативным показателям энергоэффективности, а также дается разрешение (или налагается обоснованный запрет) на пуск и эксплуатацию. Разрешение на пуск и эксплуатацию оформляется соответствующим актом, в котором устанавливается дата проведения первичного обследования. Основанием для запрета является письменное решение Ростехнадзора, одновременно с которым выносится предписание об устранении выявленных при обследовании нарушений с указанием сроков их устранения. В решении о запрете на пуск и эксплуатацию устанавливается дата повторного обследования.

2. *Первичное энергетическое обследование* проводится с целью определения фактических показателей энергоэффективности находящегося в эксплуатации топливо- и энергопотребляющего оборудования (объекта, технологического процесса), оценки фактической эффективности использования ТЭР (проверяется состояние учета используемых и производимых ТЭР, отчетность по их использованию и производству, проводится анализ затрат на топливо- и энергообеспечение и т.д.). По результатам обследования составляется акт обследования или выдается предписание об устране-

нии нарушений в использовании ТЭР. Результаты обследования заносятся в энергетический паспорт предприятия.

3. *Периодическое энергетическое обследование* проводится в целях проверки выполнения выданных ранее предписаний, оценки динамики потребления ТЭР и их удельных расходов на выпуск продукции (энергоемкость, стоимость ТЭР в общих материальных затратах производства), а также выполнение программы энергосбережения (мероприятий по энергосбережению). По результатам обследований составляется акт обследования, вносятся изменения в ранее разработанный энергетический паспорт предприятия – потребителя ТЭР или выдается предписание об устранении нарушений в использовании ТЭР (в случае выявления таких нарушений).

4. *Внеочередное энергетическое обследование* проводится по инициативе отдельных органов РФ в случаях:

- предоставления льгот, связанных с использованием ТЭР;
- изменения общего и удельного потребления ТЭР;
- изменения себестоимости продукции и энергетической составляющей в ней;
- изменения количества выбросов вредных веществ в атмосферу;
- предположений по изменению эффективности использования ТЭР.

5. *Локальное энергетическое обследование* проводится с целью:

- оценки эффективности использования ТЭР;
- выявления отдельных показателей энергоэффективности по отдельным технологическим процессам, группам агрегатов или отдельным агрегатам.

Финансирование энергетических обследований и энергетического аудита осуществляется за счет средств предприятия. Финансирование внеочередных энергетических обследований производится за счет организаций, явившихся инициаторами этих обследований.

10.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА

В проведении энергетических обследований и энергетического аудита участвуют: предприятие, федеральная служба Ростехнадзора и организация, проводящая энергетическое обследование и энергоаудит.

Порядок проведения энергетических обследований и энергетического аудита предприятия включает в себя несколько этапов.

1. **Подготовительный этап**.

На предприятии проводятся:

- подготовка договора на проведение энергетического обследования;
- обзор и анализ информации о предприятии, системах энергоснабжения, оборудовании, режимах его работы;
- проверка наличия приборного оснащения для проведения энергетического обследования;
- разработка, согласование и утверждение программы и календарного плана проведения энергетического обследования.

Предприятие:

- выбирает энергоаудиторскую организацию (фирму) для заключения договора на проведение энергетического обследования;
- утверждает техническое задание на проведение энергетического обследования, включая программу проведения обследования;
- издает соответствующий приказ с утверждением состава рабочей группы, ответственной за проведение обследования;
- приказом по предприятию назначается ответственное лицо за проведение работ по энергетическому обследованию или энергоаудиту.

Ответственное лицо, в дальнейшем «Предприятие», должно сотрудничать с персоналом организации, в дальнейшем «Энергоаудитор», проводящей энергетическое обследование или энергоаудит.

Персонал федеральной службы Ростехнадзора, в дальнейшем «Ростехнадзор»:

- осуществляет проверку и полноту используемых показателей энергоэффективности и соответствие их нормативным показателям;

- согласует техническое задание, программу и календарный план проведения энергетического обследования;
- изучает представленную документацию и осуществляет контроль полноты представленной информации;
- осуществляет контроль соответствия используемых приборов требованиям стандартов;
- согласовывает методики обработки результатов обследования;
- согласовывает перечень мероприятий по энергосбережению;
- согласовывает энергетический паспорт;
- выдает предписание на устранение выявленных нарушений в использовании ТЭР.

«*Предприятие*» должно (см. п. 9.1, 9.3):

- оказывать содействие проведению обследования, энергоаудита;
- обеспечить доступ персонала «Энергоаудитора» к обследуемым объектам;
- выделить квалифицированный персонал «Предприятия» для сопровождения «Энергоаудитора» и оказывать помощь при проведении обследования;
- предоставить «Энергоаудитору» статистическую, документальную, техническую и технологическую документацию;
- установить режимы работы оборудования предприятия, необходимые для проведения «Энергоаудитором» метрологических, термографических (инструментальных) измерений, но если методики не противоречат требованиям технологии и техники безопасности.

«*Предприятие*» и «*Энергоаудитор*» совместно:

- заключают договор на проведение энергетического обследования;
- оформляют двухсторонний акт о передаче статистической, документальной, технической и технологической документации с указанием наименования каждою документа, даты его составления, формата и количества листов, количества экземпляров;
- в двухстороннем акте оговариваются условия пользования и возврата передаваемой документации (срок пользования, конфиденциальность, возможность копирования, выноса с территории предприятия);
- в примечании акта напротив каждого документа делается отметка «оригинал» или «копия».

После заключения совместного договора «*Предприятие*»:

- представляет «Энергоаудитору» энергетический паспорт (если он имеется), а также имеющуюся документацию по результатам проведения энергетического аудита потребителей ТЭР;
- представляет схемы энергоснабжения потребителей ТЭР, количественные показатели по входящим и выходящим потокам ТЭР;
- представляет технологические схемы и регламенты технологических процессов.

«*Энергоаудитор*»:

- оформляет техническую документацию для заключения договора, согласовывает проект договора с «Предприятием» и заключает договор на проведение энергетического обследования;
- изучает энергетический паспорт (при его наличии) и материалы энергоаудита потребителей ТЭР (совместно с «Ростехнадзором»).

«*Ростехнадзор*»:

- согласует техническое задание, программу и календарный план проведения энергетического обследования;
- осуществляет проверку и полноту используемых показателей энергоэффективности и соответствие их нормативным показателям;
- совместно с «Энергоаудитором» знакомится с энергетическим паспортом (при его наличии) и другой представленной документацией;
- совместно с «Предприятием» и «Энергоаудитором» утверждает форму энергетического паспорта [57].

2. **Этап документального обследования**.

«*Предприятие*» представляет «Энергоаудитору» и «Ростехнадзору» информацию за базовый год (последний отчетный календарный год на момент проведения энергетического обследования), а именно:

- отчетную документацию по коммерческому и техническому учету потребляемых энергоресурсов;
- отчетную документацию по ремонтным, наладочным, испытательным и энергосберегающим мероприятиям;
- бухгалтерские расчеты за потребление всех видов ТЭР;
- сведения о структуре и составе предприятия, объемах производства продукции по основным технологическим процессам, годовом потреблении всех видов энергоносителей для заполнения форм Б, В энергетического паспорта;
- сведения о потреблении электроэнергии с использованием данных отраслевой статистической отчетности (форма № 24) «Перечень основного энергетического оборудования», содержащих информацию о трансформаторных подстанциях, установленной мощности электроприемниках (электрогенераторах) с краткой характеристикой оборудования в режимах потребления (генерации) электроэнергии, а также годовой баланс потребления электроэнергии для заполнения форм Г, Д, К энергетического паспорта;
- сведения о потреблении (производстве) тепловой энергии с использованием данных отраслевой статистической отчетности (форма № 23) «Отчет о наличии промышленных котлов, установленных на объектах», содержащие информацию о составе и режимах работы котельных агрегатов, сведения о технологическом оборудовании, использующем тепловую энергию, расчетно-нормативном потреблении теплоэнергии, а также годовой баланс потребления тепловой энергии для заполнения форм Л, М, Н, П энергетического паспорта;
- информацию о топливоиспользующих агрегатах с использованием данных отраслевой статистической отчетности (формы № 3, 8, 36) для заполнения формы Р энергетического паспорта;
- сведения о потреблении природного газа и моторных топлив на собственные нужды основного и вспомогательных производств, технологических потерь по основным технологическим процессам, о потреблении моторных топлив транспортными средствами с использованием данных отраслевой статистической отчетности (форма № 20) «Работа и использование автомобильного транспорта», а также годовой баланс потребления природного газа на собственные нужды и годовой баланс потребления моторных топлив для заполнения форм С, Т, У энергетического паспорта;
- данные об использовании вторичных энергоресурсов, альтернативных топлив и возобновляемых источников энергии для заполнения формы Ф энергетического паспорта;
- сведения о показателях энергоэффективности по основным технологическим процессам, содержащие информацию об удельных расходах каждого вида ТЭР на производимую продукцию для заполнения формы Х энергетического паспорта;
- перспективные планы, программы энергосбережения, технико-экономические обоснования и проектную документацию по технологическому или организационному совершенствованию и энергосберегающим мероприятиям для заполнения формы Ц энергетического паспорта.

«*Энергоаудитор*» изучает представленную информацию.

«*Ростехнадзор*» осуществляет контроль полноты представленной информации.

3. **Этап метрологического и термографического обследования**.

Метрологическое (или инструментальное) и термографическое обследование всех потребителей тепловой и электрической энергии проводится для дополнения статистической, документальной и технической информации, недостающей для оценки эффективности энергоиспользования, или при возникновении сомнения в достоверности при обзоре информации. На этапе метрологического обследования:

- определяются объем и регламент необходимого метрологического обследования;

- разрабатывается и согласовывается схема измерений, устанавливаются необходимые режимы работы оборудования, если это не нарушает условия безопасной эксплуатации;
- разрабатывается методика обработки результатов метрологического обследования с учетом определения погрешностей;
- производится обработка результатов измерений;
- результаты измерений оформляются в виде, необходимом для дальнейшей обработки.

