УДК

НОРМИРОВАНИЕ, ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ПОМЕЩЕНИЯМИ И ЗДАНИЕМ

Д.т.н., проф. А.Г. Сотников «АВОК Северо-Запад»

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 $Q_{\text{ТП}} = f(t_{\text{в}} - t_{\text{н}i})$, пренебрегая всеми остальными факторами и сложными климатическими воздействиями.

В свете давно известного и физически понятного разделения теплопотерь на *быстрые* (через окна) и *медленные* (через непрозрачные ограждения), описанного, например, С. А. Чистовичем [32–34] и использованного автором (А. С.) для решения задач отопления. Из этого мы приходим к другому, более тонкому и точному толкованию анализируемого явления. Здесь несомненно имеет место многофакторность и частотная модуляция воздействий, когда годичный ход температуры $t_{\text{н}}(\tau)$ может быть представлен гармоникой и неупорядоченными на разных частотах колебаниями. При таком *беспорядке* и неопределенности ответа отопления (управляемого или неуправляемого) становится понятной стохастичность точек на рис. 1, *а*, *б*, рис. 2, *а* и в других источниках.

Фактически-наблюдаемые теплопотери зданий. На практике неоднократно описывали и фактически наблюдали это многофакторное явление. Как пример этих зависимостей на рис. 1, *а–г* приведены такие опытные данные, многократно отмеченные и зарегистрированные в разные годы в жилых зданиях по показаниям счетчиков-тепломеров по данным и публикациям А. Н. Сканави и Л. М. Махова [26], Ю. А. Матросова, И. Н. Бутовского и Д. Гольдштейна [21], В. А. Пухкала и Л. Р. Крумера [23] и др.

Как общий вывод авторы статей [21, 23, 26 и др.] **подчеркивают** сложный характер зависимости фактически наблюдаемых расходов теплоты на отопление жилых зданий от разности $\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$. Опытные значения образуют на графиках поле точек, поэтому зависимость теплопотерь от разности температур далека от линейной. В частности, **при малых перепадах температур** $t_{\text{в}} - t_{\text{н}} < 15$ °С 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** $t_{\text{в}} - t_{\text{н}} > 25$ °С наблюдается снижение теплопотребления по сравнению с проектными данными из-за срезки температурного графика на источнике теплоты и уменьшения естественного проветривания.

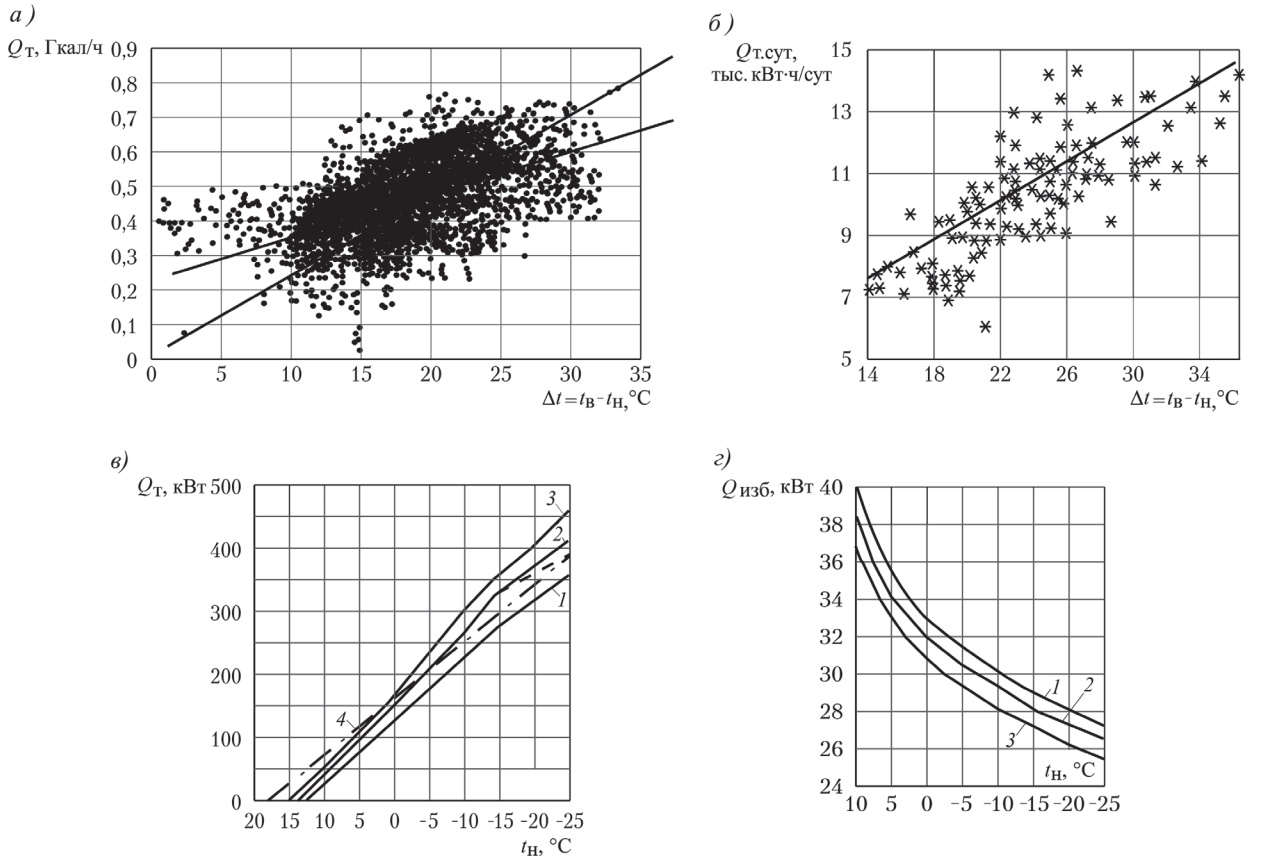

Рис. 1. Зависимость фактически потребленной теплоты на отопление, естественную вентиляцию (проветривание) и инфильтрацию жилых зданий от разности средних температур $t_в - t_{нi}$: *а* — среднечасовые данные расходов теплоты в жилых зданиях, приведенные [23], для семимесячного периода наблюдений за отопительный период 2003/04 гг. в С-Петербурге; усредненная зависимость для относительных теплопотерь, предлагаемая авторами $\bar{Q}_т = 0{,}237 + 0{,}0124\Delta t$; *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 [21]; характеристики здания: число квартир — 256, общая площадь — 15 тыс. м^2, строительный объем примерно 45 тыс. м^3, теплопотребление при $t_н$ = –29°С $Q_т$ = 17410 кВт·ч/сут = 725 кВт, удельная отопительная характеристика $q_{т.\ от}$ = 0,33 Вт/(м^3·°С), что удовлетворяет требованиям СНиП 23-02-2003 [28]; *в* — зависимость проектной (линия *4*) и действительной потребности 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 [21]; *г* — внутренние (бытовые) теплопоступления жилого дома серии П-68/16 в Москве по данным [26] при разных наружных температурах и скорости ветра 0 м/с (линия *1*), 5 м/с (линия *2*), 10 м/с (линия *3*)

Организуемые [11] **измерения температур, расходов и тепловых потоков** проводят в течение отопительного периода, выбрав продолжительность измерений экспресс-методом в две недели, либо методом длительных испытаний в течение трех месяцев. Анализ данных измерений [23], представленных на графике рис. 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 ГОСТ [11].

Составляющие потерь теплоты зданием. К составляющим потерь теплоты относят следующие:

• **основные трансмиссионные теплопотери через наружные ограждающие конструкции здания** с учетом текущей и расчетной температуры наружного воздуха и скорости ветра (т. н. **основные** теплопотери, а также **добавочные** теплопотери). Для задач управления системой отопления

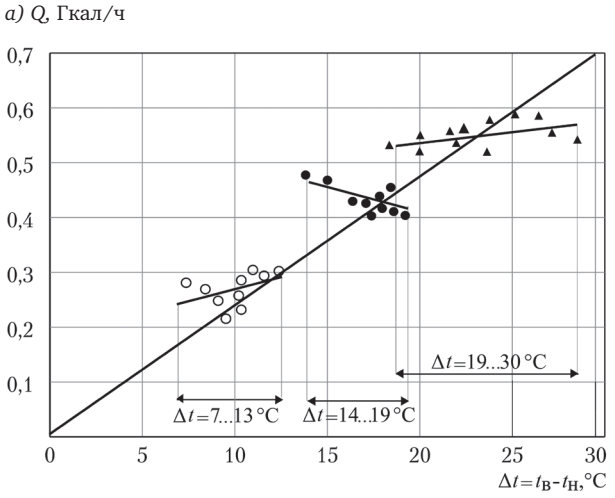

Рис. 2, а. Зависимость фактически потребленной теплоты на отопление и естественную вентиляцию (проветривание) и инфильтрацию жилого здания при разных внешних условиях: в интервале $\Delta t = t_в - t_н = 7 - 13$ °С в октябре 2003 г. (○), в интервале $\Delta t = t_в - t_н = 14 - 19$ °С в ноябре 2003 г. (●),в интервале $\Delta t = t_в - t_н = 19 - 30$ °С в январе 2004 г. (▲)

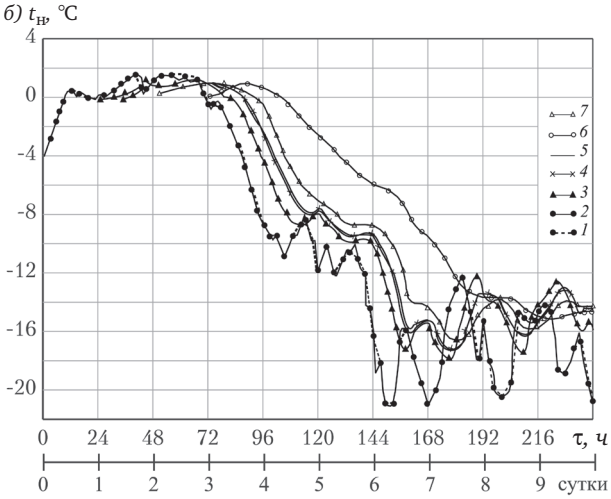

Рис. 2,б. График зависимости изменения медленных тепловых потерь через наружные ограждения здания разной массивности:

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

и выбора наружной расчетной температуры имеет значение, что теплопотери разделяют на «быстрые» (через окна) и «медленные» (через наружные стены, кровлю и др.). Последние определяют инерционность процесса передачи тепла через ограждения, зависящую от их массивности [33]. Как пример такой инерционности на рис. 2, *б* показано изменение медленных тепловых потерь через наружные ограждения разной массивности в течение 10 суток;

• **теплота на нагрев инфильтрирующегося наружного воздуха** (при современных стеклопакетах эта величина пренебрежимо мала);

• **теплота на нагрев наружного воздуха** в режиме периодического проветривания помещений;

• **теплота на нагрев доставляемых в помещение охлажденных материалов**, оборудования и транспортных средств;

• **в ряде случаев теплопотери уменьшают на величину теплового потока**, регулярно или периодически поступающего в воздух от освещения, электрических приборов (см. рис. 1, *г*), технологического оборудования, коммуникаций, материалов, людей и других источников теплоты раздельно 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:

$$Q_{т.\,от} = \Big[\sum k_{н_i} F_{н_i}(1+\beta) + (L_{инф} + \overline{\tau}L_{вент})c_в\rho_в + \\ + \alpha_{в.\,пов}(1-\theta_{пов})\sum F_{об}\Big](t_в - t_{нрх})\cdot 10^{-3} - \\ - \sum Q_{т.\,вн}, \qquad (1)$$

где $k_{н_i}$ — коэффициент теплопередачи наружного ограждения (стены, светопроема, кровли и др.), Вт/(м^2·°С), определяемый в зависимости от комплекса — ГСОП — градусосуток отопительного периода ($t_в$ – – $t_{н.\,ср.\,от.\,пер})\tau_{от.\,пер}$, (°С·сут)/год; $F_{н_i}$ — площадь, м^2, i-того 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, м^3/с; $L_{вент}$ — секундный расход наружного воздуха, поступающего в помещение при периодическом проветривании, м^3/с; $\bar{\tau}$ — относительное время проветривания, доля часа; $c_в$ — массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); $\rho_в$ — плотность воздуха, кг/м^3; $\theta_{пов} = \Delta t_{в.\ пов}(\tau)/\Delta t_в$ — относительное изменение температуры поверхности оборудования, определяемое по методике А. В. Лыкова в зависимости от критериального комплекса $M = Bi^2Fo = \alpha_к^2 a_м \tau / \lambda_м^2 = \alpha_к^2 \tau / (c_м \rho_м \lambda_м)$; $\Sigma Q_{т.вн}$ — сумма внутренних тепловыделений в помещении в рабочее время, кВт; $\alpha_{в.\ пов} = \alpha_к + \alpha_л$ — суммарный коэффициент конвективной и лучистой теплоотдачи на поверхностях внесенного в помещение холодного оборудования, Вт/(м^2·°С).

