

Автор рубрики «Советы специалиста» А.Г. СОТНИКОВ, д.т.н., профессор МГСУ, продолжает профессионально отвечать на самые сложные вопросы, касающиеся инженерных задач проектирования систем вентиляции и кондиционирования.

16. В инженерных расчетах мне наиболее понятны те, которые сопровождаются графиками. Нигде не мог найти графоаналитической методики, объясняющей, как вычислить годовой расход теплоты и холода. Не могли ли Вы мне помочь в этом?

Методику привожу на примере, тогда она будет более понятной, предварительно сопроводив ее краткой теоретической частью.

Графоаналитическая методика расчета основана на представлении годового расхода теплоты или холода интегралом (на графике это площадь, ее и определяют). В подынтегральном выражении (1) плотность повторяемости dt/dt_n или dt/dt_n умножена на функцию текущего расхода теплоты $Q_T(t_n)$ или холода $Q_X(t_n)$ в зависимости от температуры или энтальпии наружного воздуха, например, так:

$$Q_{т.год} = \psi_{см} \int_{-\infty}^{t_k} Q_T(t_n) \frac{d\tau}{dt_n} dt_n, \quad (1)$$

где плотность распределения описывается аналитически композиционным или приближенно-трапецидальным законом. Для графических построений и соответствующего расчета проводят горизонтальную ось температуры или энтальпии наружного воздуха. Относительно нее по вертикальной оси в выбранном масштабе наносят линию — график плотности dt/dt_n в виде ступенчатой (эмпирической) или сглаженной линии и в другом масштабе — линию (обычно прямую) зависимости $Q_T(t_n)$ или иную. Последовательно перемножая величины dt/dt_n на $Q_T(t_n)$ при нескольких значениях t_n , например, -20°C , -10°C , 0°C , 5°C и выбрав новый масштаб произведения $(dt/dt_n)Q_T(t_n)$, (ч/год)(кВт/°C), строят кривую, прижимающуюся на краях к оси t_n . Заменяя площадь между этой кривой и горизонтальной осью равновеликим треугольником или трапецией, определяют по известным формулам геометрии ее площадь, которая численно равна искомому годовому расходу теплоты или холода (кВт·ч)/год.

При определенном навыке такие построения и вычисления производят быстро, а сам метод отличается простотой и наглядностью. Поясним методику расчета годового расхода теплоты и холода центральной СКВ примером.

Пример 1. Определить графоаналитическим методом годовые расходы теплоты и холода для нагревания и охлаждения наружного воздуха в центральной СКВ без увлажнения в климатических условиях Санкт-Петербурга. Расчетный расход теплоты на нагревание наружно-

го воздуха $t_n = t_{нрх} = -26^\circ\text{C}$ до $t_k = 10^\circ\text{C}$ при его расходе $G_{пр} = G_n = 7$ кг/с составляет $Q_{т.расч} = 250$ кВт, а расчетный расход холода на охлаждение наружного воздуха при увеличенном его расходе и охлаждении от $t_n = 25^\circ\text{C}$ до $t_{к1} = 13^\circ\text{C}$ $Q_{х.расч} = 130$ кВт. Для расчета использовать композиционное распределение температуры наружного воздуха, а для сравнения провести расчет теплоты на нагревание по данным СНиП 23-01-99 при продолжительности периода $\tau_{t_n < 10^\circ\text{C}} = 239$ сут/год = 5740 ч/год и средней температуре этого периода $t_{н.ср} = -0,9^\circ\text{C}$. Режим работы системы принять непрерывным ($\psi_{см} = 1,0$).

Для расчета использовать композиционноераспределение температуры наружного воздуха

По карте рис. 7.1.8а [4] и известным географическим координатам Санкт-Петербурга (60° с.ш., $30,5^\circ$ в.д.) определяем параметры композиционного распределения температуры наружного воздуха: $a_t = -9,4^\circ\text{C}$, $b_t = 19,3^\circ\text{C}$, $\sigma_t = 7,5^\circ\text{C}$. По этим трем параметрам поочередно строим сначала четырехугольник распределения, после этого — равновеликую ему трапецию, а затем, после ее сглаживания, композиционное распределение температуры $dt/dt_n = f(t_n)$.

