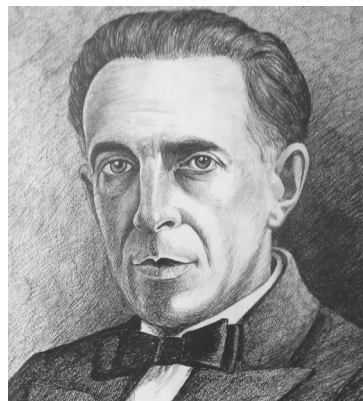


Раздел II. ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ СО И СГВС, ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ, ХОЛОДИЛЬНАЯ И ПЫЛЕ-ПАРОВАЗОВЫЕ НАГРУЗКИ СПВ, СКВ И СХС

Один из основоположников отечественной отопительно-вентиляционной специальности, автор дважды изданного двухтомного учебника «Отопление и вентиляция» (1934 и 1939 гг.), трехтомного учебника в вопросах и ответах, заведующий кафедрой отопления и вентиляции ЛИИГС (потом ЛИСИ — СПб ГАСУ), профессор **Борис Михайлович Аше*** (1884–1942). Вглядываясь в прошлое спустя столетие, все больше осознаешь роль наших учителей — ученых «дедов» и «прадедов», стоявших у истоков профессии. Их уместно сравить с первыми лыжниками — они накатами «лыжню» специальности. Следующие поколения легко скользят, даже не задумываясь... Среди других проф. Б. М. Аше вырастил ученика — проф. Г. А. Максимова. Он в свою очередь воспитал известную школу ленинградских ученых, среди них — и автор этой и других книг. Передача знаний продолжается. Благодарность учеников — искреннее, расхожее, но не единственное и самое точное выражение чувств...



Глава 5

РАСЧЕТ, АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ НА ОТОПЛЕНИЕ И ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЙ

5.1. НОРМИРОВАНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ПОМЕЩЕНИЯМИ И ЗДАНИЕМ

Определение потерь теплоты через наружные ограждения, выбор типа системы отопления по разным признакам (виду и параметрам теплоносителя, конфигурации, типу и способу присоединения приборов, расположению магистралей и др.), тепловые и гидравлические расчеты являются одними из самых распространенных процедур при проектировании систем обеспечения микроклимата (СОМ) здания. Систему отопления как отдельных помещений, так и здания в целом проектируют для обеспечения оптимальной (расчетной) температуры воздуха в холодный период года.

При кажущейся внешней простоте отопительная нагрузка помещения и здания далеко не однозначна в своем определении и зависит, с одной стороны, от внешних климатических условий (температуры наружного воздуха, направления и скорости ветра, солнечной радиации), а с другой стороны, от теплозащитных свойств наружных ограждений, площади и негерметичности светопроемов, инфильтрации, режима проветривания помещений, управления системой отопления и других факторов. Обсуждая теплопотери здания и их зависимость от наружной температуры, обычно упрощенно линеаризуют функцию $Q_{т. п.} = f(t_{в} - t_{н i})$, пренебрегая всеми остальными факторами и сложными климатическими воздействиями.

В свете давно известного и физически объяснимого разделения теплопотерь на *быстрые* (через окна) и *медленные* (через непрозрачные ограждения), описанного, например, С. А. Чистовичем [5.54–5.56] и использованного автором (А. С.) для решения задач отопления [3.106],

* Подробнее о жизни и деятельности проф. Б. М. Аше см. журнал: Инженерные системы, АВОК-СЗ. 2004. № 4 (16). С. 77.

а также с учетом хаотичной радиации становится понятной сложность изучаемых процессов. Поэтому мы приходим к другому, более тонкому и точному толкованию анализируемого явления. Здесь, несомненно, имеет место многофакторность и частотная модуляция воздействий, когда годичный ход температуры $t_n(\tau)$ может быть представлен гармоникой и неупорядоченными на разных частотах колебаниями (см. рис. 3.6, б, в). При таком беспорядке и неопределенности ответа отопления (управляемого или неуправляемого) становится понятной стохастичность точек на рис. 5.1, а, б, рис. 5.2, а и в других источниках.

5.1.1. Фактически наблюдаемые теплопотери зданий

На практике неоднократно описывали и фактически наблюдали это многофакторное явление. Как пример этих зависимостей на рис. 5.1 приведены такие опытные данные, многократно отмеченные и зарегистрированные в разные годы в жилых зданиях по показаниям счетчиков-тепломеров, по данным и публикациям А. Н. Сканава и Л. М. Махова [5.43], Ю.А. Матросова, И. Н. Бутовского и Д. Гольдштейна [5.37], В.А. Пухкала и Л. Р. Крумера [5.40] и др.

Подводя общий итог, авторы статей [5.37, 5.40, 5.43 и др.] подчеркивают сложный характер зависимости фактически наблюдаемых расходов теплоты на отопление жилых зданий от разности $\Delta t = t_B - t_H$. Опытные значения образуют на графиках поле точек, поэтому зависимость теплопотерь от разности температур далека от линейной. В частности, при *малых перепадах температур* $t_B - t_H < 15^\circ\text{C}$ и достаточном отпуске теплоты в здании увеличивается воздухообмен при открывании окон и форточек до величины, не нарушающей тепловой комфорт человека. Расход теплоты на отопление и естественную вентиляцию в этом случае остается практически постоянным и значительно превышает проектное значение. При *больших перепадах температур* $t_B - t_H > 25^\circ\text{C}$ наблюдается снижение теплопотребления по сравнению с проектными данными из-за срезки температурного графика на источнике теплоты и уменьшения естественного проветривания (рис. 5.2, а).

Организуемые [5.14] измерения температур, расходов и тепловых потоков проводят в течение отопительного периода, выбрав продолжительность измерений экспресс-методом в 2 недели, либо методом длительных испытаний в течение 3 месяцев. Анализ данных измерений [5.40], представленных на графике (рис. 5.2, а), показывает, что их результаты в значительной мере зависят от периода измерений, особенно при выборе экспресс-метода. Наиболее обстоятельные и надежные данные получают при наблюдении за теплопотреблением здания в течение всего отопительного периода. Как вывод из анализа методик замеров предложено доработать и уточнить эту методику по ГОСТу [5.14].

5.1.2. Составляющие потерь теплоты зданием

К составляющим потерь теплоты относят следующие:

1. **Основные трансмиссионные теплопотери через наружные ограждающие конструкции здания** с учетом текущей и расчетной температур наружного воздуха и скорости ветра (так называемые **основные** теплопотери, а также **добавочные** теплопотери). Для задач управления системой отопления и выбора наружной расчетной температуры имеет значение то, что теплопотери разделяют на «быстрые» (через окна) и «медленные» (через наружные стены, кровлю и др.). Последние определяют инерционность передачи теплоты через ограждения, зависящую от их массивности [5.55]. Как пример такой инерционности на рис. 5.2, б показано изменение медленных тепловых потерь через наружные ограждения разной массивности в течение 10 суток.

2. **Теплота на нагрев инфильтрирующегося наружного воздуха** (при современных стеклопакетах эта величина пренебрежимо мала).

3. **Теплота на нагрев наружного воздуха** в режиме периодического проветривания помещений.