В частности, для вертикальной охлажденной поверхности с учетом свободной и вынужденной конвекции по данным В. Н. Богословского [4] справедлива зависимость:

$$\alpha_к = 1{,}66\sqrt[3]{\Delta t_{в.\ пов.\ усл}} = 1{,}66\sqrt[3]{\Delta t_{в.\ пов} + \Delta t_{V_в}} =$$

$$= 1{,}66\sqrt[3]{\Delta t_{в.\ пов} + 60 v_в^2 / h}, \qquad (2)$$

по которой при скорости воздуха вблизи поверхности $v_в$ = 0,2 м/с, высоте *холодного* оборудования h = 2 м и разности температур $\Delta t_{в.\ пов} = t_в - t_{в.\ пов}$ = 30 °С

$\alpha_к = 1{,}66\sqrt[3]{30 + 60 \cdot 0{,}2^2 / 2} = 9{,}3$ Вт/(м^2·°С), $\alpha_л \approx 5$ Вт/(м^2·°С).

Наиболее сложно в расчетах по формуле (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 $t_н$, скорости ветра $v_н$ и его направления по отношению к рассматриваемому проему и др. факторов. По методике В. П. Титова [31, 3] инфильтрационный расход воздуха через неплотности *старых* негерметичных светопроемов и в предположении герметичного помещения можно вычислять по формуле:

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

где $\rho_н$ — плотность воздуха при температуре $t_н$, $\rho_н = 353/(273 + t_н)$, кг/м^3; $\Delta\rho_в = 0{,}005\Delta t$ — разность плотности наружного и внутреннего воздуха, кг/м^3 при разности температур $\Delta t = t_в - t_н$, °С; $h_{ок}$ — высота окна, м; $k_в$ — коэффициент, показывающий, во сколько раз изменится расход инфильтрирующего воздуха под влиянием ветра или дисбаланса расходов по сравнению с инфильтрацией при их отсутствии; приближенно $k_в \approx 1 + 0{,}33\bar{P}_в$, где $\bar{P}_в$ — относительное давление ветра, определяемое по формуле:

$$\bar{P}_в = 0{,}61 v_н^2 \rho_н / (h_{ок} \Delta \rho_в g). \qquad (4)$$

Сопротивление воздухопроницанию$R_{инф}$, (м^2·ч·Па$^{2/3}$)/кг для «старых» конструкций окон определяют по табл. 3.2 [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 (м^2·ч·Па$^{2/3}$)/кг. На основании работ В. П. Титова [3] представлен график зависимости инфильтрации через окна от температуры и скорости ветра (рис. 3). Для современных закрытых герметичных окон инфильтрирующий расход $L_{инф} = 0$.

При наличии естественной вытяжной вентиляции расход $L_{вент}$ определяют по данным п. 10.2.5 [29] 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 [6–8, 22].

Учет влияния наружной температуры и скорости ветра на теплопотери. Обстоятельный анализ добавочных теплопотерь в зависимости от скорости ветра представлен в работе [20], где изложены основ-

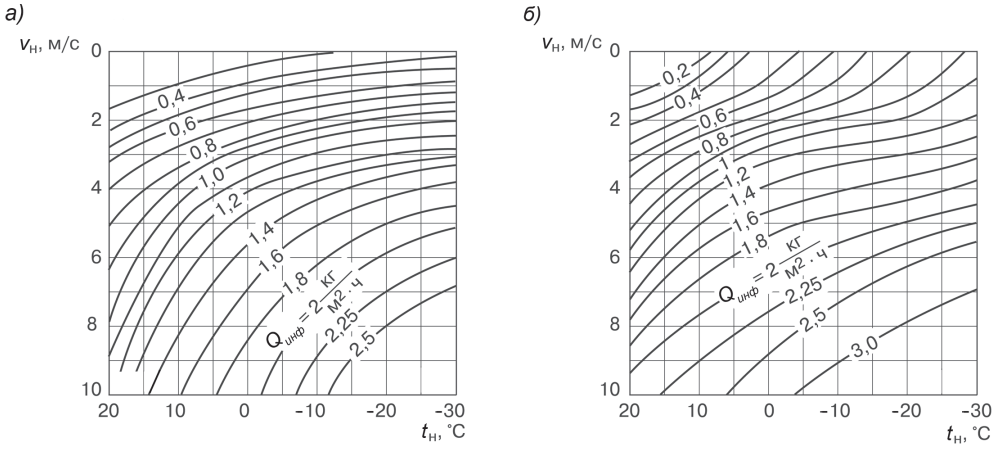

Рис. 3. Номограмма для приближенного определения удельного массового расхода инфильтрирующего через светопроемы наружного воздуха ($g_{инф}$, кг/м^2·ч) при одностороннем остеклении в герметичном помещении в зависимости от сочетания температуры наружного воздуха $t_н$ и скорости ветра $v_н$: *а* — при высоте окна $h_{ок} = 2$ м; *б* — при высоте окна $h_{ок} = 4$ м

ные 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** относятся методики, в которых определяют дополнительное количество теплоты, необходимой для подогрева воздуха, проникающего в помещение через окна. **К третьей группе** относятся методики, по которым общие теплопотери зданий вычисляют при помощи т. н. эквивалентных температур [6–8, 22]. Эти методики наиболее просты и могут обеспечить требуемую точность расчетов теплопотерь зданий в том случае, если принципы, заложенные в определение эквивалентных температур, достаточно надежно отражают процесс теплообмена 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 [25, 24]. В частности, А. Н. Сканави на основе анализа данных за 23 зимних сезона предложил зависимость скорости ветра от температуры для окрестностей Москвы в виде: $v_н = 5{,}37 + 0{,}092t_н$ (линия *4* на рис. 4, *а*).

Как показал анализ, выполненный в работе [20], процентных надбавок к основным теплопотерям в зависимости от средней скорости ветра недостаточно. Важную роль играет площадь остекления, качество уплотнения, направление и скорость ветра. Для учета всех этих факторов предложена номограмма для определения эквивалентной температуры при использовании «старых» светопроемов (рис. 4, *а*). Кроме того, исследованы предельные сочетания комплекса «температура наружного воздуха – скорость ветра», при которых система отопления обеспечивает расчетную температуру внутреннего воздуха (рис. 4, *б*).

Оригинальную методику учета кондуктивно-инфильтрационных теплопотерь разработали в ГГО им. А. И. Воейкова Л. Е. Анапольская и Л. С. Гандин [2]. Не приводя здесь все выкладки, описывающие инфильтрацию через неплотности, отметим главный результат исследований — авторы предложили удельную характеристику воздухопроницаемости *старых* окон:

а)

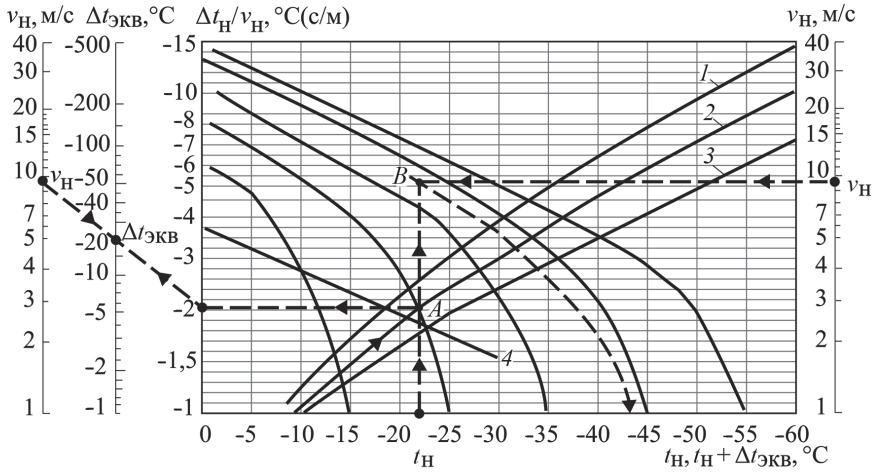

Рис. 4, а. Номограмма для определения поправки $\Delta t_{н.\ экв}$ к температуре наружного воздуха, учитывающей скорость ветра и относительную площадь остекления: $\overline{f}_{ост}$ = 0,4 — линия *1*; $\overline{f}_{ост}$ = 0,3 — линия *2*; $\overline{f}_{ост}$ = 0,2 — линия *3* по данным работы [6], линия *4* — засисимость 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 [2]. КЛЮЧ: при наружной температуре $t_н$ = –22 °С, скорости ветра $v_н$ = 9,5 м/с и относительной площади остекления $\overline{f}_{ост}$ = 0,3 величина $\Delta t_н/v_н$ = –2,05 °С (с/м), поправка $\Delta t_{н.\ экв}$ = (–2,05)·9,5 = –20 °С. Результирующая эквивалентная температура наружного воздуха с учетом влияния ветра равна: $t_{н.\ экв} = t_н + \Delta t_{н.\ экв}$ = –22 + + (–20) = –42 °С. По методике ГГО им. А. И. Воейкова при тех же условиях $t_{н.\ экв} = t_н +$ + $\Delta t_{н.\ экв}$ = –43 °С, откуда $\Delta t_{н.\ экв}$ = –21 °С. Как показал этот расчет, результаты определения эквивалентной температуры по обеим методикам оказались близкими

$$\gamma = 0{,}5\rho_в c_в R_{ок}\overline{u} / v_н \approx 0{,}225 \text{ с/м}, \qquad (5)$$

где $\overline{u}$ — скорость воздуха, отнесенная к одному погонному метру щели окна; связь этой величины со скоростью ветра описывается зависимостью: $\overline{u} = 1{,}1\cdot 10^{-3} v_н$. По этой методике и приводимым таблицам автором (А.С.) построена дополнительная номограмма (рис. 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 теплопотерь здания В. М. Ильинский [15] предложил одновременно учитывать температуру наружного воздуха и скорость ветра, которая влияет на воздухопроницаемость строительных конструкций стен по предложенной им формуле:

$$t_{нрх} = t_н(1+0{,}01v_н^2 R_{ст} / R_u) = $$

$$= t_н(1+0{,}0055v_н^2), \qquad (6)$$

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

Инфильтрационные теплопотери и режимы работы естественной вытяжной вентиляции. В таких системах побудителем движения (вытяжки) воздуха являются природные силы: гравитационные из-за разности плотности наружного и внутреннего воздуха:

$$\Delta P_{грав} = \Delta h g\left[\rho_н(t_н) - \rho_в(t_в)\right], \qquad (7)$$

и природные силы — перепады давления, вызванные действием ветра:

$$\Delta P_{ветра} = (c_н - c_з)v_н^2\rho_н / 2, \qquad (8)$$

где Δh — разница отметок входа (из атмосферы в помещение) и выхода удаляемого воздуха (в атмосферу); $c_н$, $c_з$ — так называемые

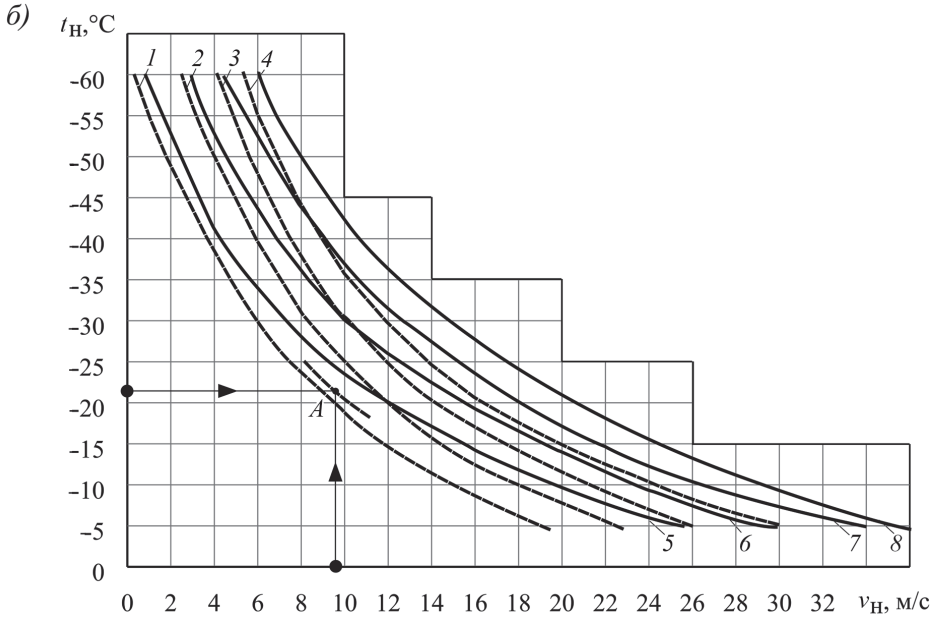

Рис. 4, б. Кривые сочетания предельных значений температуры наружного воздуха и скорости ветра, при которых система отопления здания обеспечивает расчетную температуру внутреннего воздуха. Обозначения линий при относительной площади остекления 30%:

1 — $t_н$ = –30 °С, *2* — $t_н$ = –40 °С, *3* — $t_н$ = –50 °С, *4* — $t_н$ = –60 °С; при относительной площади остекления 20%: *5* — $t_н$ = –30 °С, *6* — $t_н$ = –40 °С, *7* — $t_н$ = –50 °С, *8* — $t_н$ = –60 °С. По данным статьи [20] для районов Сибири и Крайнего Севера.

