

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

1. Оценка энергоэффективности зданий по СНиП 23-02-2003 и по рекомендациям Стандарта РНТО

В качестве примера приведем результаты расчетов q_h^{des} в размерности $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{сут})$ для характерного здания-представителя – средней школы по типовому проекту 221-1-25-387 [8] (здесь и далее ссылки на список литературы в конце Раздела 3) – в трех регионах России с различными климатическими условиями. Коэффициент компактности k_e^{des} , м^{-1} , представляющий собой отношение суммарной площади наружных ограждений A_e^{sum} , м^2 , к отапливаемому объему здания V_h , м^3 , для данного объекта равен 0.423. Если взять для примера, скажем, Краснодар ($D_d = 2682$ [9]), Москву ($D_d = 4944$) и Воркуту ($D_d = 8905$), получается следующая картина. В таблице 4.1 приведены значения q_h^{des} для трех вариантов: 1 – требуемое сопротивление теплопередаче ограждений R_{req} , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, непосредственно по таблице 4; 2 – после допустимого снижения по п.5.13 [2], 3 – несветопрозрачные ограждения по формуле (3) [2], т.е. по санитарно-гигиенической норме. Снижение сопротивления теплопередаче по п.5.13 [2] по сравнению с требованиями таблицы 4 [2] (для наружных стен – до 37%, для полов и потолков – до 20%, для светопрозрачных конструкций – до 5%) возможно при выполнении норм по удельному потреблению тепловой энергии зданием за отопительный период q_h^{req} . Требуемый по таблице 9 [2] уровень энергопотребления q_h^{req} , $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{сут})$, указан в шестой колонке. В двух последних колонках таблицы 4.1.1 приведен K_m , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а также удельные тепlopоступления K_{int} в той же размерности, полученные соответствующим пересчетом из формул (Г.6) и (Г.7) [2].

Таблица 4.1.1. Теплоэнергетические показатели зданий образовательных учреждений.

Регион	D_d	q_h^{des}			q_h^{req}	Для Варианта 1:		
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3		q'_h	K_m	K_{int}
Краснодар	2682	29.71	34.45	43.56	38	0.53	1.089	0.369
Москва	4944	22.75	26.26	34.56	38	0.50	0.808	0.257
Воркута	8905	21.70	24.16	31.69	36.1	0.42	0.691	0.166

Таким образом, оказывается, что даже после допустимого снижения теплозащиты величина q_h^{des} будет ниже, чем q_h^{req} , и довольно существенно, особенно в северных районах. В скрытом виде это означает, что R_{req} по сравнению с таблицей 4 можно снизить практически всегда. Кроме того, отсюда видно, что доля трансмиссионных тепlopотерь в энергетическом балансе здания не слишком велика. В таблице эта доля показана в виде отношения q'_h тепlopотерь через ограждения к общей отопительно-вентиляционной нагрузке.

Для этого же здания заполним энергетический паспорт по методике Стандарта РНТО [1]:

Таблица 4.1.2. Результаты определения энергетических показателей для здания средней школы по типовому проекту 221-1-25-387.

Параметр	Обозначение, формула	Ед. изм.	Значение	
			Вар.1	Вар.2
Число учащихся	$N_{\text{чел}}$	Чел	392	
Площадь остекления	$F_{\text{ок}}$	м^2	464	
Площадь наружных стен (без окон)	$F_{\text{нс}}$	м^2	1014	
Площадь покрытия	$F_{\text{пт}}$	м^2	1397	
Площадь перекрытия над техподпольем	$F_{\text{пл}}$	м^2	1397	
Коэффициент остекления	K_o	-	0.314	
Отапливаемая площадь	$F_{\text{от}}$	м^2	2794	
Отапливаемый объем	V	м^3	10102	
Средняя температура внутреннего воздуха	t_v	$^\circ\text{C}$	+20	
Средняя температура нар. воздуха за от. период	$t_{\text{от}}$	$^\circ\text{C}$	-3.1	