Сначала проведем горизонтальную ось температуры наружного воздуха (рис. 1) и поставим на ней в выбранном масштабе значения $t_n = -30^\circ\text{C}$, -20°C , -10°C ... $+30^\circ\text{C}$. Укажем на этой оси расчетные температуры наружного воздуха $t_{нрх} = -26^\circ\text{C}$, $t_{нрт} + \Delta t_{пр} = 25^\circ\text{C}$, конечную температуру нагрева $t_k = 10^\circ\text{C}$ и конечную температуру охлаждения $t_{к1} = 13^\circ\text{C}$. Кроме этого, нанесем на этой оси точки с температурами $t_n = a_t = -9,4^\circ\text{C}$ и $t_n = b_t = 19,3^\circ\text{C}$. Вычислим максимальную плотность повторяемости этого распределения [ч/(год·°C)]:

$$\left(\frac{d\tau}{dt_n}\right)_{\max} = \frac{8766}{b_t - a_t} = \frac{8766}{19,3 - (-9,4)} = 305.$$

Эту величину в выбранном масштабе отложим на вертикальной оси dt/dt_n . Заменяем прямоугольник $a_t b_t$ равновеликой трапецией с основанием $b_t - a_t + 2\sigma_t$ и той же высотой (рис. 1). После этого скруглим склоны трапеции, оставляя неизменным положение ее точек $a_{ср}$ и $b_{ср}$ на середине высоты, в результате будет построена плавная кривая:

