



Сравнение методологического подхода к определению массового расхода в коридоре с численными методами и моделями исчисления

Рецензия эксперта на статью получена 23.03.2026 [The expert review of the article was received on March 23, 2026]

Вопрос определения расчётного расхода удаления дымогазовоздушной смеси при работе системы вытяжной противодымной вентиляции в защищаемом коридоре является одним из наиболее обсуждаемых в профессиональных и научных сообществах. Причиной является многолетняя стагнация исследований в части формирования воздушного режима для систем противодымной вентиляции. Разработанные за последние 50 лет решения были применимы для объёмно-планировочных решений до момента наступления интенсивного роста многоэтажного и высотного строительства в России.

Обратимся к формулировке требований п. 7.18 СП 7.13130.2013 [1]: «Для противодымной защиты допускается использовать системы приточно-вытяжной общеобменной вентиляции при обеспечении требований пунктов 7.1–7.17. Расчётное определение требуемых параметров систем противодымной вентиляции или совмещённых с ними систем общеобменной вентиляции следует производить в соответствии с положениями настоящих норм. Расчёты могут быть выполнены в соответствии с методическими рекомендациями к СП 7.13130.2013 [2] или

на основе других методических пособий, не противоречащих указанным требованиям». Данный пункт указывает, что методологический подход должен быть сформулирован на основе рекомендаций ВНИИПО. Предлагаем рассмотреть возникновение данных рекомендаций более подробно.

Методика берёт начало от документа 1983 года «Рекомендации по расчёту систем противодымной защиты зданий различного назначения» [3], которую разработал следующий авторский коллектив: В.М. Есин, И.И. Ильминский, М.П. Стецовский, В.П. Бородавкин, Г.Н. Валеев, В.Ф. Коротких, П.Н. Попов. Большинство из перечисленных авторов являются разработчиками множества современных нормативных документов и научных изданий, которые легли в основу регулирования вопросов противодымной защиты.

В основе документа по расчёту массового расхода находится исследование, проведённое в рамках кандидатской диссертации М.П. Стецовского «Исследование теплогазообмена на этаже пожара и определение некоторых параметров для расчёта вентиляционных систем противодымной защиты жилых зданий» [4].

УДК 699.871. Научная специальность: 2.1.3.

Сравнение методологического подхода к определению массового расхода в коридоре с численными методами и моделями исчисления

Григорий Петрович Васильев, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), главный научный сотрудник лаборатории «Инновационные технологии энергоэффективности» Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (ФГБУ «НИИСФ РААСН»), председатель совета директоров ГК «Инсолар» (г. Москва); **Алексей Владимирович Бусахин**, к.т.н., доцент, НИУ МГСУ, председатель правления НП «ИСЗС-Монтаж» (г. Москва), эксперт ТК 465, ТК 400, ТК 061; **Георгий Андреевич Савенко**, преподаватель, НИУ МГСУ, инженер ООО «ППФ АК» (г. Москва), аттестованный специалист НП «АВОК» и «НОПРИЗ»

В статье анализируются существующие методики определения массового расхода дымогазовоздушной смеси в системах противодымной вентиляции. Показана ограниченность полумпирических зависимостей и обоснована необходимость применения CFD-моделирования. Полученные результаты демонстрируют расхождения с нормативными методиками и подтверждают необходимость их пересмотра.

Ключевые слова: противодымная вентиляция, пожар, CFD-моделирование, массовый расход, моделирование.

UDC 699.871. Scientific specialty number: 2.1.3.

Comparison of the methodological approach to determining mass flow in a corridor with numerical methods and calculation models

Grigory P. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Chief Researcher at the "Innovative Energy Efficiency Technologies" Laboratory of the Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Chairman of the Board of Directors of the "Insolar" Group (Moscow); **Alexey V. Busakhin**, PhD (Engineering), Associate Professor, NRU MGSU, Chairman of the Management Board of "Engineering Systems of Buildings and Structures" Non-profit Partnership (NP "ISZS-Montazh"), expert of Technical Committees No. 465, No. 400, No. 061; **Georgiy An. Savenko**, lecturer, NRU MGSU, an engineer, "Design and Production Company "AK", LLC ("PPF AK", Moscow), certified specialist of "Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics" Non-government Public Organization (NP "AVOK") and National Association of Prospectors and Designers (NOPRIZ)

The article analyzes the existing methods for determining the mass consumption of a smoke-gas-air mixture in smoke ventilation systems. The limitations of semi-empirical dependencies are shown and the need for CFD modeling is justified. The results obtained demonstrate discrepancies with the normative methods and confirm the need for their revision.