«*Предприятие*»:

- обеспечивает допуск персонала «Энергоаудитора» на объекты обследования и утверждает схему измерений при обследовании энергетического оборудования;
- обеспечивает условия проведения метрологического обследования и устанавливает соответствующие режимы работы оборудования, если это не противоречит правилам безопасной эксплуатации.

«*Энергоаудитор*» определяет объекты метрологического обследования потребителей ТЭР, разрабатывает схему измерений, проводит энергетическое обследование, составляет протоколы проведения обследования и осуществляет обработку результатов измерений.

«*Ростехнадзор*» осуществляет контроль соответствия приборов требованиям стандартов, согласовывает методику обработки результатов метрологического обследования.

4. **Аналитический обзор и оценка энергоэффективности по всем видам энергетической деятельности предприятия**.

После метрологического и термографического обследования проводится обработка полученной или собранной информации, а также аналитический обзор по всем видам энергетической деятельности предприятия. Также проводится оценка энергоэффективности теплотехнического, теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, теплогенерирующих установок, систем отопления и вентиляции, горячего водоснабжения, пароснабжения, сбора и возврата конденсата, холодоснабжения, электроснабжения, использования вторичных энергоресурсов (см. п. 9.6, 9.7, 9.8). Кроме того, проводится разработка основных рекомендаций и мероприятий по энергосбережению, учету топлива, воды, электрической и тепловой энергии.

Весь этот этап включает:

- расчет фактических показателей эффективности потребления топлива и всех видов энергоносителей;
- сравнение фактических и нормативных показателей энергоэффективности в сопоставимых условиях;
- выявление причин несоответствия фактических показателей нормативным значениям и определение потенциала энергосбережения по каждому показателю отдельно;
- обобщение результатов анализа использования ТЭР по группам оборудования, технологическим процессам, видам топлива и энергоносителей;
- исследование и составление теплового и эксергетического баланса предприятия;
- разработку организационно-технических мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР и определения работ, необходимых для реализации энергосберегающих мероприятий;
- анализ разработанных мероприятий по выполнению нормативных документов, действующих в части надежности, безопасности, охраны труда, охраны окружающей среды, качества топлива и энергии;
- расчет экономии топлива и всех видов энергоносителей;
- количественную оценку других факторов, влияющих на экономическую эффективность мероприятия (уровень надежности, численность эксплуатационного персонала и т.д.);
- определение затрат и возможных сроков по реализации мероприятий;
- расчет экономической эффективности от реализации мероприятий по энергосбережению и сроки окупаемости инвестиций.

«*Предприятие*» представляет необходимую информацию по нормативам расходования топливно-энергетических ресурсов по технологическим процессам и энергооборудованию, согласует перечень мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР.

«*Энергоаудитор*»:

- выполняет расчет фактических показателей энергоэффективности, выявляет причины их несоответствия и разрабатывает мероприятия, направленные на повышение эффективности использования ТЭР по каждому показателю;
- согласовывает методику определения потенциала энергосбережения с «Ростехнадзором»;
- проводит анализ собранной информации и результатов обработки метрологического и термографического обследования;
- проводит сравнение фактических и нормативных значений показателей эффективности использования ТЭР;
- выявляет причины несоответствия фактических и нормативных значений показателей эффективности энергоиспользования;
- проводит обобщение результатов анализа использования ТЭР по группам оборудования, технологическим процессам, видам топлива и энергоносителей;
- составляет топливно-энергетический баланс и энергетический паспорт (или вносит корректировки в существующий энергетический паспорт);
- разрабатывает организационно-технические мероприятия по повышению эффективности использования ТЭР, определяет перечень работ, необходимых для реализации конкретных энергосберегающих мероприятий;
- проводит анализ разработанных мероприятий по выполнению нормативных документов по надежности, безопасности, охране труда и окружающей среды, качеству топлива и энергии;
- осуществляет оценку экономии топлива и всех видов ТЭР, достигаемую при реализации предложенных мероприятий, проводит количественную оценку других факторов, влияющих на экономическую эффективность мероприятий;
- проводит оценку стоимости предложенных энергосберегающих мероприятий, их ранжирование по эффективности.

«*Ростехнадзор*» осуществляет контроль за соответствием используемых отраслевых методик расчета и значений нормативных характеристик энергоиспользования, согласовывает результаты определения потенциала энергосбережения.

5. **Этап согласований**.

Этап согласований в основном включает:

- согласование формы и содержания топливно-энергетического баланса и энергетического паспорта;
- анализ предложенных мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР и ранжирование их (мало-, средне- и высокозатратные) с указанием расчетного энергетического и экономического эффекта;
- согласование отчетной документации;
- оформление отчетной документации и ее сдача в установленном договором порядке.

«*Предприятие*» утверждает отчетную документацию в соответствии с условиями договора, согласует перечень мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР.

«*Энергоаудитор*» представляет отчетную документацию и материалы энергетического обследования в соответствии с условиями договора.

«*Ростехнадзор*»:

- согласовывает энергетический паспорт;
- согласовывает перечень мероприятий по энергосбережению;
- выдает предписание на устранение выявленных нарушений в использовании ТЭР.

10.5. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ

ОБСЛЕДОВАНИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА

1. По результатам проведенных энергетических обследований «Энергоаудитор» оформляет и представляет следующие документы:

- акт (отчет) о проведенном энергетическом обследовании;
- рекомендации и мероприятия по повышению эффективности использования ТЭР и снижению затрат на топливо- и энергообеспечение;
- предписание об устранении нарушений в использовании ТЭР.

2. По результатам энергетических обследований и энергетического аудита «Энергоаудитор» представляет следующие документы:

- акт (отчет) о проведенном энергетическом аудите;
- эксергетический, тепловой и топливно-энергетический баланс;
- экономически обоснованную программу по повышению эффективности использования ТЭР и снижению затрат на топливо- и энергообеспечение;
- энергетический паспорт (и изменения в существующий паспорт).

3. Перечень оформляемой документации может уточняться или изменяться в зависимости от характера проводимых обследований.

4. При разработке «Энергоаудитором» рекомендаций и мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР должны быть раскрыты причины выявленных нарушений, вскрыты имеющиеся резервы экономии, предложены технические и организационные энегосберегающие мероприятия с определением затрат на их реализацию и расчетом прогнозируемой экономии ТЭР в физическом и денежном выражении. Рекомендации «Энергоаудитора» не должны ухудшать экологические характеристики и производительность работающего оборудования, параметры технологических процессов, снижать уровень безопасности и комфортности производственных условий персонала, качество и безопасность продукции.

5. Акты и отчеты о проведенных энергетических обследованиях и предписания об устранении нарушений в использовании ТЭР подписываются руководителем организации «Энергоаудитор». После подписания актов и отчетов внесение исправлений, изменений и дополнений в них запрещается. «Энергоаудитор» в недельный срок после завершения работ передает полный отчет о проведенном энергетическом аудите.

6. «Энергоаудитор» несет ответственность за качество проведенных и выполненных им энергетических обследований, а также выданных рекомендаций в порядке, определенном двухсторонним договором и в соответствии с действующим законодательством РФ.

7. При наличии разногласий по содержанию и существу актов и предписаний окончательное решение принимает руководитель организации «Энергоаудитор». «Предприятие» в этом случае вправе изложить свое особое мнение, которое оформляется в виде приложения к акту. В случае отказа представителя «Предприятия» от подписи в акте энергетического обследования делается соответствующая запись.

10.6. АККРЕДИТАЦИЯ ЭНЕРГОАУДИТОРОВ

1. Порядок аккредитации «Энергоаудитора» претендующего на право проведения энергетических обследований и энергетического аудита, определяется правилами «Предприятия» по согласованию с «Ростехнадзором». Документом, свидетельствующим об аккредитации «Энергоаудитора», является Свидетельство на бланке, утвержденным «Предприятием». Передача или использование Свидетельства об аккредитации другими энергоаудиторами запрещается. Свидетельство об аккредитации выдается на определенный срок (например, на три года).

2. Для получения Свидетельства об аккредитации «Энергоаудитора» заявитель представляет на «Предприятие» и «Ростехнадзор» следующие документы: заявление о выдаче Свидетельства об аккредитации на право проведения энергоаудиторской деятельности; сведения о заявителе по форме «Предприятия»; копию учредительных документов и свидетельства о государственной регистрации юридического лица; свидетельство о постановке на учет в налоговом органе; копию Свидетельства об аккредитации «Энергоаудитора» в случае продления или изменения специализации

аккредитации; согласование с «Предприятием» по направлениям заявляемого вида деятельности; заключение организации, уполномоченной осуществлять экспертизу документов, представленных заявителем, при прохождении процедуры аккредитации «Энергоаудитора». «Предприятие» и «Ростехнадзор» имеют право при необходимости запрашивать у заявителя другие документы.

3. Решение об отказе или выдаче Свидетельства об аккредитации принимается в течение месяца со дня подачи заявителем документов. Мотивированное уведомление об отказе в выдаче Свидетельства об аккредитации представляется заявителю в недельный срок после принятия указанного решения. Основанием для отказа в выдаче Свидетельства об аккредитации является: наличие в заявляемых документах искаженной или недостоверной информации; отрицательное заключение экспертизы, устанавливающее несоответствие представленной информации условиям осуществления заявляемой деятельности.

