Светлой памяти академика РААСН, президента АЦ ТЭЭТ, д-ра техн. наук **Сергея Андреевича Чистовича**, замечательного человека, истинного петербургского интеллигента, корифея теплоснабжения и автоматизации, основателя и руководителя информационного бюллетеня «Теплоэнергоэффективные технологии». С нами надолго останутся Ваше обаяние, научные идеи и серьезные книги.

УДК 612.52

ТЕПЛОПОТЕРИ И ОТОПИТЕЛЬНАЯ НАГРУЗКА ЗДАНИЙ: КОМПЛЕКСНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ (ДИНАМИЧЕСКИЙ) ПОДХОД

А. Г. Сотников, д-р техн. наук, профессор, НП «АВОК-С-З», Санкт-Петербург

Инженер часто находится в плену заблуждений — общесложившихся и собственных, зависящих в основном от критичности мышления и уровня физико-математической подготовки. Привычка к традиционному, вера в старые книги и мнения «боссов», неумение спорить и учитывать всю картину явления могут его подводить. Действительно, нет ничего проще, чем традиционное, впитанное с «молоком матери», представление о теплопотерях. О нем написано немало книг[1], начиная с 30-х гг. XX в. Но верно ли это представление и не является оно тупиком в дальнейшем познании? Как пример этим словам в статье рассмотрены основы другого, а именно динамического подхода к феномену теплопотерь и аккумуляции теплоты. Попытаемся получить новый результат, применив системный анализ и одновременно учитывая нестационарность тепловых процессов, климатических воздействий на здание и математические методы, совместно описывающие эти явления. Из-за сложности и многофакторности проблемы, а также крайней ограниченности объема статьи выделим только основные вопросы, а их описание приведем в значительной мере на основе чувственного восприятия (графиков).

Общеизвестна высокая доля расхода теплоты на отопление как в балансе каждого здания, так и в масштабах региона и страны. Поэтому совершенствованию технических решений и методов оценки эффективности посвящено очень много статей в журналах «ТЭЭТ», «С.О.К.», «Инженерные системы». Например, этому уделено большое внимание в статьях В. Г. Гагарина («АВОК». № 1, 2, 3, 2009), В. И. Ливчака (№ 2, 7, 2009; № 3, 2010; № 3, 2011), В. Н. Карпова (№ 8, 2009), Е. Г. Малявиной (№ 8, 2010) и др. Мы не ставим здесь задачу все обсудить и разложить по полочкам. В конце концов, автор прав в рамках его представлений и допущений, но каков будет ответ в других условиях?

Остановимся на очевидном, что все и всегда упрощают по умолчанию и *дружно* не замечают. Это, прежде всего, нестационарность воздействий температуры, а также ветра и радиации на здания и его ограждения. Во всех расчетах исходят из условия стационарности процессов, то есть пренебрегают происходящей аккумуляцией теплоты наружных, а тем более внутренних ограждений. Теплопотери через окна этому соответствуют, а наружные стены и кровля — нет. Поэтому фактическое поступление теплоты или холода через стены никогда не соответствуют расчету, разве что при пятисуточном расчетном условно-стационарном периоде. Система отопления должна реагировать на «быстрые» теплопотери (через окна) [18, 19], а доля их площади среди всех ограждений помещения сильно различается (от 5 до 50 %). Известен удачный немецкий опыт управления отоплением по величине *быстрых* теплопотерь [21].

Если говорить о температуре воздуха как регулируемом параметре в помещении, то прежде всего нужно учитывать как *конвективные* теплопотери, так и *конвективную* теплоотдачу приборов. При воздушном отоплении это есть вся подводимая в помещение теплота, при других

[1] Здесь имеются в виду известные отечественные научные школы, авторы учебников, монографий и статей москвичи: В. М. Чаплин, В. Д. Мачинский, П. Н. Каменев, А. Н. Сканави, И. Ф. Ливчак, Н. Н. Разумов, В. И. Ливчак, А. Л. Наумов, В. И. Сасин, Л. М. Махов, Е. Г. Малявина и др.; ленинградцы: Б. М. Аше, Г. А. Максимов, А. И. Орлов, Я. М. Миниович, Е. Ф. Бродский, В. М. Гусев, Е. А. Белинкий, В. Е. Минин, А. И. Тютюнников и др.; киевляне: Б. Н. Лобаев, Н. Т. Ральчук и др.; минчанин Э. Х. Одельский, его коллеги и многие другие отечественные ученые-отопленцы.

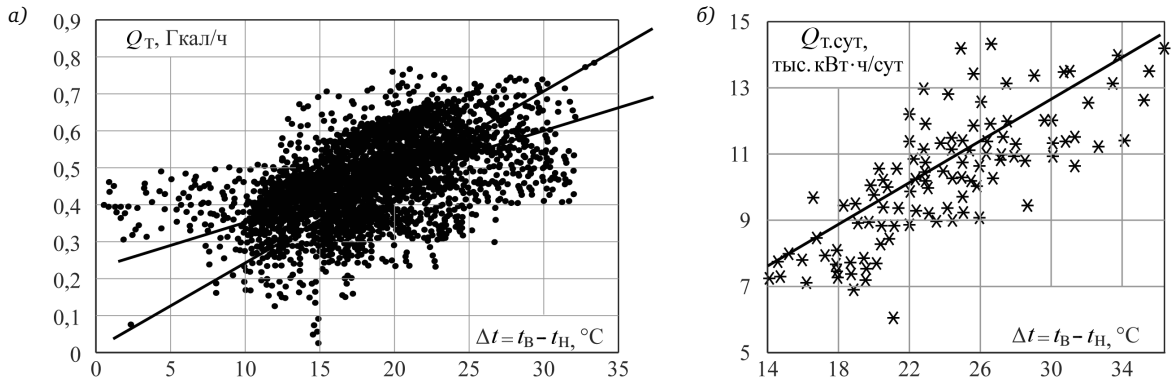


Рис. 1. Зависимость фактически потребленной теплоты на отопление, естественную вентиляцию (проветривание) и инфильтрацию жилых зданий от разности средних температур $t_в - t_{н\,i}$: *а* — среднечасовые данные расходов теплоты в жилых зданиях, приведенные [11] для семимесячного периода наблюдений за отопительный период 2003/04 гг. в Санкт-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 [7]; характеристики здания: число квартир — 256, общая площадь — 15 тыс. м^2, строительный объем примерно 45 тыс. м^3, теплопотребление при $t_н = -29$ °С, $Q_Т = 17\,410$ кВт · ч/сут = = 725 кВт, удельная отопительная характеристика $q_{Т.\,от} = 0{,}33$ Вт/(м^3·°С), что удовлетворяет требованиям СНиП [13]

системах отопления — только частично. Такое разделение теплоты традиционно применяют, например, при расчете воздухообмена в помещении с теплоизбытками, производимого на основе методики Г. М. Позина с использованием известного коэффициента k_t [14]. Аккумуляция теплоты и холода внутренними поверхностями ограждений и оборудования может быть оценена только приблизительно, т. к. коэффициент теплообмена на поверхностях вентилируемого помещения зависит от циркуляции воздуха, кратности воздухообмена, вида струй и в итоге трудноопределим.

Отопительная нагрузка здания — весьма сложная и неоднозначная величина, являющаяся совокупностью основных и добавочных теплопотерь, расходов теплоты на инфильтрацию, естественное проветривание, уменьшаемое радиационной теплотой и др. Поэтому многочисленные исследователи фактической нагрузки, как правило, получали не линейную зависимость от температуры, а более сложную, не поддающуюся какому-либо анализу. На рис. 1 показаны подобные данные по результатам исследований В. А. Пухкала, Л. Р. Крумера [11], Ю. А. Матросова, И. Н. Бутовского, Д. Гольдштейна [7]. В таких случаях предполагают многофакторность явления и стохастический характер климатических воздействий и «человеческого» фактора. Говорить о каком-то порядке и линеаризации зависимостей не приходится.

Наиболее сложный случай воздействия температуры наружного воздуха и ветра на *старые* негерметичные светопроемы требует отдельного анализа и отражен в многочисленных публикациях (Б. М. Красовского и др., А. П. Васьковского и др.[1] № 7, 1963; № 9, 1968; Е. И. Семеновой и А. В. Щербакова; А. Н. Сканави, № 1, 1984; Н. Н. Левченко, Е. А. Девятко и др. № 3, 1970). Выбирая самое главное, представим учет этих воздействий в виде номограммы по разным источникам, что наиболее наглядно. Как специалисты-климатологи, так и теплотехники единодушно пришли к похожим зависимостям. На рис. 2 представлена сводная номограмма и пример, согласующий расчеты по данным Л. Е. Анапольской, Л. С. Гандина [1] и А. П. Васьковского, Е. А. Девятко и Н. Н. Левченко [3] и др.

Пример 1. Сравнить результаты расчета теплопотерь старых окон по разным методикам при наружной температуре $t_н = -22$ °С, скорости ветра $v_н = 9{,}5$ м/с и относительной площади остекления $\bar{f}_{ост} = 0{,}3$, величина $\Delta t_н/v_н = -2{,}05$ °С (с/м), поправка $\Delta t_{н.\,экв} = (-2{,}05) \cdot 9{,}5 = -20$ °С. Окончательная 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.

Общая постановка задачи о динамических воздействиях пояснена контрольной поверхностью (рис. 3). На ней представлена совокупность внешних климатических воздействий на ограждения, характеристики этих ограждений и заданные нормируемые оптимальные и допустимые

[1] Здесь и далее указаны ссылки на публикации в центральном отечественном журнале «Водоснабжение и санитарная техника».

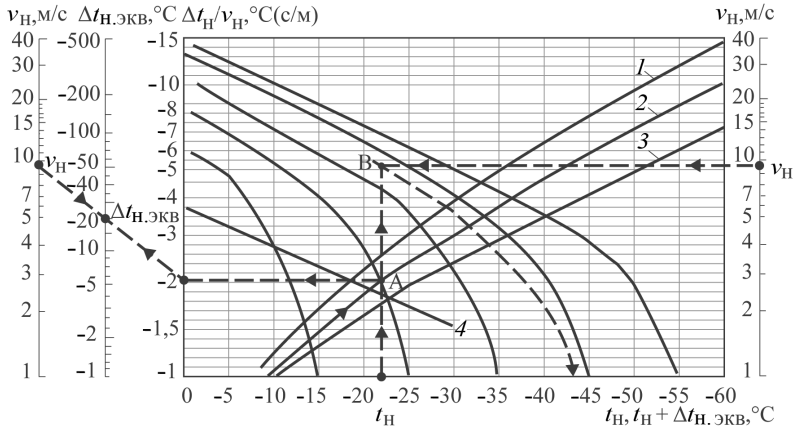


Рис. 2. Номограмма для определения поправки $\Delta t_{н.\ экв}$ к температуре наружного воздуха, учитывающей скорость ветра и относительную площадь остекления: $\bar{f}_{ост}$ = = 0,4 — линия *1*; $\bar{f}_{ост}$ = 0,3 — линия *2*; $\bar{f}_{ост}$ = 0,2 — линия *3* по данным работы [3], линия *4* — 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 [1]

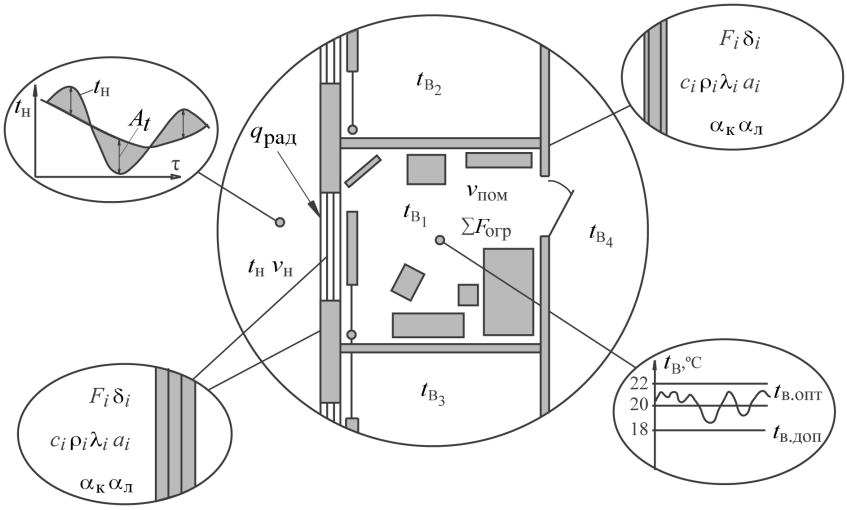


Рис. 3. Условное представление контрольной поверхности отапливаемого помещения в рамках решаемой задачи о теплопотерях при динамическом подходе с выделением внешних климатических факторов, нормируемой температуры помещения, теплофизических характеристик ограждения и условий теплообмена на поверхностях

температурные условия в жилых и общественных зданиях. Возмущения температурного режима возникают при одновременном воздействии на ограждения таких метеовеличин, как температура наружного воздуха $t_н(\tau)$, скорость $v_н(\tau)$ и направление ветра, интенсивность солнечной радиации $q_{рад}(\tau)$, как источник поступления теплоты в помещение. Общепринято, что основным возмущением на температурный режим помещения в холодное время года является температура наружного воздуха. Поэтому рассмотрим основные представления (модели) ее изменения.