Продолжительность отопительного периода	$Z_{оп}$	сут	214	
Характеристика отопительного периода	$M = 0.024 \cdot (t_b - t_{оп}) \cdot Z_{оп}$	тыс. К·час	118.6	
Сопротивление теплопередаче стен	$R_{нс}$	$m^2 \cdot K/Вт$	0.92	2.77
То же, покрытия	$R_{пт}$	$m^2 \cdot K/Вт$	1.66	3.70
То же, перекрытия над техподпольем	$R_{пл}$	$m^2 \cdot K/Вт$	1.38	3.25
Сопротивление теплопередаче окон	$R_{ок}$	$m^2 \cdot K/Вт$	0.42	0.54
Суммарная площадь наружных ограждений	$F_{общ}$	m^2	4272	
Коэффициент n наружной стены	$n_{нс}$	-	1	
То же, покрытия	$n_{пт}$	-	1	
То же, перекрытия над техподпольем	$n_{пл}$	-	0.6	
То же, окон	$n_{ок}$	-	1	
Коэффициент компактности	$K_{комп} = F_{общ}/V_{зд}$	m^{-1}	0.423	
Коэффициенты добавочных теплопотерь	β_1, β_2	-	1.1, 1.13	
Трансмиссионные теплопотери	$Q_1 = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot M \cdot \sum (n_i F_i / R_i) \cdot 10^{-3}$	МВт·ч/г.	538.8	274
Расчетный воздухообмен (по проекту)	$L_{расч}$ [54]	$m^3/ч$	15200	
Кратность воздухообмена (в рабочее время)	$Kp_{раб} = L_{расч}/V$	$ч^{-1}$	1.505	
То же, в нерабочее время (принято)	Kp_n	$ч^{-1}$	0.5	
Коэфф. эффективности устр-в теплоутилизации	$k_{эф}$	-	0	0.5
Коэфф. учета встречного теплового потока	k	-	0.8	0.7
Рабочее время (исходя из режима работы)	z_p	час/сут	10	
Эффективная кратность воздухообмена	$Kp = [(1 - k_{эф}) \cdot z_p \cdot Kp_{раб} + k \cdot (24 - z_p) \cdot Kp_n] / 24$	$ч^{-1}$	0.86	0.52
Энергозатраты на подогрев вент. воздуха	$Q_2 = 0.33 \cdot M \cdot V \cdot Kp \cdot 10^{-3}$	МВт·ч/г.	340.0	205.6
Норма расхода горячей воды в средние сутки	$q_{u,m}^h$	л/сут	$1333 = 3.4 \cdot N_{чел}$	
Перепад температур в системе ГВС	Δt	К	55	
Коэффициент снижения расхода горячей воды	k_h	-	1	0.94
Энергозатраты на ГВС	$Q_3 = q_{u,m}^h \cdot 1.163 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta t \cdot Z_{оп} \cdot k_h$	МВт·ч/г.	18.2	17.1
Мощность эл.приводов инженерных систем	$N_{пр.i}$	кВт	20	
Коэффициент спроса для электроприводов	$k_{сп.i}$	-	0.5	
Энергопотребление эл.приводами инж. систем	$Q_4 = \sum N_{пр.i} \cdot k_{сп.i} \cdot z_{p,i} \cdot Z_{оп} \cdot 10^{-3}$	МВт·ч/г.	21.4	
Удельная нагрузка на освещение и эл.приборы	$n_{э.i}$	кВт/1 уч.	0.22	
Мощность освещения и электроприборов	$N_{э.i} = n_{э.i} \cdot N_{чел}$	кВт	86.2	
Коэфф. спроса для освещения и эл.приборов	$k_{сп.i}$	-	0.76	
Эл.потребление на освещение и эл.приборами	$Q_5 = \sum N_{э.i} \cdot k_{сп.i} \cdot z_{p,i} \cdot Z_{оп} \cdot 10^{-3}$	МВт·ч/г.	140.2	
Быт. теплопоступления на 1м ² отапл. площади	$q_{быт}$ (по расчету)	Вт/м ²	14.9	
Бытовые тепловыделения	$Q_{быт} = 24 \cdot q_{быт} \cdot Z_{оп} \cdot F_{от} \cdot 10^{-6}$	МВт·ч/г.	213.1	
Коэфф. затенения светового проема	$\tau_{ок}$	-	0.65	0.5
Коэфф. относит. проникания солн. радиации	$k_{ок}$	-	0.57	0.83
Теплопоступл. от солн. радиации через окна	$Q_{рад} = \tau_{ок} \cdot k_{ок} \cdot \sum (F_{ок,i} \cdot I_i / 3600)$	МВт·ч/г.	72.2	80.9
Суммарные теплопоступления	$Q_{тп} = Q_{быт} + Q_{рад}$	МВт·ч/г.	-	294
Энергетическая эксплуатационная хар-ка	$q = (\sum Q_i - Q_{тп}) \cdot 10^3 / F_{от}$	кВт·ч/(м ² ·г)	378.9	130