4. При реорганизации «Энергоаудитора», изменении его названия или утраты Свидетельства «Энергоаудитор» обязан уведомить об этом «Предприятие» и подать заявление о переоформлении свидетельства.

5. «Энергоаудитор» может лишиться Свидетельства об аккредитации в следующих случаях:

- нарушения условий действия Свидетельства об аккредитации или действующих нормативно-правовых документов о порядке проведения энергетических обследований и энергетического аудита;
- подтверждения экспертным заключением низкого качества энергетического обследования или энергетического аудита;
- лишения права на проведение энергоаудиторской деятельности федеральной службой Ростехнадзора.

В случае принятия решения о лишении Свидетельства об аккредитации «Энергоаудитора» администрация «Предприятия» или «Ростехнадзора» в определенный срок (например, недельный) письменно уведомляет «Энергоаудитора» и другие заинтересованные организации. Расходы, связанные с экспертизой документов, оплачиваются «Энергоаудитором» по соответствующему договору с «Предприятием».

10.7. ПРИМЕРЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1. Распределение затрат на энергоносители в рублях приведено в табл. 10.1.

10.1. Распределение затрат на энергоносители в 2005 г.

Энергоносители	Газ	Электроэнергия	Тепловая энергия	Ст	Вода
Затраты, р.	95 678 000	7 675 000	737 000	42	12 590

2. График суммарного выпуска продукции по месяцам приведен на рис. 10.1.

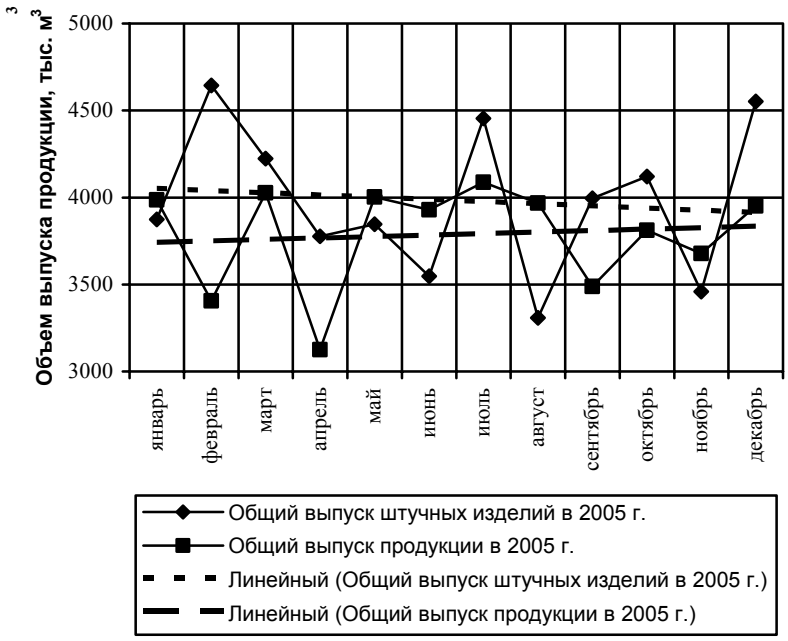


Рис. 10.1. График суммарного выпуска продукции по месяцам

3. График распределения энергоносителей приведен на рис. 10.2.

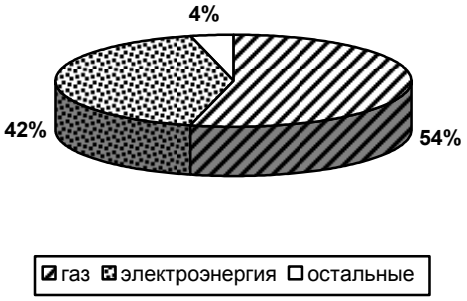


Рис. 10.2. График распределения энергоносителей в 2005 г.

4. График потребления электроэнергии в 2005 г. по месяцам предприятия приведен на рис. 10.3.

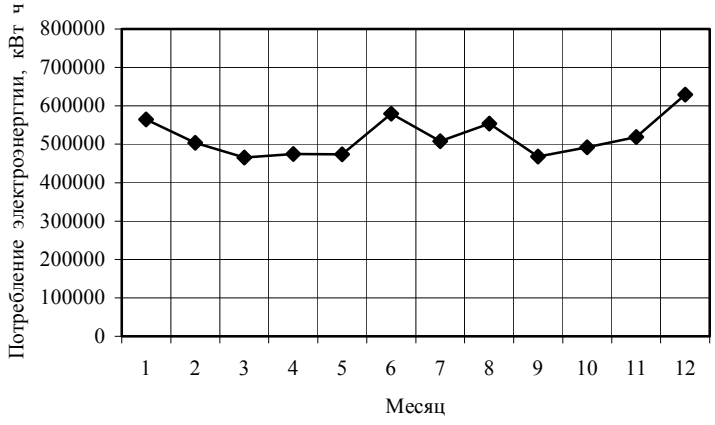
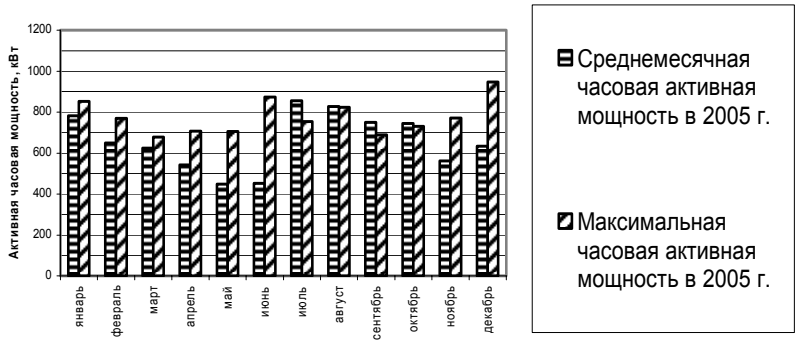


Рис. 10.3. График потребления электроэнергии

5. График потребления электроэнергии по месяцам предприятия приведен на рис. 10.4.



Р

ис. 10.4. График потребления электроэнергии по месяцам

6. График суточного потребления электроэнергии по часам предприятия приведен на рис. 10.5.

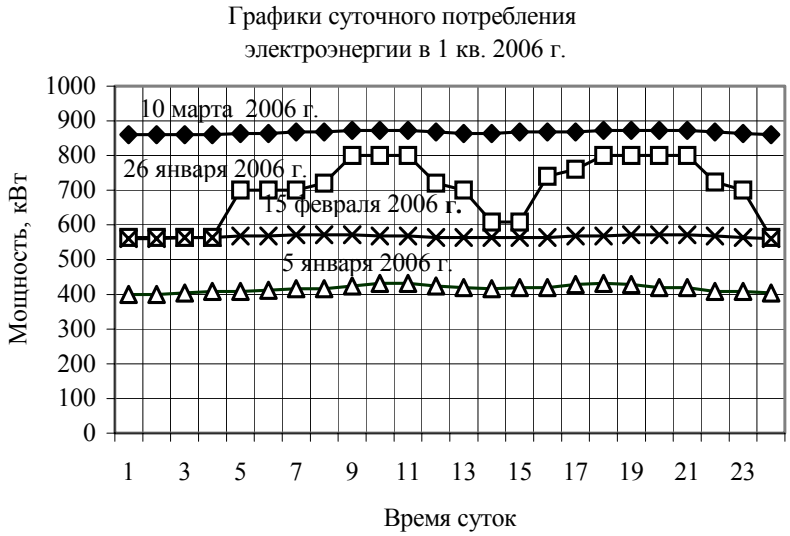


Рис. 10.5. График суточного потребления электроэнергии по часам

7. График распределения мощности электрооборудования предприятия приведен на рис. 10.6.

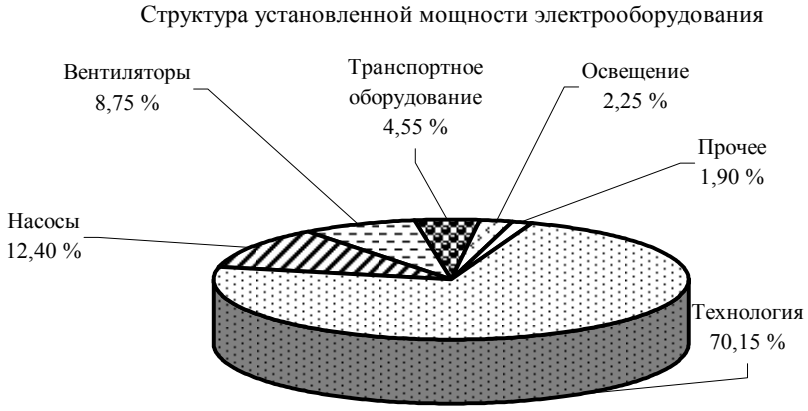


Рис. 10.6. График распределения мощности электрооборудования

8. График распределения мощности электрооборудования предприятия приведен на рис. 10.7.

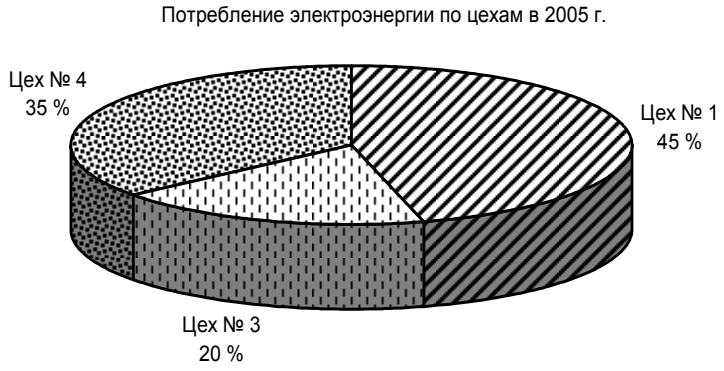


Рис. 10.7. График распределения электроэнергии по цехам

9. Схема подключения трехфазного анализатора параметров электропотребления AR.4M (микропроцессорного анализатора параметров одно- и трехфазных электрических сетей, для измерения, регистрации и анализа тока, напряжения, частоты, активной мощности, реактивной энергии, cos φ, гармоник тока и напряжения) приведена на рис. 10.8.