Основные физические модели изменения температуры наружного воздуха, используемые в ОВ-технике, представлены на графиках (рис. 4, *а–г*). Выбор той или иной модели зависит от рассматриваемого временного отрезка (сутки, период года, весь год), характера решаемой задачи (технической, экономической), применяемых математических методов (спектральный анализ, временные ряды, статистические методы, выборка краев, методы аппроксимации сложных зависимостей, дифференциальные уравнения воздушно-теплового режима в частных производных, гармонический анализ и др.). Кроме того требуют обобщения *инерционность* ограждений здания при разных граничных и начальных условиях и *теплообмен на поверхностях* при циркуляции воздуха в помещении.

Собранные вместе, эти и подобные зависимости дают достаточно полное представление о возможностях использования данных о температуре,

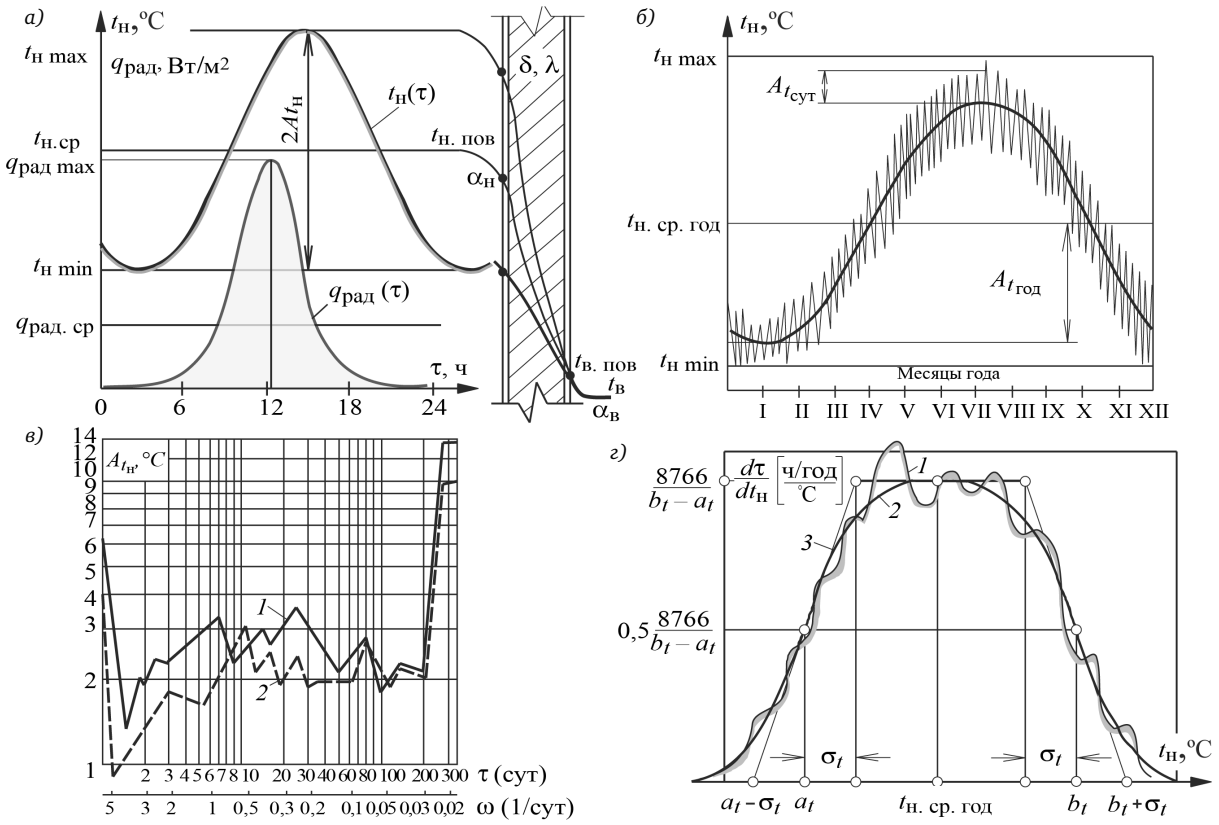


Рис. 4. Графики зависимостей, характеризующих физическую картину изменения температуры наружного воздуха: *а* — периодическое изменение температуры наружного воздуха и плотности потока суммарной солнечной радиации $q_{рад}$, Вт/м^2, воздействующих на наружное ограждение (стену) здания в течение суток и затухающих в его массе; *б* — годовое изменение температуры наружного воздуха как результат наложения двух основных (суточной и годовой) гармоник колебаний; *в* — спектральная характеристика колебаний температуры наружного воздуха на разных частотах по данным ГГО им. А. И. Воейкова:

1 — Иркутск, *2* — Санкт-Петербург;

г — плотность распределения температуры наружного воздуха как случайной величины:

1 — эмпирическое распределение; *2* — теоретическое композиционное распределение [14]; *3* — теоретическое приближенно-трапецеидальное распределение

а также радиации и ветре в различных расчетах, но одновременно нуждаются в более подробных комментариях и ссылках на публикации. *В рассматриваемой проблеме управления наибольшее значение имеет анализ временных рядов хода наружной температуры, который рассмотрен ниже.*

Временные ряды хода ежедневной температуры наружного воздуха за несколько десятилетий для большого числа городов России представлены на сайте www.meteo.ru. Это позволяет оценить как текущие теплопотери, фактические и расчетные, так и требования к управлению системой отопления. На рис. 5 представлен фрагмент такого ряда для Москвы в «теплый» 1998 г. и «холодный» январь 2010 г. Несмотря на сложный характер кривых и различные уровни температур, после предварительного их сглаживания и отделения высоко- и низкочастотных колебаний, удалось определить основные характеристики фрагментов январского ряда [8 и др.]. В дальнейшем анализе использованы известные понятия *тренда* (устойчивое среднее), $\pm b$, °C/сут, амплитуды $A_{t_н}$, °C и примерного периода низкочастотной составляющей $\tau_п$ = 15…20 сут. Показанные на рис. 5 кривые *2′* и *3′* имеют разные полупериоды и, строго говоря, гармоническими *не являются*. В результате такого предварительного анализа оказалось, что в январе 1998 г. наблюдался длинный и слабо отрицательный тренд температуры b_t = –8/31 = –0,26 °C/сут и отмечена самая «медленная» из возможных в этом ряду гармоника с периодом $\tau_п$ = 16 сут, ее началом τ_0 = 05.01 и амплитудой $A_{t_н}$ = 4 °C. Эти данные служат основой для расчета и анализа текущих теплопотерь через стены и кровлю здания, формула (4).

Разделение теплопотерь помещения на *быстрые* и *медленные* предложено С. А. Чистовичем [18, 19] еще в 50-х г. XX в. Рассматривая динамическую задачу управления системой отопления, он

писал: *«Установлено, что для стабилизации внутренней температуры в условиях переменных наружных тепловых воздействий необходимо в САУ отпуском теплоты предусматривать дифференцированный учет медленных и быстрых тепловых потерь»*. Как пример пренебрежения этими процессами и аккумуляцией теплоты ограждениями рассмотрим статью [9]. Ее авторы моделировали тепловой режим одноэтажного здания. Оказалось, что в течение суток отключения отопления при $t_н(\tau) = -29 + 5\cos[2\pi(\tau - 13)/24]$ температура воздуха в здании снижалась от 20 до –10 °С, что вряд ли возможно при наличии в таком здании наружных и внутренних непрозрачных и теплоинерционных ограждений и мебели. Для доказательства этого были выполнены расчеты по формуле (8) при $\alpha_{к.\,ср} = 2$ Вт/(м^2 · °С), $k_{ок} = 2$ Вт/(м^2 · °С), $\tau = 24$ ч, $M = \mathrm{Bi}^2\mathrm{Fo} = 0{,}59$ и $1 - \theta_{пов} = 0{,}50$. Такому быстрому изменению температуры воздуха соответствует относительная площадь окон $\vec{F}_{ок} \to 1$, т. е. неучет каких-либо теплоинерционных ограждений здания.

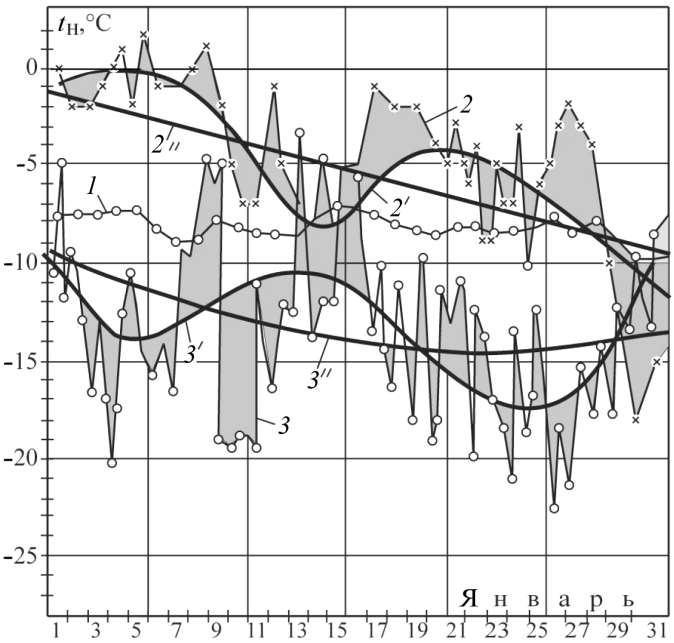


Рис. 5. Фрагмент выборки временного ряда наружной температуры в период 1949–2010 гг. в Москве (ВДНХ), за *теплый* январь 1998 г. и *холодный* январь 2010 г.:

x — 1998 г. («теплый» январь); ◦ — 2010 г. («холодный» январь)

1 — средняя многолетняя температура на данное число января (норма) в Москве по многолетним наблюдениям; *2, 3* — ход температуры в 1998 и 2010 гг.; *2′, 3′* — приближено-периодическая сглаженная *медленная* кривая, близкая к гармонике; *2″, 3″* — тренд температуры наружного воздуха в январе

Инерционность наружных и внутренних ограждений определяет процесс передачи теплоты через них, зависит от их массивности [18] и определяется известной постоянной времени такой конструкции $T_{огр} = c\rho\delta/(3600\alpha_{к.\,ср})$. На рис. 6 показано изменение медленных теплопотерь через наружные ограждения разной массивности и инерционности в течение 10 суток. Оригинальный подход к оценке инерционности предложен М. В. Шаприцкой [20]. Используя графические представления об экспоненциальном переходном процессе за время τ при постоянной времени T, она обсуждаемую инерционность графически представляла площадью выше растущей или ниже падающей экспоненты по отношению к общей площади четырехугольника при единичном возмущении $t = 1$. Например, если рассматривается время $\tau = 4$ сут, а постоянная времени ограждения $T_{огр} = 1$ сут, то аккумулируемая за это время теплота составит ок. 27 % подведенной. Для сравнения двойное остекление практически безынерционно, по данным [18] его постоянная времени $T_{ок} = 0{,}1\ldots0{,}2$ ч, поэтому аккумуляцией теплоты пренебрегают.