Таблица 4.1.3. Сравнительная эффективность энергосберегающих мероприятий для здания средней школы по типовому проекту 221-1-25-387.

Энергосберегающие мероприятия	Снижение энергопотребления	
	кВт·ч/(м ² ·год)	%
Утепление несветопрозрачных наружных ограждений	81.7	21.6
Замена двойного остекления на тройное		
- повышение термического сопротивления	12.9	3.4
- снижение неорганизованного воздухообмена	4.1	1.1
Утилизация теплоты вытяжного воздуха	44.3	11.7
Установка смесителей с левым расположением крана горячей воды и кранов с регулируемым напором	0.4	0.1
Учет бытовых тепловыделений	76.2	20.1
Учет теплопоступлений от солнечной радиации через окна	28.9	7.6
Итого	248.5	65.6

2. Расчет энергоэффективных схем обработки воздуха и технико-экономическое обоснование применения энергосберегающих мероприятий.

Определение расходов воздуха и параметров характерных точек для схемы обработки воздуха, приведенной на рис.3.4.3, производится по следующей схеме. Принимаем с учетом I-d-диаграммы параметры точки «В» по рекомендациям [15] для помещений бассейнов: $t_B = 28^\circ\text{C}$; $\phi_B = 60\%$; $d_B = 14.2$ г/кг; $I_B = 64.2$ кДж/кг, и «Н» по данным [9]: $t_H = -28^\circ\text{C}$; $I_H = -27.3$ кДж/кг; $d_H = 0.3$ г/кг (для условий Москвы). Находим расход наружного воздуха G_H , кг/ч, для компенсации влаговывделений в бассейне, сравниваем его с расходом, вычисленным, исходя из санитарной нормы в объеме $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ на человека, и используем для дальнейшего расчета больший из них. Принимаем ориентировочно долю наружного воздуха около 22% и соответственно долю рециркуляционного 78%. Вычисляем расход приточного воздуха $G_{\Pi} = G_H/0.22$, и рециркуляционного $G_P = G_{\Pi} - G_H$. Принимаем $t_{\text{ут}} = 10^\circ\text{C}$.

Определяем влагосодержание приточного воздуха d_{Π} , г/кг, двумя способами:
 1) $d_{\Pi} = d_B - \frac{W \cdot 10^3}{G_{\Pi}}$ – по балансу влаги в помещении; 2) $d_{\Pi} = \frac{G_H \cdot d_H + G_P \cdot d_B}{G_{\Pi}}$ – для процесса смешения – и убеждаемся в равенстве результатов. Здесь W – влагопоступления в помещение, кг/ч. Если такого совпадения нет, необходимо изменить соотношение между наружным и рециркуляционным воздухом и заново вычислить G_{Π} и G_P по известному G_H .

Вычисляем энтальпию в точке «О» по уравнению теплового баланса в теплоутилизаторе: $I_O = I_B - \frac{G_H \cdot c_B \cdot (t_{\text{ут}} - t_H)}{G_{\Pi}}$, кДж/кг, находим точку «О», ее температуру t_O и убеждаемся, что относительная влажность $\phi_O < 100\%$, и в теплоизвлекающем теплообменнике нет конденсации. Здесь $c_B = 1.005$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха.