КЛЮЧ: при относительной площади остекления 30 %, температуре наружного воздуха $t_н$ = –22 °С и скорости ветра $v_н$ = 9,5 м/с согласно построениям на графике для точки *A* предельная температура наружного воздуха, при которой будет обеспечена расчетная температура воздуха в помещении равна $t_н$ = –33 °С. В этой точке отношение приращений $\Delta t_н / v_н = 5/2 = 2{,}5$ °С (с/м), что близко данным рис. 4, *а*

аэродинамические коэффициенты наветренной и заветренной части оголовка вытяжного устройства (шахты, дефлектора). Эффект вытяжки в таких системах зависит от сочетания текущих температур наружного воздуха $t_н$, его плотности $\rho_н = 353/(273 + t_н)$ и скорости ветра $v_н$. По действующим нормам расчет такой системы производят при $t_н$ = 5 °С и безветрии; при более низких температурах $t_н$ и большей скорости ветра эффект вытяжки заметно усиливается, т.е. в вытяжной шахте увеличивается скорость $v_в$ и расход $L_в$ воздуха, а эффект разряжения растет. Вытяжные системы с естественной вытяжкой в многоэтажных зданиях имеют специфическую конструкцию (рис. 5).

С точки зрения топологии такую сеть можно представить согласно гл.10 [29], 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: бóльшим на нижних этажах и меньшим — на верхних, где рекомендуют установку местных вытяжных (кухонных) вентиляторов. В тоже время климатологические данные указывают, что с понижением наружной температуры скорость ветра снижается. Расчетное сопротивление сборного коллектора и одного из ответвлений с *i*-того этажа увязывается с текущим ветровым давлением в шахте и гравитационным давлением на этом этаже уравнением:

$$\sum^{i} (Rl + Z)_{кол} + (Rl_i + Z) - \\ - \Delta P_{грав.\,i} - \Delta P_{ветр} = 0. \qquad (9)$$

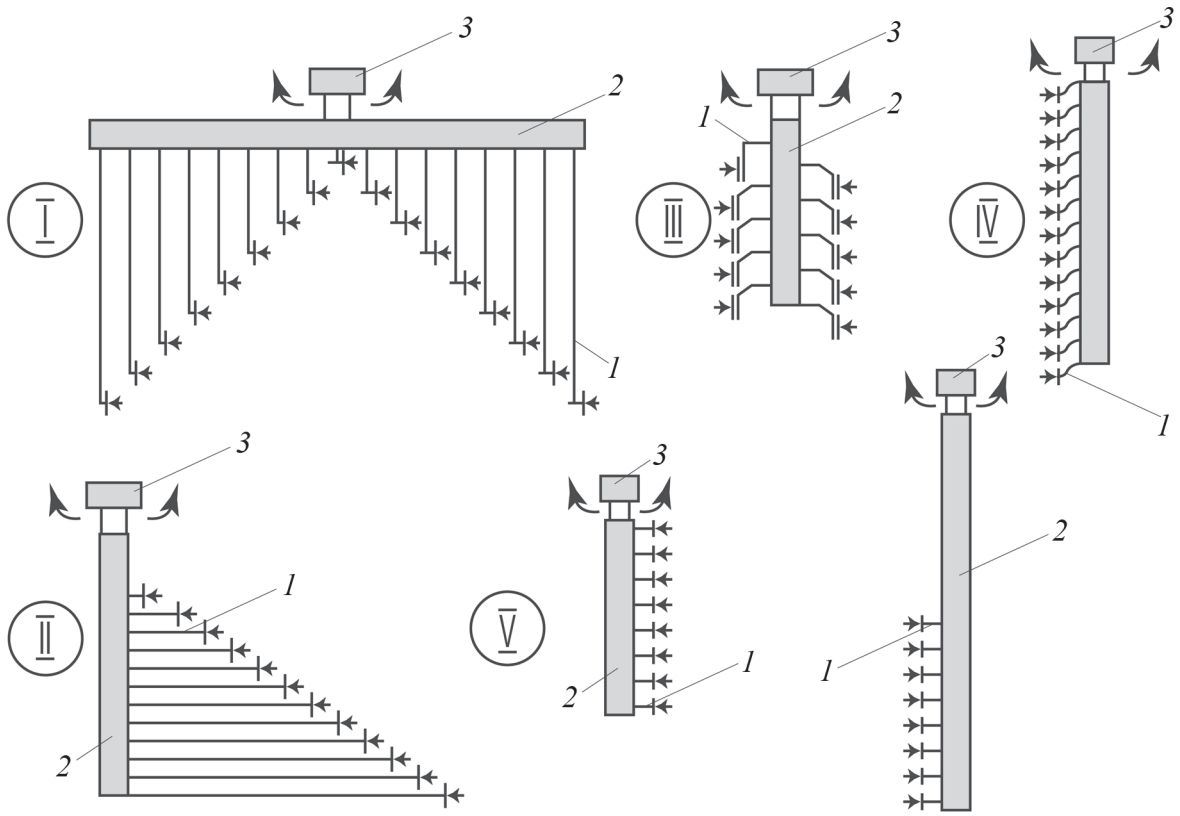

Рис. 5. Разрез-схема естественной вытяжной системы вентиляции многоэтажного здания:
1 — ответвление; *2* — сборный канал (коллектор); *3* — вытяжной оголовок (наружная шахта, зонд, дефлектор)

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 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 может быть разная герметичность, давление и условия удаления воздуха; при хорошей герметизации таких квартир условия вытяжки оказываются минимальными.

Расчет вентиляционных сетей естественной вытяжки для многоэтажных зданий исследован на моделях и описан В. Е. Константиновой и К. С. Светловым [17]. 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. 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. 6, соответствуют следующим случаям: схема I — система вытяжной вентиляции с раздельными 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.

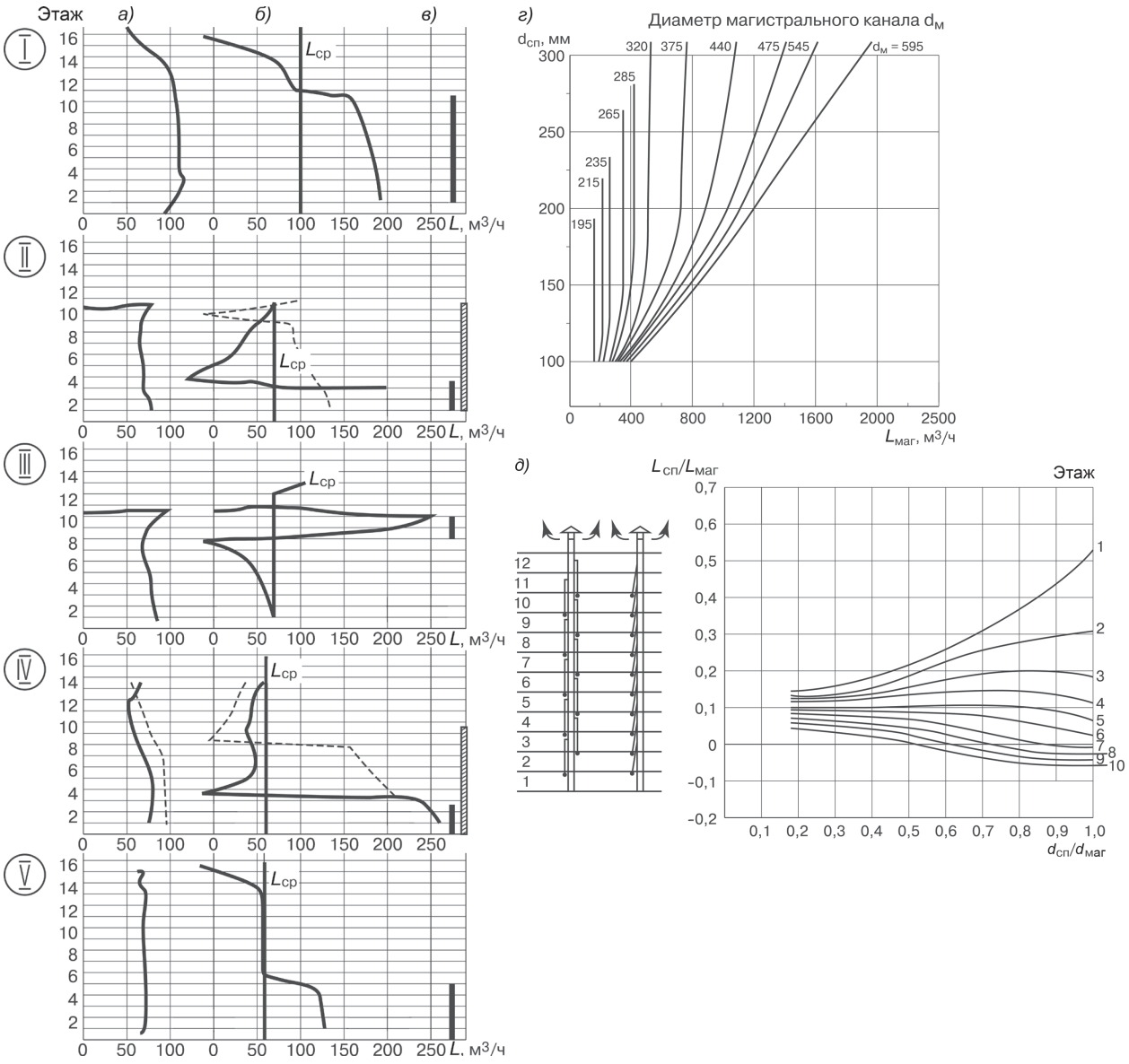

Рис. 6. Основные графические зависимости, характеризующие результаты исследования вытяжных систем естественной вентиляции 16-этажного здания с разными схемами устройства вентиляционных каналов: *а* — расходы воздуха в расчетных условиях в м^3/ч ($t_н$ = –5 °С, $v_н$ = 0 м/с, t_B = 18 °С); *б* — расходы 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 $v_м$ = 0,9 м/с, скорость в ответвлении v_0 = 0,9 м/с; при схеме II $v_м$ = 2 м/с, v_0 = 0,9…1,3 м/с; при схеме III $v_м$ = 2 м/с, v_0 = 0,9 м/с; при схеме IV $v_м$ = 1,4…2,1 м/с, v_0 = 0,9…1,1 м/с; при схеме V $v_м$ = 1,5 м/с, v_0 = 2,4…4,6 м/с; *г* — зависимость производительности вытяжной системы от диаметров магистрального канала $d_{маг}$ и ответвлений-спутников $d_{сп}$; *д* — зависимость неравномерности расходов вытяжного воздуха на разных этажах $L_{сп}/L_{маг}$ в зависимости от соотношения диаметров канала-спутника и магистрали $d_{сп}/d_{маг}$ для 12-ти этажного подъезда по данным Э. Я. Гинцбурга

В результате исследований получены закономерности (эпюры) расходов удаляемого воздуха на разных этажах при обеспечении устойчивости системы (закрытых форточках) и при 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 [10]; полученные им зависимости показаны на рис. 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 нет. Как видно из графика рис. 6, *д* при значениях отношения диаметров $d_{сп}/d_{маг} > 0{,}45$ в верхних этажах наблюдалось опрокидывание тяги. В схеме с перепуском воздуха через 4 этажа повышается устойчивость вытяжки по сравнению с перепуском через 2 этажа.

Исследование теплового режима жилых зданий повышенной этажности выполнены В. Е. Константиновой [18]. В экспериментах получено, что реальное теплопотребление 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. 7 показано переменное теплопотребление жилых помещений на разных этажах многоэтажных зданий (5, 9 и 16 этажей) при 40 % 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. Полученные зависимости позволяют одновременно уменьшить перегрев помещений и обеспечить заметную экономию теплоты.

Производительность вытяжной системы, иначе скорость воздуха в вытяжной шахте ($v_в$) зависят также от конструкции такой шахты, скорости ветра ($v_н$), его направления и наружной температуры ($t_н$). Комплекс зависимостей, характеризующих *работу* вытяжных шахт и аналогично дефлекторов, приводится по данным А. И. Шуцкого [35] на рис. 8. Исследования проводили на моделях разных шахт в изотермических условиях. Отрицательное давление в шахте (рис. 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).

Удельный расход теплоты на отопление здания. Расход теплоты, отнесенный к 1 м^3 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/(м$^3\cdot$°С$\cdot$сут) или Вт/(м$^3\cdot$°С) — по табл. 8 и 9 СНиП [28], отнесенным к единице объема здания и рассчитанным в соответствии с современными требованиями теплозащиты зданий по формуле:

$$q_{от.\,V} = \frac{Q_{т.\,от}}{V_{зд}(t_{в.\,ср} - t_{нро})} <$$

$$< (q_{от.\,V})_{норм},\ Вт/(м^3\cdot°С). \qquad (10)$$

Зависимость удельного нормируемого расхода теплоты на отопление от типа и этажности зданий разного назначения показана в виде графика на рис. 9, *а*.