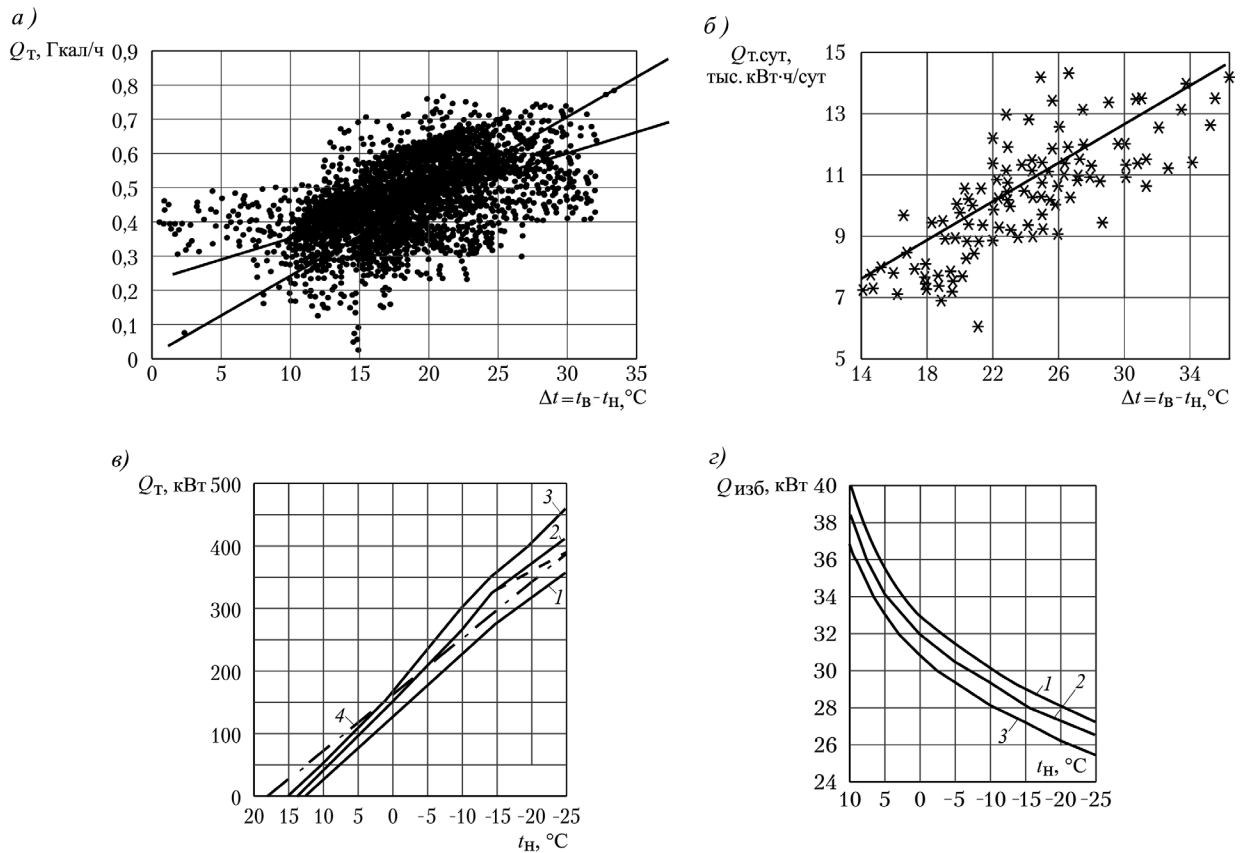


Рис. 5.1. Зависимость фактически потребленной теплоты на отопление, естественную вентиляцию (пронетривание) и инфильтрацию жилых зданий от разности средних температур $t_B - t_H$; *а* — среднечасовые данные расходов теплоты в жилых зданиях, приведенные [5.40] для семимесячного периода наблюдений за отопительный период 2003/04 гг. в Санкт-Петербурге; усредненная зависимость для относительных теплопотерь, предлагаемая авторами, $Q_T = 0,237 + 0,0124\Delta t$; *б* — зависимость суточного теплопотребления (кВт·ч/сут) типового жилого 17-этажного здания серии П-44 за отопительный период 1992/93 гг. в Москве по данным [5.37]; характеристики здания: число квартир — 256, общая площадь — 15 тыс. м², строительный объем — примерно 45 тыс. м³, теплопотребление при $t_H = -29$ °С $Q_T = 17410$ кВт·ч/сут = = 725 кВт, удельная отопительная характеристика $q_{T,от} = 0,33$ Вт (м³ · °С), что удовлетворяет требованиям СНиП 23-02-2003 [5.48]; *в* — проектная (линия 4) и действительная потребность жилого дома серии П-68/16 в Москве в расходе теплоты на отопление при разных температурах наружного воздуха и скорости ветра 0 м/с (линия 1), 5 м/с (линия 2), 10 м/с (линия 3) по данным [5.37]; *з* — внутренние (бытовые) теплопоступления жилого дома серии П-68/16 в Москве по данным [5.43] при разных наружных температурах и скорости ветра 0 м/с (линия 1), 5 м/с (линия 2), 10 м/с (линия 3)

4. **Теплота на нагрев доставляемых в помещение охлажденных материалов, оборудования и транспортных средств.**

5. В ряде случаев теплопотери уменьшают на **величину теплового потока**, регулярно или периодически поступающего в воздух от освещения, электрических приборов (см. рис. 5.1, з), технологического оборудования, коммуникаций, материалов, людей и других источников теплоты отдельно в рабочее и нерабочее время.

Учитывая все вышеперечисленные слагаемые, **расчетный расход теплоты**, кВт, на **отопление помещения или здания при учете возможных тепловыделений** можно записать в виде

$$Q_{T,от} = \left[\sum k_{Hi} F_{Hi} (1 + \beta) + (L_{инф} + \bar{\tau}L_{вент}) c_B \rho_B + \alpha_K (1 - \theta_{пов}) \sum F_{об} \right] \times (t_B - t_{н.р.х}) \cdot 10^{-3} - \sum Q_{T,вн}, \tag{5.1}$$

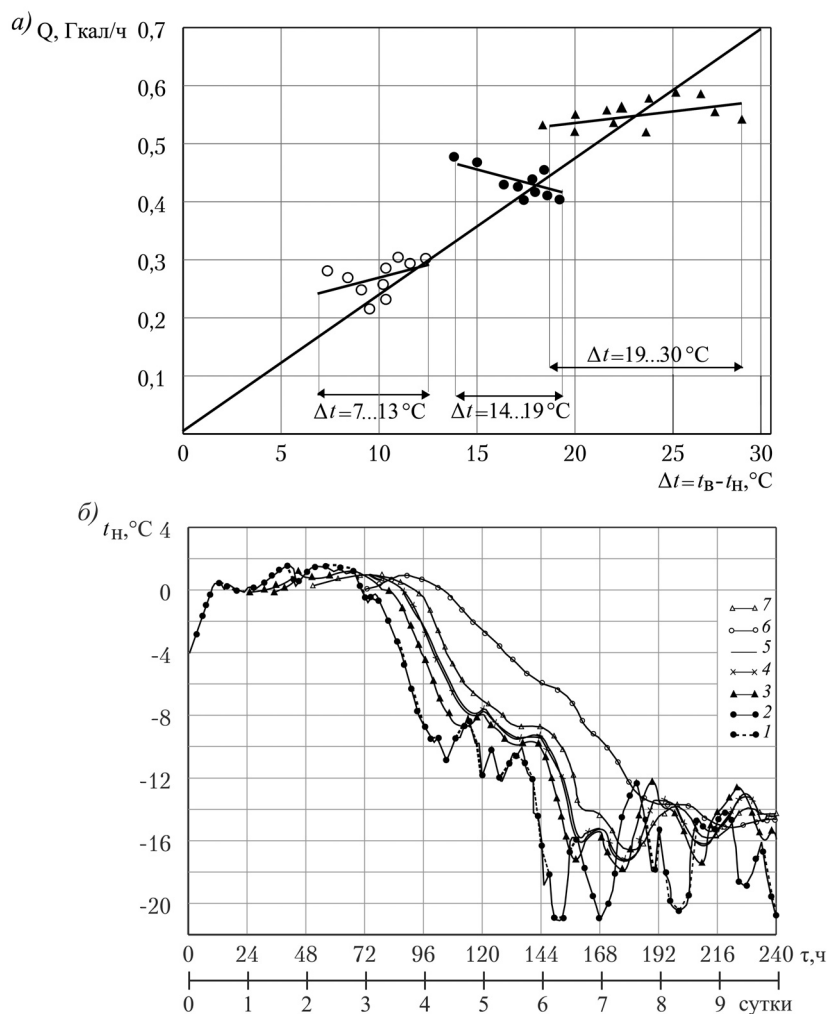


Рис. 5.2. Зависимости:

а — фактически потребленной теплоты на отопление и естественную вентиляцию (проветривание) и инфильтрацию жилого здания при разных внешних условиях: в интервале $\Delta t = t_B - t_H = 7...13 ^\circ\text{C}$ в октябре 2003 г. (○); в интервале $\Delta t = t_B - t_H = 14...19 ^\circ\text{C}$ в ноябре 2003 г. (●); в интервале $\Delta t = t_B - t_H = 19...30 ^\circ\text{C}$ в январе 2004 г. (▲);

б — изменения эквивалентной температуры для расчета тепловых потерь через наружные ограждения здания разной массивности:

1, 2 — температура наружного воздуха по замерам с интервалом $\Delta\tau$, равным 1 и 3 ч; 3 — теплотери через газобетонную панель толщиной $\delta = 0,26$ м, $\rho = 600$ кг/м³, $R = \delta/\lambda = 1,28$ (м²·°C)/Вт, $S_{24} = 3,4$ Вт/(м²·°C), $D = RS_{24} = 4,3$, $T = c\rho\delta/(3600\alpha_k) = 18$ ч = 0,75 сут; 4, 5 — теплотери через керамзитобетонную панель толщиной $\delta = 0,3$ м, $\rho = 1000$ кг/м³, $R = \delta/\lambda = 1,01$ (м²·°C)/Вт, $S_{24} = 3,9$ Вт/(м²·°C), $D = RS_{24} = 3,9$, $T = c\rho\delta/(3600\alpha_k) = 35$ ч = 1,5 сут с интервалом $\Delta\tau$, равным 1 и 3 ч; 6 — теплотери через кирпичную стену толщиной $\delta = 0,38$ м, $\rho = 1800$ кг/м³, $R = \delta/\lambda = 0,79$ (м²·°C)/Вт, $S_{24} = 7,2$ Вт/(м²·°C), $D = RS_{24} = 5,7$, $T = c\rho\delta/(3600\alpha_k) = 84$ ч = 2,5 сут; 7 — то же, толщиной $\delta = 0,64$ м, $\rho = 1800$ кг/м³, $R = \delta/\lambda = 1,19$ (м²·°C)/Вт, $S_{24} = 7,8$ Вт/(м²·°C), $D = RS_{24} = 9,3$, $T = c\rho\delta/(3600\alpha_k) = 140$ ч = 6 сут при $\Delta\tau = 3$ ч. Постоянная времени экспоненциального изменения температуры ограждения T вычислена при $\alpha_k = 1,66\Delta t_{в. пов}^{1/5} \approx 2$ Вт/(м²·°C) для вертикальной поверхности по данным [5.5]

где k_{Hi} — коэффициент теплопередачи наружного ограждения (стены, светопроема, кровли и др.), Вт/(м²·°С), определяемый в зависимости от комплекса ГСОП (градусо-суток отопительного периода) $(t_B - t_{н. ср. от. пер})\tau_{от. пер}$, (°С · сут)/год; F_{Hi} — площадь, м², i -го наружного ограждения; β — добавки к основным теплопотерям ограждения, учитывающие его ориентацию по странам света и число наружных стен в помещении; $L_{инф}$ — секундный расход наружного воздуха, инфильтрирующего через неплотности светопроемов, м³/с; $L_{вент}$ — секундный расход наружного воздуха, поступающего в помещение при периодическом проветривании, м³/с; $\bar{\tau}$ — относительное время проветривания, доля часа; c_B — массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); ρ_B — плотность воздуха, кг/м³; $\theta_{пов} = \Delta t_{в. пов}(\tau)/\Delta t_B$ — относительное изменение температуры поверхности оборудования, определяемое по методике А. В. Лыкова в зависимости от критериального комплекса $M = \text{Bi}^2 \text{Fo} = \alpha_K^2 a_M \tau / \lambda_M^2 = \alpha_K^2 \tau / (c_M \rho_M \lambda_M)$ (см. рис. 8.21); $\Sigma Q_{т. вн}$ — сумма внутренних тепловыделений в помещении в рабочее время, кВт; $\alpha_{в. пов} = \alpha_K + \alpha_{л}$ — суммарный коэффициент конвективной и лучистой теплоотдачи на поверхности внесенного в помещение холодного оборудования, Вт/(м²·°С), $\alpha_{л} \approx 5$ Вт/(м²·°С).

В частности, для вертикальной охлажденной поверхности с учетом свободной и вынужденной конвекции, по данным В. Н. Богословского [5.5], справедлива зависимость

$$\alpha_K = 1,66\sqrt[3]{\Delta t_{в. пов. усл}} = 1,66\sqrt[3]{\Delta t_{в. пов} + \Delta t_{v_B}} = 1,66\sqrt[3]{\Delta t_{в. пов} + 60v_B^2/h}, \quad (5.2)$$

по которой при скорости воздуха вблизи поверхности $v_B = 0,2$ м/с, высоте *холодного* оборудования $h = 2$ м и разности температур $\Delta t_{в. пов} = t_B - t_{в. пов} = 30$ °С, $\alpha_K = 1,66\sqrt[3]{30 + 60 \cdot 0,2^2/2} = 9,3$ Вт/(м²·°С).

Наиболее сложно в расчетах по формуле (5.1) определяют *расходы инфильтрирующего* $L_{инф}$ и *вентиляционного* $L_{вент}$ *воздуха*. Они зависят от общих решений системы вентиляции (естественная, механическая приточная или вытяжная, приточно-вытяжная), герметичности светопроемов и степени их открытия, этажности здания и конкретного этажа, текущих параметров внешней среды: температуры t_n , скорости ветра v_n , его направления по отношению к рассматриваемому проему и других факторов. По методике В. П. Титова [5.52, 5.3], инфильтрационный расход воздуха через неплотности старых негерметичных светопроемов и в предположении герметичного помещения можно вычислять по формуле

$$L_{инф} = 0,47\rho_n k_B F_{ок} (h_{ок} \Delta\rho_B)^{2/3} R_{инф}^{-0,5}, \quad (5.3)$$

где ρ_n — плотность воздуха при температуре t_n , $\rho_n = 353/(273 + t_n)$, кг/м³; $\Delta\rho_B = 0,005\Delta t$ — разность плотности наружного и внутреннего воздуха, кг/м³, при разности температур $\Delta t = t_B - t_n$, °С; $h_{ок}$ — высота окна, м; k_B — коэффициент, показывающий, во сколько раз изменится расход инфильтрирующего воздуха под влиянием ветра или дисбаланса расходов по сравнению с инфильтрацией при их отсутствии; приближенно $k_B \approx 1 + 0,33P_B$ где P_B — относительное давление ветра, определяемое по формуле:

$$\bar{P}_B = 0,61v_n^2 \rho_n / (h_{ок} \Delta\rho_B g). \quad (5.4)$$

Сопrotивление воздухопроницанию $R_{инф}$, (м²·ч·Па²/3)/кг для старых конструкций окон определяют по табл. 3.2 [5.3] в зависимости от типа остекления, числа уплотняемых притворов и типа прокладок в них (шнур, губчатая резина, пенополиуретан) и составляет от 0,54 до 2,57 м²·ч·Па²/3/кг. На основании работ В. П. Титова [5.3] представлен график зависимости инфильтрации через окна от температуры и скорости ветра (рис. 5.3). Для современных закрытых герметичных окон инфильтрующий расход $L_{инф} = 0$.

При наличии естественной вытяжной вентиляции расход $L_{вент}$ определяют по данным п. 10.2.5 [5.49] или другим источникам в зависимости от конструкции вытяжной системы, наружной температуры и скорости ветра на отметке расположения вытяжного оголовка (зонта, дефлектора и т.п.). Как показал опыт эксплуатации зданий, особенно в районах Крайнего Севера, наиболее неблагоприятный температурный режим имеет место не при минимальных температурах наружного воздуха, а при более умеренных, но сопровождающихся большими скоростями ветра [5.7–5.9, 5.38].