$$\frac{d\tau}{dt_n} = f(t_n).$$

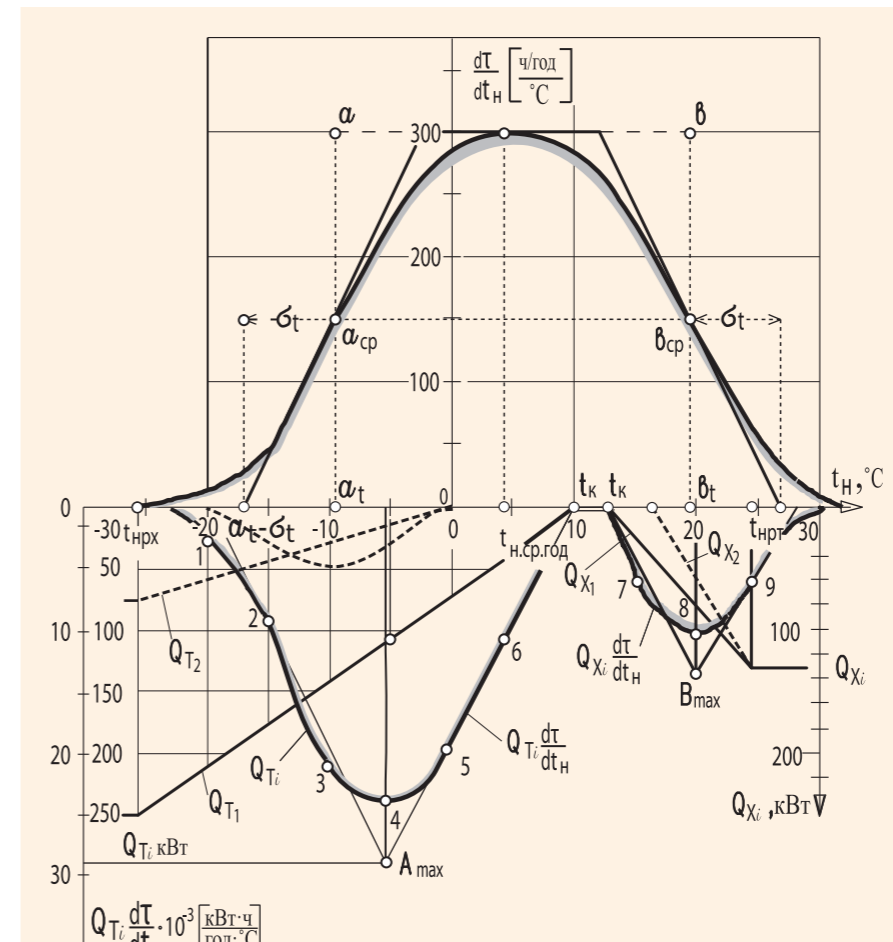


Рис. 1. График теоретической плотности композиционного распределения температуры наружного воздуха в Санкт-Петербурге (верхняя часть) и график расходов теплоты и холода, график суммы произведений $Q_T dt/dt_n$ и $Q_X dt/dt_n$ (нижняя часть) [сплошные — к примеру 1, пунктирные — к примеру 2]

В нижней части графика проведем вертикальную ось тепловой Q_T и холодильной Q_X нагрузки системы. Поскольку эти величины одного порядка, то их масштаб примем одинаковым. Проводим прямую линию Q_T при условии, что при $t_n = t_k = 10^\circ\text{C}$ $Q_T = 0$, а при $t_n = t_{нрх} = -26^\circ\text{C}$ $Q_T = 250$ кВт. Аналогично проводим прямую линию Q_X при условии, что при $t_n = t_{к1} = 13^\circ\text{C}$ $Q_X = 0$, а при $t_n = t_{нрт} = 25^\circ\text{C}$ $Q_T = 130$ кВт. При более высоких температурах, чем $t_{нрт} = 25^\circ\text{C}$, расход холода не может быть увеличен, и поэтому на графике $Q_X(t_n)$ в этой точке имеется перелом. Выберем несколько значений температуры t_n , для них определим соответствующие значения Q_T и Q_X , а также плотность повторяемости dt/dt_n , перемножим эти величины, а их произведение $Q_T dt/dt_n$ и $Q_X dt/dt_n$ запишем в табл. 1. По результатам вы-

числения произведений в выбранном масштабе, с учетом того, что:

$$\left(\frac{d\tau}{dt_n}\right)_{\max} = 24600 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{год}\cdot^\circ\text{C}},$$

выбираем дополнительную ось этой величины и ставим точки 1, 2, 3, ... 9 соответственно температурам в табл. 1. После этого заменим площадь между кривой по точкам 1, 2, ... 6 и горизонтальной осью температур равновеликим треугольником с основанием $\Delta t_n = 10 - (-20) = 30^\circ\text{C}$, вершиной в точке A_{\max} , высотой этого треугольника $Q_T dt/dt_n = 29 \times 10^3$ кВт·ч/(год·°C). Искомый годовой расход теплоты на нагревание наружного воздуха соответствует площади данного треугольника и составляет 0,435 млн кВт·ч/год:

$$Q_{т.год} = 0,5 \frac{Q_T d\tau}{dt_n} \Delta t_n = 0,5 \times 29 \times 10^3 \times 30 \times 10^{-6} = 0,435,$$

Значения $Q_T dt/dt_n$ и $Q_X dt/dt_n$

$t_n, ^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	0	+5	+15	+20	+25
$Q_T(Q_X), \text{кВт}$	208	180	140	103	70	35	30	85	130
$dt/dt_n, \text{ч}/(\text{год}\cdot^\circ\text{C})$	7	50	150	240	290	305	210	140	50
$Q_T dt/dt_n, Q_X dt/dt_n, \text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{год}\cdot^\circ\text{C})$	1450	9000	21000	24600	21000	10500	6300	12000	6500
№ точки на рис. 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Для проверки этой методики и сравнения с данными СНиП 23-01-99 определим годовой расход теплоты по следующей формуле и получаем результат 0,44 млн кВт·ч/год:

$$Q_{т.год} \approx G_{прсв}(t_k - t_{н.ср})t_{нагр} = 7 \times 1 \times 5740 [10 - (-0,9)] \times 10^{-6} = 0,44.$$

Как следует из результатов сравнения расчетов по двум методикам, искомые годовые расходы оказались практически одинаковыми. В меньшем интервале температур нагреваемого воздуха сравнительная погрешность расчета по разным методикам возрастает.