Key words: smoke ventilation, fire, CFD modeling, mass flow, modeling.

Данная работа с лабораторными исследованиями ВНИИПО была выполнена и защищена на базе МИСИ под руководством В. П. Титова.

Основная зависимость для определения массового расхода описана как скорость выгорания древесины с удельной теплотой сгорания древесины 16,3 МДж/кг (с последующей ссылкой на работу К. Фудзита 1972 года [5]):

$$G_T = k_T B_0 H_0^{1,5}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где k_T — коэффициент пропорциональности, $k_T = 0,1 \text{ кг/(с·м}^{2,5}\text{)}$; B_0 — ширина проёма (коридора), м; H_0 — высота проёма (коридора), м.

Обратим внимание на одно из ключевых примечаний к расчёту: «Эта зависимость справедлива для случая естественного газообмена помещения очага пожара через проём, выходящий в неограниченный объём. В представленном методе расчёта предполагали, что температура среды в помещении не зависит от координат, что интенсивность тепловыделений в помещении очага пожара не зависит от полноты сгорания пожарной нагрузки. Указанные допущения должны отразиться на точности результатов. Однако в работе результаты расчётов не сопоставлены с экспериментальными данными, так как на реальном пожаре измерений не проводили».

Таким образом, исходная зависимость и её последующие производные являются результатом исследования конкретных лабораторных условий и носят полуэмпирический характер. Уравнение базируется на скорости выгорания при естественной конвекции и не сопряжено с системой уравнений сохранения (массы, энергии, импульса), лежащей в основе фундаментальной теории развития горения. Экстраполяция метода определения массового расхода в коридоре для современных объёмно-планировочных решений лишена физического обоснования.

Ранее для выполнения требования об обеспечении незадымляемости путей эвакуации (в данном случае в лестничной клетке) были определены требования п. 5.24 СНиП II-Л.1–71* «Жилые здания. Нормы проектирования» [6]:

«В зданиях высотой 10 этажей и более для удаления дыма из поэтажных коридоров и холлов необходимо предусматривать устройство вентиляционных шахт с принудительной вытяжкой и клапанами на каждом этаже. Производительность вентиляторов, сечение шахт и клапанов определяются расчётом... Для предотвращения распространения дыма: по этажам в шахтах лифтов, а также

в лестничных клетках с поэтажными входами в них из коридоров в общежитиях и квартирных домах коридорного и галерейного типов следует обеспечить подпор воздуха не менее 2 кг/м^2 при одной открытой двери. Вентиляторы должны включаться автоматически от специальных датчиков и дистанционно — от кнопок, установленных на каждом этаже в шкафах пожарных кранов.

В зданиях высотой 10 этажей и более для удаления дыма... необходимо предусматривать устройство вентиляционной вытяжки с клапанами на каждом этаже... Для предотвращения распространения дыма: по этажам в шахтах лифтов, а также в лестничных клетках с поэтажными входами в них из коридоров в общежитиях и квартирных домах коридорного и галерейного типов следует обеспечить подпор воздуха не менее 2 кг/м^2 при одной открытой двери. Вентиляторы должны включаться автоматически от специальных датчиков и дистанционно...

Незадымляемые лестничные клетки в пределах первого этажа должны иметь выходы непосредственно наружу и через вестибюли. Выход из лестничных клеток в вестибюль может быть предусмотрен через проход, открытый во внешнюю среду, или через тамбур-шлюз с samozакрывающимися дверями и уплотнёнными притворами; при этом в тамбуре-шлюзе должен быть обеспечен подпор воздуха давлением не менее 2 кг/м^2 .