Механизм изменения температуры воздуха в отапливаемом помещении при неуправляемом отоплении таков. Если температура $t_н(\tau)$ некоторым образом снижается, то так же, практически безынерционно, растут *быстрые* теплопотери. Однако снижение температуры $t_в$ происходит медленно, его *тормозят* еще теплые поверхности ограждений, оборудования, мебели и теплоемкость воздушного объема. Этому случаю соответствует уравнение переходного процесса изменения температуры в сосредоточенных параметрах

$$\Delta t_в(\tau) = \frac{-\Delta Q_{ок}}{q_{огр} + q_{возд}} = \frac{k_{ок}F_{ок}}{\alpha_{к.ср}(1-\theta_{пов})\sum F_{огр} + V_{пом}c_в\rho_в\left(k_р + 1/\tau\right)}\Delta t_н(\tau), \quad (1)$$

где искомое изменение температуры является отношением возмущающего теплового потока (числитель) к аккумулирующей массе ограждений и воздуха (знаменатель). Кратность воздухообмена $k_р$ учитывают при наличии механической вентиляции и (или) воздушного отопления. Наиболее сложно учесть величину $\theta_{пов}$. Для этого предварительно вычисляют теплофизический комплекс, предложенный А. В. Лыковым [6], как $M = \mathrm{Bi}^2\mathrm{Fo}$, в котором исключен определяющий размер ограждения, после чего используют формулу

$$\theta_{пов} = \frac{dt_{в.\,пов}(\tau)}{dt_в} = 1 - 0{,}43M^{-\beta}, \quad (2)$$

где при $M < 1{,}0$ $\beta = 0{,}20$, а при $M > 1{,}0$ $\beta = 0{,}37$. Для упрощения расчетов по формуле (2) удобно использовать график (рис. 7, *а*).

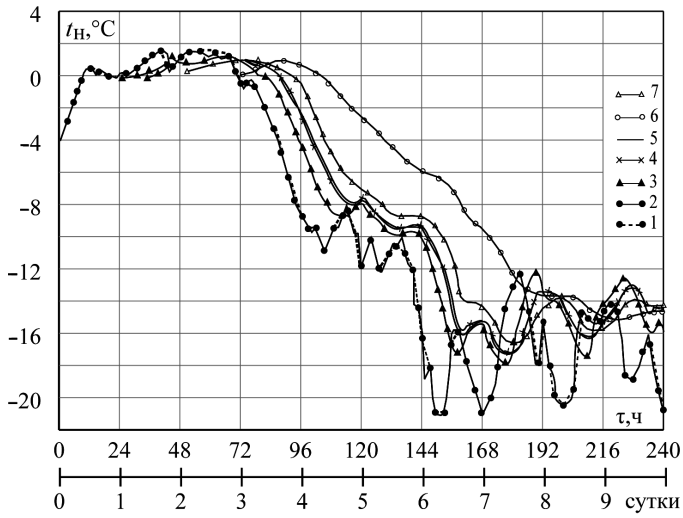


Рис. 6. График зависимости изменения медленных тепловых потерь через наружные ограждения здания разной массивности:

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

Учет конвективного теплообмена ($\alpha_к$) в вентилируемых помещениях производят на основе энергии, вносимой в помещение, а также кратности циркуляции и удельных теплоизбытков по разным данным. В результате обобщения многих исследований на эту тему на рис. 7, *б* представлен сводный график изменения среднего коэффициента конвективного теплообмена на поверхностях разных помещений, исследованных П. В. Участкиным (линии 1–3), в зависимости от кратности воздухообмена $k_р = 1\ldots100$ ч$^{-1}$. Из него видно, что существует нелинейная зависимость между этими величинами. Обобщены данные, связывающие вносимую в помещение энергию или удельные теплоизбытки со средней подвижностью воздуха (рис. 7, *в*).

Расчет текущих теплопотерь ограждений в сутки τ с учетом *предыстории* изменения наружной температуры. Мы предлагаем такой расчет проводить следующим образом. *Быстрые* теплопотери через окна при их малой тепловой инерции *следят* за текущей температурой наружного воздуха по известной зависимости

$$Q_{ок.\,к}(\tau) = k_{ок}F_{ок}\,[t_в - t_н(\tau)]. \qquad (3)$$

Совершенно иначе реально происходят и описываются конвективные *медленные* теплопотери через непрозрачные наружные ограждения (стены, кровля). В формуле учитываются начальная температура $t_{н\,0}$ до начала тренда τ_0, сут, а также влияние *тренда* b_t, °C/сут и *медленной* гармоники изменения $t_н$ с периодом $\tau_п$, сут, начальным временем τ_0, сут, амплитудой $A_{t_н}$, °C, запаздыванием температурной волны ε, сут. На такой частоте затухание температурных колебаний в ограждении ν будет наименьшим (см. пример 2). Соответственно этим предпосылкам уравнение для текущих теплопотерь во время τ можно определить по зависимости

$$Q_{ст.к} = 1{,}66F_{ст}\times \left\{\frac{k_{ст}}{\alpha_к+\alpha_л}(t_в - t_{н\,0}) - \theta\, b_t\sum\frac{h_i^2}{a_i} + \frac{A_{t_н}\cos\left[2\pi(\tau-\tau_0+\varepsilon)/\tau_п\right]}{\nu_i}\right\}^{4/3}, \qquad (4)$$

где h — толщина, м; a — коэффициент температуропроводности, м^2/сут; τ — текущее время, сут. В частном случае при отсутствии тренда ($b_t = 0$) и медленной гармоники ($A_{t_н} = 0$) уравнение (4) превращается в известное, однако учитывает только конвективную теплоту, отдаваемую наружной стеной воздуху. Относительная температура θ при линейном изменении наружной (трен-

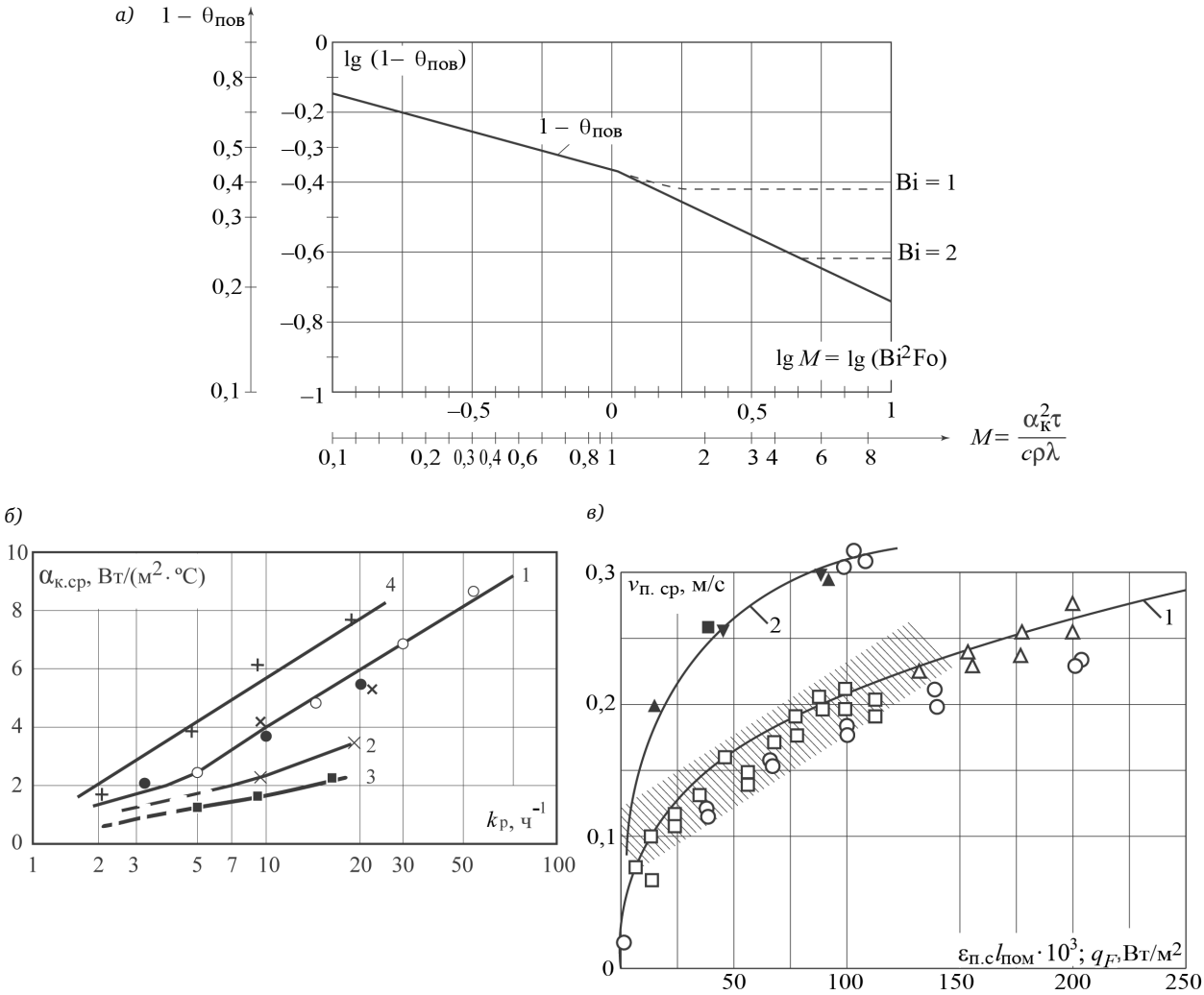


Рис. 7. Комплекс зависимостей для расчета переходных температурных режимов отапливаемых и вентилируемых помещений: *а* — график температурного критерия $\theta_{пов}$, иначе — относительной температуры поверхности полуограниченного массива (——) и однослойной пластины (– – –) при скачкообразном изменении температуры окружающего воздуха и граничных условиях третьего рода в зависимости от комплексного критерия $M = Bi^2Fo = \alpha_к^2\tau/(c\rho\lambda)$; *б* — сводный график изменения среднего коэффициента конвективного теплообмена на поверхностях исследованных П. В. Участкиным помещений (линии 1–3) в зависимости от кратности воздухообмена $k_р$ = 1…100 ч$^{-1}$. Дополнительная линия (4) соответствует коэффициенту $\alpha_{к.ср}$, полученному в ЛТИХП в опытах на модели: × — отрывные струи, + — настильные струи; *в* — зависимость средней подвижности воздуха в помещении с перемешивающей вентиляцией и охлаждающими потолками от удельной тепловой нагрузки (потребности в холоде). Линия 1 — данные Behne, опытные точки — данные K. Fitzner. Обозначения опытных точек характеризуют способ размещения источников теплоты: ∘ — по торцам помещения; □ — равномерное в плане; Δ — в треугольной зоне помещения. Линия 2 и опытные точки — данные Е. М. Эльтермана в зависимости $v_{в.ср}$ от произведения удельной энергии приточных струй на определяющий размер помещения (см. труды ВЦНИИ Охраны труда, вып. 40, 1966)

да) по уравнению $t_н = t_{н\,0} + b_t\tau$ для ограждения толщиной h, м, и коэффициенте температуропроводности a, м^2/сут, можно приближенно определить при $Bi_в > 2$ по зависимости $\theta \approx 0{,}7Fo/Bi_в$, а более точно — по данным А. И. Пеховича и В. М. Жидких [10], представленным на графике (рис. 8, *а*). Аналогичная зависимость при экспоненциальном изменении тренда показана на графике (рис. 8, *б*) [10]. Для этого случая второе слагаемое в формуле (4) записывают как $-\theta(t_{н.\,кон} - t_{н\,0})$, где в формуле для экспоненциального процесса β — величина, обратная постоянной времени $T_{сут}$.

Поясним методику расчета текущих теплопотерь для конкретного пункта, года, месяца и даты характерным примером, предварительно определив теплофизические характеристики наружной стены.