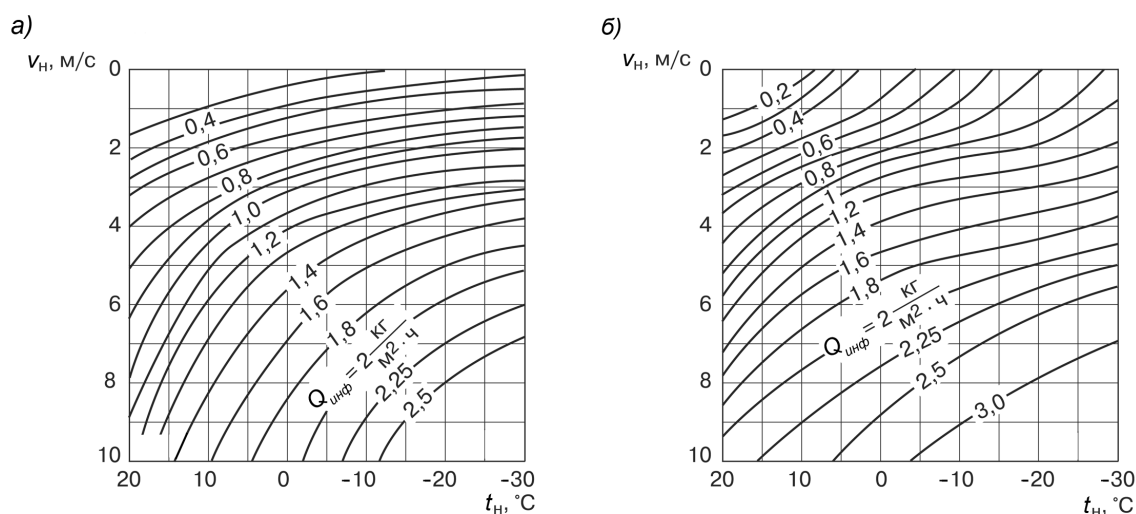


Рис. 5.3. Номограмма для приближенного определения удельного массового расхода инфильтрующего через светопроемы наружного воздуха ($g_{\text{инф}}$, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$), при одностороннем остеклении в герметичном помещении в зависимости от сочетания температуры наружного воздуха t_n и скорости ветра v_n :
 а — при высоте окна $h_{\text{ок}} = 2$ м; б — при высоте окна $h_{\text{ок}} = 4$ м

Рассмотрим учет влияния наружной температуры и скорости ветра на теплопотери. обстоятельный анализ добавочных теплопотерь в зависимости от скорости ветра представлен в работе [5.32], где изложены основные методики таких расчетов. В первую группу отнесены методики, изложенные в работах Б. М. Красовского, А. П. Рохлецова, Г. Н. Устинова и др., в которых добавочные теплопотери выражаются в процентах от основных и вычисляются по расчетной скорости ветра без учета температуры наружного воздуха. Однако практика показала, что одна и та же скорость ветра оказывает различное влияние на тепловой режим здания, поэтому такая методика не может обеспечить требуемой точности расчета дополнительных теплопотерь. Ко второй группе относят методики, в которых определяют дополнительное количество теплоты, необходимой для подогрева воздуха, проникающего в помещение через окна. К третьей группе относят методики, по которым общие теплопотери зданий вычисляют при помощи так называемых эквивалентных температур [5.7–5.9, 5.38]. Эти методики наиболее просты и могут обеспечить требуемую точность расчетов теплопотерь зданий в том случае, если принципы, заложенные в определение эквивалентных температур, надежно отражают теплообмен здания с внешней средой.

К четвертой группе относят методики, в которых учитывают корреляционную связь между усредненной скоростью ветра и температурой наружного воздуха. В частности, отмечается отрицательная корреляция между этими метеовеличинами для районов Европейской территории России от Оренбурга и Кирова до Калуги и Вологды [5.42, 5.41]. Например, А. Н. Сканава на основе анализа данных за 23 зимних сезона предложил зависимость скорости ветра от температуры для окрестностей Москвы в виде: $v_n = 5,37 + 0,092t_n$ (линия 4 на рис. 5.4, а). К пятой группе можно отнести методику, учитывающую зависимость скорости воздуха в щели окна от скорости ветра, она разработана ГГО им. А. И. Воейкова [5.2] и описана далее.

Как показал анализ, выполненный в работе [5.32], процентных надбавок к основным теплопотерям в зависимости от средней скорости ветра недостаточно. Важную роль играют площадь остекления, качество уплотнения, направление и скорость ветра. Для учета всех этих факторов предложена номограмма для определения эквивалентной температуры при использовании старых светопроемов (рис. 5.4, а). Кроме того, исследованы предельные сочетания комплекса «температура наружного воздуха — скорость ветра», при которых система отопления обеспечивает расчетную температуру внутреннего воздуха (рис. 5.4, б).

Оригинальную методику учета кондуктивно-инфильтрационных теплопотерь разработали в ГГО им. А. И. Воейкова Л. Е. Анапольская и Л. С. Гандин [5.2]. Не приводя здесь все

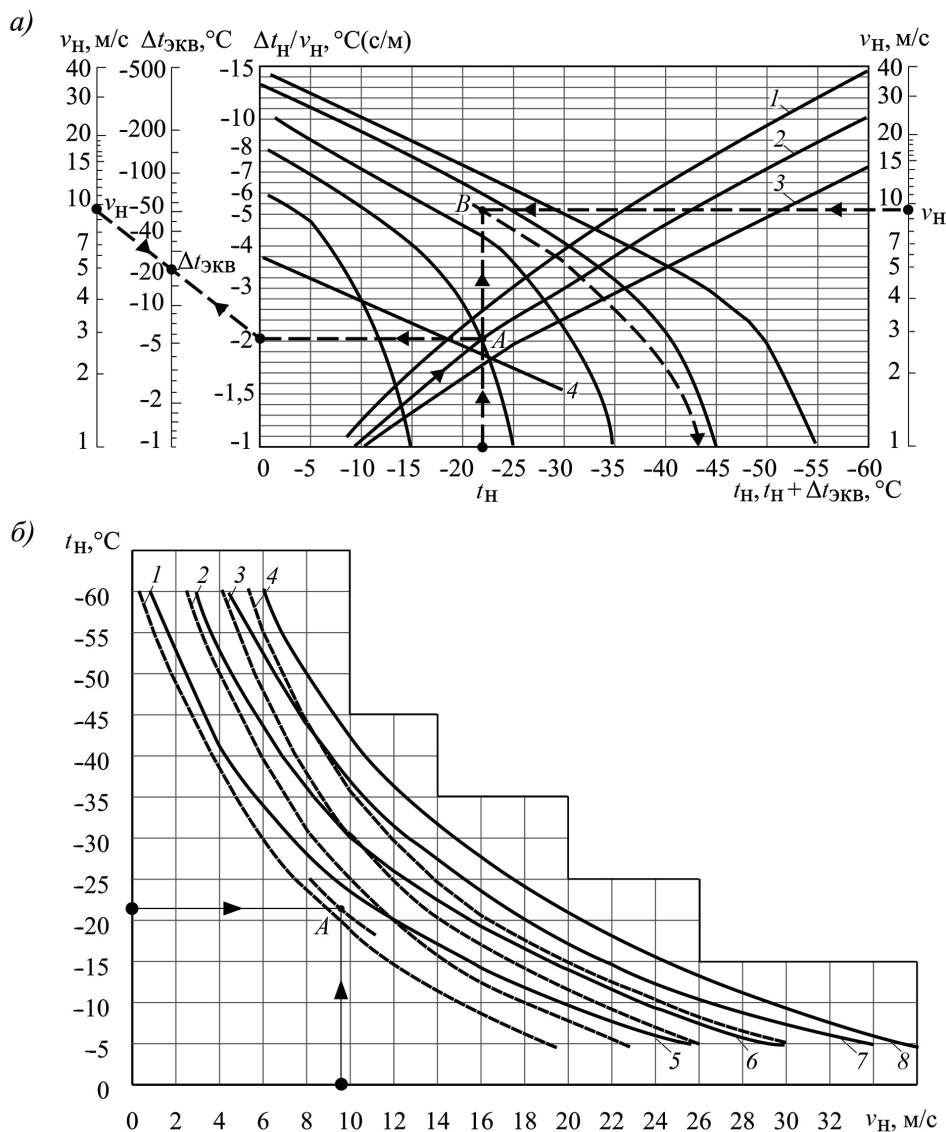


Рис. 5.4.