Развитие зависимости, предложенной авторским коллективом рекомендаций по противоподымной защите 1982 года, отражено в следующих работах.

Работа В. М. Есина продолжена в составе авторов документа Рекомендации (Р) НП «АВОК» 5.5.1–2023 [7], в котором с формулой (1) математически соотносится определение массового расхода:

$$G_{\text{пр}} = k B_{\text{п}} H_{\text{п}}^{3/2}, \text{ кг/с}, \quad (2)$$

где k — размерный коэффициент, для жилых зданий $k = 0,96 \text{ кг/(с·м}^{5/2}\text{)}$, для общественных — $k = 1,2 \text{ кг/(с·м}^{5/2}\text{)}$; $B_{\text{п}}$ — ширина дверного проёма из коридора в лестничную клетку, м; $H_{\text{п}}$ — высота дверного проёма из коридора в лестничную клетку, м.

Работа И. И. Ильминского продолжена в составе авторов МР ВНИИПО к СП 7.13130.2013 [1], в которых определение массового расхода дублирует (1) и (2) в иной математической записи (за исключением изменённого значения безразмерного коэффициента для жилых зданий):

$$G_{\text{см}} = k_{\text{см}} A_d \sqrt{H_d}, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где A_d — площадь двери при выходе из коридора по путям эвакуации, м^2 ; H_d — высота этой двери, м. Значения коэффициента $k_{\text{см}}$ в данной зависимости составляют 1,0 и 1,2 для жилых и общественных зданий, соответственно.

Многие специалисты, занимающиеся вопросами противоподымной вентиляции, обратили внимание, что представленное уравнение не описывает реальную картину развития и распространения пожара, поскольку расчёт массового расхода исходит из условия поступления воздуха на окисление пожарной нагрузки при открытой двери лестничной клетки / шахты лифта в коридор, а также данная формула имеет трактовку, отличную от базовой академической.



На примере из [8] вспомним основные компоновки лестнично-лифтовых узлов (рис. 1а–г). Из представленных компоновок типовых этажей видно, что типы планировок (а) и (б) не соответствуют условию поступления воздуха в коридор при открытой двери, поскольку система вентиляции в лифтовом холле пожаро-безопасной зоны (ПБЗ) срабатывает по датчику открытия эвакуационной двери и является кратковременным источником поступления воздуха. Планировка типа (в) не предполагает фиксацию двери незадымляемой лестничной клетки типа Н2 в открытом положении. А для незадымляемой лестничной клетки типа Н3 в планировке типа (г) предусматривается устройство сброса воздуха (клапан избыточного давления, КИД), пропорциональная геометрия которого не сопоставима с размерами эвакуационной двери. В современном строительстве встречаются «технические» коридоры, для которых не представляется возможным найти примыкающее помещение с подпором воздуха или помещение с пожарной нагрузкой «древесина», чтобы воспользоваться формулой расчёта массового расхода.

Последовательно рассмотрим представленный материал:

1. В 1971 году сформулировано требование минимального перепада избыточного давления в проёме открытой эвакуационной двери в размере 2 кг/м^2 ($\approx 20 \text{ Па}$, приблизительно формирует более 30 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ через проём размерами $2,0 \times 1,0 \text{ м}$).

2. Формула (1) в диссертации М.П. Стецовского [4] от 1978 года берет своё начало в исследовании 1972 года со следующими допущениями:

- естественный газообмен между помещениями;
- переход дымогазовоздушной смеси из помещения с очагом пожара в неограниченный объём (которым коридор никогда по определению не являлся);
- интенсивность тепловыделений в помещении очага пожара не зависит от полноты сгорания пожарной нагрузки.

3. Дальнейшее развитие исследования М.П. Стецовского [4] послужило основанием для формирования методических рекомендаций 1982 года.

4. Работа В.М. Есина (и др.) [3] использует зависимость на основе уравнения выгорания (2).

5. Работа И.И. Ильминского (и др.) [2] использует зависимость на основе уравнения выгорания (3).

6. Современные объёмно-планировочные решения не соотносятся с требованиями проведения расчёта по указанным зависимостям.