Пример 2. Выполнить расчет и анализ теплотехнических и инерционных характеристик наружной стены, состоящей из пенобетона и кирпича (фактурным слоем пренебречь). Теплофизические характеристики пенобетона указаны в числителе, кирпича — в знаменателе: δ = 0,4/0,13 м, λ = 0,20/0,60 Вт/(м · °С), c = 840/840 Дж/(кг · °С), ρ = 600/1100 кг/м^2,

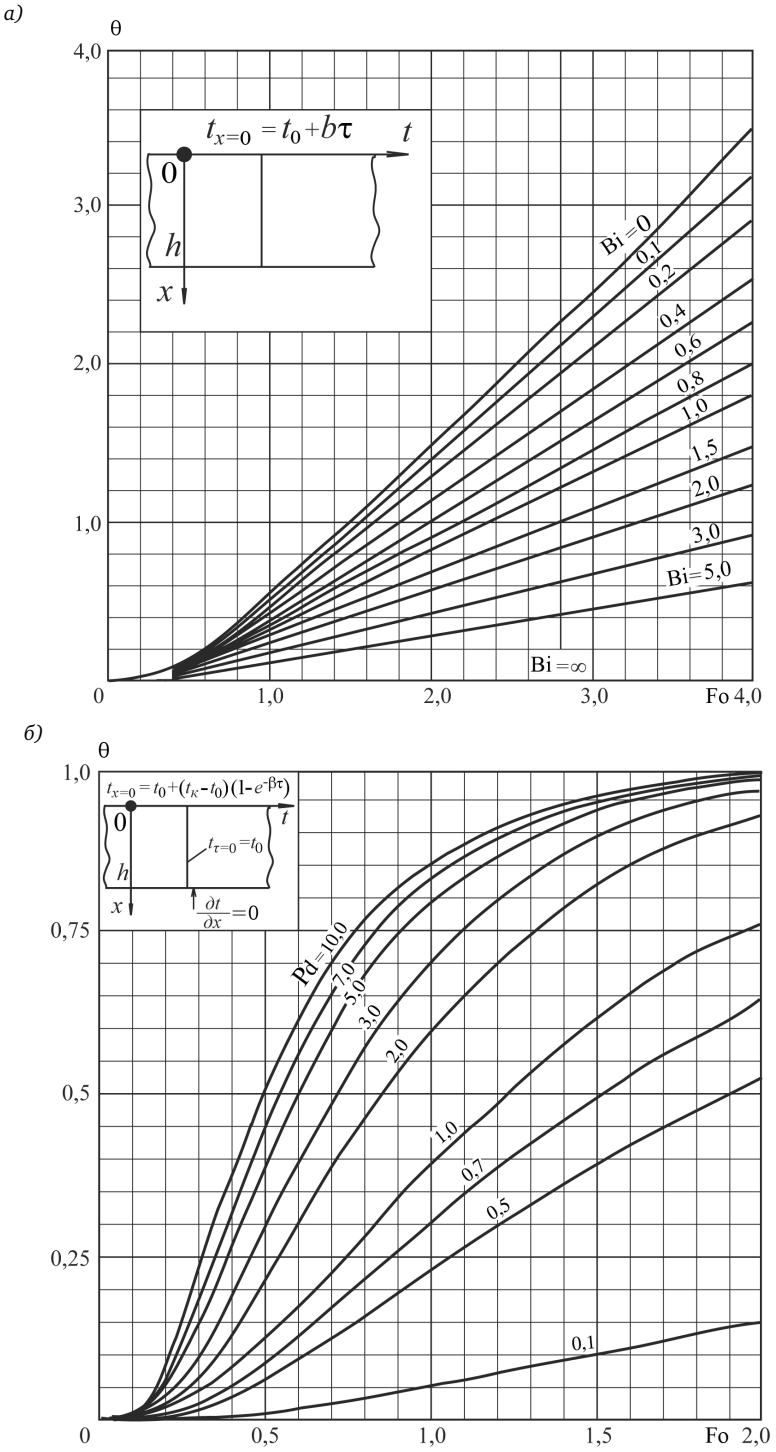


Рис. 8. График зависимости относительной температуры внутренней поверхности θ: *а* — при линейном изменении наружной (тренда) по уравнению $t_н = t_{н\,0} + b_t\tau$ для ограждения толщиной h и коэффициенте температуропроводности a, в зависимости от критериев $Bi_в$ и Fo; *б* — при экспоненциальном изменении тренда температуры наружного воздуха и наружной поверхности ограждения в зависимости от критериев $Pd = h^2/\beta a$ и $Fo = a\tau/h^2$

R = 2/0,217 (м^2 · °С)/Вт, a = 0,034/0,056 м^2/сут, S_{24} = $S_{1с}$ = 2,95/6,33 Вт/(м^2 · °С), ($RS_{1с}$) = = 5,9/1,37. В итоге термическое сопротивление такой стены R = 2,217 (м^2 · °С)/Вт, общий коэффициент теплопередачи $k \approx$ 0,4 Вт/(м^2 · °С), массивность стены при периоде колебаний $\tau_п$ = = 24 ч = 1 сут составляет $\Sigma RS_{1с}$ = 7,27. Затухание температурных колебаний [2] при $\tau_п$=1 сут $\nu_{1с}$ = exp($\Sigma RS_{1с}/2^{0,5}$) = exp (7,27/$2^{0,5}$) = 174; при $\tau_п$ = = 2 сут $\nu_{2с}$ = exp($\Sigma RS_{1с}/4^{0,5}$)= exp(7,27/$4^{0,5}$) = = 37,7; при $\tau_п$ = 4 сут $\nu_{4с}$ = exp($\Sigma RS_{1с}/8^{0,5}$)= = exp(7,27/$8^{0,5}$) = 13; при $\tau_п$ = 16 сут $\nu_{16с}$ = = exp($\Sigma RS_{1с}/32^{0,5}$) = exp(7,27/$32^{0,5}$) = 3,6. Таким образом на высоких частотах колебания температуры наружного воздуха затухание существенно и поэтому не влияет на температуру внутренней поверхности наружной стены. При низких частотах, наоборот, затухания незначительны, а колебания температуры на внутренней поверхности при определении теплопотерь требуют учета.

Пример 3. Рассчитать удельный конвективный тепловой поток, поступающий от внутренней поверхности наружной стены площадью $F_{ст}$ = 1 м^2, в условиях примера 2 при $t_в$ = 20 °С для Москвы на τ = 15.01.1998 при $t_{н.\ ср}$ = –8 °С, если по данным рис. 5 начало линейного тренда соответствовало времени τ_0 = 05.01.1998, начальной температуре $t_{н\,0}$ = 0 °С, величина тренда b_t =–0,28 °С/сут, *медленная* гармоника температурной волны имела такие характеристики: $\tau_п$ = 16 сут, $\nu_{16с}$ = 3,6, $A_{t_н}$ = 4 °С, сдвигом фазы колебаний ε пренебречь. Коэффициенты теплообмена на внутренней поверхности стены принять: $\alpha_к$ = 3 Вт/(м^2 · С), $\alpha_л$ = 5 Вт/(м^2 · С). Результаты расчета по предлагаемой методике сравнить с традиционным расчетом стационарных теплопритоков через наружную стену при заданной условно-стационарной наружной температуре.

Для расчета по формуле (4) предварительно вычисляем критерий $Bi_в = \alpha_к \Sigma R$ = 3 · 2,22 = = 6,66, а также критерий $Fo = (a_{пб}/\delta^2_{пб} + a_к/\delta^2_к) \times$ $\times (\tau - \tau_0)$ = (0,034/0,4^2 + 0,056/0,13^2)(13 – 5) = = 28,16. Этим условиям линейного тренда изменения наружной температуры соответствует температурный комплекс $\theta \approx 0{,}7Fo/Bi$ = = 0,7 · 28,16/6,66 ≈ 3. Удельный поток конвективной теплоты (теплопотерь наружной стены) по формуле (4) будет равен $q_к$ = 1,66 · 1[0,4(20 – – 0)/8 – 3(–0,28)(0,4^2/0,034 + 0,13^2/0,056) + + 4/3,6]$^{4/3}$ = 19,5 Вт/м^2. В этом случае с учетом *предыстории* изменения температуры наружного воздуха за рассматриваемый период времени разность температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены (выражение в прямых скобках) будет равна $\Delta t_{в.\ пов}$ = 1 + 4,2 + 1,1 = = 6,3 °С, чему соответствует $\alpha_к$ = 1,66 · 6,3$^{1/3}$ = = 3,1 Вт/(м^2 · °С). Другой результат можно получить в том же расчете, предполагая $t_{н.\ ср}$ = –8 °С, при этом не учитывая ни тренд, ни «медленную» гармонику изменения наружной температуры: $q_к$ = 1,66 · 1{0,4[20 – (–8)/8]}$^{4/3}$ = 26 Вт/(м^2 · °С). Различие результатов расчета при понижении наружной температуры объясняется учетом происходящей аккумуляции холода конструкцией наружной стены. Аналогично при повышении наружной температуры знак различия результатов изменится на противоположный.

Уточнение коэффициента конвективной теплоотдачи. При совместном учете лучисто-конвективного теплообмена на внутренней поверхности наружных стен принимают $\alpha_к+\alpha_л$ = = 8,7 Вт/(м^2 · °С) [13], при этом коэффициент лучистого теплообмена равен $\alpha_к$ = 0,85 · 5,75 = = 4,9 Вт/(м^2 · °С). В этом случае вычитанием получаем $\alpha_к$ = 8,7 – 4,9 = 3,8 Вт/(м^2 · °С), чему для условий свободной конвекции у вертикального ограждения [2] соответствует перепад температур $\Delta t_{в.\ пов}$ = ($\alpha_к$/1,66)^3 = (3,8/1,66)^3 = 12 °С. Однако по современным требованиям теплозащиты зданий СНиП [13] нормируемый перепад температур должен быть $\Delta t_{в.\ пов}$ = 4…4,5 °С. Значит, в этих условиях коэффициент конвективной теплоотдачи будет меньше, а именно $\alpha_к$ = 1,66 · 4$^{1/3}$=2,65 Вт/(м^2 · °С). Изменив теплозащиту наружных ограждений, эту важную для расчетов величину не скорректировали. В результате, фактически происходящие конвективные теплопотери стен оказываются несколько меньше, чем учитываемые в расчетах.

Приведем характерные задачи отопительной техники, решаемые на основании учета динамических режимов, происходящих в здании.

Расчетная температура наружного воздуха для определения теплопотерь и мощности системы отопления [15]. Традиционные и не обсуждаемые представления о единой для всех случаев расчетной *пятидневочной* наружной температуры для определения теплопотерь, сформированные сто лет назад, никак не учитывают теплофизическую природу потерь теплоты разными ограждениями, современную площадь остекления и поэтому содержат методические ошибки. Это особенно важно при современном увлечении архитекторов остеклением многих общественных зданий, достигающим 60–80 % и более от общей площади фасада. В этих условиях актуальна методика, позволяющая достаточно объективно оценить правомерность применяемого нормирования расчетной отопительной температуры для помещений, имеющих разный, часто повышенный процент остекления фасада,

особенно для угловых помещений при заданной величине допустимого понижения температуры воздуха в них.

Такую методику можно реализовать на основе рассмотрения физических процессов (рис. 9, *а*) и уравнения, описывающего снижение внутренней температуры при увеличении некомпенсируемых быстрых теплопотерь через окна, следующей зависимостью

$$\Delta t_{\text{н.р.х}}(\tau) = t_{\text{н.р.х}}(\tau) - t_{\text{н.абс min}} = \frac{\alpha_{\text{к.ср}} \sum F_{\text{огр}} \left[1 - \theta_{\text{пов}}(M)\right] + V_{\text{пом}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \left[k_{\text{р}} + 1/\tau\right]/3600}{k_{\text{ок}} F_{\text{ок}}} \times \Delta t_{\text{в.доп}}, \quad (5)$$

где все приводимые величины объяснены ранее. Для практических расчетов такой задачи приведена сводная номограмма рис. 9, *б*.

Поясним предлагаемую методику характерным примером.