a — Номограмма для определения поправки $\Delta t_{н. экв}$ к температуре наружного воздуха, учитывающей скорость ветра и относительную площадь остекления:

1 — $f_{ост} = 0,4$; 2 — $f_{ост} = 0,3$; 3 — $f_{ост} = 0,2$ по данным работы [5.7], 4 — зависимость усредненной скорости ветра от температуры наружного воздуха для окрестностей Москвы по данным А. Н. Сканави; наклонные линии, направленные слева сверху вниз, соответствуют методике ГГО им. А. И. Воейкова [5.2]; ключ: при наружной температуре $t_H = -22$ °С, скорости ветра $v_H = 9,5$ м/с и относительной площади остекления $f_{ост} = 0,3$ величина $\Delta t_H/v_H = -2,05$ (°С·с/м), поправка $\Delta t_{н. экв} = (-2,05) \cdot 9,5 = -19,5$ °С. Результирующая эквивалентная температура наружного воздуха с учетом влияния ветра равна: $t_{н. экв} = t_H + \Delta t_{н. экв} = -22 + (-19,5) = -41,5$ °С; по методике ГГО им. А. И. Воейкова при тех же условиях $t_{н. экв} = t_H + \Delta t_{н. экв} = -43$ °С, откуда $\Delta t_{н. экв} = -21$ °С (как показал этот расчет, результаты определения эквивалентной температуры по обоим методикам оказались близкими);

б — кривые сочетания предельных значений температуры наружного воздуха и скорости ветра, при которых система отопления здания обеспечивает расчетную температуру внутреннего воздуха; обозначения линий при относительной площади остекления 30 %:

1 — $t_H = -30$ °С, 2 — $t_H = -40$ °С, 3 — $t_H = -50$ °С, 4 — $t_H = -60$ °С; при относительной площади остекления 20%: 5 — $t_H = -30$ °С, 6 — $t_H = -40$ °С, 7 — $t_H = -50$ °С, 8 — $t_H = -60$ °С (по данным статьи [5.32] для районов Сибири и Крайнего Севера); ключ: при относительной площади остекления 30%, температуре наружного воздуха $t_H = -22$ °С и скорости ветра $v_H = 9,5$ м/с, согласно построениям на графике для точки А предельная температура наружного воздуха, при которой будет обеспечена расчетная температура воздуха в помещении $t_H = -33$ °С; в этой точке отношение приращений $\Delta t_H/v_H = -5/2 = -2,5$ °С (с/м), что близко данным рис. 5.4, *a*

выкладки, описывающие инфильтрацию через неплотности, отметим главный результат исследований — авторы предложили удельную характеристику воздухопроницаемости старых окон:

$$g = 0,5\rho_{\text{в}}c_{\text{в}}R_{\text{ок}}\bar{u}/v_{\text{н}} = 0,225 \text{ с/м}, \quad (5.5)$$

где \bar{u} — скорость воздуха, отнесенная к одному погонному метру щели окна; связь этой величины со скоростью ветра описывается зависимостью: $\bar{u} = 1,1 \cdot 10^{-3}v_{\text{н}}$. По этой методике и приводимым таблицам автором (А. С.) построена дополнительная номограмма (рис. 5.4, а) в виде пучка линий, идущих из левого верхнего угла вниз и позволяющих по сочетанию температуры и скорости ветра вычислить эквивалентную температуру. Сравнение расчетов по этой и ранее описанной методикам показало их хорошее совпадение.

При расчете теплотерь здания В. М. Ильинский [5.25] предложил одновременно учитывать температуру наружного воздуха и скорость ветра, которая влияет на воздухопроницаемость строительных конструкций стен по предложенной им формуле:

$$t_{\text{н. р. х}} = t_{\text{н}}(1 + 0,01v_{\text{н}}^2R_{\text{ст}}R_{\text{у}}) = t_{\text{н}}(1 + 0,0055v_{\text{н}}^2), \quad (5.6)$$

что соответствует термическому сопротивлению стены $R_{\text{ст}} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ и его коэффициенту воздухопроницаемости $R_{\text{у}} = 1,8 \text{ (мм. в. ст.} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч)/кг}$. Однако с этой методикой нельзя полностью согласиться, потому что воздухопроницаемость стен существенно ниже, чем *старых* окон, и поэтому несущественна.

5.1.3. Инфильтрационные теплотери и режимы работы естественной вытяжной вентиляции

В системах естественной вытяжной вентиляции побудителем движения (вытяжки) воздуха являются: *природные гравитационные силы* из-за разности плотности наружного и внутреннего воздуха:

$$\Delta P_{\text{грав}} = \Delta h g [\rho_{\text{н}}(t_{\text{н}}) - \rho_{\text{в}}(t_{\text{в}})] \quad (5.7)$$

и *природные силы — перепады давления*, вызванные действием ветра:

$$\Delta P_{\text{ветра}} = (c_{\text{н}} - c_{\text{з}})v_{\text{н}}^2\rho_{\text{н}}/2, \quad (5.8)$$

где Δh — разница отметок входа (из атмосферы в помещение) и выхода удаляемого воздуха (в атмосферу); $c_{\text{н}}$, $c_{\text{з}}$ — аэродинамические коэффициенты наветренной и заветренной частей оголовка вытяжного устройства (шахты, дефлектора).

Эффект вытяжки в таких системах зависит от сочетания текущих температур наружного воздуха $t_{\text{н}}$, его плотности $\rho_{\text{н}} = 353/(273 + t_{\text{н}})$, скорости ветра $v_{\text{н}}$ и его направления. По действующим нормам расчет такой системы производят при $t_{\text{н}} = 5 \text{ °C}$ и безветрии; при более низких температурах $t_{\text{н}}$ и большей скорости ветра эффект вытяжки заметно усиливается, т. е. в вытяжной шахте увеличивается скорость $v_{\text{в}}$ и расход $L_{\text{в}}$ воздуха, а эффект разряжения растет. Вытяжные системы с естественной вытяжкой в многоэтажных зданиях имеют специфическую конструкцию (рис. 5.5).

С точки зрения топологии такую сеть можно представить согласно [5.49, гл. 10], коллектором постоянного сечения с переменным расходом и разноуровневыми ответвлениями при разных Δh и поэтому разным перепадом гравитационных давлений. При одинаковой длине и сечении таких ответвлений эффект вытяжки на разных этажах оказывается разным: большим на нижних этажах и меньшим — на верхних, где рекомендуют установку местных вытяжных (кухонных) вентиляторов. В то же время климатологические данные указывают, что с понижением наружной температуры скорость ветра снижается. Расчетное сопротивление сборного коллектора и одного из ответвлений с i -го этажа увязывается с текущим ветровым давлением в шахте и гравитационным давлением на этом этаже уравнением

$$\sum_i (Rl + Z)_{\text{кол}} + (Rl_i + Z) - \Delta P_{\text{грав.}i} - \Delta P_{\text{ветр}} = 0. \quad (5.9)$$