Определяем температуру в точке «С» через выражение для процесса смешения наружного и рециркуляционного воздуха $t_c = \frac{G_H \cdot t_{\text{ут}} + G_P \cdot t_O}{G_{\Pi}}$, $^\circ\text{C}$, и затем находим суммарный

коэффициент температурной эффективности принятой комбинации мероприятий, равный отношению разности температур в точках «С» и «Н» к ее разности в точках «В» и «Н». Этот коэффициент по физическому смыслу представляет собой долю теплоты для подогрева приточного воздуха до требуемых параметров в точке «П», получаемой за счет вторичных энергоресурсов (в данном случае – утилизации и рециркуляции), т.е. степень экономии тепловой энергии в системе вентиляции. Расчеты показывают, что для принятой схемы эта величина действительно может достигать 80 – 85%, как и в схеме [15].

В теплый период года сохранение рециркуляции в рассматриваемых условиях позволяет избежать как подогрева, так и охлаждения, а также увлажнения и осушки наружного воздуха. Дело в том, что точка «Н» по данным [9] для Москвы в этом случае имеет параметры $t_H = +26.3^\circ\text{C}$; $I_H = 52.5$ кДж/кг; $d_H = 10.47$ г/кг при обеспеченности 0.98 (для расчета кондиционирования воздуха). Поэтому, как показывает построение процесса на I-d-диаграмме, при простом смешении наружного и рециркуляционного воздуха без какой-либо дальнейшей обработки можно получить воздух с параметрами, достаточными для непосредственной подачи в помещение – с влагосодержанием, равным d_{Π} , и температурой на $0.5 - 1$ градус ниже величины t_{Π} с учетом последующего подогрева смеси в вентиляторе. Требуемая доля рециркуляционного воздуха здесь получается по расчету процесса смешения и будет значительно ниже, чем в холодный период – примерно 20%. Суммарный расход притока по условиям эксплуатации вентиляционного оборудования и организации воздухопотока в помещении при этом должен оставаться таким же, как и в холодный период, поэтому абсолютное значение G_H в теплый период будет существенно выше, чем в холодный.

Для схемы на рис.3.4.4: температура притока $t_{\Pi} = 14^\circ\text{C}$ и удаляемого воздуха $t_y = 22^\circ\text{C}$. Принимаем величину $t_{\text{ут}}$ на 1°C ниже значения t_O . Значения $t_H = -28^\circ\text{C}$ и $d_H = 0.3$ г/кг прини-

маем, как в первом примере. Залы для ЭВМ относятся к помещениям «точного кондиционирования», в которых требуется поддержание температуры $t_b=20\pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi_b=60\pm 15\%$. Назначая для холодного периода ϕ_b на минимально допустимом уровне 45%, по построению получаем $d_y = d_o = 6.6$ г/кг. Расходы притока и вытяжки $G_{\Pi} = G_y$, кг/ч, вычисляются по выделениям явной теплоты при принятых температурах притока $t_{\Pi} = 14^\circ\text{C}$ и удаляемого воздуха $t_y = 22^\circ\text{C}$.

Система уравнений для остальных параметров имеет вид (обозначения см. на рис.3.4.4):

$$Q_{ym} = G_n \cdot c_{\epsilon} \cdot (t_{ym} - t_c) / 3.6 = G_y \cdot c_{\epsilon} \cdot (t_y - t_o) / 3.6;$$

$$t_{ym} = t_o - 1; G_p = G_n - G_n;$$

$$t_c = \frac{t_n \cdot G_n + t_o \cdot G_p}{G_n}; d_c = \frac{d_n \cdot G_n + d_o \cdot G_p}{G_n}.$$

Решая ее, получим: $t_o = 15^\circ\text{C}$, $t_c = t_{yt} - (t_y - t_o) = 7^\circ\text{C}$, доля рециркуляционного воздуха 81% (вычисляется из формулы для t_c), $d_c = 5.4$ г/кг. По первоначальному построению $d_{\Pi} = 6.4$ г/кг, поэтому в помещении требуется местное доувлажнение. Общий коэффициент температурной эффективности составляет примерно 0.82, т.е. лежит на том же уровне, что и в первом примере.