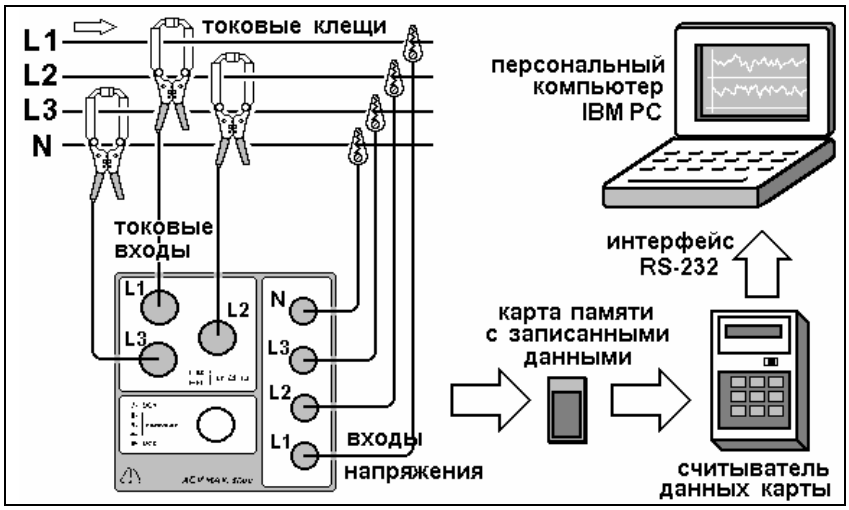


Рис. 10.8. Схема подключения трехфазного анализатора параметров электропотребления AR.4M

10. Схема измерения расхода теплоносителя и установки датчика приведена на рис. 10.9.

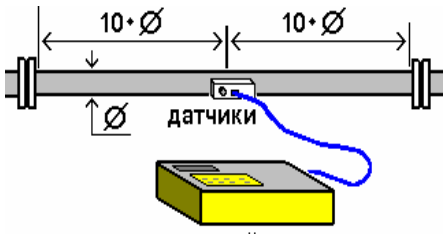


Рис. 10.9. Схема установки датчика для измерения расхода теплоносителя

11. Формы сигналов фазных напряжений и токов приведены на рис. 10.10.

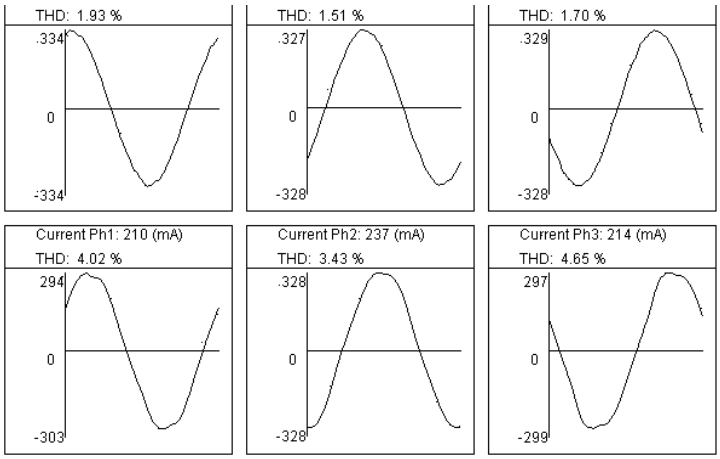


Рис. 10.10. Формы сигналов фазных напряжений и токов

12. Спектральный состав сигналов фазных напряжений приведен на рис. 10.11.

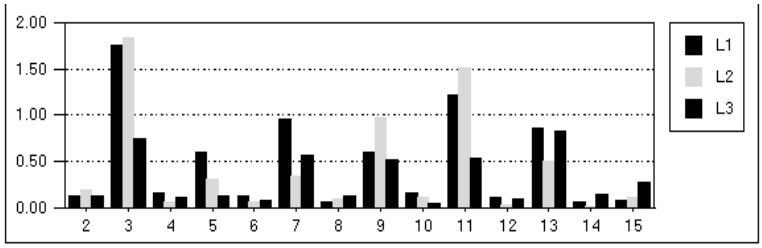


Рис. 10.11. Спектральный состав сигналов фазных напряжений

10.8. ПРИМЕР МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО И ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Структурную схему для метрологического и термографического обследования теплофизических параметров жидкостей, газов, веществ, материалов и изделий можно представить в виде последовательного соединения нескольких элементов – звеньев (рис. 10.12).

Универсальный восьмиканальный измеритель-регулятор ТРМ 138 предназначен для измерения, регистрации и регулирования температуры, а также регистрации измеренных параметров на ЭВМ. ТРМ 138 имеет восемь входов, к которым могут быть подключены датчики разного типа и любой конфигурации, что позволяет одновременно измерять и контролировать несколько различных величин. Для измерения температуры по входам подключены датчики температур – термопары ТХК или термопреобразователи сопротивления. Универсальный измеритель ТРМ 138 с термопарами ТХК(L) имеет диапазон измерений –50…+750 °С, разрешающую способность 0,1 °С, предел основной приведенной погрешности 0,25 %.

Блок обработки данных предназначен для обработки входных сигналов, цифровой фильтрации, коррекции, масштабирования, вычисления дополнительных математических параметров, индикации измерительных параметров и формирования управляющих сигналов. Вычисленное или изме-

ренное значение температуры подается на входы логических устройств (ЛУ) для дальнейшей обработки и выдачи управляющих сигналов. ЛУ регистрируют и выдают аналоговый сигнал в диапазоне 4…20 мА, пропорциональный значению измеряемого параметра. Блок обработки данных ТРМ 138 включает в себя восемь ЛУ. К каждому ЛУ может быть подключено одно из восьми выходных устройств, порядковый номер которого задается при программировании.

В приборе ТРМ 138 могут быть установлены в любой комбинации следующие выходные устройства: ЦАП «параметр ток 4…20 мА»; транзисторные оптопары 200 мА 40 В; семисторные оптопары 50 мА 300 В.

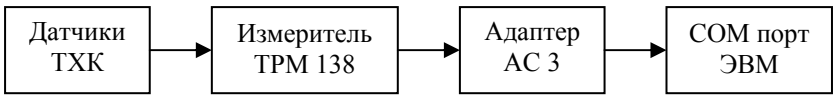


Рис. 10.12. Структурная схема метрологических средств для измерения теплофизических параметров

Интерфейс связи с ЭВМ предназначен для передачи данных и информации от прибора ТРМ 138 на компьютер, а также приема данных от компьютера к другим приборам, оснащенным таким же интерфейсом связи. В нашем случае прибор имеет встроенный двунаправленный интерфейс RS–485. Через этот интерфейс прибор может передавать текущее значение измеренных температур и состояния входных устройств. Адаптер интерфейса АС 3 предназначен для взаимного преобразования сигналов интерфейса RS–485 и подключения до 32 многоканальных приборов ТРМ 138, ТРМ 101, СИ 8, ПКП 1.

Супервизорный контроль и сбор данных для определения теплофизических свойств веществ, материалов и изделий (температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности) производится системой SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition). SCADA – система OWEN PROCESS MANAGER (OPM) – программное обеспечение, предназначенное для осуществления связи ПК (ЭВМ) с приборами ОВЕН, подключенными с помощью преобразователя интерфейса RS–485 АС 3 [48]. Система OPM используется для создания схемы технологических процессов на мониторе ПК и сохранения этой схемы на диске для последующего использования. Процесс сбора данных предусматривает опрос всех приборов с периодичностью, отдельно задаваемой для каждого прибора, отображение результатов этого опроса, а также сохранение указанных пользователем значений в файлы протокола.

OPM предоставляет следующие возможности:

- регистрация на ПК через заданные промежутки времени данных с выбранных пользователем каналов приборов;
- отображение текущих показаний приборов в цифровом или графическом виде на экране ПК;
- возможность просмотра архива измерений за любой промежуток времени в табличном и графическом виде с помощью подсистемы OWEN REPORT VIEWER (ORV).

Организация интерфейса связи приборов с ПК проходит в следующей последовательности. При запуске OPM тестирует рабочий компьютер и автоматически определяет свободные COM-порты, к которым через адаптер интерфейса могут быть подключены приборы ОВЕН. Информация о COM-портах выводится на экран ПК в главном окне программы. Выбор адаптера интерфейса зависит от типа интерфейса подключаемых приборов. К одному COM-порту возможно подключить только один адаптер интерфейса. При необходимости увеличить количество отображаемых каналов на ПК следует установить дополнительные COM-порты.



Рис. 10.13. Термографическое исследование на ЭВМ теплофизических свойств строительных материалов

Для подключения приборов с интерфейсом RS–485 используется преобразователь RS–485 АС 3, к которому можно подсоединять до 32 приборов, с использованием усилителя – максимальное количество каналов отображения для одного порта составляет 256.

Система ОРМ позволяет архивировать данные каналов подключенных приборов. Просмотр файла архива осуществляется с помощью программы OWEN Report Viewer (ORV), которая позволяет открывать и просматривать файлы архива в табличном или графическом виде, а также конфигурировать архивные данные для исследуемого процесса.

На рис. 10.13 показаны образцы материалов, выполненные в виде призмы квадратного сечения, куба, шара, стержня, а также просмотр файла на ЭВМ при определении ТФХ материалов в графическом виде.