Пример 4. Определить расчетную температуру для проектирования отопления угловых помещений последнего 21-го этажа банковского здания в Санкт-Петербурге, если при сплошном остеклении углового помещения и верхнем свете $F_{\text{ок}}/\Sigma F_{\text{огр}} = 0{,}50$ и остальных данных рис. 9, *б*. По этому графику при заданном $F_{\text{ок}}/\Sigma F_{\text{огр}} = 0{,}50$ для линии, построенной для Санкт-Петербурга определяем $\Delta t_{\text{н.р.х}} \approx 5{,}5$ °С, $\Delta t_{\text{н.р.х}} \approx 5{,}5 - 36 = -30{,}5$ °С, этой расчетной температуре соответствует максимальная непрерывная продолжительность ее

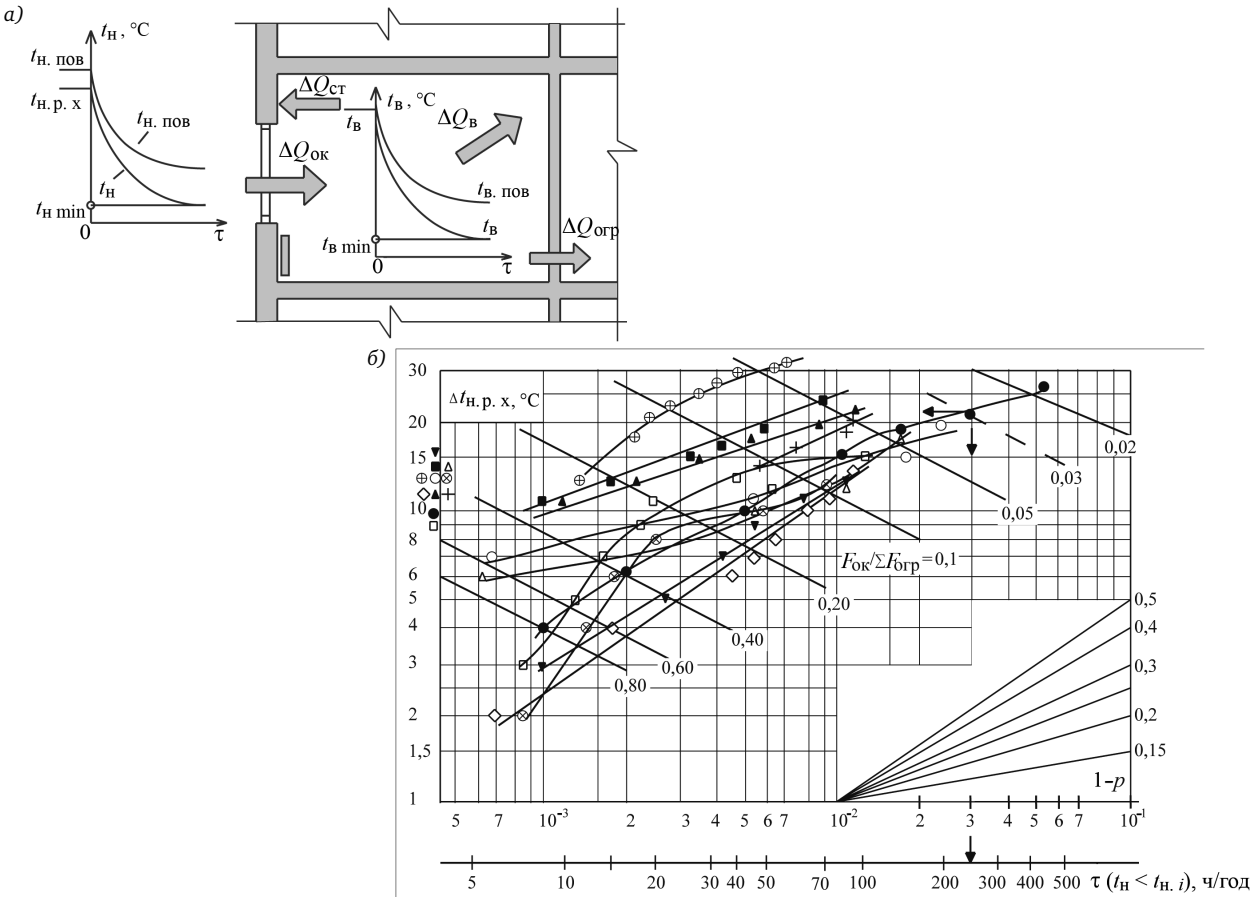


Рис. 9. Графические зависимости, объясняющие взаимосвязь площади остекления помещения и непрерывные продолжительности низких температур с выбором расчетной температуры наружного воздуха и мощности системы отопления: *а* — воздействие «быстрых» теплопотерь через окна на температуру воздуха в помещения и его внутренних поверхностей во времени при монотонном снижении температуры наружного воздуха от расчетной до абсолютно минимальной; *б* — сводная номограмма для определения расчетной температуры наружного воздуха в холодный период года $t_{\text{н.р.х}} = t_{\text{н.абс min}} + \Delta t_{\text{н.р.х}}$ в зависимости от относительной площади окон по отношению к общей площади ограждений и оборудования (мебели) помещения $F_{\text{ок}}/\Sigma F_{\text{огр}} = 0{,}02...0{,}80$ при $k_{\text{р}} = 0$, $\alpha_{\text{к}} = 2$ Вт/(м^2 · °С), $k_{\text{ок}} = 2$ Вт/(м^2 · °С), допустимом понижении температуры воздуха в помещении $\Delta t_{\text{в.доп}} = 18 \cdot 21 = -3$ °С [4] и непрерывной продолжительности низких температур наружного воздуха в разных городах по данным книг из серии «Климат городов» Гидрометеоиздата: ● — Санкт-Петербург; ○ — г. Киров; ■ — г. Архангельск; □ — г. Чита; ◊ — г. Чебоксары; ▲ — г. Сыктывкар; ▼ — г. Псков; ⊗ — г. Ашхабад [3.43]. Точки на вертикальной оси соответствуют расчетной разности температур $\Delta t_{\text{н.р.х}}$ между нормируемой расчетной температурой по параметрам «Б» при обеспеченности $p = 0{,}92$ и абсолютно минимальной температурой $t_{\text{н.абс min}}$ в данном пункте; эта разность составляет в среднем $\Delta t_{\text{н.р.х}} \approx 10...15$ °С. Пучок линий в правом нижнем углу номограммы используют для определения численного значения показателя степени m в зависимости $\Delta t_{\text{н.р.х}} = \Delta t_{\text{н}0}(1-p)^{-m}$

понижения, определяемая на горизонтальной оси, τ = 15 ч/год. Для сравнения в обычных помещениях с ограниченным остеклением принимают $t_{н.р.х}$ = –26 °С. Таким образом в данном помещении теплоотдача нагревательных приборов должна быть увеличена примерно на 10 %.

Приближенный расчет «остывания» здания при аварии системы отопления. Эта задача является весьма важной и характерной для эксплуатации энергосистем, в том числе систем водяного отопления многих зданий. Она встречается при авариях старых теплосетей и требует экстренного слива воды из системы. В типичном плане такого здания (рис. 10, *а*) выделены две группы помещений — наружные (зона I), примыкающие к наружным ограждениям, и внутренние (зона II), непосредственно не имеющие наружных ограждений.

Естественно, что при аварии в теплосети будут постепенно снижаться давление, расход и температура воды в подающем трубопроводе, быстро снизятся температура поверхности нагревательных приборов и их теплоотдача в помещения. Некомпенсируемые отоплением теплопотери, прежде всего так называемые *быстрые*, через безинерционные прозрачные ограждения — окна здания и помещения площадью $F_{ок}$ при коэффициенте теплопередачи $k_{ок}$ — приведут к постепенному, сложно описываемому снижению температуры воздуха в помещениях группы I, охлаждению ограждений (стен, перекрытий) как наружных, так и внутренних (рис. 10, *а*). Затем медленнее будет меняться температура воздуха во внутренних помещениях группы II.

Наибольший интерес представляет приближенный расчет изменения температуры воздуха $t_{вI}$ в каждом из помещений наружной зоны при неопределенности условий теплообмена на поверхностях. Оно будет очень медленно приближаться к наружной температуре, хотя за рассматриваемое время (сотни часов) эта температура изменится. При отсутствии механической вентиляции и подачи приточного воздуха в такое помещение уравнение теплового баланса за интервал времени $\Delta\tau$ при учете *быстрых* теплопотерь и аккумуляции холода ограждениями помещения и воздухом в его объеме запишем в виде:

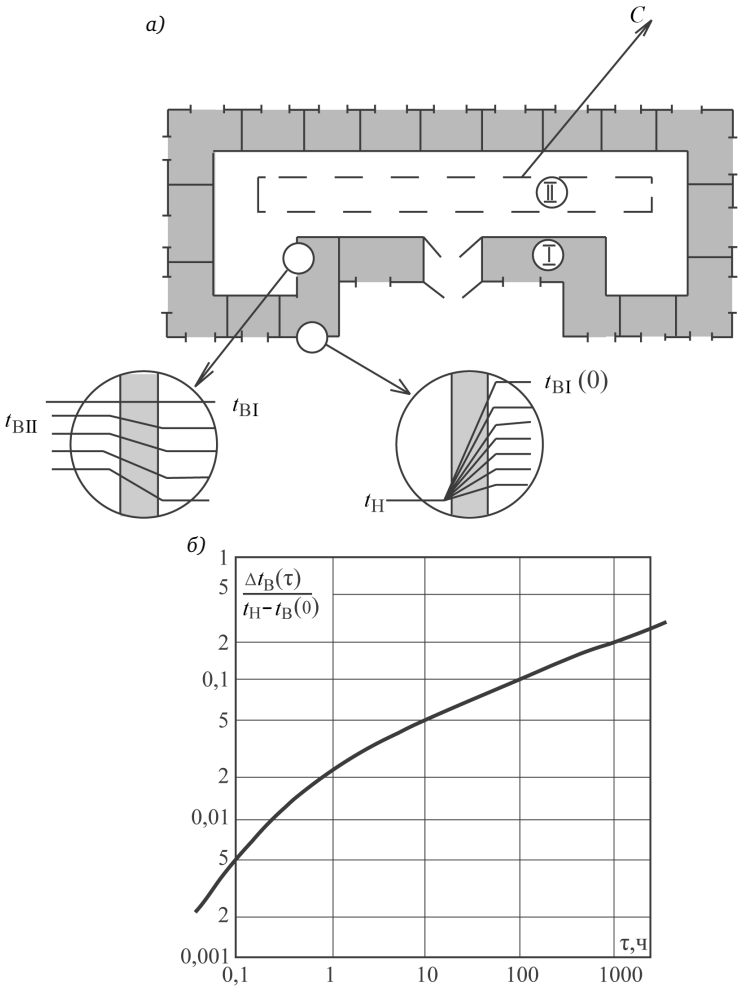


Рис. 10. Основные зависимости для расчета переходного температурного режима в помещениях здания при отключении системы отопления: *а* — характерный план здания с указанием наружной (I) и внутренней (II) групп помещений по отношению к наружным ограждениям и графики изменения температур воздуха во времени в этих зонах и по толщине наружных и внутренних стен; *б* — график снижения относительной температуры воздуха в помещениях группы I во времени в процессе остывания здания при аварии системы отопления

$$-\Delta Q_{ок} + \Delta Q_{огр} + \Delta Q_{в} = 0, \qquad (6)$$

или более подробно с учетом всех слагаемых этого уравнения

$$k_{ок}F_{ок}\left[t_{н} - t_{вI}(0) + \Delta t_{вI}(\tau)\right] + \\ + \alpha_{к.ср}\sum F_{огр}\left[1 - \theta_{пов}(\mathrm{Bi}^2\mathrm{Fo})\right]\Delta t_{вI}(\tau) + \\ + V_{пом}c_{в}\rho_{в}\Delta t_{вI}(\tau)/\Delta\tau = 0, \qquad (7)$$

где основные слагаемые объяснены у формулы (1). После несложных преобразований получаем общее выражение для изменения температуры воздуха в помещениях наружной зоны здания в долях от начальной разности температур во времени (см. рис. 10, *б*):

$$\frac{\Delta t_{вI}(\tau)}{t_{н} - t_{вI}(0)} = \\ = \left[1 + \frac{\alpha_{к.ср}\sum F_{огр}\left[1 - \theta_{пов}(\mathrm{Bi}^2\mathrm{Fo})\right] + V_{пом}c_{в}\rho_{в}/\Delta\tau}{k_{ок}F_{ок}}\right]^{-1}. \qquad (8)$$

Приближенный расчет снижения температуры воздуха в отапливаемых помещениях в «пиковых» зимних условиях. Этой проблеме посвящен ряд статей, например М. М. Грудзинского и др. (№ 1, 1980; «АВОК» № 7, 2011). Традиционно для систем отопления при определении расчетных теплопотерь принимают температуру наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью $p = 0{,}92$. Это объясняется тем, что другие более низкие средние температуры имеют меньшую непрерывную продолжительность. Например, для Санкт-Петербурга средняя температура наиболее холодной пятидневки при $p = 0{,}92$ — $t_{н.р.х} = -26$ °С, средняя температура наиболее холодных суток при $p = 0{,}92$ — $t_{н.х.сут} = -30$ °С, средняя температура наиболее холодных суток при $p = 0{,}98$ — $t_{н.х.сут} = -33$ °С, абсолютный минимум — $t_{н.абс\,min} = -36$ °С. На основе специализированной и подробной информации для Санкт-Петербурга [5] максимальная непрерывная продолжительность периода с температурой наружного воздуха, равной или ниже, составляет: 8 ч при $t_{н} \le -32$ °С, 17 ч при $t_{н} \le -30$ °С, 38 ч при $t_{н} \le -26$ °С.