Рассмотрим также технико-экономическое обоснование применения комплекса энергосберегающих мероприятий для общественного здания по методике п.п. 3.3 – 3.5. Норма дисконта была принята равной ставке рефинансирования ЦБ РФ, действовавшей с 15.01.04, или 14 % годовых. Ниже приведены результаты расчета составляющих капитальных и эксплуатационных затрат [1] (обозначения см. п.п. 3.3, 3.5, кроме дополнительно приведенных в примере).

$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_{т.1} = (q_1 - q_2) \cdot F_{от} \cdot 10^{-3} \cdot 0.86 \cdot C_{т} = (355 - 132) \cdot 8976 \cdot 10^{-3} \cdot 0.86 \cdot 574 = 988093$ руб/год – дополнительные эксплуатационные затраты на тепловую энергию в Вар.1 (т.е. считаем $\mathcal{E}_2 = 0$);

$Q_{co} = Q_1 \cdot (t_b - t_{н5}) \cdot 10^3 / M = 357 \cdot (18 + 28) / 108.4 = 151400$ Вт – мощность системы отопления по Вар.2;

$N_{TK} = Q_{co} / 1000 = 151400 / 1000 = 152$ шт – количество термклапанов (из расчета 1 шт на 1 кВт);

$K_{co} = C_{TK} \cdot N_{TK} = 28 \cdot 36 \cdot 152 = 153216$ руб – затраты на термклапаны (из расчета $C_{TK} = 36$ \$ за 1 шт);

$C_{пу} = 28 \cdot 0.36 \cdot L_{расч} = 28 \cdot 0.36 \cdot 86830 = 875246$ руб – стоимость приточных установок (из расчета 0.36 \$ за 1000 м³/ч воздухопроизводительности);

$K_{ту} = 1/3 \cdot C_{пу} = 1/3 \cdot 875246 = 291749$ руб – затраты на теплоутилизационное оборудование;

$K_{ок} = \Delta C_{ок} \cdot F_{ок} = 260 \cdot 747 = 194220$ руб – затраты на замену остекления (при удельной стоимости замены остекления $\Delta C_{ок} = 260$ руб/м²);

$V_{ут} = (\sum F_i \cdot \Delta R_i) \cdot \lambda_{ут} / r = (1.4 \cdot 1759 + 1.56 \cdot 2397 + 1.79 \cdot 2992) \cdot 0.042 / 0.8 = 607$ м³ – объем утеплителя ($\Delta R_i = R_{2,i} - R_{1,i}$ – разность сопротивлений теплопередаче i-го ограждения по Вар.2 и Вар.1, $r = 0.8$ – средний коэффициент теплотехнической однородности конструкций);

$K_{ут} = C_{ут} \cdot V_{ут} + C_p \cdot \sum F_i = 850 \cdot 607 + 90 \cdot 7148 = 1159270$ руб – затраты на теплоизоляцию;

$K_2 = \sum K_i = 1798455$ руб – суммарные дополнительные капитальные затраты по Вар.2 (если $K_1 = 0$).

Графики зависимости СДЗ от Т по вариантам для рассматриваемого здания приведены на рис. 4.2.1. Результаты расчета СДЗ сведены в таблицу 4.2.1 [1].