Расчетный показатель компактности жилых зданий по п. 5.15 [28], показанный на рис. 9, *а,б* есть отношение общей площади внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций к отапливаемому объему здания $\sum F_н/V_{зд}$, м$^{-1}$. Величину, обратную показателю компактности, называют определяющим размером помещения или здания $l_{зд}$ и определяют через его длину l, ширину b и высоту h по общей формуле:

$$l_{зд} = (1/l + 1/b + 1/h)^{-1}/2. \qquad (11)$$

Если размеры помещения или здания таковы, что $l \gg h$ и $b \gg h$, то в этом случае

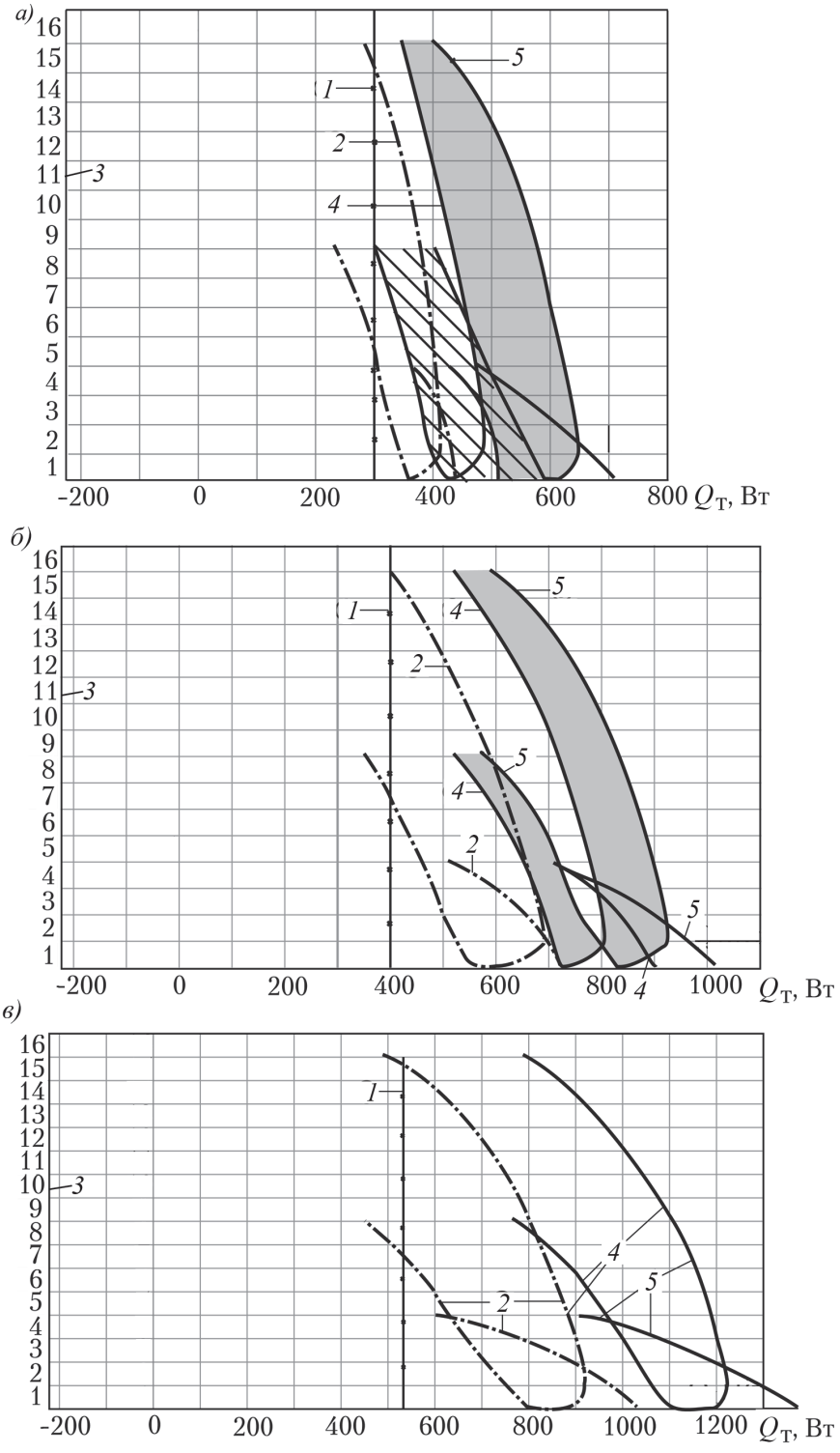

Рис. 7. Переменные тепловые балансы жилых помещений 5, 9 и 16-этажных зданий при разных наружных температурах:

1 — основные теплопотери через наружные ограждения; *2* — потери теплоты на инфильтрацию воздуха через светопроемы; *3* — бытовые тепловыделения; *4* — суммарное теплопотребление жилых помещений разных этажей; *5* — отпуск теплоты в соответствии с линейной зависимостью от разности температур; затененная область соответствует перерасходу теплоты при его отпуске в соответствии с линейной зависимостью: *а* — при наружной температуре $t_н = -5$ °С; *б* — при наружной температуре $t_н = -15$ °С; *в* — при наружной температуре $t_н = -26$ °С

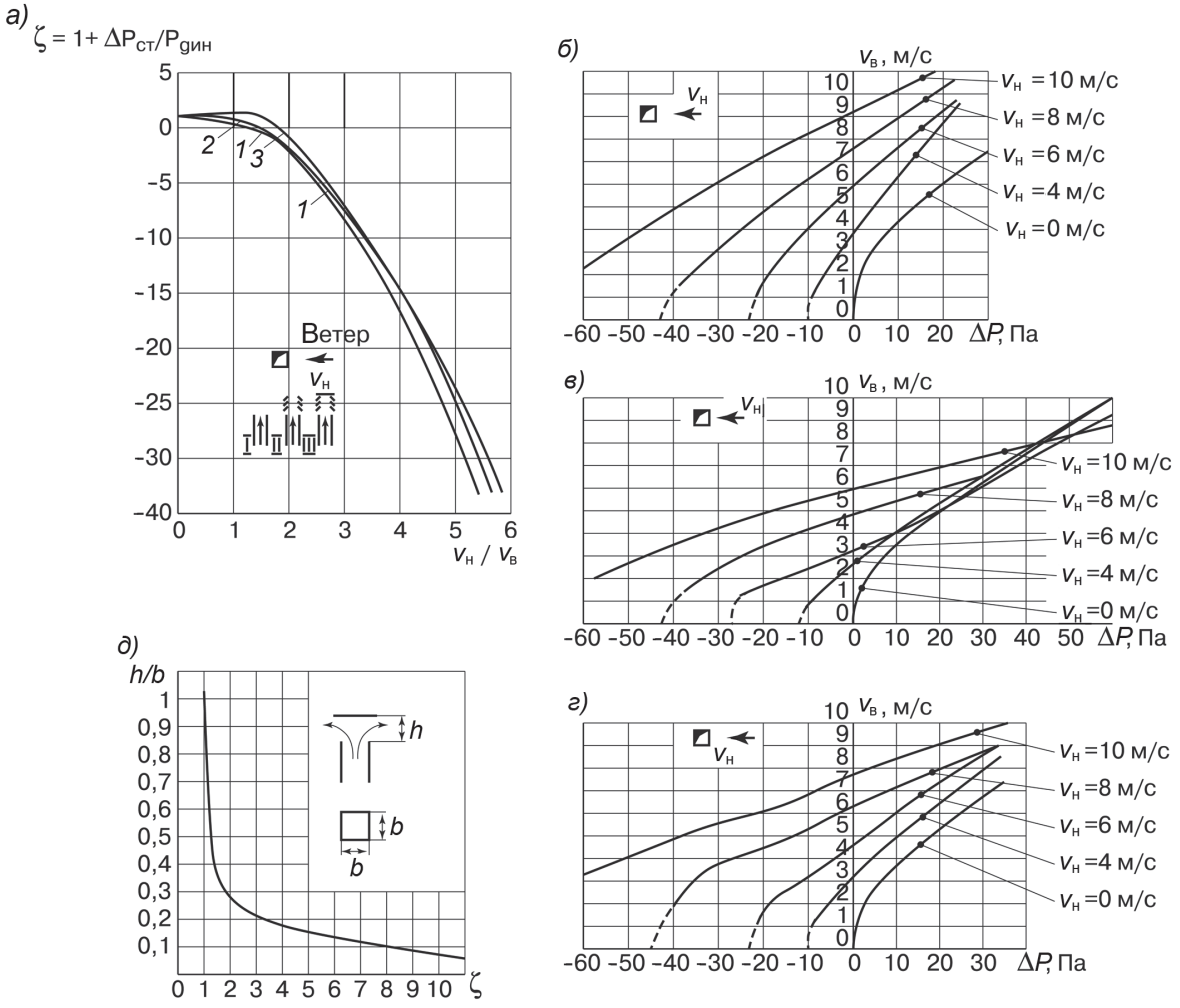

Рис. 8. Аэродинамические характеристики вытяжных шахт разных конструкций: *а* — зависимость коэффициента местного сопротивления ζ и отношения скоростей ветра и воздуха в шахте $v_н/v_в$ от конструкции вытяжной шахты:

1 — без оголовка; *2* — с решеткой без оголовка; *3* — с решеткой и оголовком; *б*, *в*, *г* — аэродинамические характеристики шахт, как зависимость скорости воздуха и разрежения в горловине шахты от скорости ветра $v_н$: *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

$l_{зд} \approx 0{,}5h$, где h — высота помещения. Для сравнения с отечественными нормативами на рис. 9, *б* приводится график удельной тепловой характеристики на отопление здания в зависимости от показателя компактности по данным [5] для таких стран как Австрия, Великобритания, Финляндия, Швейцария, Швеция и др.

Удельный комплексный показатель затрат теплоты на отопление здания (УКПТ) предложено ввести в работе [26]; он учитывает несколько составляющих затрат теплоты на отопление и включает частные удельные показатели: основные теплопотери, инфильтрацию, бытовые и радиационные теплопоступления, отнесенные к 1 м^3 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 [36]: отопления, охлаждения, вентиляции, освещения, связи, лифтами и др.

Пример 1. Сравнить удельный нормируемый по СНиП [28] $q_{от.\,F} = 72$ кВт·ч/(м^2·°С) расход теплоты на отопление административного здания в С-Петербурге

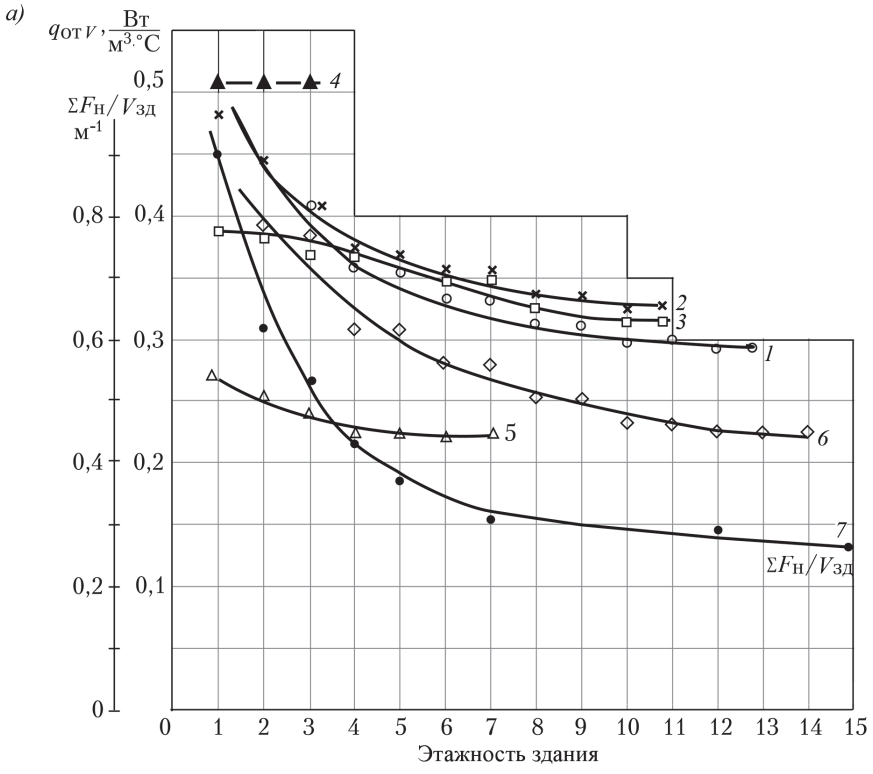

Рис. 9, а. Зависимость удельного нормируемого расхода теплоты на отопление $q_{от.\,V}$, Вт/(м^3·°С) от типа и этажности зданий разного назначения:

1 (○) — жилые здания, гостиницы, общежития; *2* (×) — здания общественные, кроме названных для линий 3, 4 и 5; *3* (□) — поликлиники, лечебные учреждения, дома-интернаты; *4* (▲) — дошкольные учреждения; *5* (△) — объекты сервисного обслуживания; *6* (◊) — здания административного назначения (офисы); *7* (●) — расчетный показатель компактности жилых зданий по п. 5.15 [28], как отношение общей площади внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций к отапливаемому объему здания $\Sigma F_н/V_{зд}$, м$^{-1}$

($\tau_{от.\ пер}$ = 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·м^2), с удельным расходом теплоты на отопление энергоэффективных зданий США и др. стран по данным [36] и общим удельным расходом энергии этими зданиями.