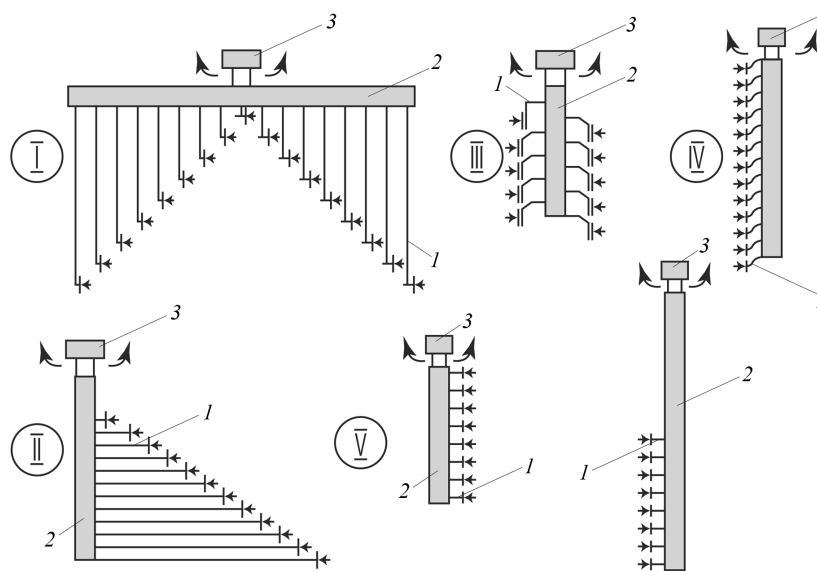


Рис. 5.5. Разрез-схема естественной вытяжной системы вентиляции многоэтажного здания:
 1 — ответвление; 2 — сборный канал (коллектор); 3 — вытяжной оголовок (наружная шахта, зонд, дефлектор).

Общее сопротивление такой «разновысокой» вытяжной сети (со многими параллельными ответвлениями на разных этажах при разных текущих перепадах давлений в них, наличии отдельных местных вентиляторов и с общим коллектором — хотя и постоянного сечения, но при разных расходах) описать без использования средств вычислительной техники невозможно. К тому же в разных помещениях и квартирах могут быть разные герметичность, давление и условия удаления воздуха; при хорошей герметизации таких квартир условия вытяжки оказываются минимальными.

Режимы вентиляционных сетей естественной вытяжки для многоэтажных зданий исследован на моделях и описан В. Е. Константиновой и К. С. Светловым [5.28]. О сложности такого расчета говорит тот факт, что для 16-этажного здания требуется получить решение системы взаимосвязанных уравнений в количестве 20–30 с показателями степени 2 и 1,5. Естественно, что подобные аналитические расчеты в практике проектирования не применяют, а расчет ведут приближенно для наружных условий, принимаемых за расчетные.

Цель описываемой работы — исследование вытяжных систем с разными схемами вентиляционных каналов (рис. 5.6). Здесь же представлены и результаты этих исследований — расходы воздуха на разных этажах в расчетных условиях, а также расходы при нарушении устойчивости системы (при открытых форточках). Устройства вытяжных каналов по схемам I...V, показанным на рис. 5.6, соответствуют следующим случаям: схема I — система вытяжной вентиляции с отдельными каналами, объединяемыми на чердаке в сборную шахту; схемы II, III и IV — это вытяжные системы с каналами и перепусками через два и пять этажей; на схеме V показана одноканальная вытяжная система с боковыми отверстиями переменного сечения на каждом этаже, рассчитанная на равномерную вытяжку из всех этажей.

В результате исследований получены закономерности (эпюры) расходов удаляемого воздуха на разных этажах при обеспечении устойчивости системы (закрытых форточках), нарушении устойчивости системы (открытых на некоторых этажах форточках) и разных схемах каналов. Более подробно с результатами проведенных исследований можно ознакомиться в упомянутой статье авторов.

Естественная вытяжная вентиляция многоэтажных зданий в зависимости от геометрических размеров каналов исследована Э. Я. Гинцбургом [5.11]; полученные им зависимости показаны на рис. 5.6, *г*, *д*. В частности, им установлено, что производительность вытяжной системы естественной вентиляции монотонно возрастает при увеличении диаметра магистрального канала независимо от того, наблюдалось ли в системе опрокидывание тяги или

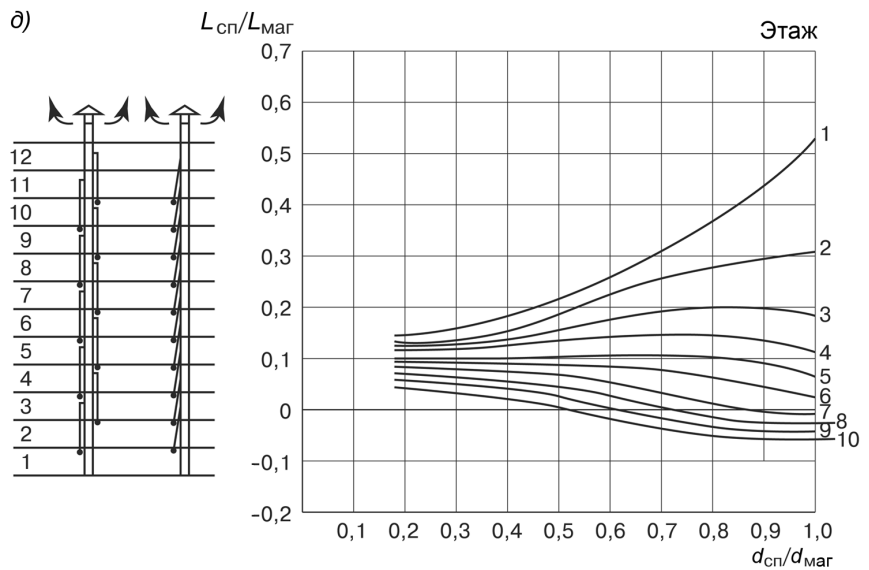
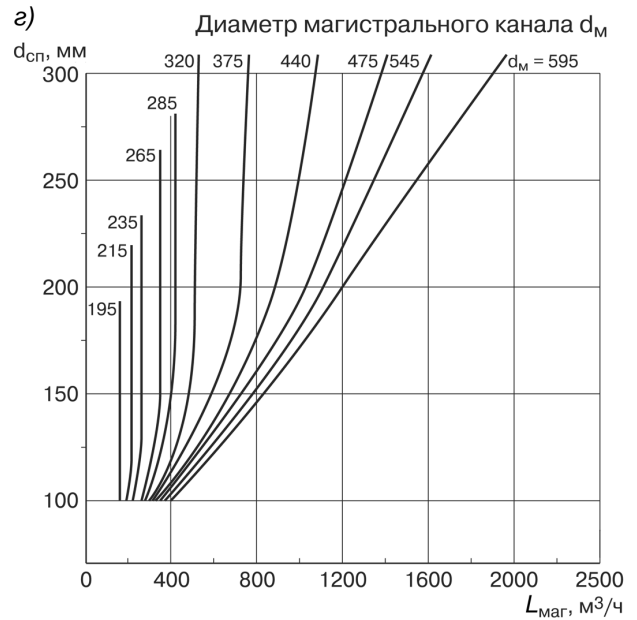
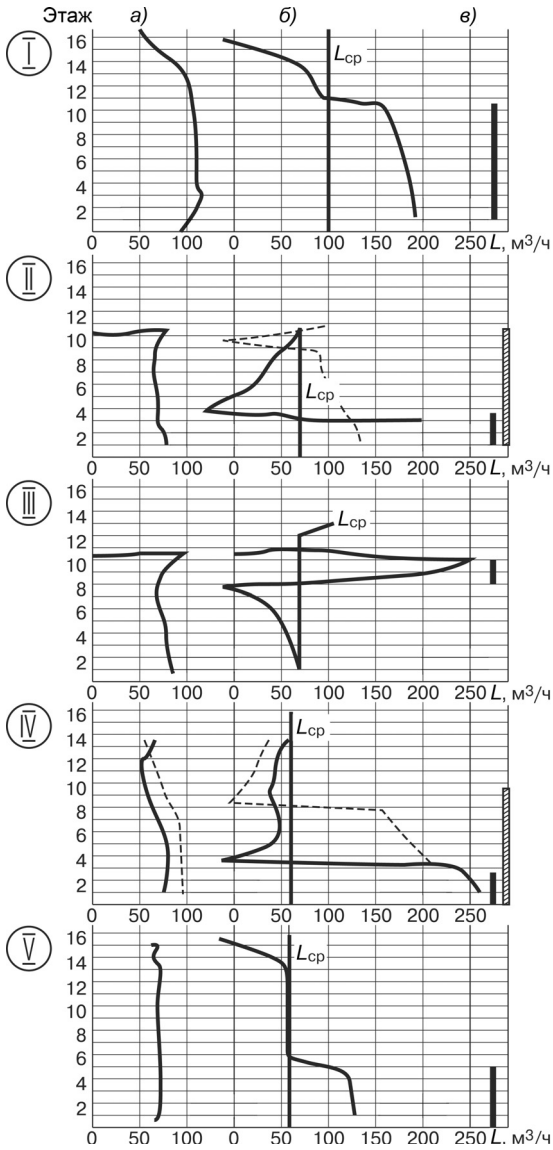