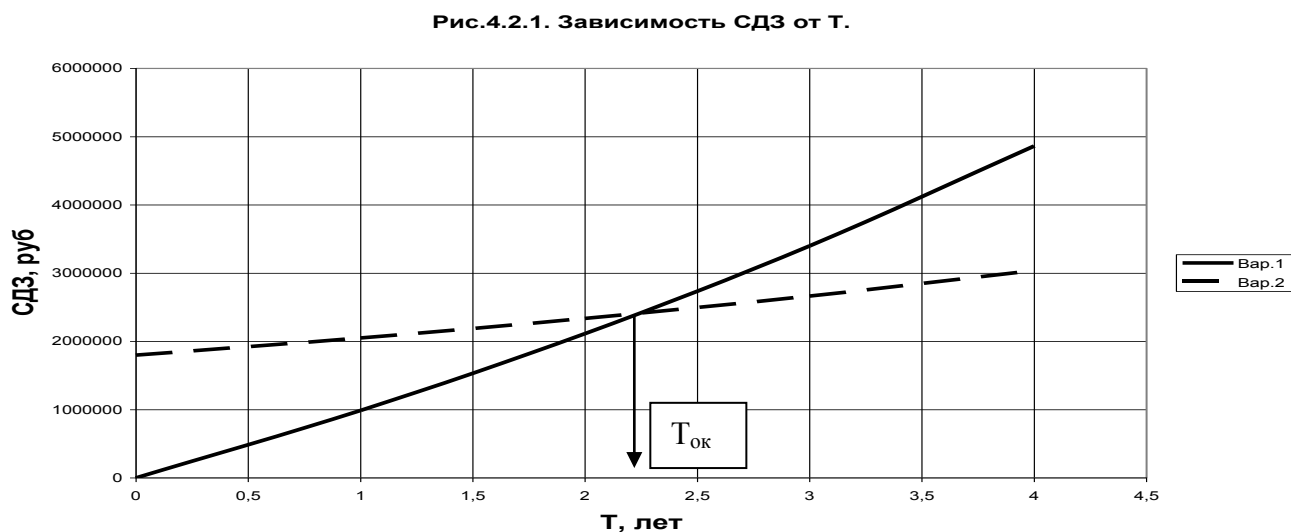


Таблица 4.2.1. Результаты расчета СДЗ в зависимости от Т по вариантам для Здания 1.

Т, лет	СДЗ ₁ , руб	СДЗ ₂ , руб
0	0	1798455
1	988093	2050239
2	2114519	2337272
3	3398645	2664490
4	4862548	3037519

Легко видеть, что ожидаемый срок окупаемости всего использованного комплекса энергосберегающих мероприятий $T_{ок}$ даже с учетом дисконтирования затрат составляет всего лишь 2.2 года, что намного меньше расчетного срока службы здания (не менее 25 лет).

3. Экономический расчет тепловых потерь ВОС.

Задание: оценить величину эксплуатационных затрат на отопление ВОС.

Расчет: Цена 1 кг условного топлива в 2007 году:

2,0 руб. – магистральный газ;

6,0 руб. – сжиженный газ;

16 руб. – солярка /мазут.

В переводе на тепловую энергию цена составит от 20 коп. до 1,6–2,0 руб. за 1 кВт·ч. Максимальная цена соответствует электроэнергии, хотя в некоторых регионах (Иркутск) возможна цена 30 коп./кВт·ч электроэнергии.

Рассмотрим здание ВОС – 3000 м², установленное в Москве:

- температура воздуха внутри 15 °С;
- максимальная тепловая мощность оборудования 600 кВт;
- удельная тепловая нагрузка 200 Вт/м² при 2-хслойной оболочке;
- средний расход топлива 3000 кг в неделю;
- сезон работы ноябрь-апрель 210 сут – 30 нед.

Итого общее количество топлива 90 т солянки или 1млн. 440 тыс. руб. = 55 000 \$.

Стоимость самой 2-хслойной оболочки равна 100 \$/м² или 300 000 \$ в целом. Стоимость теплового генератора мощностью 600 кВт составляет 25000 \$. Итого расходы за 1-й год = 55000+300 000+25 000 =380 000 \$.

Сравним с ЭКОНОМНОЙ оболочкой.

Стоимость однослойной оболочки равна 50 \$/м² или 150 000 \$ в целом. Увеличенный бюджет на отопление составит 110 000–120 000 \$. Стоимость оборудования повышенной мощности равна 50 000 \$.

Итого за 1-й год получаем 150 000 + 120 000 + 50 000 = 320 000 \$. Прочие расходы на обустройство аналогичны первому варианту.

В итоге экономия 60 000 \$ затрат в 1-й год эксплуатации в кажущемся более дешевым варианте с однослойной оболочкой полностью пропадет на второй год и станет чистым убытком в 60 000 \$ в третий год использования.