• Здание в С-Петербурге: $q_{от.\ год\ F}$ = 72·220[20 – – (–1,8)]/3600 = 97 кВт·ч/(м^2·год);

• здание в г. Сочи: $q_{от.\ год\ F}$ = 72·92(20 – 6,4)/3600 = = 25 кВт·ч/(м^2·год);

• энергоэффективное здание в г. Чикаго $q_{от.\ год\ F}$ = = 40 кВт·ч/(м^2·год); в Атланте — $q_{от.\ год\ F}$ = 43 кВт· ·ч/(м^2·год); в г. Торонто — $q_{от.\ год\ F}$ = 51 кВт·ч/ (м^2·год).

Общее удельное годовое потребление тепловой и электрической энергии энергоэффективными административными зданиями в Калифорнии, Орегоне (США), Британской Колумбии, Онтарио, Квебек (Канада), Норвегии и Нидерландах согласно табл. 1 [36] находится в интервале $\Sigma q_{зд.\ F}$ = 63 – 130 кВт·ч/(м^2·год). Значительный расход теплоты на отопление здания в С-Петербурге объясняется сравнительно суровыми зимними условиями и продолжительным отопительным периодом, а большая доля в общем энергопотреблении — непрерывной работой системы отопления по сравнению с другими инженерными системами за отопительный период (снижение температуры воздуха в ночное время и другие меры снижения теплопотерь здесь не рассматриваются).

Комплекс требований к тепло- и влагозащите и воздухопроницанию наружных ограждений здания. Этот комплекс требований, достаточно известный и изложенный в СНиП [28], сводится к следующим условиям тепло-, влаго- и воздухозащиты помещений и здания от внешних воздействий. Одновременно выполняются условия «дыхания» ограждений, движения влаги через них, исключающее ее накопление, переувлажнение конструкций, изменение их свойств и несущей способности, эстетических качеств, дизайна, фактуры и др.:

• **сопротивление теплопередачи** выбирают в зависимости от вида ограждения (стена, кровля, чердачное перекрытие, окно, бал-

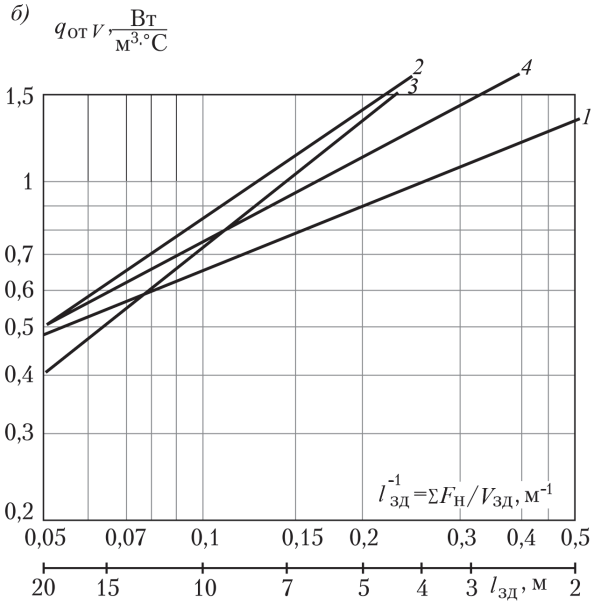

Рис. 9, б. График удельной тепловой характеристики на отопление $q_{от.V}$, Вт/(м³·°С) зданий разного назначения в зависимости от показателя компактности $\Sigma F_н/V_{зд}$, м$^{-1}$:

1 — административные помещения без тепловыделений; *2* — административные помещения с тепловыделениями; *3* — здания школ; *4* — лечебные и детские учреждения

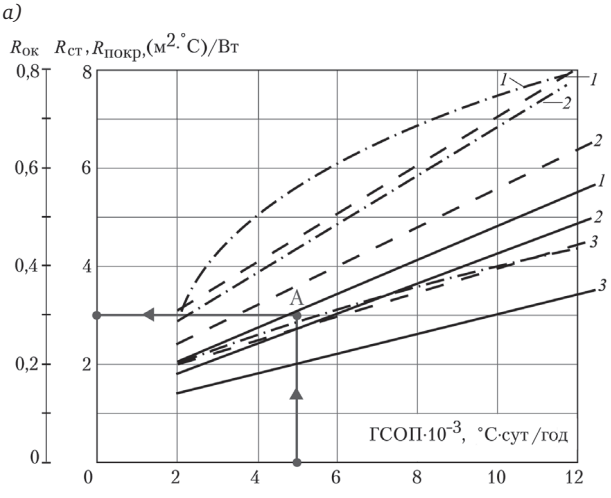

Рис. 10, а. График для определения требуемого термического сопротивления наружных ограждений здания $R_{тр}$, (м²·°С)/Вт в зависимости от градусосуток отопительного периода ГСОП = 2000 – 12000 (°С·сут)/год и типа здания:

1 — жилые, лечебно-профилактические и детские, школы, интернаты, гостиницы и общежития; *2* — общественные, кроме указанных выше, административные и бытовые, производственные и другие здания с влажным и мокрым режимом; *3* — производственные здания с сухим и нормальном режимами; сплошные линии — $R_{тр}$ для стен, пунктирные линии — $R_{тр}$ для покрытий (кровель); штрихпунктирные линии — $R_{тр}$ для окон, балконных дверей, витрин и витражей.

Ключ: для наружной стены жилого здания в С-Петербурге при $t_в$ = 20 °С, $t_{н.\,ср.\,от.\,пер}$ = –2,2 °С, $\tau_{от.\,пер}$ = = 220 сут число градусосуток отопительного периода ГСОП = [20 – (–2,2)]220 = 4840 (сут·°С)/год для сплошной линии *1* в точке *А* определяем требуемое термическое сопротивление $R_{ст}$ = 3 (м²·°С)/Вт, а коэффициент теплопередачи должен быть не более $k_{ст}$ = 0,33 Вт/(м²·°С)

конная дверь, световой фонарь и др.) и числа ГСОП (градусосуток отопительного периода) по табл. 4 [28] или по графику рис. 10, *а*.

• **экономически оптимальное сопротивление теплопередачи** определяют из [12] с учетом стоимости этого ограждения, эксплуатационных затрат и затрат на топливо. Исследования показали, что экономически-оптимальное $R_о^{эк}$, (м²·°С)/Вт, можно найти из выражения:

$$R_о^{эк} = \sqrt{\frac{(t_в - t_{н.\,ср.\,от.\,пер})\tau_{от.\,пер} c'_т T_{норм}}{\lambda_{ут} c'_{огр}}}, \quad (12)$$

где $t_в$ — расчетная внутренняя температура воздуха в отапливаемом помещении, °С; $t_{н.\,ср.\,от.\,пер}$ — средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С; $\tau_{от.\,пер}$ — продолжительность отопительного периода, сут/год; $c'_т$ — удельная стоимость теплоты в горячей воде, руб/кВт·ч; $T_{норм}$ — нормативный срок окупаемости дополнительных капитальных затрат, лет; $\lambda_{ут}$ — коэффициент теплопроводности материала утеплителя, Вт/(м·°С); $c'_{огр}$ — стоимость ограждения совместно со строительным материалом утеплителя (например, ячеистого бетона), руб/м³. Например, для С-Петербурга при $t_в$ = 20 °С, $t_{н.\,ср.\,от.\,пер}$ = –1,8 °С, $\tau_{от.\,пер}$ = = 220 сут/год комплекс ГСОП = 4800 (°С·сут)/год, $c'_т$ = 0,7 руб/кВт·ч = 820 руб/Гкал, $T_{норм}$ = 8 лет, $\lambda_{ут}$ = 0,2 Вт/(м·°С), $c'_{огр}$ = = 12000 руб/м³ по формуле (12) получаем $R_о^{эк} \approx 3{,}3$ (м²·°С)/Вт, что близко к современным нормируемым значениям термического сопротивления наружной стены. Для других типов зданий предложены другие зависимости для величины $R_о^{эк}$, например в работе [13] для неотапливаемых свинарников с учетом тепловыделений животных.

Как пример зависимости теплопотерь 9-этажного жилого здания от термического сопротивления его наружных стен по данным [1] приведен график (рис. 10, *б*), из которого видно, что эта зависимость приближено-гиперболическая.

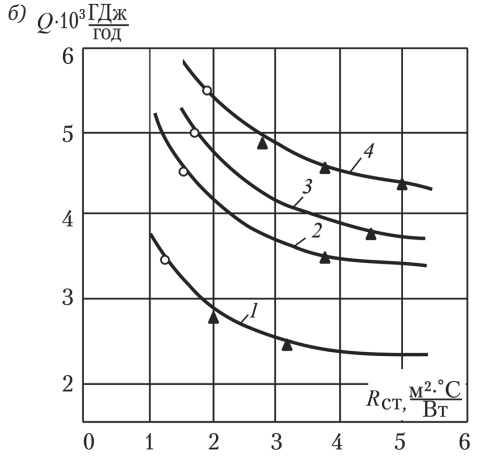

Рис. 10, б. Зависимость теплопотерь 9-этажного жилого здания от термического сопротивления его наружных стен для разных климатических условий: ○ — термическое сопротивление, определенное по санитарно-гигиеническим требованиям, ▲ — то же, по условию энергосбережения;

1 — г. Тверь (ГСОП = 5014), *2* — г. Ханты-Мансийск (ГСОП = 7200), *3* — г. Ленск и г. Уренгой (ГСОП = = 9000), *4* — г. Якутск (ГСОП = 10400)

Метод проектирования зданий с «условно-минимальными теплопотерями» в 40-х годах XX века предложил Н. С. Ермолаев [14]. Высоту такого здания предложено определять по зависимости:

$$h = 0{,}64\sqrt{V_{\text{зд}} k_{\text{пр}}}, \qquad (13)$$

а размер его стороны основания — по формуле:

$$b = l = 1{,}26\sqrt[3]{V_{\text{зд}} / k_{\text{пр}}}, \qquad (14)$$

где $k_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент теплопередачи наружных ограждений всего здания: $k_{\text{пр}} = (\beta_{\text{пл}} k_{\text{пл}} + \beta_{\text{кр}} k_{\text{кр}})/k_{\text{э}}$, где $k_{\text{э}}$ — приведенный коэффициент теплопередачи вертикальных наружных ограждений здания: $k_{\text{э}} = k_{\text{ст}} + \bar{f}_{\text{ост}}(k_{\text{ок}} - k_{\text{ст}})$; $\beta_{\text{пл}}$, $\beta_{\text{кр}}$ — поправочные коэффициенты к расчетной разности температур для пола и кровли;

• **ограничение температуры внутренней поверхности наружных ограждений** из условия предотвращения конденсации водяного пара производят по табл. 4 [28]: для наружных стен жилых и общественных зданий $\Delta t_{\text{в. пов}}$ = 4–4,5 °С, для окон $\Delta t_{\text{в. пов}}$ = = 2–2,5 °С;

• **требование теплоустойчивости наружных ограждений** в теплый и холодный периоды года сводится к ограничению амплитуды температурных колебаний на внутренней поверхности наружного ограждения (стены). Летом это ограничение вводится в районах со среднемесячной температурой июля 21 °С и выше, зимой регламентируют колебание результирующей температуры помещения с амплитудой не более $A_{t.\text{рез}}$ = = 1,5 °С;

• **ограничение воздухопроницаемости ограждающих конструкций** $R_{\text{вп}} = \Delta P / G_{\text{инф}}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$, для стен жилых, общественных, административных и бытовых зданий оно должно быть не менее $R_{\text{вп}}$ = = 0,5 $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$;

• **защита от переувлажнения** обеспечивается выбором нормируемого сопротивления паропроницанию $R_{\text{п}}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$ из условия недопустимости накопления влаги в ограждениях за годовой период их эксплуатации и условия ограничения этого за холодный период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха.

Учитывая дискуссионность этого вопроса при многослойной конструкции ограждения, ниже приведен пример расчета возможной зоны конденсации водяного пара в толще многослойного ограждения, выполненный аналогично тому, что приведен В. М. Ильинским [15]. В примере учтено увеличенное термическое сопротивление современных ограждений. Рассмотрены два варианта взаимного расположения пенобетона, как более легкого материала, и кирпича в конструкции стены.