Пользователь может самостоятельно определять, какие из происшедших событий, зафиксированных в архивном файле, следует включать в отображаемые таблицы и графики. Можно также ограничивать временные рамки отображаемых событий с тем, чтобы более подробно рассматривать отдельные эпизоды технологического процесса. Для последующей работы и обработки данных из архива желательно их сохранение в форматах Access, FoxPro, Dbase или Excel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные выше материалы, посвященные проблемам энергосбережения, энергоаудита и энергетическим обследованиям, могут создать противоречивое впечатление. С одной стороны, разработаны различная техника и технологии для освоения и использования топливноэнергетических ресурсов, а с другой стороны, современный уровень использования тепловой, электрической энергии и альтернативных источников явно не соответствует реальным возможностям ее производства и потребностям. Причины такого расхождения различны, но основная причина – финансовая, ввиду того, что любые энергосберегающие мероприятия, энергоаудит, энергетические обследования требуют немалых затрат.

До недавнего времени цена углеводородистых топлив была столь невысока, что вкладывать значительные средства в энергосберегающие мероприятия было неоправданным. К тому же не столь остро стояла проблема обеспечения экологической чистоты окружающей среды. Сейчас стоимость энергии, получаемой за счет угля, мазута, природного газа возросла в сотни раз, и поэтому безоговорочно, в любой ситуации, отдавать предпочтение традиционным энергоресурсам и методам сжигания топлива уже нельзя. Необходимо, прежде всего, перестроиться психологически и перестать смотреть на энергосбережение, энергоэффективные мероприятия, приме-

нение альтернативных и возобновляемых источников энергии как на нечто экзотическое, практически мало полезное. Альтернативы теплоэнергосбережению – нет.

В настоящее время альтернативные источники энергии и вторичные энергоресурсы становятся полноценными соперниками углеводородных топлив. Конечно, в каждом конкретном случае необходимы всестороннее сопоставление стоимости энергии, себестоимости получаемой тепловой и электрической энергии, оценка надежности энергоснабжения в различных вариантах. При этом следует учитывать расход средств не только на топливо и энергетическое оборудование, но и на создание и эксплуатацию очистных сооружений, предназначенных для обеззараживания твердых, жидких и газообразных отходов производства. Несомненно, что с ужесточением экологических требований и совершенствованием техники для сбора, преобразования и резервирования энергии роль мероприятий по энергосбережению, использованию альтернативных источников энергии, водородной энергетики и вторичных энергоресурсов будет неуклонно возрастать.

История и настоящее время полностью подтверждают, что энергосбережение и энергоаудит – это сложная система знаний, включающих:

- различные термодинамические и теплотехнические законы: первый и второй законы термодинамики, законы теплопроводности, конвективного и лучистого теплообмена, фазовых переходов, кипения и конденсации, сложного тепло- и массообмена;
- законы гидравлики, электротехники и электроники;
- тепловые, эксергетические, материальные балансы;
- способы, методы и оборудование для сжигания топлива;
- расчеты теплообменных аппаратов, теплогенерирующих установок и теплотехнологических систем;
- применение альтернативных источников энергии;
- нормативно-методическое обеспечение;
- законодательное регулирование.

Афоризмы науки, рекомендуемые при проведении энергетических обследований, анергоаудите и разработке мероприятий по энергосбережению:

- наука достигает полной зрелости тогда, когда она начинает говорить языком математики;
- явление богаче закона, его описывающего;
- лучше время, когда есть идея для обработки;
- открытие часто делается тогда, когда все знают, что этого не может быть, а кто-то один этого не знает: он-то и делает это открытие;
- неплохо помогать тому, у кого лоб мокрый;
- любой порядок лучше самого хорошего беспорядка;
- если твое мнение не расходится с мнением твоих подчиненных – давай им возможно большую свободу действий;
- всегда благодари персонал за хорошую работу;
- не говори тотчас, если раздражен;
- ничто так не возвышает, как хорошее поведение в споре;
- брань, какой бы она ни была, никогда не являлась веским доказательством;
- наука не бокс – плохого человека просто обойди;
- если вы держите «слона» за ногу, а он вырывается, самое лучшее – это отпустить его;
- самый красивый корабль – это тот, который проходит мимо;
- в спокойное время промедление весьма уместно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

МОНОГРАФИИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ

1. **Борщов Д.Я.** Устройство и эксплуатация отопительных котельных малой мощности. М.: Стройиздат, 1982. 360 с.

2. **Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Березиньш Э.Я.** Производственные и отопительные котельные. М.: Энергоатомиздат, 1984. 268 с.

3. **Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А.** Теплогенерирующие установки. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.

4. **Зыков А.К.** Паровые и водогрейные котлы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.

5. **Котлы утилизаторы и энерготехнологические агрегаты** / Под ред. Л.Н. Сидельковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.

6. **Лебедев В.И., Пермяков Б.А., Хаванов П.А.** Расчет и проектирование теплогенерирующих установок систем теплоснабжения. М.: Стройиздат, 1992. 358 с.

7. **Матросов Ю.А., Бутовский И.Н., Гольштейн Д.** Энергетический паспорт здания // АВОК. 1997. № 3.

8. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 1982.

9. **Ушаков В.Г.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Новочеркасск: НГТУ, 1994. 120 с.

10. **Фокин В.М**. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения. М.: Машиностроение-1, 2006. 241 с.

11. **Фокин В.М.** Теплогенераторы котельных. М.: Машиностроение-1, 2005. 160 с.

12. **Фокин В.М.** Энергосбережение в производственных и отопительных котельных. М.: Машиностроение-1, 2004. 180 с.

13. **Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В.** Основы энергосбережения в вопросах теплообмена. М.: Машиностроение-1, 2005. 192 с.

14. **Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В.** Основы технической теплофизики. М.: Машиностроение-1, 2004. 172 с.

НОРМАТИВНЫЕ И ИНСТРУКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

15. **Аракелов В.Е., Минеев Р.В.** Методика проведения ускоренного энергетического обследования промышленного оборудования / ВНИПИэнергопром. М., 1989. 232 с.

16. **Аэродинамический** расчет котельных установок: Нормативный метод. Л.: Энергия, 1977. 256 с.

17. **Гидравлический** расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. М.: Энергия, 1978. 255 с.

18. **Госгортехнадзор** СССР: Сборник правил и руководящих материалов по котлонадзору. М.: Недра, 1977. 480 с.

19. **Инструкция** по эксплуатации тепловых сетей. М.: Энергия, 1972.

20. **Методические указания** по обследованию теплопотребляющих установок закрытых систем теплоснабжения и разработка мероприятий по энергосбережению: Отраслевой руководящий документ РФ 34.09.455–95 / РАО «ЕЭС России». М., 1996.

21. **МИХАЙЛОВ В.В.** МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИСХОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НОВЫХ И РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЭНЕРГО СССР / ВНИПИЭНЕРГОПРОМ. М., 1986.

22. **Основные методические положения** по планированию использования вторичных энергоресурсов. М.: Энергоатомиздат, 1987.

23. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. ПБ 10-574-03. М.: Госгортехнадзор, 2003. 216 с.

24. **Правила** учета тепловой энергии и теплоносителя / Главгосэнергонадзор. М., 1995.

25. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973. 295 с.

СПРАВОЧНИКИ

26. **Копытов Ю.В., Чуланов Б.А.** Экономия электроэнергии в промышленности: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982.

27. **Либерман Н.Б., Нянковская М.Т.** Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения. М.: Энергия, 1979. 224 с.

28. **Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Э.Б.** и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник. М.: Стройиздат, 1998. 432 с.

29. **Промышленная теплоэнергетика** и теплотехника: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991. 588 с.

30. **Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н.** Справочник по котельным установкам малой производительности. М.: Энергоиздат, 1989. 487 с.

31. **Справочник проектировщика**. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 1. Отопление / Под ред. Н.Г. Староверова. М.: Стройиздат, 1990. 344 с.

32. **Справочник проектировщика**. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Под ред. Н.Г. Староверова. М.: Стройиздат, 1978. 509 с.

33. **Теплотехнический** справочник / Под общ. ред. В.Н. Юрьева и П.Д. Лебедева. М.: Энергия, 1975. Т. 1. 744 с.

34. **Тепловые** и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 624 с.

35. **Тепломассообмен и теплотехнический эксперимент**: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.

36. **Теплотехнический** справочник / Под общ. ред. В.Н. Юрьева и П.Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. Т. 2. 896 с.

37. **Теплоэнергетика** и теплотехника: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергия, 1980. 528 с.

СНиПы, КАТАЛОГИ, ГОСТы

38. **СНиП 23-01–99.** Строительная климатология. М., 1999.

39. **СНиП II-35–76.** Котельные установки. М., 1977.

40. **СНиП 2.04.07–86*.** Тепловые сети. М., 1994.

41. **СНиП 12-04.05-91*.** Отопление, вентиляция и кондиционирование. М., 1997.

42. **СНиП 2-04.01–85.** Внутренний водопровод. М., 1986.

43. **СНиП 2.04.08–87*.** Газоснабжение. М., 1995.

44. **СНиП 2.05.06–85.** Магистральные трубопроводы. М., 1985.

45. **СНиП 3.05.01–85.** Внутренние санитарно-технические системы. М., 2000.

46. **КАТАЛОГ** КОТЕЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ БИЙСКЭНЕРГОМАШ-ЮГ. М., 2003. 49 С.

47. **КАТАЛОГ** ОАО «БЕЛЭНЕРГОМАШ». ПАРОВЫЕ И ВОДОГРЕЙНЫЕ КОТЛЫ ДЛЯ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. БЕЛГОРОД, 2001. 51 С.

48. **Каталог** продукции ОВЕН. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации. М., 2003. 153 с.

49. **ГОСТ 21.205–93**. СПДС. Условные обозначения элементов санитарно-технических систем.