Аналогично вышеописанному, определим годовой расход холода на охлаждение наружного воздуха в теплый период года. Для этого заменим площадь между кривой, построенной через точки 7, 8 и 9, и горизонтальной осью температур равновеликим треугольником с основанием $\Delta t_n = 28 - 13 = 15^\circ\text{C}$, вершиной в точке B_{\max} , высотой этого треугольника $Q_X dt/dt_n = 13,5 \times 10^3$ кВт·ч/(год·°C). Искомый годовой расход холода на охлаждение наружного воздуха соответствует площади треугольника с указанным основанием и высотой и составляет 0,1 млн кВт·ч/год:

$$Q_{х.год} \approx 0,5 \frac{Q_X d\tau}{dt_n} \Delta t_n = 0,5 \times 13,5 \times 10^3 \times 15 \times 10^{-6} = 0,1.$$

17. Объясните, как по этой методике определить годовой расход теплоты системы вентиляции после ряда теплосберегающих мероприятий и сравнить с первоначальным?

Для сравнения вычисленного годового расхода теплоты в СКВ без теплосберегающих мероприятий с расходом теплоты в такой же системе, но после ряда энергосберегающих мероприятий приведем нижеследующий пример в продолжение предыдущего.

Пример 2. Определить уменьшенный годовой расход теплоты на нагрев наружного воздуха в СКВ в условиях примера 1 после комплекса следующих теплосберегающих мероприятий:

- естественная приточная (при наличии в окнах открывающихся фрагмуг и подаче воздуха в направлении перекрытия) и вытяжная механическая вентиляция помещения в интервале температур наружного воздуха $t_n = 0 - 17^\circ\text{C}$;
- утилизация теплоты удаляемого воздуха при средней эффективности процесса $q_{ту} = 0,70$, что сокращает расчетный расход теплоты (рис. 1)

с $Q_{т.расч} = 250$ кВт до $Q_{т.расч1} = (1 - q_{ту})Q_{т.расч} = (1 - 0,70) \times 250 = 75$ кВт.

На графике рис.1 пунктиром проводим линию текущих расходов теплоты Q_{T2} и холода Q_{X2} в такой системе при условии, что при $t_n = 0^\circ\text{C}$ $Q_T = 0$, при $t_{нрх} = -26^\circ\text{C}$ $Q_{T,расч} = 75$ кВт, соответственно, при $t_n = 17^\circ\text{C}$ $Q_X = 0$, при $t_{нрт} = 24,6^\circ\text{C}$ $Q_{X,расч} = 130$ кВт. Умножением частных значений Q_{Ti} и dt/dt_n при нескольких наружных температурах $t_n = -2,5^\circ\text{C}$, -5°C , -10°C получаем новые значения произведения $Q_{Ti} \cdot dt/dt_n$ (пунктир). Заменяя эту кривую равновеликой трапецией, получаем уменьшенный годовой расход теплоты $Q_{T,год} = 5 \times 10^3 \times 13,5 \times 10^{-3} = 67$ тыс. кВт·ч/год, что в 6,7 раз меньше ранее вычисленного расхода теплоты аналогичной СКВ, но без теплосберегающих мероприятий.

18. Мне непонятно, чем отличаются вычисленные теплопотери помещений и зданий от фактической нагрузки на системы отопления? К тому же постоянное обсуждение путей снижения тепловой нагрузки на отопление мне кажется однообразным и не содержащим ничего нового. Прав ли я?