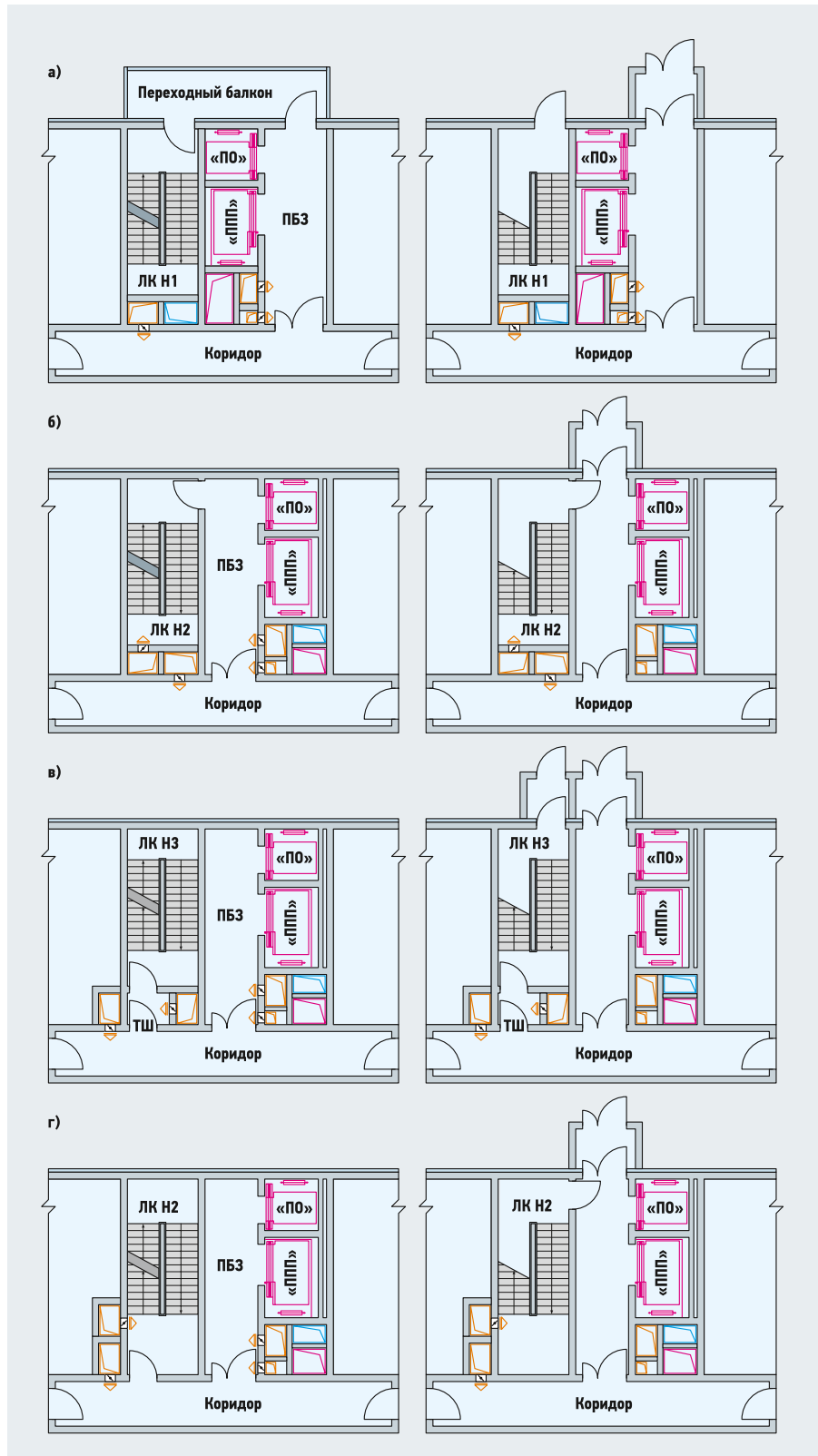


Рис. 1. Современные планировки лестнично-лифтовых узлов типовых этажей

7. Запись в составе СП 7.13130.2013 [1] даёт прямое указание на использование методики расчёта ВНИИПО, в частности, при прохождении госэкспертизы.