50. **ГОСТ 21. 206–93.** СПДС. Условные обозначения трубопроводов.

51. **ГОСТ 37322–87.** Энергобаланс промышленного предприятия. Общие положения.

52. **ГОСТ 26691–85**. Теплоэнергетика. Термины и определения.

53. **ГОСТ 19431–84.** Энергетика и электрификация. Термины и определения.

54. **ГОСТ 30583–98.** Энергосбережение. Методика определения полной энергоемкости продукции, работ, услуг.

55. **ГОСТ Р 51541–99.** Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения.

56. **ГОСТ Р 51387–99.** Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение.

57. **ГОСТ Р 51379–99.** Энергосбережение. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов. Основные положения. Типовые формы.

58. **ГОСТ Р 51380–99.** Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции нормативным значениям. Общие требования.

59. **ГОСТ Р 51388–99.** Энергосбережение. Информирование потребителей об энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения. Общие требования.

60. **ГОСТ 2.114–95.** Единая система конструкторской документации. Технические условия.

61. **ГОСТ 2.601–95.** Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы.

62. **ГОСТ 28310–89.** Коллекторы солнечные. Общие технические условия.

63. **ГОСТ Р 51164–98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.

64. **ГОСТ 30494–96.** Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.

65. **ГОСТ 24940–96.** Здания и сооружения. Методы измерения освещенности.

66. **ГОСТ 26629–85.** Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.

67. **ГОСТ 26254–84.** Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

68. **ГОСТ 26253–84.** Здания и сооружения. Метод определения теплоустойчивости ограждающих конструкций.

69. **ГОСТ 23274–84.** Здания мобильные. Электроустановки.

70. **ГОСТ 26824–86.** Здания и сооружения. Методы измерения яркости.

71. **ГОСТ 25380–82.** Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ …….. 3
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ……...……. 4
ВВЕДЕНИЕ ……... 5
1. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ……..……. 6
1.1. Основные термины и понятия энергосбережения…..... 6
1.2. Нормативно-методическое обеспечение энергосбережения ……. 12
1.3. Энергетический паспорт промышленного потребителя-топливно-энергетических ресурсов ……...…… 18
1.4. Основные направления энергосбережения …… 24
2. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ВОПРОСАХ ТЕПЛООБМЕНА ……...… 28

2.1. Основные положения теплообмена …… 28
2.2. Основные положения и законы теплопроводности …….. 29
2.3. Условия однозначности процессов теплообмена……... 32
2.4. Дифференциальные уравнения теплопроводности …….. 33
2.5. Основные положения конвективного теплообмена …….. 36
2.6. Теоремы и критерии теплового подобия ……..... 41
2.7. Расчет теплоотдачи по критериям подобия ……..…..... 45
2.8. Основные положения и законы лучистого теплообмена 52
2.9. Теплообмен при конденсации пара ……. 58
2.10. Теплообмен при кипении жидкости ……..….. 60
2.11. Процессы теплопередачи через плоские и цилиндрические системы ……..…. 62
2.12. Интенсификация процессов теплопередачи ……. 66
2.13. Тепловая изоляция …….. 68
2.14. Общий или сложный теплообмен ……..... 72
2.15. Теплообменные аппараты …….. 74
3. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ …….. 80
3.1. Общие понятия топлива и горения …..…….……. 80
3.2. Состав органического топлива ……..…….. 81
3.3. Теплота сгорания топлива …… 83
3.4. Способы сжигания органического топлива ……... 83
3.5. Расчет горения органического топлива …….. 85
3.6. Коэффициент избытка воздуха …… 86
3.7. Тепловой баланс теплогенератора …….. 87
3.8. Коэффициент полезного действия и расход топлива теплогенератора ……... 88
3.9. Тепловые потери теплогенерирующей установки …… 89
3.10. Мероприятия по энергосбережению в теплогенерирующих установках ……... 90
3.11. Эксплуатационные испытания котлов …….. 91
4. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В КОТЕЛЬНЫХ И СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ …….……..…... 95
4.1. Классификация тепловых схем котельных ……..….. 95
4.2. Классификация систем теплоснабжения …… 101
4.3. Энергосбережение в производственно-отопительных котельных с паровыми котельными агрегатами ……... 103
4.4. Энергосбережение в отопительных котельных с водогрейными котельными агрегатами ……. 110
4.5. Энергосбережение в котельных с паровыми и водогрейными котельными агрегатами ……. 114
4.6. Мероприятия по энергосбережению в котельных ……. 118
5. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ ……..…… 120
5.1. Особенности теплотехнологических процессов, комплексов и систем …… 120
5.2. Классификация теплотехнологических установок, схем и источников энергии …….……. 123
5.3. Технологические котлы-утилизаторы ……...……. 126

5.4. Энергетическая эффективность теплотехнологических установок …….. 127
5.5. Прогрессивные источники энергии теплотехнологических установок ……... 132
5.6. Энергетическая эффективность топок теплотехнологических установок ……... 133
5.7. Энергетическая эффективность ограждающих конструкций теплотехнологических установок …… 135
5.8. Графоаналитический и номографический методы определения плотности теплового потока ограждающих конструкций …….. 139
5.9. Тепловой баланс теплотехнологических установок …….. 142
6. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ ……...…… 151
6.1. Энергетическая эффективность зданий и сооружений ….. 151
6.2. Классификация систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха …… 152
6.3. Мероприятия по энергосбережению в зданиях и сооружениях …….. 155
6.4. Мероприятия по энергосбережению в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха ... 159
6.5. Энергосбережение тепловыми трубками ……... 164
7. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ …….. 166
7.1. Мероприятия по энергосбережению за счет использования вторичных энергоресурсов ……... 166
7.2. Гелиоустановки с тепловым насосом для систем отопления и горячего водоснабжения ……... 168
7.3. Теплонасосные установки …… 172
7.4. Производство тепловой энергии из биомассы ……..... 176
7.5. Ветроэнергетические установки …….. 181
7.6. Фотоэлектрические установки …… 184
7.7. Термоэлектрические установки ……... 185
8. ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ……..…. 186
8.1. Основные организационные и технические мероприятия энергосбережения …… 186
8.2. Основные мероприятия энергосбережения в системах электроснабжения предприятия ……. 187
8.3. Основы экономии электроэнергии при проектировании и эксплуатации электроустановок ……. 188
9. ОСНОВЫ ЭНЕРГОАУДИТА ……... 190
9.1. Содержание и основные положения энергоаудита ……... 190
9.2. Цели и этапы энергоаудита …….. 192
9.3. Обзор статистической, документальной и технической информации …….. 193
9.4. Метрологическое и термографическое обследование потребителей …… 194
9.5. Погрешности метрологического и термографического 198

обследования ……

9.6. Исследование теплового и эксергетического баланса ….. 201

9.7. Аналитический обзор энергетической деятельности предприятий …… 202

9.8. Оценка энергоэффективности оборудования предприятий …… 204

9.9. Разработка основных рекомендаций и мероприятий по энергосбережению …….. 207

9.10. Оформление отчета и составление энергетического паспорта ……... 209

10. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ …... 210

10.1. Структура энергетического отдела предприятия …… 210

10.2. Цели и задачи энергетического обследования ……. 210

10.3. Организация энергетического обследования ……... 211

10.4. Порядок проведения энергетических обследований и энергетического аудита …….. 212

10.5. Оформление результатов энергетических обследований и энергетического аудита ……... 219

10.6. Аккредитация энергоаудиторов …… 220

10.7. Примеры метрологического и термографического обследования тепловых и электрических параметров … 222

10.8. Пример метрологического и термографического обследования теплофизических свойств материалов …. 228

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……... 231

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …….. 233

ПРИЛОЖЕНИЕ ……... 237

ПРИЛОЖЕНИЕ

П1. Расчет тепловой схемы производственно-отопительной котельной С ЗАКРЫТОЙ ДВУХТРУБНОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

№ п/п	***Параметры и размерность***	***Расчетная формула или метод определения***	Расчет максимально- зимнего режима	Режим		
				максимально-зимний	зимний	летний
	Исходные данные					
1	Технологическая нагрузка, МВт	$Q_{тн}$		10,2	9,0	8,0
2	Давление технологического пара, МПа	$P_{тн}$		0,8	0,8	0,8
3	Доля возврата конденсата от технологии, %	μ		60	60	60
4	Расчетная температура наружного воздуха, °С	$t_{о}^{р} = -22\ ;\ t_{нв}$		– 22	– 9,2	+ 8
5	Нагрузка на отопление и вентиляцию (расчетная) $Q_{ов}$, МВт	$Q_{ов} = Q_{ов}^{р}\,\frac{t_{вн} - t_{нв}}{t_{вн} - t_{о}^{р}}$	$3{,}5 \cdot \frac{18-(-22)}{18-(-22)}$	3,5	2,38	–

Продолжение табл. П1

№ п/п	***Параметры и размерность***	***Расчетная формула или метод определения***	Расчет максимально- зимнего режима	Режим		
				максимально-зимний	зимний	летний
6	Нагрузка на горячее водоснабжение $Q_{\text{гв}}$, МВт	$Q^{\text{з}}_{\text{гв}}$ (зима) $Q^{\text{л}}_{\text{гв}} = 0{,}82\,Q^{\text{з}}_{\text{гв}}$ (лето)	$-0{,}82 \cdot 1{,}5$	1,5–	1,5–	–1,23

7	Сухой остаток исходной воды, мг/кг	$S_{ив}$		300	300	300
8	Солесодержание воды после ХВО, мг/кг	$S_{хво} = S_{ив}$		300	300	300
9	Солесодержание котловой воды, мг/кг	$S_{кв}$		3000	3000	3000
10	Энтальпия пара, кДж/кг, при давлении в МПа:					
	1,4	$i''_{1,4}$		2790	2790	2790
	0,8	$i''_{0,8}$		2768	2768	2768
	0,15	$i''_{0,15}$		2693	2693	2693
	0,12	$i''_{0,12}$		2683	2683	2683