Отопительная нагрузка здания складывается из основных и добавочных теплопотерь, теплоты, затрачиваемой на инфильтрацию и периодическую вентиляцию (проветривание), нагрев вводимых материалов и др. При кажущейся внешней простоте отопительная нагрузка

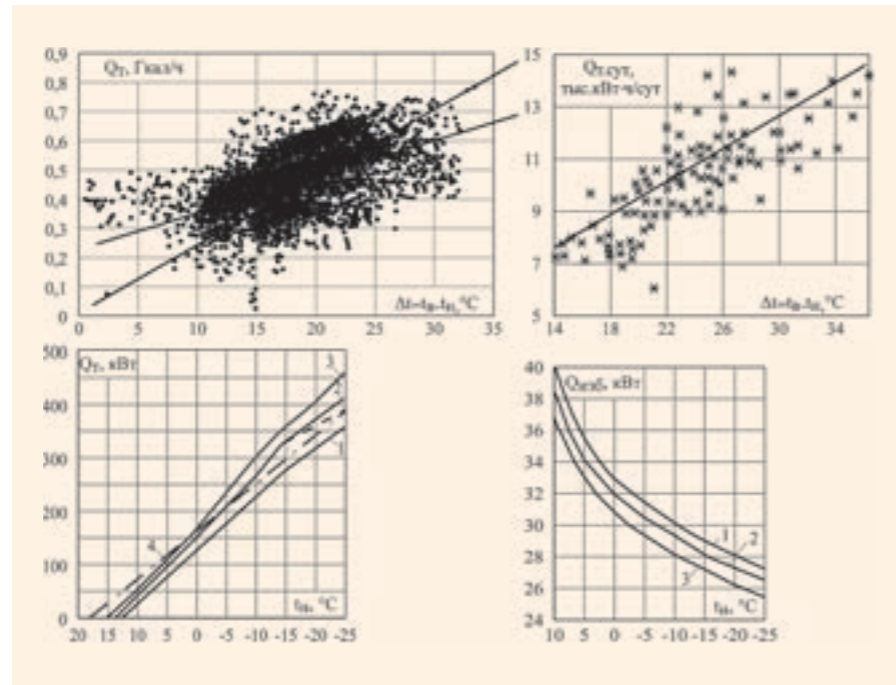


Рис. 2. Зависимость фактически потребленной теплоты на отопление, естественную вентиляцию (проветривание) и инфильтрацию жилых зданий от разности средних температур $t_n - t_{ni}$ [а — среднечасовые данные расходов теплоты в жилых зданиях, приведенные [2] для семимесячного периода наблюдений за отопительный период 2003–2004 гг. в Санкт-Петербурге, усредненная зависимость для относительных теплопотерь, предлагаемая авторами $Q_T = 0,237 + 0,0124 \Delta t$; б — зависимость суточного теплопотребления (кВт·ч/сут.) типового жилого 17-этажного здания серии П-44 за отопительный период 1992/93 гг. в Москве по данным [1], характеристики здания: число квартир — 256, общая площадь — 15 тыс. м², строительный объем — примерно 45 тыс. м³, теплопотребление при $t_n = -29^\circ\text{C}$ $Q_T = 17410$ кВт·ч/сут. = 725 кВт, удельная отопительная характеристика $q_{T,от} = 0,33$ Вт/(м³·°C), что удовлетворяет требованиям СНиП 23-02-2003; 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 [1]; г — внутренние (бытовые) теплопоступления жилого дома серии П-68/16 в Москве по данным [3] при разных наружных температурах и скорости ветра 0 м/с (линия 1), 5 м/с (линия 2), 10 м/с (линия 3)]

ка 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 герметичности светопроемов, инфильтрации, режима проветривания помещений, управления системой отопления и других факторов.

Обсуждая теплопотери здания и их зависимость от наружной температуры, обычно упрощенно линеаризуют функцию $Q_{Tn} = f(t_n - t_{ni})$, пренебрегая всеми остальными факторами и сложными климатическими воздействиями.