Результаты расчета приведены на рис. 11 в виде графиков изменения температуры, соответствующей ей упругости насыщенных водяных паров $p''_{\text{п}}$ и фактической упругости $p_{\text{п}}$ в толще многослойного ограждения, определенной по законам паропроницания. Из этого примера следует, что взаимное положение слоев играет большую роль для возникновения конденсации. В частности, конденсация наблюдалась по всей толщине ограждения в конструкции, где более легкий материал — пенобетон — был расположен со стороны помещения.

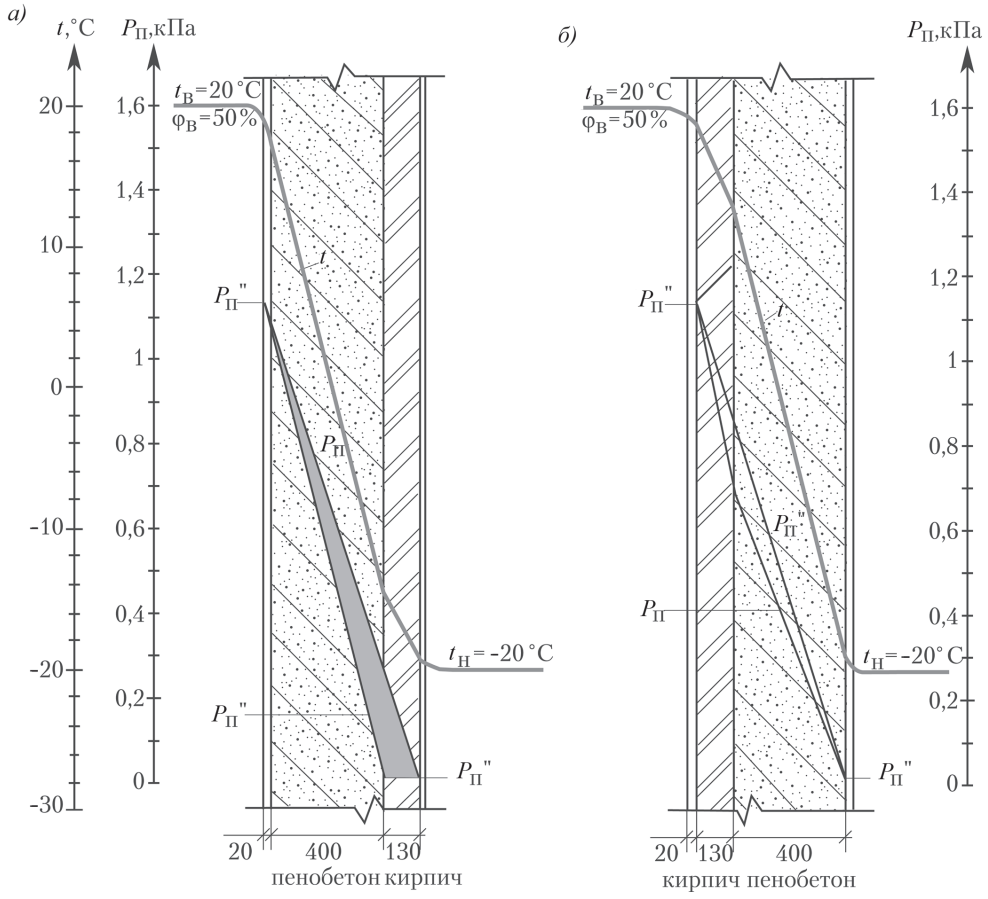

Рис. 11. Графики изменения температуры t, °С, соответствующей ей упругости насыщенных водяных паров $p''_п$, кПа и фактической упругости $p_п$, кПа в толще многослойного ограждения, определенной по законам паропроницания. Условия расчета: параметры воздуха $t_в$ = 20 °С, $φ_в$ = 50 %, $p_п$ = 1,19 кПа, $t_н$ = –20 °С, термическое сопротивление конструкции стены $R_{ст}$ = 2,4 м^2·°С/Вт, теплофизические характеристики материалов слоев: кирпич обыкновенный, ρ = 1100 кг/м^3, δ = 0,13 м, λ = 0,60 Вт/(м·°С), μ = 0,11 г/(м·ч·кПа); пенобетон ρ = 600 кг/м^3, δ = 0,40 м, λ = 0,20 Вт/(м·°С), μ = 0,17 г/(м·ч·кПа); фактурный слой — цементно-песчаный раствор ρ = 1800 кг/м^3, δ = 0,02 м, λ = 0,80 Вт/(м·°С), μ = 0,09 г/(м·ч·кПа): а — пенобетон примыкает к внутренней поверхности конструкции, кирпич — к наружной; зона конденсации водяного пара, где $p_п > p''_п$, показана затемненной; *б* — пенобетон примыкает к наружной поверхности конструкции, кирпич — к внутренней

Нормируемое накопление влаги в конструкции наружного ограждения должно быть не более $ΔM/M_0$ = 1,5 % для кирпича и керамических блоков, 2 % — для силикатного кирпича, 5 % — для легких бетонов на пористых заполнителях, 6 % — для ячеистых бетонов (газобетон, пенобетон, газосиликат и др.). Не требуется проверять на выполнение этих норм паропроницания однослойные наружные стены в помещениях с сухим и нормальным влажностным режимом, двухслойные наружные стены, если внутренний слой стены имеет сопротивление $R_п$ > > 1,6 (м^2·ч·Па)/кг.

Пример 2. Оценить возможность конденсации водяного пара в многослойной конструкции наружной стены, состоящей из пенобетона ($δ_{пб}$ = 0,40 м, $ρ_{пб}$ = 600 кг/м^3, $λ_{пб}$ = 0,20 Вт/(м·°С), $μ_{пб}$ = = 0,17 г/(м·ч·кПа), обыкновенного кирпича ($δ_к$ = = 0,13 м, $ρ_к$ = 1100 кг/м^3, $λ_к$ = 0,60 Вт/(м·°С), $μ_к$ = = 0,11 г/(м·ч·кПа), и фактурного слоя — цементно-песчаного раствора ($δ_р$ = 0,02 м, $ρ_р$ = 1800 кг/м^3, $λ_р$ = 0,80 Вт/(м·°С), $μ_р$ = 0,09 г/(м·ч·кПа) при разном взаимном положении слоев пенобетона и кирпича (рис. 11, *а, б*). Температурно-влажностные условия для последующего расчета зоны возможной конденсации водяного пара принять следующими: в помещении $t_в$ = 20 °С, $φ_в$ = 50 %, $p''_п$ = 17,53 мм рт. ст. = 2,38 кПа, $p_п = φ_в p''_п$ = 0,50·2,38 = 1,19 кПа; в наружном воздухе $t_н$ = –20 °С, $φ_н$ = 85 %, $p''_п$ = 0,77 мм рт. ст. = 0,104 кПа,

$p_п = \varphi_в p''_п = 0{,}85 \cdot 0{,}104 = 0{,}08$ кПа. Коэффициенты теплообмена на поверхностях наружного ограждения принять: $\alpha_в = 8{,}7$ Вт/(м$^2 \cdot$°С), $R_в = 1/\alpha_в = 0{,}115$ (м$^2 \cdot$°С)/Вт, $\alpha_н = 23$ Вт/(м$^2 \cdot$°С), $R_н = 1/\alpha_н = 0{,}043$ (м$^2 \cdot$°С)/Вт. Общее термическое сопротивление наружной стены составляет: $R_{ст} = R_в + R_{пб} + R_к + R_р + R_н = 0{,}115 + 0{,}40/0{,}20 + 0{,}13/0{,}60 + 0{,}02/0{,}80 + 0{,}043 = 2{,}4$ (м$^2 \cdot$°С)/Вт, что соответствует современным требованиям теплозащиты наружной стены в климатических условиях С-Петербурга при ГСОП = [20 – (–1,8)] · 219 = 4800 (°С · сут)/год. Сопротивление паропроницанию на внутренней поверхности стены согласно рекомендации В. М. Ильинского [15] примем $R_{п.\,в.\,пов} = 0{,}06$ (м$^2 \cdot$ч$\cdot$кПа)/г. Общее сопротивление паропроницанию конструкции наружной стены равно $R_{п.\,ст} = R_{п.\,в.\,пов} + R_{п.\,пб} + R_{п.\,к} + R_{п.\,р} = 0{,}06 + 0{,}40/0{,}17 + 0{,}13/0{,}11 + 0{,}02/0{,}09 = 3{,}7$ (м$^2 \cdot$ч$\cdot$кПа)/г, что соответствует удельной часовой массе перемещаемой влаги $g_{вл} = \Delta p_п/R_{п.\,ст} = (p_{п.\,в} - p_{п.\,н})/R_{п.\,ст} = (1{,}19 - 0{,}08)/3{,}7 = 0{,}3$ г/(ч$\cdot$м^2).

Пример 3. Для описанной конструкции в обоих вариантах взаимного расположения слоев построить (рис. 11, *а, б*):

• распределение температуры материалов в толще ограждения $t(\delta)$;

• распределение парциального давления насыщенного водяного пара $p''_п(t)$, соответствующее этой температуре, в толще ограждения;

• распределение парциального давления водяного пара $p_п(\delta)$ с учетом сопротивления паропроницанию отдельных слоев $R_п = \delta/\mu$.

По результатам построений в каждом из вариантов конструкций определить возможную зону конденсации водяного пара при условии $p_п > p''_п$. Общее изменение температур на границе слоев определяют по формуле: $\Delta t_i = R_i(t_в - t_н)/R_{cm}$ и составляет для внутренней поверхности $\Delta t_{в.\,пов} = 0{,}115[20 - (-20)]/2{,}4 = 1{,}9$ °С, для пенобетона $\Delta t_{п.\,б} = 2[20 - (-20)]/2{,}4 = 33{,}4$ °С, для кирпича $\Delta t_к = 0{,}25[20 - (-20)]/2{,}4 = 4{,}2$ °С, для фактурного слоя $\Delta t_р = 0{,}025[20 - (-20)]/2{,}4 = 0{,}4$ °С, для наружной поверхности ограждения $\Delta t_{н.\,пов} = 0{,}043[20 - (-20)]/2{,}4 = 0{,}7$ °С. По вычисленным перепадам температур на границах отдельных слоев многослойной стены и в зависимости от взаимного расположения слоев пенобетона и кирпича вычисляют температуры и их изменения в толще стены (см. линию *t*, °С, на рис. 11, *а, б*). По этим температурам и таблицам для влажного воздуха определяют и строят линии давления насыщенного водяного пара (см. линию $p''_п$, кПа, на рис. 11, *а, б*).

Общее изменение парциального давления водяного пара на границах слоев определяют по зависимости $\Delta p_п = R_{п.\,i}(p_{п.\,в} - p_{п.\,н})/R_{п.\,ст} = R_{п.i}(1{,}19 - 0{,}08)/3{,}7 = 0{,}3R_{п.\,i}$, кПа. Для отдельных слоев конструкции многослойной стены эти перепады равны: для внутренней поверхности $\Delta p_{п.\,в.\,пов} = 0{,}3 \cdot 0{,}06 = 0{,}018$ кПа, для пенобетона $\Delta p_{п.\,б} = 0{,}3 \cdot 0{,}40/0{,}17 = 0{,}70$ кПа, для кирпича $\Delta p_{п.\,к} = 0{,}3 \cdot 0{,}13/0{,}11 = 0{,}35$ кПа, для фактурного слоя $\Delta p_{п.р} = 0{,}3 \cdot 0{,}02/0{,}09 = 0{,}07$ кПа. Вычисленные перепады откладываем последовательно от величины $p_{п.в}$ и по точкам строим ломаную линию. В том варианте, где пенобетон расположен со стороны помещения, линия $p_п$ расположена выше линии $p''_п$ (*рис.* 11, *а*). Это означает, что по всей толщине конструкции стены можно ожидать конденсации водяного пара в порах материалов ограждения.

Расчет влагопередачи через наружные ограждения здания на основе понятия «потенциал влажности», в отличие от методов, основанных на диффузии пара и влагопроводности, описан в учебнике В. Н. Богословского [4]. Как пишет автор, этот метод можно использовать как в стационарных, так и в нестационарных условиях влагопередачи, а приводимый пример поясняет процесс высыхания конструкции покрытия за период $\tau = 1000\ldots 3000$ ч. Несколько другой подход к решению этой задачи предложил С. В. Корниенко [19]. Учитывая сложность зависимости равновесного влагосодержания материалов от абсолютного потенциала влажности и температуры, им предложен другой показатель — относительный потенциал влажности, однозначно определяющий влагосодержание. Приводимый пример расчета по методикам В. Н. Богословского и С. В. Корниенко показал их хорошее совпадение.

Влага, накопленная в ограждениях здания в процессе его строительства или при реконструкции, отводится специальными системами: лучистым или конвективным нагревом внутренних поверхностей, их комбинацией.