Как всё это влияет на современное строительство:

1. Морально устаревшая и не исследованная на зданиях нового типа методика определения массового расхода не имеет возможности обосновать расчёт дымоудаления из коридора.

2. В борьбе за обеспечение безопасности путей эвакуации расход и установочные мощности оборудования принимаются с избыточным запасом.

3. Игнорируется нестационарный характер развития очага пожара, что порождает фундаментальную проблему нарушения массового баланса. Расчёт по формулам (1)–(3) даёт единственное значение расхода, в то время как в реальности количество дыма, подлежащего удалению, дина-

мически меняется. Это приводит к тому, что система может оказаться неспособной обеспечить незадымляемость на критически важных начальных стадиях эвакуации либо работать с избыточной производительностью на поздних стадиях, создавая неучтённые перетоки и нарушая расчётный воздушный режим.

4. Иные интерпретации расчётов, выходящие за текст методических рекомендаций ВНИИПО, не рассматриваются при прохождении экспертизы.

Попытка решения данной задачи в рамках исследования М. П. Стецовского, как было упомянуто ранее, была весьма эффективной до момента появления многоэтажного и высотного строительства.

В настоящий момент существуют более глубокие и наглядные научные подходы, позволяющие получить картину течения газозвудушных сред в объёме помещения, например, численное CFD-моделирование на базе методов расчёта физических процессов. Рассмотрим основные модели [9] горения [10] с кратким указанием области применения:

1. Модель горения Зельдовича — модель распространения пламени, применяется для исследования стабилизации пламени и скорости в простых конфигурациях.
2. Модель горения Аррениуса — кинетическая модель, применяется для исследования процесса горения при детальном описании химического взаимодействия.
3. Модель горения Магнуссена — модель турбулентного диффузионного горения при пожаре, применяется для исследования квазистатических химических реакций при турбулентном перемешивании.
4. Модель горения Аррениуса — Магнуссена — комбинированная модель, применяется при исследовании более сложных процессов химической кинетики и турбулентного перемешивания.
5. Eddy Dissipation Concept (EDC) — модель сложного горения с подробной химией, применяется при решении нелинейных, нестационарных и узких задач.

Из представленного списка наибольший прикладной интерес представляет модель горения Аррениуса — Магнуссена Q_f , поскольку позволяет рассмотреть нестационарный процесс горения пожарной нагрузки и распространения дымогазовоздушной смеси непосредственно в объёме коридора.

В общем виде модель вычисляет кинетическую составляющую Аррениуса Q_{kin} и турбулентную составляющую Магнуссена Q_{turb} через конвективно-диффузионное уравнение g_f и восстановленную массовую долю вещества Y_f^* , что позволяет при соответствующих заданных началь-

ных и граничных условиях получить результат процесса горения в рассматриваемом объёме и перемещение объёма дыма:

$$\frac{1}{Q_f} = \frac{1-y}{Q_{kin}} + \frac{y}{Q_{turb}}; \quad (4)$$

$$y = \min \left(1, \frac{\sqrt{g_f}}{Y_f^*} \right). \quad (5)$$

С физической точки зрения комбинированная модель Аррениуса — Магнуссена адекватно описывает процесс горения в реальных условиях пожара. Уравнение (4) определяет суммарную скорость реакции Q_f как величину, обратную взвешенной сумме обратных скоростей кинетического Q_{kin} и турбулентного Q_{turb} режимов. Параметр y в (5) выступает в роли весового коэффициента, определяющего доминирующий механизм: кинетический (лимитируемый химией) или турбулентный (лимитируемый перемешиванием). Такая формулировка позволяет моделировать нестационарное и пространственно-неоднородное распространение фронта пламени и дымовых газов.

Из-за значительного повышения сложности расчёта массового расхода в рамках инженерных методов такой подход не нашёл широкого применения в рамках инженерных задач противоподымной защиты.