В свете давно известного и физически объяснимого разделения теплопотерь на быстрые (через окна) и медленные (через непрозрачные ограждения), описанного, например, С.А. Чистовичем [6–8] и использованного автором (А. Сотников) для решения задач отопления [5], а также с учетом хаотичной радиации становится понятной сложность изучаемых процессов. Поэтому мы приходим к другому, более тонкому и точному толкованию анализируемого

явления. Здесь, несомненно, имеет место многофакторность и частотная модуляция воздействий, когда годичный ход температуры $t_n(t)$ может быть представлен гармоникой и неупорядоченными на разных частотах колебаниями температуры, скорости и направления ветра, солнечной радиации. При таком беспорядке и неопределенности ответа отопления (управляемого или неуправляемого) становится понятной стохастичность точек на рис. 2а, б, в других источниках.

На практике неоднократно описывали и фактически наблюдали это многофакторное явление. Как пример этих зависимостей, на рис. 2а–г приведены опытные данные, многократно отмеченные и зарегистрированные в разные годы в жилых зданиях по показаниям счетчиков-тепломеров, по данным и публикациям А.Н. Сканава и Л.М. Махова [3], Ю.А. Матросова, И.Н. Бутовского и Д. Гольдштейна [1], В.А. Пухкала и Л.Р. Крумера [2] и др.

Как общий вывод авторы статей [1, 2, 3, 6–8 и др.] подчеркивают сложный характер зависимости фактически наблюдаемых расходов теплоты на отопление жилых зданий от разности $\Delta t = t_n - t_{ni}$.

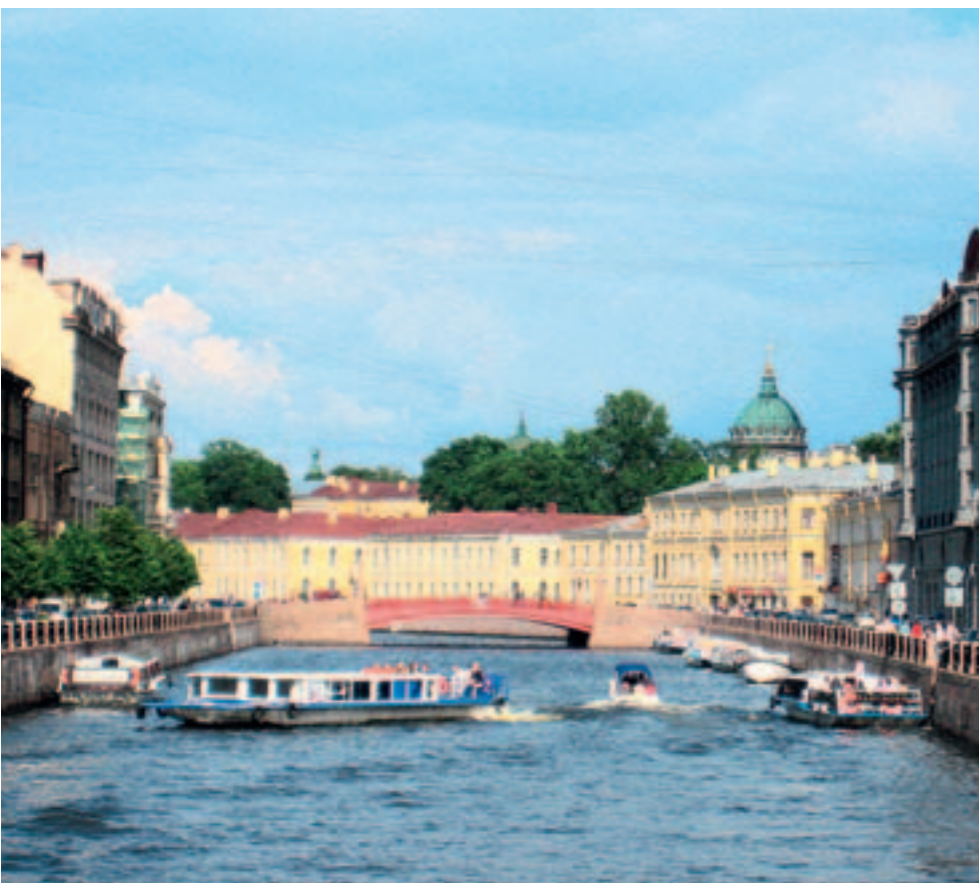
Очень сложно разобраться в совокупности упорядоченных и хаотичных воздействий на здания, формирующих его потребность в теплоте в данный момент, а тем более за год