Известная тенденция потепления климата никак не исключает того, что возможны экстремально низкие температуры наружного воздуха. К тому же по одной из теорий после периода потепления климата может наступить период похолодания. Все эти особенности привлекают внимание к задаче поддержания температуры воздуха в отапливаемых помещениях в пиковых зимних условиях и неформируемом отоплении.

Пусть система отопления, не имеющая возможности форсирования, т. е. увеличения теплоотдачи при более низких, чем расчетные, температурах наружного воздуха, обеспечивает требуемую $t_{в}$ при $t_{н} \ge t_{н.р.х}$. Представим, что в момент $\tau = 0$ температура наружного воздуха резко снизилась на величину $\Delta t_{н}$ и держится на этом уровне некоторое время τ. Опишем закономерности снижения температуры воздуха в помещении $\Delta t_{в}(\tau)$. Дополнительные некомпенсируемые теплопотери через окна помещения возникнут мгновенно с учетом их незначительной массивности $D = RS$ и тепловой инерции.

В результате итоговое соотношение для относительного снижения температуры воздуха в отапливаемом помещении при пиковых или близких к ним наружных температурах можно представить в виде соотношения дополнительных теплопотерь и их аккумуляции воздухом и внутренними ограждениями

$$\frac{\Delta t_{в}(\tau)}{\Delta t_{н}} = \frac{t_{в}(\tau) - t_{в}(0)}{t_{н\,min} - t_{н.р.х}} = \\ = \left\{1 + \frac{\alpha_{к.ср}\sum F_{огр.вн}\left[1 - \theta_{пов}(\mathrm{Bi}^2\mathrm{Fo})\right] + V_{пом}c_{в}\rho_{в}/\tau}{k_{ок}F_{ок} + \alpha_{к.ср}F_{ст.н}\theta_{пов}(\mathrm{Bi}^2\mathrm{Fo})}\right\}^{-1}. \qquad (9)$$

Инженерный расчет ночного охлаждения помещения наружным воздухом [17]. Низкая температура наружного воздуха в ночное время даже в теплый период года представляет большой интерес как дешевый источник холода. Известны предложения специалистов для использования такого воздуха в технике кондиционирования и охлаждения (Б. С. Тихонов, № 6, 1970, № 9, 1971; Е. Е. Карпис; Е. О. Шилькрот, «АВОК», № 7, 2006 и др.). Ночное охлаждение помещения наружным воздухом — специальная научно-инженерная задача, имеющая заметное значение для охлаждаемых объектов — помещений разного назначения с большими теплоизбытками, где температура воздуха в теплый период года может быть задана интервалом $t_{в\,min}\ldots t_{в\,max}$, например 20…25 °С. Холод, накопленный за ночь в поверхностных слоях внутренних ограждений, при появлении теплоизбытков и повышении температуры воздуха поступает в последний, уменьшая необходимый расход подводимого к воздухоохладителю холода. Как показывают расчеты, удельное количество аккумулируемого холода может составлять 30…50 Вт/м^2, что при больших габаритных размерах помещения оказывается существенным.

В основе расчета эффекта лежат анализ повторяемости наружных температур (рис. 11, *а*) и рассмотрение хода наружной температуры в ноч-

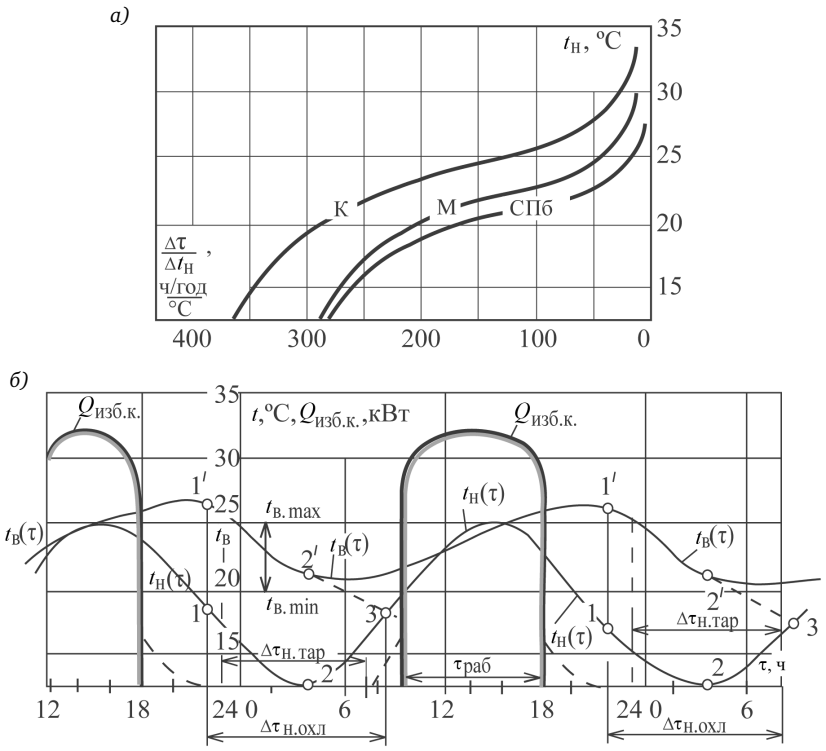


Рис. 11. Основные зависимости для расчета ночного охлаждения помещения наружным воздухом: *а* — плотность повторяемости наружных температур $\Delta\tau/\Delta t_н$, ч/(год · °C) в теплое время года в некоторых городах: СПб — Санкт-Петербург, М — Москва, К — Киев; *б* — график изменения избыточных конвективных тепловыделений в помещении $Q_{изб.\ к}$, суточного изменения температуры наружного $t_н(\tau)$ и внутреннего $t_в(\tau)$ воздуха при использовании ночного охлаждения помещения наружным воздухом в период $\Delta\tau_{н.\ охл}$ = 22 — 9 ч утра и льготном ночном тарифе на электроэнергию в период $\Delta\tau_{н.тар}$ = 23 — 7 ч утра. Обозначения точек: 1, 1′ — температуры наружного и внутреннего воздуха в момент начала ночного охлаждения; 2, 2′ — температуры наружного и внутреннего воздуха в момент, когда температура наружного воздуха минимальна; 3 — соответствует моменту времени, когда обе температуры одинаковы и охлаждение наружным воздухом прекращается

ное время в теплый период года. Представим, что температура наружного воздуха в течение летних суток меняется приближенно гармонически по закону

$$t_н(\tau) \approx t_{н.ср.сут} + A_{t_н} \cos\left[2\pi\left(\tau - 15\right)/24\right], \quad (10)$$

причем в ночные часы она существенно ниже $t_{в\ max}$ и даже $t_{в\ min}$ (рис. 11, *б*).

Включая вентиляцию в ночное время, можно заметно снизить температуру воздуха и одновременно внутренних поверхностей всех ограждений такого помещения. Процесс снижения $t_в(\tau)$, показанный на рис. 11, *б*, происходит сложным образом под влиянием разных факторов:

• изменения $t_н(\tau)$, сначала падения (1–2 на рис. 11, б), потом подъема (2–3);

• начальной разности температур $(t_в - t_н)_0$, соответствующей точкам 1′ и 1 в момент включения вентиляции для ночного охлаждения помещения;

• нагрева наружного (приточного) воздуха с учетом потерь энергии в вентиляторе и двигателе на величину $\Delta t_{пр} = 0{,}8P_{вент}/(\eta_{вент} \cdot \eta_{дв})$, где $P_{вент}$ — полное давление вентилятора, кПа;

• остаточных конвективных тепловыделений в помещении в нерабочее время $\Delta Q_{изб.\ к}$, например теплоты солнечной радиации.

После достижения наружной температуры $t_н$ своего минимального значения (примерно в 3–4 ч утра) начинается ее подъем, поэтому снижение температуры в помещении $t_в$ затормаживается и в какой-то момент времени, соответствующий точке 3 на рис. 11, *б*, эти температуры, сближаясь, становятся одинаковыми. С этого момента ночное охлаждение помещения становится неэффективным и систему вентиляции до начала работы объекта отключают. Заметным преимуществом ночного охлаждения является то, что по времени оно совпадает или близко времени действия льготного ночного тарифа.

Расчет снижения температуры воздуха помещения в ночное время можно производить по методике [17] на основе формулы

$$\Delta t_{\text{в}}(\tau) = \\ = \frac{-\Delta t_{\text{н}}(\tau) - (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})_0 + \Delta t_{\text{пр}} + \Delta Q_{\text{изб.к}} / (L_{\text{пр}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}})}{1 + \alpha_{\text{к.ср}}(1 - \theta_{\text{пов}})(k_{\text{р}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} l_{\text{пом}})^{-1} + 1/\tau k_{\text{р}}}. \quad (11)$$

Методика и пример такого расчета в разных задачах охлаждения приведен в статье [17].

Теплофизический расчет теплопотерь подземной части зданий. Все ограждения современных зданий контактируют с грунтом и поэтому требуют использования соответствующих методик расчета теплопередачи и теплопотерь в грунт. В первую очередь — это общественные здания, заглубленные в грунт, что позволяет экономить занимаемые территории, не превышать заданную высоту и соблюдать другие условия. Подобные расчеты теплопотерь необходимы для объектов специального назначения: подземных магазинов, парковок, зимних и весенних теплиц, обогреваемых футбольных полей и других объектов, по данным Н. Н. Вишняка, № 11, 1970; П. И. Дячека, № 8, 1992; М. Г. Тарабанова, «АВОК», № 7, 2003; О. Г. Щукина, № 8, 1965 и др. Ниже автором предлагается новая, достаточно строгая, теплофизическая методика таких расчетов [16], основанная на исследованиях отечественных ученых [10] и физической картине теплообмена через грунт, показанной на рис. 12.

В общем случае для ограждений подземной части здания (стена, пол) учитывают все слои конструкции, кроме $1/\alpha_{\text{н}}$ для пола. Тогда общее термическое сопротивление, (м^2 · °С)/Вт, отнесенное к температуре внутреннего и наружного воздуха,

$$R_{\text{огр}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})F / Q = \\ = 1/\alpha_{\text{в}} + \sum_{i=1}^{n} \delta_i / \lambda_i + R_{\text{гр}} + 1/\alpha_{\text{н}}. \quad (12)$$

Сложность заключается в том, что для данной задачи надо выбрать ту единственную конструкцию или их группу, которая позволит найти искомое термическое сопротивление и теплопотери. Подземная часть здания (рис. 12, *в*, *д*) может быть представлена в виде воздушного объема — параллелепипеда размерами $l \times b$, заглубленного в грунт на глубину h_1 и имеющего определенную конструкцию стен и пола, а значит, величины λ_i и δ_i ее слоев. Термическое сопротивление грунта в такой конструкции (см. рис. 12, *в*) и соответствующие теплопотери рассчитывают отдельно для горизонтальной части размерами $l \times b$, расположенной в полуограниченном массиве с теплопроводностью λ, термическим сопротивлением R_{17} (см. рис. 12, *б*) при известной температуре грунта t_2.

В статьях автора [16] подробно приведена эта методика и пример расчета. В частности, для конкретного здания с подземной трехэтажной частью 20 × 20 м глубиной $h = 6$ м, для грунта с заданными теплофизическими характеристиками теплопотери этой подземной части оказались на 60 % больше по сравнению с традиционным расчетом по зонам $h = 2$ м.

Оптимальный температурный график управления системой отопления здания или их группы можно построить по данным В. И. Ливчака, если приравнять текущий расход теплоты на отопление и суммарную теплоотдачу нагревательных приборов данного типа в здании

$$q_{\text{от}\,V} V_{\text{зд}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}_i}) = \\ = k_{\text{н.пр}} \left[0,5(t_{w\,\text{н}_i} + t_{w\,\text{к}_i}) - t_{\text{в}} \right] \sum F_{\text{пр}} \quad (13)$$

или после подстановки зависимости для коэффициента теплопередачи нагревательного прибора данного типа, конструкции и производителя получаем

$$q_{\text{от}\,V} V_{\text{зд}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}_i}) = a \sum F_{\text{пр}} \Delta t_{\text{пр.ср}}^{1+m}. \quad (14)$$

Итоговое выражение для графика управления системой отопления здания или их группы получаем из уравнения (14), разделяя неизвестные температуры воды и заданную температуру воздуха от других известных величин:

$$\frac{\Delta t_{\text{пр.ср}}^{1+m}}{t_{\text{в}} - t_{\text{н}_i}} = \frac{q_{\text{от}\,V} V_{\text{зд}}}{a \sum F_{\text{пр}}} = \text{const}. \quad (15)$$

Поясним примером методику построения индивидуального графика оптимального управления температурами воды и теплоотдачей нагревательных приборов в системе отопления, компенсирующей основные и инфильтрационные теплопотери здания.