Однако проводимое на базе Московского государственного строительного университета исследование в рамках развития изучения закономерностей формирования воздушного режима позволяет получить следующие результаты на основе моделирования базовых условий развития пожара (с целью валидации результатов) и оценке последующих эмпирических данных натурных испытаний:

1. Массовый расход по представленным зависимостям (1)–(3) отличается от результатов решения с применением численных методов на величину, превышающую допустимую расчётную точность.

2. Наблюдается режим формирования нестационарного развития кинетической и турбулентной составляющей в период развития очага.

3. Зафиксирована сходимость справочного значения требуемого объёма окислителя (воздуха) на поддержание и развитие горения 1 кг пожарной нагрузки (древесины) при стандартных начальных условиях (температура, влажность, теплота сгорания).

4. Решение задачи для типовых условий сходится при различном положении дымового слоя в коридоре, что предварительно даёт возможность утверждать возможность исключения необходимости выбора середины коридора как расчётной области.

Для однозначного утверждения выдвигаемых гипотез и верификации результатов численного моделирования, а также теоретических изысканий, требуется проверка в условиях реального пожара. Эту задачу позволяет решить проводимое исследование на базе НИУ МГСУ, о котором постепенно будет доложено на страницах научных журналов.

Таким образом, основная гипотеза проводимого исследования заключается в том, что существующие нормативные методики расчёта массового расхода, основанные на полуэмпирических зависимостях 1970-х годов, систематически неадекватны для современных зданий.

Апробированное и верифицированное натурными экспериментами CFD-моделирование на основе физически обоснованных моделей горения (таких как модель Аррениуса — Магнуссена) способно стать основой для разработки новой, корректной инженерной методики. Такой подход позволит не только повысить точность расчётов и оптимизировать капитальные и эксплуатационные затраты, но и, что главное, обоснованно гарантировать требуемый уровень пожарной безопасности путей эвакуации. ●

1. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности (с Изм. №1–3) / Дата введ.: 25.02.2013.
2. Расчётное определение основных параметров противоподымной вентиляции зданий: методические рекомендации к СП 7.13130.2013 / И. И. Ильминский [и др.]. — М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013. 58 с.
3. Рекомендации по расчёту противоподымной защиты зданий различного назначения: методические рекомендации / В. М. Есин [и др.]. — М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. 35 с.
4. Стецовский М. П. Исследование теплогазообмена на этаже пожара и определение некоторых параметров для расчёта вентиляционных систем противоподымной защиты жилых зданий: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.03. — М.: МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1978. 198 с.
5. Fujita K. Characteristics of fire inside a non-combustible room and prevention of fire damage. Building Research Institute. Tsukuba, Japan. Report No. 2h/E2H. 1972.

6. СНиП II-Л.1–71*. Жилые здания. Нормы проектирования / Дата введ.: 04.03.1971.
7. Р НП «АВОК» 5.5.1–2023. Системы противоподымной вентиляции жилых и общественных зданий / А. Н. Колубков [и др.]. — М.: НП «АВОК», 2023. 172 с.
8. Противоподымная вентиляция многоквартирных жилых и общественных зданий: учебник / А. В. Бусахин [и др.]; Минобрнауки России; НИУ МГСУ. — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2025. 200 с.
9. Горение: физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатт, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г. Л. Агафонова; под ред. П. А. Власова. — М.: Физматлит, 2006. 352 с.
10. Magnussen B. F., Hjertager B. H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. Symposium (International) on Combustion. 1977. Vol. 16. Issue 1. Pp. 719–729.

References — see page 79.

Comparison of the methodological approach to determining mass flow in a corridor with numerical methods and calculation models. Pp. 52–56.