Опытные значения образуют на графиках поле точек, поэтому зависимость теплопотерь от разности температур далека от линейной. В частности, при малых перепадах температур $t_n - t_{ni} < 15^\circ\text{C}$ и достаточном отпуске теплоты в здании при открывании окон и форточек воздухообмен увеличивается до величины, нарушающей тепловой комфорт человека. Расход теплоты на отопление и естественную вентиляцию в этом случае остается практически постоянным и значительно превышает проектное значение. При перепадах температур $t_n - t_{ni} > 25^\circ\text{C}$ наблюдается снижение теплопотребления по сравнению с проектными данными из-за срезки температурного графика на источнике теплоты и уменьшения естественного проветривания.

Как общий вывод и результирующий ответ на ваши вопросы, отмечу, что очень

сложно разобраться в совокупности упорядоченных и хаотичных воздействий на здания, формирующих его потребность в теплоте в данный момент, а тем более за год. В результате т.н. «простое отопление» является далеко не простым в энергопотреблении и энергосбережении. ●

1. Матросов Ю.А., Бутовский И.Н., Гольдштейн Д. Энергетический паспорт здания // АВОК, №3/1997.
2. Пухкал В.А., Крумер Л.Р. Теплопотребление жилых зданий на отопительно-вентиляционные нужды // В кн.: Сб. докл. 6-й международной научно-практической конференции. — СПб.: ЛенЭКСПО, 2007.
3. Сканава А.Н., Махов Л.М. Теплосбережение на отопление жилых зданий // Водоснабжение и санитарная техника, №1/1984.
4. Сотников А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции / Теория, техника и проектирование на рубеже столетий. — СПб.: АТ-Publishing. Т. I, 2005; Т. II, ч. 1, 2006; Т. II, ч. 2, 2007.
5. Сотников А.Г. О связи расчетной отопительной температуры и мощности системы отопления с относительной площадью остекления помещения и здания // Журнал «С.О.К.», №3/2010.
6. Чистович С.А. Автоматизация установок и систем теплоснабжения. — М.: Стройиздат, 1964.
7. Чистович С.А., Быков С.И., Лебедев П.И. Метод учета влияния инерционности наружных ограждений зданий на режим отпуски теплоты в условиях АСУ ТП // В кн.: Индустриальные отопительно-вентиляционные и санитарно-технические системы и технологии их монтажа. — Л.: ВНИИГС, 1983.
8. Чистович С.А., Харитонов В.Б. Автоматизированные системы теплофикации, теплоснабжения и отопления // СПб.: АВОК Северо-Запад, 2008.



Международная специализированная выставка инженерного оборудования, энергосберегающих технологий и материалов

МАТТЕХ™

1-4 Марта / March 2011
Экспоцентр на Красной Пресне

Внимание!
Проводится одновременно с Международной Специализированной выставкой климатической техники «Мир Климата™» и Международной Специализированной выставкой бассейнов, саун и спа «AQUASPACE»

Организаторы / Организаторы: МОСКВА, РОССИЯ **ЕВРОЭКСПО** / EUROEXPO, ВЕНА, АУСТРИЯ **EUROEXPO**

При поддержке / При поддержке: **ЭКСПОЦЕНТР**, **АСКОМ**

Официальный информационный партнер: **АКВАТЕРМ**, **СОК**

Официальный интернет-партнер: **ВанДом.RU**

Тел.: +7 (495) 912-91-91
Факс: +7 (495) 940-41-94
info@mattexpo.ru
www.mattexpo.ru