11	Температура, °С, и энтальпия, кДж/кг:					
	котловой и продувочной воды при P = 1,4 МПа	$t_{кв} = t_{пр} = 194$; $i'_{1,4} = i'_{кв}$		826	826	826
	конденсата от технологии	$t_{тех} = 50$; $i_{тех} = 4{,}19 t_{тех}$	$4{,}19 \cdot 50$	210	210	210
	воды из СНП при P = 0,15 МПа	$t_{0,15} = 110$; $i'_{0,15}$		465	465	465
	конденсата от мазутного хозяйства	$t_{мх} = 40$; $i_{мх} = 4{,}19 t_{мх}$	$4{,}19 \cdot 40$	168	168	168
	продувочной воды от теплообменника Т1	$t_{к1} = 60$; $i_{к1} = 4{,}19 t_{к1}$	$4{,}19 \cdot 60$	251	251	251
	конденсата от теплообменников Т2, Т3 и Т6	$t_{к2} = t_{к3} = t_6 = 80$ $i_{к2} = i_{к3} = i_{к6} = 4{,}19 t_{к2}$	$4{,}19 \cdot 80$	335	335	335
	исходной воды	$t_{исх}$ $i_{исх} = 4{,}19 t_{исх}$	$4{,}19 \cdot 5$	521	521	1563
	воды на ХВО	$t_{хво} = 30$; $i_{хво} = 4{,}19 t_{хво}$	$4{,}19 \cdot 30$	126	126	126

	умягченной воды, поступающей в деаэратор после Т4	$t_{42} = 85\ ;\ i_{42} = 4{,}19 t_{42}$	$4{,}19 \cdot 85$	356	356	356

Продолжение табл. П1

№ п/п	***Параметры и размерность***	***Расчетная формула или метод определения***	Расчет максимально- зимнего режима	Режим		
				максимально-зимний	зимний	летний

	воды в деаэраторе	$t_{д} = 102\,;\ i_{д} = 4{,}19 t_{д}$	$4{,}19 \cdot 102$	427	427	427
	питательной воды перед экономайзером	$t_{пв} = 90\,;\ i_{пв} = 4{,}19 t_{пв}$	$4{,}19 \cdot 90$	377	377	377
	сетевой воды в трубопроводе: – подающем	по температурному графику $t'_{с}\ i'_{с} = 4{,}19 t'_{с}$	$4{,}19 \cdot 150$	150629	107448	70293
	– обратном	$t''_{с}\ i'_{с} = 4{,}19 t''_{с}$	$4{,}19 \cdot 70$	70293	53222	38159
		Результаты расчета				
12	Расход пара на технологию (производство), кг/с	$D_{тн} = \dfrac{Q_{тн}}{i''_{0,8} - i_{тех}} 10^{3}$	$\dfrac{10{,}2 \cdot 10^{3}}{2768 - 210}$	4,0	3,5	3,1
13	Расход конденсата от производства, кг/с	$G_{тн} = 0{,}01 \mu D_{тн}$	$0{,}01 \cdot 60 \cdot 40$	2,4	2,1	1,9

14	Потери технологического конденсата, кг/с	$G_{\text{тн}}^{\text{пот}} = D_{\text{тн}} - G_{\text{тн}}$	$4{,}0 - 2{,}4$	1,6	1,4	1,2
15	Общая нагрузка отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, МВт	$Q_{\text{с}} = Q_{\text{ов}} + Q_{\text{гв}}$	$3{,}5 + 1{,}5$	5,0	3,88	1,23
16	Расход пара на сетевые подогреватели Т5 и Т6, кг/с	$D_{\text{ст}} = \dfrac{Q_{\text{с}}}{i''_{0,8} - i_{\text{к6}}} 10^3$	$\dfrac{5{,}0 \cdot 10^3}{2768 - 335}$	2,06	1,6	0,51
17	Общий расход пара на внешние потребители, кг/с	$D_{\text{вн}} = D_{\text{тн}} + D_{\text{ст}}$	$4{,}0 + 2{,}06$	6,06	5,1	3,61
18	Расход пара на собственные нужды котельной, кг/с	$D_{\text{сн}} = 0{,}1 D_{\text{вн}}$	$0{,}1 \cdot 6{,}06$	0,61	0,51	0,36
19	Потери пара в тепловой схеме, кг/с	$D_{\text{пот}} = 0{,}03 D_{\text{вн}}$	$0{,}03 \cdot 6{,}06$	0,18	0,15	0,11
20	Расход сетевой воды, кг/с: для отопления и вентиляции	$G_{\text{ов}}^{\text{с}} = \dfrac{Q_{\text{ов}}}{i'_{\text{с}} - i''_{\text{с}}} 10^3$	$\dfrac{3{,}15 \cdot 10^3}{629 - 293}$	10,42	10,5	–

	для горячего водоснабжения	$G_{\text{гв}}^{\text{с}} = \frac{Q_{\text{гв}}}{i'_{\text{с}} - i''_{\text{с}}} 10^3$	$\frac{1{,}5 \cdot 10^3}{629-293}$	4,46	6,64	9,18
21	Общий расход сетевой воды, кг/с	$G_{\text{с}} = G_{\text{ов}}^{\text{с}} + G_{\text{гв}}^{\text{с}}$	10,42 + 4,46	14,88	17,4	9,18
22	Расход воды на подпитку тепловой сети, кг/с	$G_{\text{подп}} = 0{,}02\ G_{\text{с}}$	0,02 · 14,88	0,30	0,35	0,18

Продолжение табл. П1

№ п/п	***Параметры и размерность***	***Расчетная формула или метод определения***	Расчет максимально- зимнего режима	Режим		
				максимально-зимний	зимний	летний
23	Паропроизводительность котельной приP = 0,8 МПа, кг/с	$D^{к}_{0,8} = D_{тн} + D_{ст} + + D_{сн} + D_{пот}$	4,0 + 2,06 ++ 0,61 + 0,18	6,85	5,83	4,2
24	Сумма потерь пара, конденсата и сетевой воды, кг/с	$G_{пот} = G^{пот}_{тн} + D_{пот} + G_{подп}$	1,6 + 0,18 + 0,3	2,08	1,9	1,5
25	**Доля потерь теплоносителя**	$П_{х} = G_{пот} / D^{к}_{0,8}$	2,08 / 6,85	0,3	0,33	0,36
26	Процент продувки, %	$П_{р} = \frac{S_{х} П_{х}\ 100}{S_{кв} - S_{х}\ П_{х}}$	$\frac{300 \cdot 0.3 \cdot 100}{3000 - 300 \cdot 0,3}$	3,1	3,4	3,73
27	Расход питательной воды на РОУ, кг/с	$G_{РОУ} = D^{к}_{0,8}\ \frac{i''_{1,4} - i''_{0,8}}{i''_{1,4} - i_{пв}}$	$6,8 \cdot \frac{2790 - 2768}{2790 - 377}$	0,06	0,05	0,04
28	Паропроизводительность котельной при P = 1,4 МПа, кг/с	$D^{к}_{1,4} = D^{к}_{0,8} - G_{РОУ}$	6,85 – 0,06	6,79	5,78	4,16

29	Расход продувочной воды, кг/с	$G_{\text{пр}} = 0{,}01\, D^{\text{к}}_{1{,}4}\, \Pi_{\text{р}}$	$0{,}01 \cdot 6{,}79 \cdot 3{,}1$	0,21	0,20	0,16
30	Расход пара из СНП, кг/с, при P = 0,15 МПа	$D^{\text{с}}_{0{,}15} = G_{\text{пр}} \dfrac{i'_{\text{кв}} - i'_{0{,}15}}{i''_{0{,}15} - i'_{0{,}15}}$	$0{,}21 \dfrac{826-465}{2693-465}$	0,034	0,032	0,026
31	Раход воды из СНП, кг/с	$G_{\text{СНП}} = G_{\text{пр}} - D^{\text{с}}_{0{,}15}$	0,21 – 0,03	0,18	0,17	0,13
32	Расход воды из деаэратора, кг/с	$G_{\text{д}} = D^{\text{к}}_{0{,}8} + G_{\text{пр}} + G_{\text{подп}}$	6,8 + 0,2 + 0,3	7,36	6,38	4,54
33	Расход выпара из деаэратора, кг/с	$D_{\text{вып}} = d\, G_{\text{д}}$	0,002 ·7,36	0,02	0,01	0,01

34	Расход пара на мазутное хозяйство, кг/с	$D_{мх} = 0{,}01 D_{вн}$	0,01 ·6,06	0,06	0,05	0,04
35	Расход конденсата от мазутного хозяйства, кг/с	$G_{мх} = 0{,}6 D_{мх}$	0,6 ·0,06	0,04	0,03	0,02
36	Потери пара при распыливании мазута, кг/с	$D_{мх}^{пот} = 0{,}4 D_{мх}$	0,4 ·0,06	0,02	0,02	0,02
37	Суммарные потери пара и конденсата (уточненные), кг/с	$G_{пот} = G_{тн}^{пот} + D_{пот} + + G_{подп} + G_{снп} + + D_{вып} + D_{мх}^{пот}$	1,6 + 0,18 + + 0,3 + 0,18 + + 0,02 + 0,02	2,3	2,1	1,65