Приближенное определение удельного расхода теплоты на отопление здания. Удельные (основные и добавочные) потери теплоты зданием, Вт/(м$^3 \cdot$°С), через наружные ограждения при форме здания в виде прямоугольного параллелепипеда размерами $l \times b \times h$, при $l > b$ и объемом по наружным обмерам $V_{зд}$, **являются основной интегральной характеристикой теплозащитных качеств здания** и основой сравнения разных зданий между собой. Согласно [16] их можно приближенно определить по формуле:

$$q_{от.\,V} = \frac{2(1+\beta)}{R_{ст}}\left[\frac{A}{b} + \frac{2\beta_{гор}}{(1+\beta)h} + \frac{Abh}{V_{зд}}\right], \quad (15)$$

где β — коэффициент, учитывающий дополнительные теплопотери здания в зависимости от ориентации наружных ограждений по странам света, в среднем $\beta = 0{,}08$; $R_{ст}$ — термическое сопротивление наружной стены,

($м^2 \cdot °C$)/Вт; A — комплекс, учитывающий отношение площадей и термических сопротивлений окон и стен: $A = 1 + (F_{ок}/F_{ст})\times$ $\times[(R_{ст}/R_{ок}) - 1]$; b, h — ширина и высота здания, м; $\beta_{гор}$ — поправочный коэффициент, учитывающий отличие термического сопротивления пола $R_{пл}$ и кровли $R_{кр}$ и их расчетных разностей температур от соответствующих показателей наружных стен: $\beta_{гор} = 0{,}5R_{ст}(\beta_{кр}/R_{кр} + \beta_{пл}/R_{пл})$; $\beta_{кр}$, $\beta_{пл}$ — понижающие коэффициенты к расчетной разности температур при определении теплопотерь здания через кровлю и пол.

Удельные теплопотери здания наряду с вышеприведенной формулой можно определять по формуле Н. С. Ермолаева [30]:

$$q_{от.\,V} = (1+\beta)\left\{\frac{2(l+b)}{lb}\left[k_{ст} + \frac{F_{ок}}{F_{ок}+F_{ст}}\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times(k_{ок} - k_{ст})\right] + \frac{0{,}9k_{кр} + 0{,}6k_{пл}}{h}\right\}, \qquad (16)$$

где обозначения всех величин совпадают с предыдущей формулой. Поясним примером эти методики расчета удельных потерь теплоты зданием.

Пример 4. Определить удельные основные и добавочные потери теплоты на отопление здания по формулам (15) и (16) и сравнить результаты расчета. Здание имеет форму параллелепипеда размерами l = 150 м, b = 20 м, h = 30 м, отношение площади окон и стен $F_{ок}/F_{ст}$ = 0,25, чему соответствует $\bar{f}_{ост} = (F_{ок}/F_{ст})/(1 + F_{ок}/F_{ст}) = 0{,}25/(1+0{,}25) = 0{,}20$. Климатические условия в пункте проектирования (С-Петербург) ГСОП = 4800 (°С·сут)/год. В этих условиях термические сопротивления наружных ограждающих конструкций здания имеют такие нормируемые значения: $R_{ст}$ = 2,8 ($м^2 \cdot °C$)/Вт, $R_{ок}$ = 0,45 ($м^2 \cdot °C$)/Вт, $R_{кр}$ = 3,6 ($м^2 \cdot °C$)/Вт, $R_{пл}$ = 10 ($м^2 \cdot °C$)/Вт, поправочные коэффициенты к разности температур $\beta_{кр}$ = 1, $\beta_{пл}$ = 1, коэффициент для учета добавочных теплопотерь на страны света β = 0,08. Предварительно вычисляем коэффициенты, входящие в формулу (15): $A = 1 + 0{,}25(2{,}8/0{,}45 - 1) = 2{,}25$; $\beta_{гор} = 0{,}5\cdot 2{,}8(1/3{,}6 + 1/10) = 0{,}53$.

По формуле (15) удельные объемные теплопотери здания составят:

$$q_{от.\,V} = \frac{2\cdot 1{,}08}{2{,}8}\left(\frac{2{,}25}{20} + \frac{2\cdot 0{,}53}{1{,}08\cdot 30} + \frac{2{,}25}{150}\right) \approx 0{,}11\ \text{Вт}/(м^3\cdot °C).$$

По формуле (16) удельные объемные теплопотери здания составят:

$$q_{от.\,V} = 1{,}08\left\{\frac{2(150+20)}{150\cdot 20}\left[0{,}36 + \frac{1}{1+4}(2{,}2 - 0{,}36)\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{0{,}9\cdot 0{,}28 + 0{,}6\cdot 0{,}1}{30}\right\} = 0{,}09\ \text{Вт}/(м^3\cdot °C).$$

Как следует из результатов расчета, формулы дают разный результат, с отклонением ±10 % от среднего; в расчете можно принять $q_{от.\,V}$ = 0,10 Вт/($м^3 \cdot °C$).

Во все выше предложенные формулы следует вводить коэффициент a для учета района строительства здания, определяемый по формуле:

$$a = 0{,}54 + 22/(t_в - t_{н.\,р.\,о}), \qquad (17)$$

где $t_{н.\,р.\,о}$ — наружная расчетная температура для проектирования отопления. Например для условий С-Петербурга при $t_{н.\,р}$ = –26 °С эта поправка равна: a = 0,54 + 22[20 – – (–26)] = 1,02.

Упрощенная формула для определения удельной тепловой характеристики здания приводится в «Справочнике»[30], монографии [27] без учета дополнительных теплопотерь и имеет вид:

$$q_{от.\,V} = k_{ст}\frac{(1+2\bar{f}_{ост})F_{ст} + F_{пл}}{V_{зд}}, \qquad (18)$$

где $k_{ст}$ — коэффициент теплопередачи стены, Вт/($м^2 \cdot °C$); $\bar{f}_{ост}$ — относительная площадь остекления на фасадах здания; $F_{ст}$, $F_{пл}$ — соответственно площадь наружных стен (включая окна) и пола здания, $м^2$; $V_{зд}$ — объем здания по наружным обмерам, $м^3$. Расчет по этой формуле для условий вышеприведенных примеров позволил определить удельную тепловую характеристику $q_{от.\,V}$ = 0,084 Вт/($м^3 \cdot °C$), что достаточно близко результатам предыдущих примеров.

Комплексная зависимость удельной тепловой характеристики здания $q_{от.\,V}$ от многих факторов, конструктивно-планировочных решений здания – его объема $V_{зд}$, высоты h, коэффициента теплопередачи окна $k_{ок}$ — представлена на рис. 12. При значительном усилении теплозащиты зданий, примененной в 90-х годах XX в., эти величины представляются устаревшими, однако принципиальный вид зависимостей сохраняется. Приближенно можно считать,

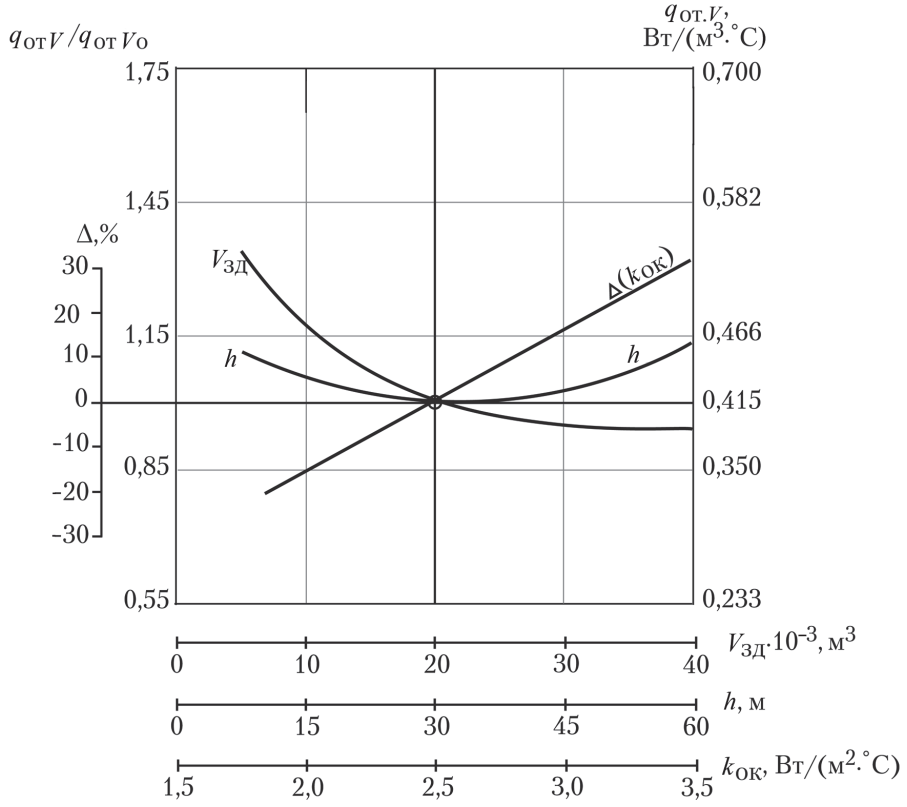

Рис. 12. Комплексная зависимость удельной тепловой характеристики здания $q_{от.V}$ по данным «Справочника» [30] и учебника [27] и относительной удельной тепловой характеристики здания $q_{от.\ V}/q_{от.\ V0}$ от определяющих факторов: конструктивно-планировочных решений здания — его объема $V_{зд} = (5 – 40)10^3$ м³, высоты $h = 5 – 60$ м, коэффициента теплопередачи окон $k_{ок} = 1{,}5 – 3{,}5$ Вт/(м²·°С). За номинальное $q_{от.\ V}/q_{от.\ V0} = 1$ принято относительное значение $q_{от.\ V}$ для здания с такими характеристиками: $V_{зд} = 20000$ м³, $h = 30$ м, $b = 11$ м, $l = 61$ м, определяющим размером здания $V_{зд}/\sum F_{огр} = 20000/5660 = 3{,}5$ м, относительной площади остекления $\overline{f}_{ост} = 25$ % и $k_{ок} = 3$ Вт/(м²·°С). В этих материалах, подготовленных до 1990 г., учитывали прежние требования к теплозащите, в результате чего удельная тепловая характеристика здания оказалась равной $q_{от.V} = 0{,}415$ Вт/(м³·°С), а коэффициент теплопередачи наружной стены принят $k_{ст} = 1{,}16$ Вт/(м²·°С), т.е. в три раза больше, чем принимаемый в настоящее время

что удельная тепловая характеристика $q_{от.\ V}$ в последнее время уменьшилась примерно в два–три раза.

Пример 5. Оценить увеличение теплопотерь здания, заменив сложную в плане форму старинного павильона «Эрмитаж» в г. Царское Село Ленинградской области (рис. 13) эквивалентным по площади и величине теплопотерь кругом.

Данный объект является памятником архитектуры XVIII в., в 2008–2010 гг. реставрируемым и приспосабливаемым под музейные цели. Первоначальный проект этого здания был разработан архитектором М. Г. Земцовым (1744 г.), в дальнейшем его фасады и колоннада переработаны архитектором Ф. Б. Растрелли (1749 г.). Планировка второго этажа здания представлена на обмерном чертеже (рис. 13). Центральная часть этого здания — 2-х-этажный парадный зал площадью $F = 131$ м² (11,5 × 11,5 м), где на первом этаже расположено подъемное оборудование, под этой частью имеется подвал. Парадный зал соединяется с четырьмя радиально расположенными кабинетами, каждый площадью ок. $F \approx 23$ м² (4,8×4,8) и соответствующими галереями площадью по $F \approx 10$ м². Толщина стен здания переменная и составляет 765–820 мм и более, окна шириной 1390 и 1760 мм, имеют значительную высоту, наружные фасады имеют колоннаду, особенно большую у кабинетов.

Как объект, требующий применения отопления в холодный период года, павильон имеет чрезвычайно развитую поверхность наружных ограждений. Об этом говорят такие цифры: при отношении максимального и минимального поперечников здания 38/18 м пери-

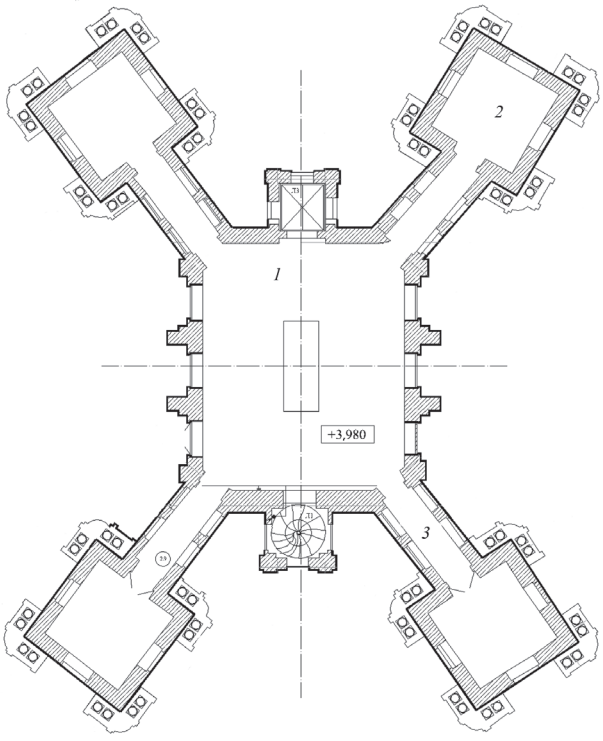

Рис. 13. План второго этажа павильона «Эрмитаж» ГМЗ «Царское Село» по обмерным чертежам: *1* — центральная часть (парадный зал); *2* — кабинет; *3* — галерея

метр наружной части здания составляет $P = 170$ м, чему соответствует диаметр равновеликого (по поверхности и теплопотерям) круга 54 м, поэтому в этом здании наблюдаются чрезвычайно большие теплопотери, в основном через окна, при площади пола ок. 260 м^2, чему соответствует условно равновеликий диаметр круга 18,2 м, а отношение площади пола к периметру, т. е. определяющий размер здания сложной формы оказался равным $l_{зд} = V_{зд}/\Sigma F_{н.\,огр} = F_{пл}/P = 260/170 \approx 1{,}53$ м.