Пример 5. Здание строительным объемом $V_{\text{зд}} = 50$ тыс. м^3 имеет удельную отопительную характеристику с учетом основных и инфильтрационных теплопотерь $q_{\text{Т. V}} = 0,2$ Вт/(м^3 · °С). Расчетная температура воздуха в помещениях $t_{\text{в}} = 20$ °С, расчетная температура наружного воздуха $t_{\text{н. р. х}} = -25$ °С. В системе отопления установлены стальные штампованные нагревательные приборы с односторонней подводкой воды, для которых коэффициент теплопередачи определяют по формуле $k_{\text{н. пр}} = 2\Delta t_{\text{пр.ср}}^{0,32}$, Вт/(м^2 · °С). Требуется построить температурный график управления элеватором системы отопления здания при условии, что расход циркули-

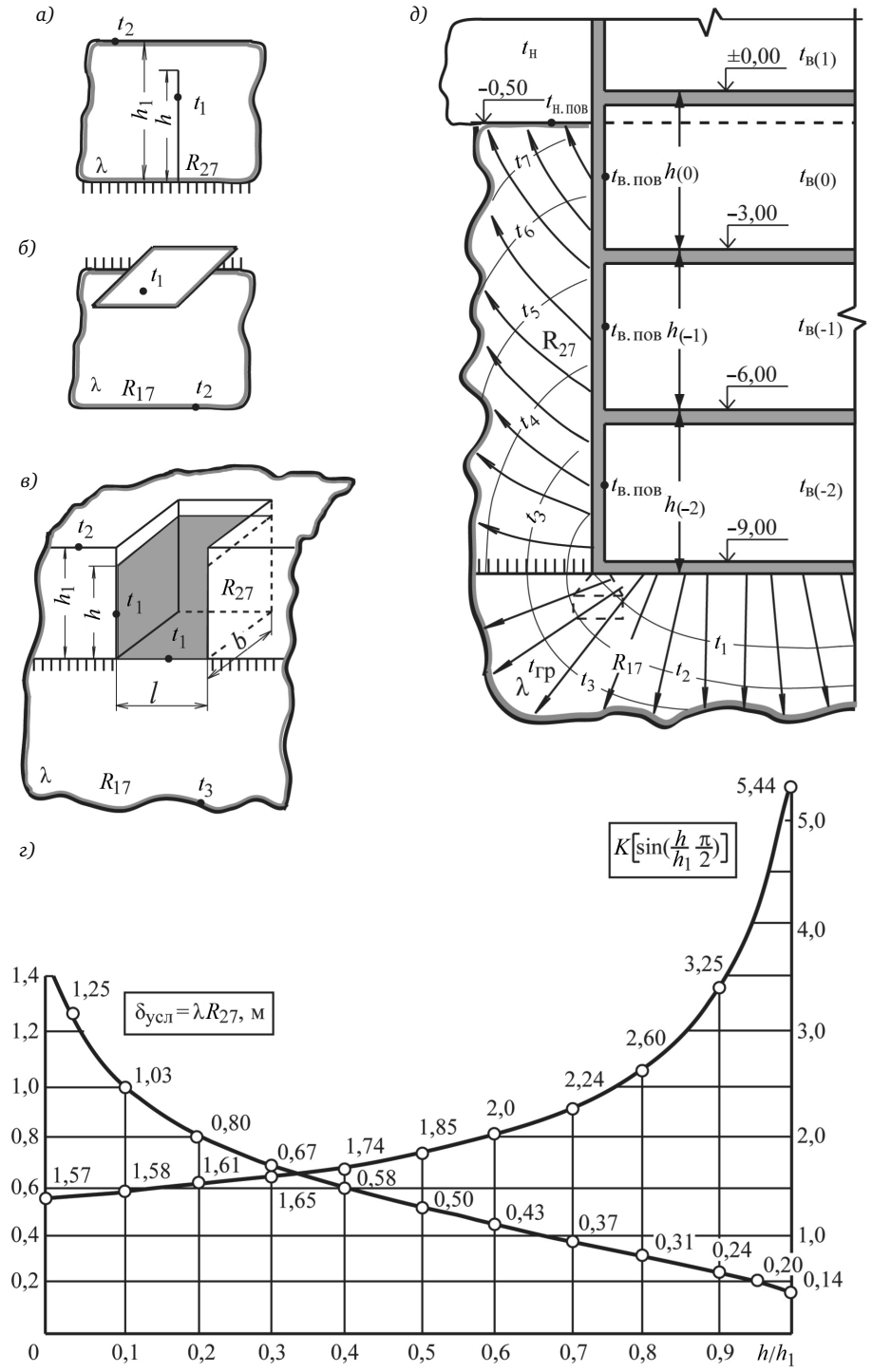


Рис. 12. Расчетные схемы и график для определения термического сопротивления грунта R_{27} и теплопотерь стен и пола подземной части зданий и сооружений по методике [16]: *а* — расчетная схема подземной части стены высотой h, заглубленной в грунт в виде бесконечной пластины высотой h_1 и ограниченной снизу адиабатической поверхностью (без теплообмена с остальной частью грунта); *б* — расчетная схема пола подземной части здания, заглубленного в грунт — полубесконечный массив, ограниченный сверху адиабатической поверхностью; *в* — расчетная схема подземной части здания, разделенная на две части: бесконечную пластину и полуограниченный массив; *г* — график для определения условной толщины грунта для вычисления термического сопротивления R_{27}; *д* — расчетная схема подземной трехэтажной части здания, разделенная на две части: бесконечную пластину и полуограниченный массив с указанием потока теплоты от ограждений в грунт R_{17} и атмосферу R_{27}

рующей воды будет оставаться неизменным, т. е. $\bar{Q}_{\text{Т. от}} \sim (t_{w\,\text{н}_i} - t_{w\,\text{к}_i}) = f(t_{\text{н}})$. Расчетные температуры теплоносителя — горячей и обратной воды в системе отопления принять $t_{w\,\text{н. р}} = 95$ °С, $t_{w\,\text{к. р}} = 70$ °С.

Определяем средний коэффициент теплопередачи нагревательных приборов системы отопления в расчетном режиме, т. е. при $\Delta t_{\text{пр. ср. р}} = 0{,}5(95 + 70) - 20 = 62{,}5$ °С, в этом случае $k_{\text{н. пр}} = 2 \cdot 62{,}5^{0{,}32} = 8$ Вт/(м^2 · °С). Суммарная поверхность всех нагревательных приборов здания $\Sigma F_{\text{пр}} = q_{\text{от}\,V} V_{\text{зд}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н. р. х}})/(k_{\text{н. пр}} \Delta t_{\text{пр. ср. р}}) = 0{,}2 \cdot 50 \cdot 10^3[20 - (-25)]/(8 \cdot 62{,}5) = 900$ м^2. Вычисляем комплекс $q_{\text{от}\,V} V_{\text{зд}}/(a\Sigma F_{\text{пр}}) = 0{,}2 \cdot 50 \times 10^3/(2 \cdot 900) = 5{,}6$.

Последовательно вычисляем требуемые температуры воды на входе и выходе из системы отопления при $t_{\text{н}} = -10$, 0 и 8 °С, а результаты расчетов наносим на рис. 13, *а* — линии 6 и 7 — линии зависимости начальной и конечной температур воды на входе и выходе из здания для оптимального управления системой отопления по формуле (15) и условиям примера.

При наружной температуре $t_{\text{н}} = -10$ °С относительный расход теплоты на отопление $\bar{Q}_{\text{Т. от}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})/(t_{\text{в}} - t_{\text{н. р. х}}) = [20 - (-10)]/[20 - (-25)] = 0{,}67$. Из уравнения (15) $(t_{w\,\text{ср}} - 20)^{4/3} = 5{,}6[20 - (-10)] = 168$ определяем $t_{w\,\text{ср}} \approx 68$ °С; перепад температур воды $\Delta t_w = \bar{Q}_{\text{Т. от}} \Delta t_{w\,\text{р}} = 0{,}67(95 - 70) \approx 17$ °С, поэтому $t_{w\,\text{н}} = 76{,}5$ °С, $t_{w\,\text{к}} = 59{,}5$ °С.

При наружной температуре $t_{\text{н}} = 0$ °С относительный расход теплоты на отопление $\bar{Q}_{\text{Т. от}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})/(t_{\text{в}} - t_{\text{н. р. х}}) = (20 - 0)/[20 - (-25)] = 0{,}44$. Из уравнения (15) $(t_{w\,\text{ср}} - 20)^{4/3} = 5{,}6(20 - 0) = 112$ определяем $t_{w\,\text{ср}} \approx 55$ °С; перепад температур воды $\Delta t_w = \bar{Q}_{\text{Т. от}} \Delta t_{w\,\text{р}} = 0{,}44(95 - 70) \approx 11$ °С, поэтому $t_{w\,\text{н}} = 60{,}5$ °С, $t_{w\,\text{к}} = 49{,}5$ °С.

При наружной температуре $t_{\text{н}} = 8$ °С относительный расход теплоты на отопление $\bar{Q}_{\text{Т. от}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})/(t_{\text{в}} - t_{\text{н. р. х}}) = (20 - 8)/[20 - (-25)] = 0{,}28$. Из уравнения (15) $(t_{w\,\text{ср}} - 20)^{4/3} = 5{,}6(20 - 8) = 67$ определяем $t_{w\,\text{ср}} \approx 36{,}6$ °С; перепад температур воды $\Delta t_w = \bar{Q}_{\text{Т. от}} \Delta t_{w\,\text{р}} = 0{,}28(95 - 70) \approx 7$ °С, поэтому $t_{w\,\text{н}} = 40$ °С, $t_{w\,\text{к}} = 33$ °С.

Несогласованные графики теплоотдачи нагревательных приборов системы отопления и отопительной нагрузки здания показаны на рис. 13, *а–в*. В частности, линии 6 и 7 на рис. 13, *а* в основной части при низких температурах $t_{\text{н}}$ оказываются практически прямыми, а при высоких — заметно отклоняются от прямых в сторону меньших значений. Линия теплоотдачи нагревательных приборов (5 на рис. 13, *б*) оказывается прямой и показывает, что при таком управлении температурами воды будет поддерживаться заданная температура воздуха.

Другое возмущение при переменной солнечной радиации компенсируется пофасадным управлением системой отопления. На эту тему рекомендуем читателям ознакомиться со следующими публикациями: М. М. Грудзинский, В. И. Ливчак, № 8, 1985; Э. Л. Дешко, В. Ф. Слоневский, № 6, 1973; В. И. Ливчак, А. А. Чугункин и др., № 5, 1986; Л. С. Локшин, № 8, 1983; И. С. Мадорский, В. Г. Драчнев, № 2, 1977 и др.

Этими методиками, примерами и задачами не ограничиваются современные проблемы помещений, их микроклимата и системы обеспечения, основанные на учете наружных воздействий, тепловлажностных характеристик объекта и режимов его работы.

Основные выводы.

1. Существенно изменить представления о текущих теплопотерях и управлении отопительной нагрузкой зданий можно лишь на основе системного анализа, учитывая современные достижения климатологии, нестационарных теплофизических процессов и математические методы решения задач об изменении температуры в помещении.

2. В соответствии с особенностями конструкции и инерционностью наружных ограждений здания теплопотери следует разделять на *быстрые* (через окна) и *медленные* (через стены и кровлю), а также дифференцировать их и теплоотдачу нагревательных приборов на *конвективную* (в воздух) и *лучистую* (на поверхности внутренних ограждений и оборудования).

3. При современном ограничении перепада температур на внутренней поверхности наружных стен условия конвективного теплообмена и коэффициент теплоотдачи должны быть скорректированы (уменьшены).

4. Текущие теплопотери через наружные стены и кровлю следует определять по формуле (4) или аналогичной ей с учетом предыстории формирования $t_{\text{н}}$, а именно тренда и наиболее медленной гармоники хода температуры.