Продолжение табл. П1

№ п/п	***Параметры и размерность***	***Расчетная формула или метод определения***	Расчет максимально- зимнего режима	Режим		
				максимально-зимний	зимний	летний
38	Расход воды после ХВО, кг/с	$G_{\text{ХВО}} = G_{\text{пот}}$		2,3	2,1	1,65
39	Расход исходной воды, кг/с	$G_{\text{исх}} = 1{,}15\, G_{\text{ХВО}}$	$1{,}15 \cdot 2{,}3$	2,65	2,42	1,90

40	Температура исходной воды после Т1, °С	$t_{12} = t_{\text{исх}} + \frac{G_{\text{СНП}}(i'_{0,15} - i_{\text{к1}})}{4{,}19\,G_{\text{исх}}}$	$5 + \frac{0{,}18 \cdot 214}{4{,}19 \cdot 2{,}65}$	9,5	20,0	29
41	Расход пара на подогреватель исходной воды Т2, кг/с	$D_2 = G_{\text{исх}} \frac{4{,}19\,(t_{\text{ХВО}} - t_{12})}{i''_{0,8} - i_{\text{к2}}}$	$2{,}6 \frac{4{,}19 \cdot 10{,}5}{2768 - 335}$	0,05	0,04	0,03
42	Температура воды после ХВО, с учетом охлаждения, °С	$t_{31} = t_{\text{ХВО}} - 3$	30 – 3	27	27	27
43	Температура воды на входе Т4 или на выходе Т3, °С ($t_{41} = t_{32}$)	$t_{41} = t_{42} - \frac{G_{\text{д}}}{G_{\text{ХВО}}}(t_{\text{д}} - t_{\text{пв}})$	$85 - \frac{7{,}36}{2{,}3} \cdot 12$	47	49	52
44	Расход пара на подогреватель Т3, кг/с	$D_3 = \frac{G_{\text{ХВО}}(t_{32} - t_{31})\,4{,}19}{i''_{0,8} - i_{\text{к3}}}$	$\frac{2{,}3 \cdot 20 \cdot 4{,}2}{2768 - 335}$	0,08	0,08	0,07

45	Расход пара на деаэрацию, кг/с	$D_{д} = \frac{1}{i''_{0,8}}\left[\left(G_{д}\, i_{д} + D_{вып}\, i''_{0,12}\right) - \left(G_{ХВО}\, i_{42} + G_{тн}\, i_{тех} + G_{мх}\, i_{мх}\right) - \right.$ $\left. -(G_2 + G_3 + G_{ст})\, i_{к2}\right] = \frac{1}{2768}[(7{,}36 \cdot 427 + 0{,}02 \cdot 2683) - (2{,}3 \cdot 356 + 2{,}4 \cdot 210 + 0{,}04 \cdot 168) - (0{,}05 + 0{,}08 + 2{,}06)335]$		0,41	0,36	0,28
46	Расчетный расход пара на собственные нужды, кг/с	$D^{р}_{сн} = D_{д} + D_{мх} + D_2 + D_3$ По п. 18 $D_{сн}$	0,41 + 0,06 + + 0,05 + 0,08	0,60,61	0,530,51	0,420,36
47	Расчетная паропроизводительность котельной приP = 0,8 МПа, кг/с	$D^{кр}_{0,8} = D_{тн} + D^{р}_{сн} + D_{пот} + D_{ст}$ По п. 23 $D^{к}_{0,8}$	4,0 + 0,6 + + 0,18 + 2,06	6,846,85	5,785,83	4,144,2

48	Невязка расчета, %	$\Delta = \frac{D_{0,8}^{кр} - D_{0,8}^{к}}{D_{0,8}^{к}} 100 < 2$	$\frac{6{,}84-6{,}85}{6{,}84} \cdot 100$	0,15< 2	0,8	1,4

П2. РАСЧЕТ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ С ЗАКРЫТОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

№ п/п	Параметры и размерность	Расчетная формула илиметод определения	Режим				
			максимальный зимний	холодный месяц	отопительный период	точка излома графика	летний период
		Исходные данные					
1	Температура, °С:						
	наружного воздуха	по температурному графику, $t_{нв}$	–22	–9,2	–3,4	+2,3	+8
	прямой сетевой воды на выходе из котельной	по температурному графику, $t'_{с}$	150	107	88	70	70
	обратной сетевой воды на входе в котельную	по температурному графику, $t''_{с}$	70	53	45	38	38
	воды на входе в котел	$t'_{к}$, при сжигании мазута	110	110	110	110	110
	исходной воды	$t_{исх}$	5	5	5	5	15

	воды на ХВО	$t_{\text{ХВО}}$	30	30	30	30	30
	воды перед ВД	t_{22}	65	65	65	65	65

		Результаты расчета					
2	Расход теплоты, МВт:						

	на отопление и вентиляцию	$Q_{ов} = Q_{ов}^{р} \frac{t_{вн} - t_{нв}}{t_{вн} - t_{о}^{р}}$	60	40,8	32,1	23,6	–
	на горячее водоснабжение	$Q_{гв}^{л} = 0{,}82\, Q_{гв}^{з}$	20	20	20	20	16,4
3	Общая тепловая мощность котельной (без учета собственных нужд), МВт	$Q_{т} = Q_{ов} + Q_{гв}$	80	60,8	52,1	43,6	16,4
4	Расход сетевой воды, кг/с:						
	на отопление и вентиляцию	$G_{ов} = \frac{Q_{ов}}{4{,}19(t_{с}' - t_{с}'')} \cdot 10^{3}$	179	180	178	176	–
	на горячее водоснабжение	$G_{гв} = \frac{Q_{гв}}{4{,}19(t_{с}' - t_{с}'')} \cdot 10^{3}$	60	88	111	149	122
	общий	$G_{с} = \frac{Q_{ов} + Q_{гв}}{4{,}19(t_{с}' - t_{с}'')} \cdot 10^{3}$	239	268	289	325	122
5	Расход воды на подпитку и потери в тепловой схеме, кг/с	$G_{подп} = 0{,}025\, G_{с}$	6,0	6,7	7,2	8,1	3,0

Продолжение табл. П2

№ п/п	Параметры и размерность	Расчетная формула илиметод определения	Режим				
			максимальный зимний	холодный месяц	отопительный период	точка излома графика	летний период

6	Расход теплоты на собственные нужды котельной (принимается предварительно), МВт	$Q_{сн} = 0{,}03\,Q_т$	2,4	1,8	1,6	1,3	0,5
7	Общая тепловая мощность котельной, МВт	$Q_к = Q_{ов} + Q_{гв} + Q_{сн}$	82,4	62,6	53,7	44,9	16,9
8	Расход воды через котельные агрегаты, кг/с	$G_к = \frac{Q_к}{4{,}19\,(t''_к - t'_к)} \cdot 10^3$	492	492	492	492	164
9	Температура воды на выходе из котельного агрегата, °С	$t''_к = t'_к + \frac{Q_к}{4{,}19\,G_к} \cdot 10^3$	150	140	136	132	135
10	Расход воды (через котельный агрегат) на собственные нужды, кг/с	$G_{сн} = \frac{Q_{сн}}{4{,}19\,(t''_к - t'_к)} \cdot 10^3$	14,3	14,3	14,7	14,1	4,8
11	Расход воды на линии рециркуляции, кг/с, при $t'_к$ = 110 °С	$G_{рц} = \frac{G_к\,(t'_к - t''_с)}{t'_к - t''_с}$	246	322	351	377	126

12	Расход воды по перемычке, кг/с	$G_{\text{пм}} = \frac{G_{\text{с}}(t''_{\text{к}} - t'_{\text{с}})}{t''_{\text{к}} - t''_{\text{с}}}$	0	102	152	214	82
13	Расход исходной воды, кг/с	$G_{\text{исх}} = 1{,}2\, G_{\text{ХВО}}$; $G_{\text{ХВО}} = G_{\text{подп}}$	7,2	8,0	8,6	9,7	3,6
14	Расход греющей воды на деаэрацию, кг/с	$G_{\text{гд}} = \frac{G_{\text{ХВО}}(t_{\text{д}} - t_{22})}{t''_{\text{к}} - t_{\text{д}}}$	0,4	0,5	0,5	0,7	0,2
15	Расход выпара из деаэратора, кг/с	$D_{\text{вып}} = d\, G_{\text{ХВО}}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

16	Расход греющей воды на мазутное хозяйство, кг/с	$G_{мх} = 0{,}01 G_{с}$	2,4	2,7	2,9	3,3	1,2
17	Расход греющей воды на теплообменник Т2, кг/с, (принимаем $t_2'' = 80$ °С)	$G_{г2} = G_{г} = \frac{G_{ХВО}(t_{22} - t_{ХВО})}{t_{к}'' - t_2''}$	3,0	3,9	4,5	5,5	1,9

Продолжение табл. П2

№ п/п	Параметры и размерность	Расчетная формула илиметод определения	Режим				
			максимальный зимний	холод-ный месяц	отопительный период	точка излома-графика	летний период
18	Температура греющей воды после теплообменника Т1, °С, принимаем $G_{г1} = G_{г2} = G_{г}$	$t_1'' = t_2'' - \frac{G_{исх}(t_{ХВО} - t_{исх})}{G_{г1}}$	20	29	32	36	52
19	Расчетный расход воды, кг/с:						
	на собственные нужды	$G_{сн}^{Р} = G_{г} + G_{гд} + G_{мх}$	5,8	7,1	7,9	9,5	3,3

	через котельный агрегат	$G_{к}^{р} = \frac{Q_{т} \cdot 10^{3}}{4{,}19\left(t_{к}'' - t_{к}'\right)} + G_{сн}^{р}$	483	491	486	483	161
20	Относительная погрешность расчета, %	$\Delta = \frac{G_{к}^{р} - G_{к}}{G_{к}^{р}} \cdot 100 < 2$	1,8	0,2	1,2	1,8	1,9