Современное нормирование теплозащиты зданий. Процитируем основные положения СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» в части нормирования удельных теплопотерь:

«Настоящие строительные нормы и правила устанавливают требования к тепловой защите зданий в целях экономии энергии при обеспечении санитарно-гигиенических и оптимальных параметров микроклимата помещений и долговечности ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Требования к повышению тепловой защиты зданий и сооружений, основных потребителей энергии, являются важным объектом государственного регулирования в большинстве стран мира. Эти требования рассматриваются также с точки зрения охраны окружающей среды, рационального использования не возобновляемых природных ресурсов и уменьшения влияния «парникового» эффекта и сокращения выделений двуокиси углерода и других вредных веществ в атмосферу.

Настоящие нормы затрагивают часть общей задачи энергосбережения в зданиях. Одновременно с созданием эффективной тепловой защиты, в соответствии с другими нормативными документами принимаются меры по повышению эффективности инженерного оборудования зданий, снижению потерь энергии при ее выработке и транспортировке, а также по сокращению расхода тепловой и электрической энергии путем автоматического управления и регулирования оборудования и инженерных систем в целом.

Нормы по тепловой защите зданий гармонизированы с аналогичными зарубежными нормами развитых стран. Эти нормы, как и нормы на инженерное оборудование, содержат минимальные требования, и строительство многих зданий может быть выполнено на экономической основе с существенно более высокими показателями тепловой защиты, предусмотренными классификацией зданий по энергетической эффективности.

Настоящие нормы предусматривают введение новых показателей энергетической эффективности зданий — удельного расхода тепловой энергии на отопление за отопительный период с учетом воздухообмена, теплопоступлений и ориентации зданий, устанавливают их классификацию и правила оценки по показателям энергетической эффективности как при проектировании и строительстве, так и в дальнейшем при эксплуатации. Нормы обеспечивают тот же уровень потребности в тепловой энергии, что достигается при соблюдении второго этапа повышения теплозащиты по СНиП II-3 с изменениями N 3 и 4, но предоставляют более широкие возможности в выборе технических решений и способов соблюдения нормируемых параметров.

Требования настоящих норм и правил прошли апробацию в большинстве регионов Российской Федерации в виде территориаль-

ных строительных норм (ТСН) по энергетической эффективности жилых и общественных зданий.

Рекомендуемые методы расчета теплотехнических свойств ограждающих конструкций для соблюдения принятых в этом документе норм, справочные материалы и рекомендации по проектированию излагаются в своде правил «Проектирование тепловой защиты зданий».

4.2. В нормах устанавливают требования к:

• приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий;

• ограничению температуры и недопущению конденсации влаги на внутренней поверхности ограждающей конструкции, за исключением окон с вертикальным остеклением

• удельному показателю расхода тепловой энергии на отопление здания;

• теплоустойчивости ограждающих конструкций в теплый период года и помещений зданий в холодный период года;

• воздухопроницаемости ограждающих конструкций и помещений зданий;

• защите от переувлажнения ограждающих конструкций;

• теплоусвоению поверхности полов;

• классификации, определению и повышению энергетической эффективности проектируемых и существующих зданий;

• контролю нормируемых показателей, включая энергетический паспорт здания.

Пересчет удельных теплопотерь, измеряемых в кДж/(м^3·°С·сут) в Вт/(м^3·°С), производят по формуле: 1 кДж/(м^3·°С·сут) = 1,16·10^{-2} Вт/(м^3·°С). Кажущаяся завышенной величина удельного расхода тепловой энергии объясняется комплексным учетом теплоты, расходуемой на компенсацию теплопотерь, инфильтрацию и периодическое проветривание помещений. Особое значение имеет выбор теплозащиты и ограждающих конструкций зданий на Севере [9].

Таблица 9

Нормируемый удельный расход тепловой энергии на отопление зданий $q_{от.\ F}$, кДж/(м^2·°С·сут) или $q_{от.\ V}$, [кДж/(м^3·°С·сут)]

Типы зданий	*Этажность зданий*					
	1-3	*4, 5*	*6, 7*	*8, 9*	*10, 11*	*12 и выше*
1. Жилые, гостиницы, общежития	По таблице 8	85[31] для 4-этажных одноквартирных и блоки- рованных домов — по таблице 8	80[29]	76[27,5]	72[26]	70[25]
2. Общественные, кроме перечисленных в поз. 3, 4 и 5 таблицы	[42]; [38]; [36] соответственно нарастанию этажности	[32]	[31]	[29,5]	[28]	—
3. Поликлиники и лечебные учреждения, дома-интернаты	[34]; [33]; [32] соответственно нарастанию этажности	[31]	[30]	[29]	[28]	—
4. Дошкольные учреждения	[45]	—	—	—	—	—
5. Сервисного обслуживания	[23]; [22]; [21] соответственно нарастанию этажности	[20]	[20]	—	—	—
6. Административного назначения (офисы)	[36]; [34]; [33] соответственно нарастанию этажности	[27]	[24]	[22]	[20]	[20]

Примечание. Для регионов, имеющих значение ГСОП = 8000 °С·сут и более, нормируемые $q_{от.\ V}$ следует снизить на 5 %».

Литература

1. *Ананьев А. Н., Гаврилов-Кремичев Н. Л.* К вопросу нормирования теплопроводности материалов и теплозащитных свойств наружных ограждающих конструкций зданий. /Теплоэнергоэффективные технологии (информ. бюллетень). – СПб.: АЦТЭЭТ, 2008, №3(52), с. 54–59.
2. *Анапольская Л. Е., Гандин Л. С.* Метеорологические факторы теплового режима здания. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 235 с.
3. *Баркалов Б. В., Карпис Е. Е.* Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 312 с.
4. *Богословский В. Н.* Строительная теплофизика / теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Изд. 1-е. – М.: «Высшая школа», 1970. – 375 с, изд. 2-е, перераб. и доп. «Высшая школа». – М.: 1982. – 415 с.
5. *Ваверка Й.* Удельные тепловые характеристики общественных зданий. /Водоснабжение и санитарная техника, 1989, № 6, с. 17–18.
6. *Васьковский А. П., Девятко Е. А., Левченко Н. Н.* О результирующем влиянии отрицательных температур наружного воздуха и ветра на тепловой режим зданий. /Водоснабжение и санитарная техника. 1968, № 9, с. 18–24.
7. *Васьковский А. П., Маков Ю. М.* К определению зависимости между инфильтрационными теплопотерями зданий и скоростью ветра. В кн.: Проблемы строительной теплофизики. – Минск. 1965.
8. *Васьковский А. П.* Учет дополнительных теплопотерь зданий через окна в приморской полосе Крайнего Севера. /Водоснабжение и санитарная техника, 1963, № 7.
9. *Васьковский А. П.* Микроклимат и температурно-влажностный режим ограждающих конструкций зданий на Севере. – Л.: Стройиздат, Л.О., 1986. – 164 с.
10. *Гинцбург Э. Я.* Исследование систем естественной вентиляции жилых зданий с помощью универсальной установки для моделирования нелинейных цепей. /Автореферат кандидатской диссертации. ЦНИИЭП жилища. – М.: 1969. – 19 с.
11. *ГОСТ* 31168-2003. Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление.
12. *Гусев В. М., Ковалев Н. И., Попов В. П., Потрошков В. А.* Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. /Учебник для вузов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 343 с.
13. *Егиазаров А. Г., Рунов А. А.* Расчет оптимального термического сопротивления наружных ограждений в свинарниках. /Водоснабжение и санитарная техника. 1971, №1, с. 28–29.
14. *Ермолаев Н. С.* Проблемы теплоснабжения и отопления многоэтажных зданий. – М.: Госстройиздат, 1949. – 200 с.
15. *Ильинский В. М.* Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). Уч. пособие для вузов. – М.: «Высшая школа». 1974. – 319 с.
16. *Ионин А. А., Хлыбов Б. М., Братенков В. Н., Терлецкая Е. Н.* Теплоснабжение. / Учебник для вузов. Под ред. А. А. Ионина. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
17. *Константинова В. Е., Светлов К. С.* Исследования систем естественной вытяжной вентиляции в многоэтажных зданиях. – Водоснабжение и санитарная техника, 1965, № 6, с. 10–13.
18. *Константинова Е. В.* Тепловой режим жилых зданий повышенной этажности. /В кн.: Теплогазоснабжение и вентиляция (тезисы докладов). Украинское НТО Стройиндустрии. Киев, 1969, с. 97–99.
19. *Корниенко С. В.* Метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе потенциала влажности. – СПб, Инженерные системы, АВОК-С-3, № 2(34), 2008, с. 52–55.
20. *Левченко Н. Н., Девятко Е. А.* Теплопотери жилых зданий в климатических условиях Заполярья. Водоснабжение и санитарная техника, 1970, № 3, с. 21–23.
21. *Матросов Ю. А., Бутовский И. Н., Гольдштейн Д.* Энергетический паспорт здания. АВОК, 1997, № 3, с. 11–15.
22. *Мелик-Аракелян Т. А., Поз М. Я.* Влияние остекления на микроклимат помещений и энергетические затраты. /Водоснабжение и санитарная техника, 1978, № 1, с. 12–17.
23. *Пухкал В. А., Крумер Л. Р.* Теплопотребление жилых зданий на отопительно-вентиляционные нужды. – В кн.: Сборник докладов 6-й международной научно-практической конференции. СПб, ЛенЭКСПО, 2007, с. 61–64.
24. *Семенова Е. И., Щербаков А. В.* О необходимости учета совместного действия температуры воздуха и скорости ветра при проектировании жилых зданий. / В кн.: Строительная климатология. Труды симпозиума. Ч. I. М.: 1982, с. 261–270.
25. *Сканави А. Н.* Зимние климатические условия Москвы для расчета систем отопления здания. МИСИ, сб. № 21, вып. 1. М.: 1957.
26. *Сканави А. Н., Махов Л. М.* Теплозатраты на отопление жилых зданий. /Водоснабжение и санитарная техника, 1984, № 1, с. 19 – 22.
27. *Сканави А. Н.* Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1981. – 735 с. А. Н. Сканави, Л. М. Махов. Отопление. / Учебник для вузов. – М.: Изд-во «АСВ», 2002. – 276 с.
28. *СНиП* 23-02-2003. Тепловая защита зданий. ГОССТРОЙ России. – М.: 2004. – 25 с.
29. *Сотников А. Г.* Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. / Теория, техника и проектирование на рубеже столетий. – СПб, AT-Publishing, т. I, 2005. – 504 с, т. II, ч. 1, 2006. – 420 с., т. II, ч. 2, 2007. – 512 с.
30. *Справочник* проектировщика. / Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. I. Отопление, водопровод, канализация. Под общ. ред. И. Г. Староверова. М.: Стройиздат. Изд. 3-е, 1975. – 425 с., изд. 4-е, 1990. – 429 с. Изд. 4-е, перераб. и доп., 1990. – 344 с.
31. *Титов В. П., Сазонов Э. В., Краснов Ю. С., Новожилов В. И.* Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зда-

ний. / Учебн. пособие для вузов. – М.: Стройиздат. 1985. – 208 с.
32. *Чистович С. А.* Автоматизация установок и систем теплоснабжения и отопления. – М.: Стройиздат, 1964.
33. *Чистович С. А., Быков С. И., Лебедев П. И.* Метод учета влияния инерционности наружных ограждений зданий на режим отпуска теплоты в условиях АСУ ТП. / В кн.: Индустриальные отопительно-вентиляционные и санитарно-технические системы и технология их монтажа. Л.: ВНИИГС, 1983, с. 23–29.
34. *Чистович С. А., Харитонов В. Б.* Автоматизированные системы теплофикации, теплоснабжения и отопления. /АВОК С-З, СПб: 2008. – 399 с.
35. *Шуцкий А. И.* Аэродинамические испытания вытяжных вентиляционных шахт. /В кн.: Вентиляция промышленных и сельскохозяйственных зданий. НИИ Санитарной техники, Сб. №9, Госстройиздат, М.: 1961, с. 114–119.
36. *Todesco G.* Энергоэффективные здания или как далеко можно идти? – АВОК, 1997, № 2, с. 6–8, 11–15.