Grigory P. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Chief Researcher at the “Innovative Energy Efficiency Technologies” Laboratory of the Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Chairman of the Board of Directors of the “Insolar” Group (Moscow); **Alexey V. Busakhin**, PhD (Engineering), Associate Professor, NRU MGSU, Chairman of the Management Board of “Engineering Systems of Buildings and Structures” Non-profit Partnership (NP “ISZS-Montazh”), expert of Technical Committee No. 465, No. 400, No. 061; **Georgy An. Savenko**, lecturer, NRU MGSU, an engineer, “Design and Production Company “AK”, LLC (“PPF AK”, Moscow), certified specialist of “Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics” Non-government Public Organization (NP “AVOK”) and National Association of Prospectors and Designers (NOPRIZ)

1. SP 7.13130.2013 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 7.13130.2013]. *Otoplenie, ventilatsiya i konditsionirovanie. Trebovaniya pozharnoy bezopasnosti (s Izm. No. 1–3)* [Heating, Ventilation, and Air Conditioning, Fire Safety Requirements (with Amendments No. 1–3)]. Date of impl.: February 25, 2013. [In Russian]
2. I.I. Ilminsky et al. *Raschetnoe opredelenie osnovnykh parametrov protivodymnoy ventilatsii zdaniy: metodicheskie rekomendatsii k SP 7.13130.2013* [Calculation of the main parameters of smoke ventilation of buildings: Guidelines to the Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 7.13130.2013]. Moscow. FGBU VNIPO MChS Rossii [Federal State Budgetary Institution “All-Russian Order of the Badge of Honor” Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia”]. 2013. 58 p. [In Russian]
3. V.M. Esin et al. *Rekomendatsii po raschetu protivodymnoy zashchity zdaniy razlichnogo naznacheniya: metodicheskie rekomendatsii* [Recommendations for calculating smoke protection for buildings for various purposes: Guidelines]. Moscow. VNIPO MVD SSSR [All-Union Research Institute of Fire Defense of the USSR Ministry of Internal Affairs]. 1983. 35 p. [In Russian]
4. M.P. Stetsovsky. *Issledovanie teplogazobmena na etazhe pozhara i opredelenie nekotorykh parametrov dlya rascheta ventilatsionnykh sistem protivodymnoy zashchity zhilykh zdaniy* [Study of heat and gas exchange on the fire floor and determination of some parameters for calculating ventilation systems for smoke protection of residential buildings]. *Diss. kand. tekhn. nauk po spets. 05.23.03* [Dissertation of a candidate of technical sciences in specialty No. 05.23.03]. Moscow. MISI im. V.V. Kuibysheva [Moscow Order of the Red Banner of Labor Civil Engineering Institute named after V.V. Kuibyshev (MISI named after V.V. Kuibyshev)]. 1978. 198 p. [In Russian]
5. K. Fujita. Characteristics of fire inside a non-combustible room and prevention of fire damage. Building Research Institute. Tsukuba, Japan. Report No. 2h/E2H. 1972.
6. SNiP II-L.1–71* [The Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. II-L.1–71*]. *Zhilye zdaniya. Normy proektirovaniya* [Residential buildings. Design standards]. Date of impl.: March 4, 1971. [In Russian]
7. R NP “AVOK” 5.5.1–2023 [Methodological recommendations of “Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics” Non-government Public Organization No. 5.5.1–2023]. *Sistemy protivodymnoy ventilatsii zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Smoke ventilation systems of residential and public buildings]. A.N. Kolubkov et al. Moscow. NP “AVOK” [“Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics” Non-government Public Organization]. 2023. 172 p. [In Russian]
8. A.V. Busakhin et al. *Protivodymnaya ventilatsiya mnogokvartirnykh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy: ucheb.* [Smoke ventilation of multi-apartment residential and public buildings: A textbook]. *Minobrnauki Rossii* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation]; NIU MGSU [National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)]. Moscow. *Izd-vo MISI-MGSU* [MISI-MGSU Publishing House]. 2025. 200 p. [In Russian]
9. Jü. Warnatz, Ul. Maas, R.W. Dibble. *Gorenie: fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv* [Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation]. Transl. from English by G.L. Agaphonov. Edited by P.A. Vlasov. Moscow. *Fizmatlit* [Publishing House of Physical, Mathematical and Technical Literature (“Fizmatlit” Publishers)]. 2006. 352 p. [In Russian]
10. B.F. Magnussen, B.H. Hjertager. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. Symposium (International) on Combustion. 1977. Vol. 16. Issue 1. Pp. 719–729.