5. При современном увлечении избыточным остеклением помещений административно-общественного назначения, при большой высоте остекления, ленточном типе, в угловых помещениях и при наличии второго света, наружная расчетная температура должна определяться специально по методике [15] на основе формулы (5).

6. Теплопотери подземной части зданий, заглубленных в грунт, следует определять на основе закономерностей теплопередачи грунта по методике [16] и соответствующим формулам.

7. Исходя из особенностей формирования теплопотерь, квартирное и внутридомовое управ-

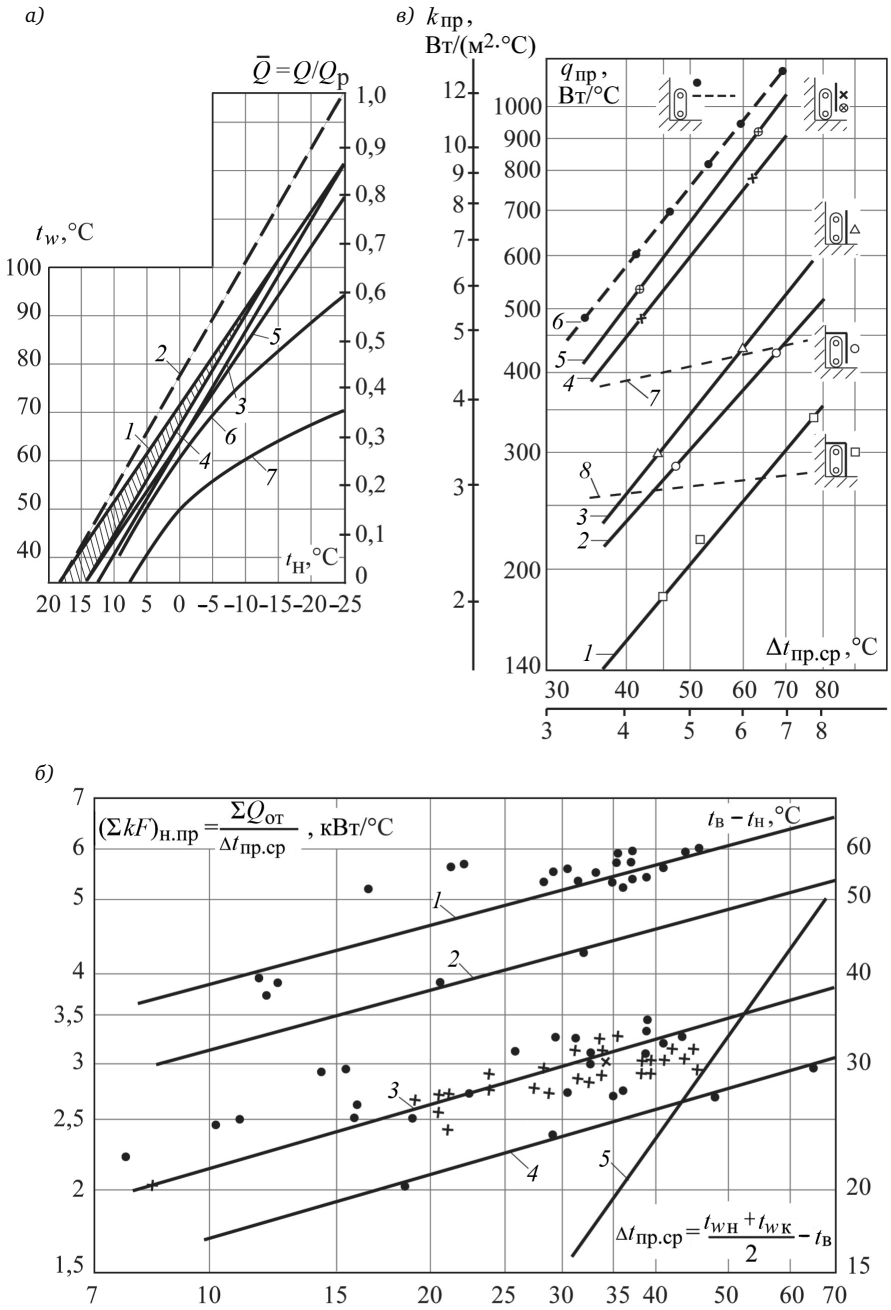


Рис. 13. Несогласованные графики теплоотдачи нагревательных приборов системы отопления и отопительной нагрузки здания: *а* — графики изменения относительных расходов теплоты зданием по данным «Справочника по энергосбережению»:

1 — на отопление без учета увеличивающейся доли бытовых тепловыделений в тепловом балансе здания при повышении наружной температуры $t_н$; *2* — сумма основных и инфильтрационных теплопотерь здания; *3*, *4* — на отопление здания с учетом увеличения доли бытовых тепловыделений в тепловом балансе здания с повышением $t_н$, соответственно при $t_в$ = 18 °С и $t_в$ = 20 °С; *5* — на отопление жилого здания при безветрии и $t_в$ = 21 °С; *6*, *7* — линии зависимости начальной и конечной температур воды на входе и выходе из здания для оптимального управления системой отопления по формуле (15) и условиям примера 5;

б — результаты фактических измерений температур и расходов воды по данным «Справочника по энергосбережению» и зависимость удельной теплоотдачи нагревательных приборов $\Sigma kF_{н.\,пр}$ здания, кВт/°С от среднеарифметической разности температур в здании $\Delta t_{пр.\,ср} = 0{,}5(t_{w\,н} + t_{w\,к}) - t_в$, °С для 12-этажного здания с плинтусными конвекторами (линии *1* и *2*, m = 0,25), для 8-этажного здания с радиаторами (линии *3* и *4*, m = 0,32), *5* — линия оптимального графика управления системой отопления в условиях примера 5 в зависимости от разности температур $t_в - t_н$;

в — зависимость теплоотдачи семисекционного нагревательного прибора М-140 площадью поверхности F = 1,75 м² и коэффициент теплопередачи этого прибора в зависимости от различных вариантов его декорирования (укрытия) по данным Е. В. Грубского и Ю. В. Соколова, ВНИИГС, 1985:

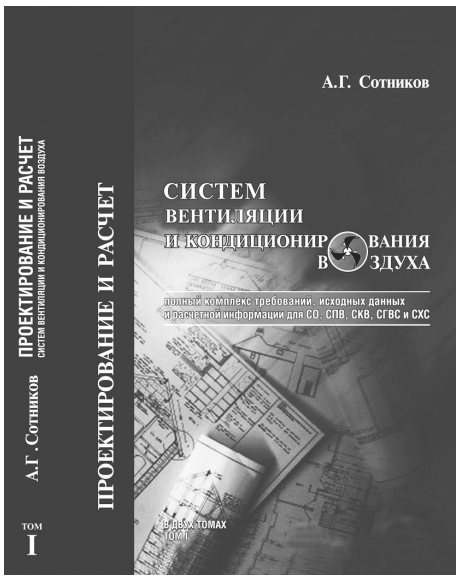
1 — полное; *2* — открытое снизу; *3* — открытое сверху; *4*, *5* — открытое сверху и снизу; *6* — открыто установленный нагревательный прибор, пунктирные; *7*, *8* — коэффициент теплопередачи открытого нагревательного прибора типа М-132 площадью F = 2 м² при подаче в него холодной воды по схеме «снизу-вверх» и «сверху-вниз» соответственно по данным Т. Н. Бегуновой (ЛТИХП).

ление подачи теплоты на отопление следует производить с учетом средней относительной площади остекления $\overline{F}_{ост}$ = 0,05...0,3, соотношения $k_{ок}/k_{ст}$ и величины температурного возмущения $\Delta t_н/(t_в - t_н)$.

Основное содержание этой статьи подробно представлено в книге А. Г. Сотникова «Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха/полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС», в 2-х томах, 10-ти главах с предисловием, форматом А4, общим объемом 860 с., подготовленной к изданию и выходящей в свет в первом полугодии 2012 г. С подробным оглавлением можно ознакомиться на сайте: www.proptimum.ru.

Литература

1. *Анапольская Л. Е., Гандин Л. С.* Метеорологические факторы теплового режима здания. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 235 с.
2. *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.
3. *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.
4. *ГОСТ 30494–96.* Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях / Госстрой России. М.: 1999. 14 с.
5. *Климат* Ленинграда // Под ред. Ц. А. Швер, Е. В. Алтыкиса, Л. С. Евтеевой. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 252 с.
6. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
7. *Матросов Ю. А., Бутовский И. Н., Гольдштейн Д.* Энергетический паспорт здания. АВОК, 1997, № 3. С. 11–15.
8. *Пановский Г. А., Браер Г. В.* Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 209 с.
9. *Панферов В. И., Нагорная А. Н., Пашина Е. Ю.* Моделирование и управление тепловым режимом здания. Труды МГСУ. М., 2005. С. 94–98.
10. *Пехович А. И., Жидких В. М.* Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
11. *Пухкал В. А., Крумер Л. Р.* Теплопотребление жилых зданий на отопительно-вентиляционные нужды / Сб. докл. 6-й междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ЛенЭКСПО, 2007. С. 61–64.
12. *РТМ 44-62.* Методика статистической обработки эмпирических данных. М.: Стандартгиз, 1963. 112 с.
13. *СНиП 23-02–2003.* Тепловая защита зданий. Госстрой России. М.: 2004. 25 с.
14. *Сотников А. Г.* Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции / Теория, техника и проектирование на рубеже столетий. СПб.: AT-Publiching. Т. II, ч. 2, 2007. 512 с.
15. *Сотников А. Г.* О связи расчетной отопительной температуры и мощности системы отопления с относительной площадью остекления помещения и здания // Теплоэнергоэффективные технологии. 2009. № 4. С. 25–28; С.О.К. 2010. № 3. С. 52–54.
16. *Сотников А. Г.* Теплофизический расчет теплопотерь подземных частей зданий // АВОК. 2010. № 8. С. 62–67; Теплоэнергоэффективные технологии. 2010. № 4. С. 23–28.
17. *Сотников А. Г.* Инженерный расчет ночного охлаждения помещения // С.О.К. 2010. № 4. С. 64–66.
18. *Чистович С. А., Быков С. И., Лебедев П. И.* Метод учета влияния инерционности наружных ограждений зданий на режим отпуска теплоты в условиях АСУ ТП / Индустриальные отопительно-вентиляционные и санитарно-технические системы и технология их монтажа. Л.: ВНИИГС, 1983. С. 23–29.
19. *Чистович С. А.* Тепловой режим отапливаемых зданий и основные характеристики САР отпуска тепла в отопительных котельных / Автоматизация отопительных котельных. Л.: Гостопиздат, 1961.
20. *Шаприцкая М. В.* Обобщенная динамическая характеристика теплоемких наружных ограждений здания / Городская энергетика. Научн. тр. /АКХ, 1967. Вып. 54.
21. *Kallina G.* Erfahrungen mit einem Optimierungsrechner für Heizungsanlagen in einem grossen Wohngebaüde. Automatieserie rungtechnishe Practics. Karlsruhe. 1987 Apt. 29 Jahrgang H. 1.



Книга рассматривает основы проектирования систем промышленной вентиляции, кондиционирования воздуха, отопления и холодоснабжения. Представленные в ней теоретические разработки и практические сведения, методики и примеры расчетов позволяют более точно подойти к описанию систем, их проектированию и работе. Книга является первым обстоятельным отечественным изданием, описывающим в первом томе весь современный комплекс исходных данных: требования к инженерным системам, термодинамическую, климатологическую, санитарно-гигиеническую, аэрохимическую и технологическую информацию для проектирования, основные нормативы и многочисленные методики, сопровождаемые примерами и контрольными вопросами для практического освоения нового для читателя материала. Во втором томе подробно описаны тепловые нагрузки систем отопления и горячего водоснабжения, классификация, источники и способы расчета теплоты, влаги и вредных веществ для расчета СКВ, СВ и СХС, в том числе в нестационарных условиях. Подробно описан метод тепло-, влаго-, паро- и газовоздушных балансов помещений. Рассмотрены вредные выделения для сварки, окраски, гальваники, химических и др. производств как основа расчета систем промышленной вентиляции.

Книга предполагает широкое применение этих материалов в общей задаче совершенствования и оптимизации СВ, СКВ, СО, СХС проектировщиками, исследователями, научными работниками, преподавателями, докторантами, аспирантами, магистрантами, бакалаврами и студентами соответствующих специальностей строительных, политехнических, энергетических, технологических и др. вузов.