Рис. 5.6. Основные графические зависимости, характеризующие результаты исследования вытяжных систем естественной вентиляции 16-этажного здания с разными схемами устройства вентиляционных каналов:

a — расходы воздуха в расчетных условиях, $\text{м}^3/\text{ч}$ ($t_{\text{н}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_{\text{н}} = 0 \text{ м/с}$, $t_{\text{в}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$); *б* — расходы воздуха при нарушении устойчивости вытяжной системы при открытии форточек на отдельных этажах и безветрии; *в* — условия, при которых нарушается устойчивость системы (этажи с открытыми форточками затемнены): при схеме I скорость в магистрали $v_{\text{м}} = 0,9 \text{ м/с}$, скорость в ответвлении $v_{\text{о}} = 0,9 \text{ м/с}$; при схеме II $v_{\text{м}} = 2 \text{ м/с}$, $v_{\text{о}} = 0,9 \dots 1,3 \text{ м/с}$; при схеме III $v_{\text{м}} = 2 \text{ м/с}$, $v_{\text{о}} = 0,9 \text{ м/с}$; при схеме IV $v_{\text{м}} = 1,4 \dots 2,1 \text{ м/с}$, $v_{\text{о}} = 0,9 \dots 1,1 \text{ м/с}$; при схеме V $v_{\text{м}} = 1,5 \text{ м/с}$, $v_{\text{о}} = 2,4 \dots 4,6 \text{ м/с}$; *г* — зависимость производительности вытяжной системы от диаметров магистрального канала $d_{\text{маг}}$ и ответвлений-спутников $d_{\text{сп}}$; *д* — зависимость неравномерности расходов вытяжного воздуха на разных этажах $L_{\text{сп}}/L_{\text{м}}$ от соотношения диаметров канала-спутника и магистрали $d_{\text{сп}}/d_{\text{маг}}$ для 12-этажного подъезда по данным Э. Я. Гинцбурга

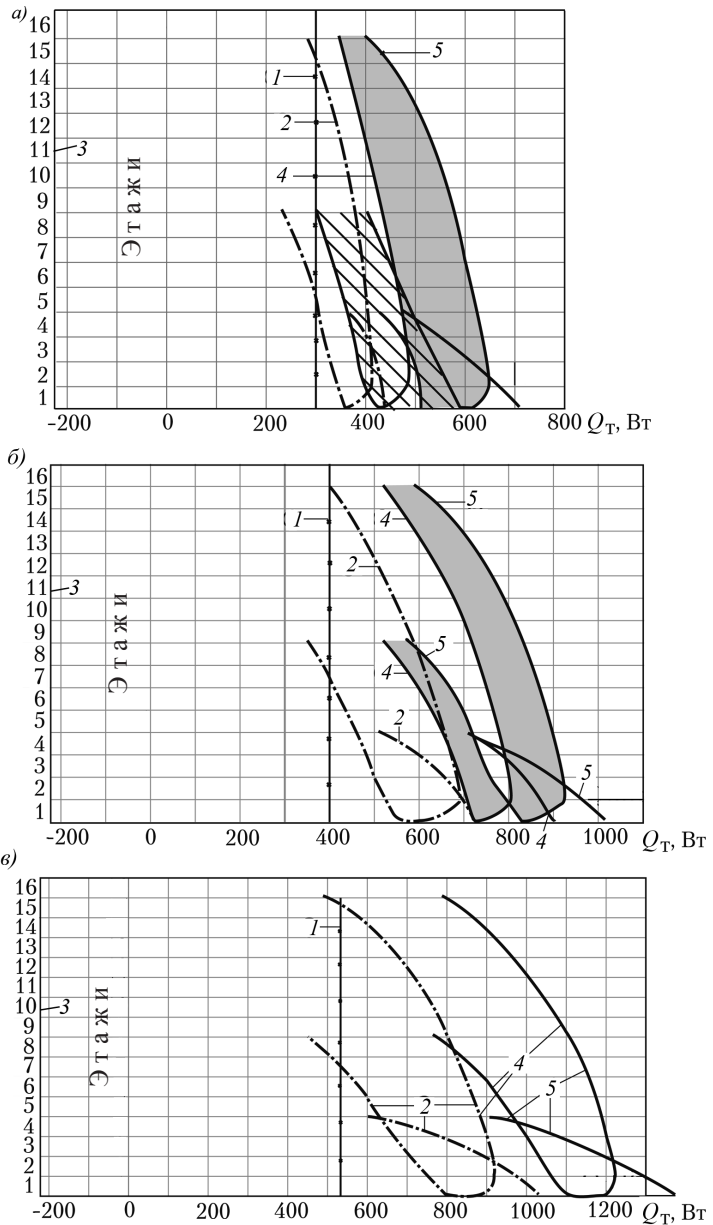


Рис. 5.7. Переменные тепловые балансы жилых помещений 5-, 9- и 16-этажных зданий при разных наружных температурах; затемненная область соответствует перерасходу теплоты при его отпуске в соответствии с линейной зависимостью:

a — $t_{\text{н}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$; *б* — $t_{\text{н}} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$; *в* — при наружной температуре $t_{\text{н}} = -26 \text{ }^\circ\text{C}$;
 1 — основные теплотери через наружные ограждения; 2 — потери теплоты на инфильтрацию воздуха через светопроемы; 3 — бытовые тепловыделения; 4 — суммарное теплотребление жилых помещений разных этажей; 5 — отпуск теплоты в соответствии с линейной зависимостью от разности температур

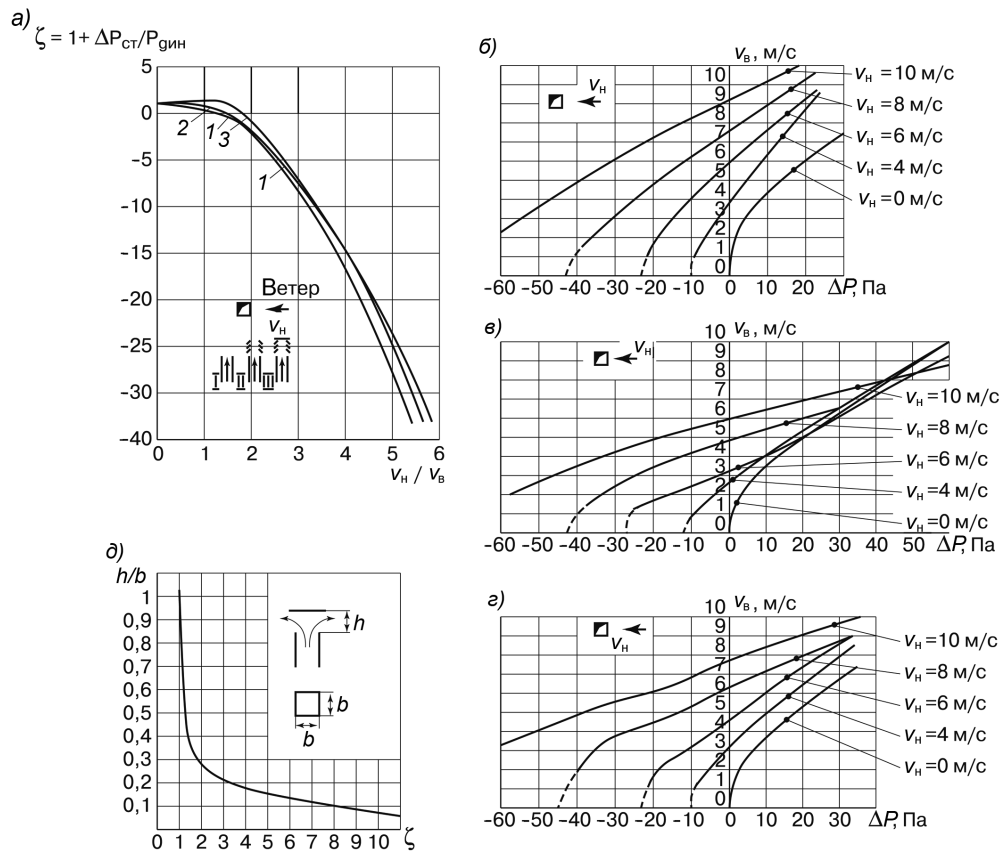


Рис. 5.8. Аэродинамические характеристики вытяжных шахт разных конструкций:

а — зависимость коэффициента местного сопротивления ζ и отношения скоростей ветра и воздуха в шахте v_H/v_B от конструкции вытяжной шахты:

1 — без оголовка; 2 — с решеткой без оголовка; 3 — с решеткой и оголовком;

б—г — аэродинамические характеристики шахт как зависимости скорости воздуха и разрежения в горловине шахты от скорости ветра v_H : б — без зонта;

в — с жалюзийной насадкой и зонтом;

г — с упрощенным дефлектором;

д — зависимость коэффициента сопротивления ζ от расстояния между зонтом и шахтой h/b при отсутствии обдува наружным воздухом

нет. Как видно из графика рис. 5.6, д, при значениях отношения диаметров $d_{ст}/d_M > 0,45$ в верхних этажах наблюдалось опрокидывание тяги. В схеме с перепуском воздуха через четыре этажа повышается устойчивость вытяжки по сравнению с перепуском через два этажа.

Исследования **воздушно-теплового режима жилых зданий повышенной этажности** выполнены В. Е. Константиновой [5.29]. В экспериментах получено, что реальное теплотребление большинства зданий, в том числе и жилых зданий повышенной этажности, не пропорционально разности температур внутреннего и наружного воздуха. Это связано с тем, что помимо теплопередачи через ограждения в тепловой баланс жилых зданий входят значительные затраты теплоты на подогрев инфильтрирующегося воздуха и бытовые тепловыделения, которые не подчиняются этой зависимости. В качестве примера на рис. 5.7 показано переменное теплотребление жилых помещений на разных этажах многоэтажных зданий (5, 9 и 16 этажей) при 40%-ном остеклении.

Полученные данные показывают, что при относительно высоких температурах наружного воздуха и отпуске теплоты по линейной зависимости возникает перерасход теплоты, а поэтому значительны резервы ее экономии. Эти резервы можно использовать для корректировки графика отпуска теплоты при центральном качественном регулировании за счет снижения температуры подаваемой воды (см. далее рис. 5.17, а, б). Полученные зависимости позволяют одновременно уменьшить перегрев помещений и обеспечить заметную экономию теплоты.

Производительность вытяжной системы, иначе скорость воздуха в вытяжной шахте (v_v) зависят также от конструкции такой шахты, скорости ветра (v_n), его направления и наружной температуры (t_n). Комплекс зависимостей, характеризующих *работу* вытяжных шахт и аналогично дефлекторов, приводится по данным А.И. Шуцкого [5.57] на рис. 5.8. Исследования проводили на моделях разных шахт в изотермических условиях. Отрицательное давление в шахте (рис. 5.8, б, в, г) соответствует разрежению в ней, возникающему при большой скорости ветра. Приводимые зависимости удобны для анализа влияния ветровых воздействий на режим естественной вытяжки в изотермических условиях, т.е. при близких температурах наружного и внутреннего воздуха (теплый период года).

5.1.4. Удельный расход теплоты на отопление здания

Расход теплоты, отнесенный к 1 м³ объема здания (по наружным обмерам) и к 1 °С разности температур, называют **удельным** и сравнивают его с **нормируемым удельным расходом теплоты** $q_{от V}$, кДж/(м³·°С·сут) или Вт/(м³·°С), по табл. 8 и 9 СНиП [5.48], отнесенным к единице объема здания и рассчитанным в соответствии с современными требованиями теплозащиты зданий по формуле

$$q_{от V} = \frac{Q_{т.от}}{V_{зд}(t_{в.ср} - t_{н.р.о})} < (q_{от V})_{норм}, \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С}). \quad (5.10)$$

Зависимость удельного нормируемого расхода теплоты на отопление от типа и этажности зданий разного назначения показана на рис. 5.9, а.

Расчетный показатель компактности жилых зданий по п. 5.15 [5.48], показанный на рис. 5.9, а, б есть отношение общей площади внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций к отапливаемому объему здания $\Sigma F_n/V_{зд}$, м⁻¹. Величину, обратную показателю компактности, называют определяющим размером помещения или здания $l_{зд}$ и находят через его длину l , ширину b и высоту h по общей формуле

$$l_{зд} = (1/l + 1/b + 1/h)^{-1/2}. \quad (5.11)$$

Если размеры помещения или здания таковы, что $l \gg h$ и $b \gg h$, то в этом случае $l_{зд} \approx 0,5h$, где h — высота помещения. Для сравнения с отечественными нормативами на рис. 5.9, б приводится график удельной тепловой характеристики на отопление здания в зависимости от показателя компактности по данным [5.6] для таких стран, как Австрия, Великобритания, Финляндия, Швейцария, Швеция.

Удельный комплексный показатель затрат теплоты на отопление здания (УКПТ) предложено ввести в работе [5.43]. Он учитывает несколько составляющих затрат теплоты на отопление и включает частные удельные показатели: основные теплопотери, инфильтрацию, бытовые и радиационные теплопоступления, отнесенные к 1 м³ объема здания и к 1 °С разности температур.

Поясним методику сравнительной оценки удельного расхода теплоты на отопление зданий в разном климате и в разных странах с зарубежными данными о суммарном потреблении тепловой и электрической энергии всеми инженерными системами здания [5.60]: отопления, охлаждения, вентиляции, освещения, связи, лифтами и др.

Пример 5.1. Сравнить удельный нормируемый по СНиП [5.48] $q_{от F} = 27 \cdot 2,65 = 72$ кДж/(м²·°С·сут) расход теплоты на отопление административного здания в Санкт-Петербурге ($\tau_{от. пер} = 220$ сут, $t_{н. ср. от. пер} = -1,8$ °С) и в г. Сочи ($\tau_{от. пер} = 92$ сут, $t_{н. ср. от. пер} = 6,4$ °С), пересчитанный в кВт·ч/(год·м²), с удельным расходом теплоты на отопление энергоэффективных зданий США и других стран по данным [5.60] и общим удельным расходом энергии этими зданиями.

- Здание в Санкт-Петербурге: $q_{от. год F} = 72 \cdot 220[20 - (-1,8)]/3600 = 97$ кВт·ч/(м²·год);
- здание в г. Сочи: $q_{от. год F} = 72 \cdot 92(20 - 6,4)/3600 = 25$ кВт·ч/(м²·год);
- энергоэффективное здание в г. Чикаго $q_{от. год F} = 40$ кВт·ч/(м²·год); в Атланте — $q_{от. год F} = 43$ кВт·ч/(м²·год); в г. Торонто — $q_{от. год F} = 51$ кВт·ч/(м²·год).