

Глава 1. Энергоэффективность и энергосбережение, Глава 2. Оценка энергопотребления здания

Расчет энергетических показателей здания

В качестве примера приведем результаты расчетов для упомянутого в лекционном материале характерного здания-представителя – средней школы по типовому проекту 221-1-25-387 (Строительный каталог. Перечень типовой документации общественных зданий для строительства в городах и поселках городского типа. – М.: ГУП ЦПП. – 1994) в г. Москве. В первом варианте возьмем сопротивление теплопередаче R_o^{mp} по данным табл. 3 СП 50.13330.2012 для вычисленного значения ГСОП, во втором – со снижением в указанных в п.5.2 СП 50.13330.2012 пределах, т.е. m_p не ниже 0,63 для наружной стены и m_p не ниже 0,8 – для покрытия. Перекрытие над подвалом и заполнения светопроемов в обоих случаях принимаем с $m_p = 1$, т.е. сравниваем только базовый и пониженный уровень теплозащиты основных несветопрозрачных конструкций. Площади ограждающих конструкций принимаем по строительным чертежам: $A_{нс} = 1014 \text{ м}^2$ (наружная стена), $A_{пт} = 1397 \text{ м}^2$ (покрытие) и $A_{пл} = 1397 \text{ м}^2$ (перекрытие над подвалом), $A_{ок} = 464 \text{ м}^2$ (окна), а соответствующие коэффициенты положения n_i равными 1 для всех ограждений, кроме пола над подвалом, где $n = 0,6$. Отапливаемый объем здания равен $V_{от} = 10102 \text{ м}^3$. Считаем среднюю температуру внутреннего воздуха в здании для расчета системы отопления $t_e = +18^\circ\text{C}$ по требованиям ГОСТ 30494-2011, среднюю температуру наружного воздуха за отопительный период $t_{от} = -2,2^\circ\text{C}$ и его продолжительность $z_{от} = 205$ сут по табл. 1 СП 131.13330.2012 для г. Москвы, тогда $\text{ГСОП} = (18+2,2) \cdot 205 = 4141^\circ\text{C} \cdot \text{сут/г}$. Результаты расчетов сводим в таблицы 1 и 1а.

Таблица 1

Теплотехнические показатели здания (вариант 1)

Ограждение	$A_i, \text{м}^2$	$R_i, \text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$	n_i	$A_i n_i / R_i, \text{Вт} / \text{К}$	$K_{\text{комп}} = A_n^{\text{сум}} / V_{\text{от}}$	$K_{\text{общ}} = (\sum n_i A_i / R_i) / A_n^{\text{сум}}$	$k_{\text{об}} = K_{\text{комп}} K_{\text{общ}}$
Наружная стена	1014	2,849	1	356	0,423	0,448	0,189
Бесчердачное покрытие	1397	4,271	1	327			
Пол над подвалом	1397	3,763	0,6	223			
Окна	464	0,461	1	1007			
Сумма	$A_n^{\text{сум}} = 4272$	—	—	$\sum n_i A_i / R_i = 1913$			

Таблица 1а

Теплотехнические показатели здания (вариант 2)

Ограждение	$A_i, \text{ м}^2$	$R_i, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	n_i	$A_i n_i / R_i, \text{ Вт/К}$	$K_{\text{комп}} = A_{\text{н}}^{\text{сум}} / V_{\text{от}}$	$K_{\text{общ}} = (\sum n_i A_i / R_i) / A_{\text{н}}^{\text{сум}}$	$k_{\text{об}} = K_{\text{комп}} K_{\text{общ}}$
Наружная стена	1014	1,795	1	565	0,423	0,516	0,218
Бесчердачное покрытие	1397	3,416	1	409			
Пол над подвалом	1397	3,763	0,6	223			
Окна	464	0,461	1	1007			
Сумма	$A_{\text{н}}^{\text{сум}} = 4272$	—	—	$\sum n_i A_i / R_i = 2204$			

Требуемая теплозащитная характеристика рассчитывается по формуле (5.5) [4]:

$$k_{\text{об}}^{\text{тр}} = \frac{0,16 + \frac{10}{\sqrt{V_{\text{от}}}}}{0,00013 \cdot GCOП + 0,61}, \text{ для } V_{\text{от}} > 960 \text{ м}^3, \text{ откуда в данном случае получается}$$

$k_{\text{об}}^{\text{тр}} = 0,226 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Таким образом, оба варианта в итоге удовлетворяют требованию $k_{\text{об}} \leq k_{\text{об}}^{\text{тр}}$, поэтому возможно их технико-экономическое сравнение.

Принимая R_o^{np} отдельно для каждого варианта из таблиц 1 и 1а, а количество теплотехнических неоднородностей по строительным чертежам здания, расчет в целом можно оформить в виде таблицы 2. Площадь фасада была определена по чертежам и составляет 400 м². Конструкция стены для вычисления толщины утеплителя приведена в таблице 2а.

Таблица 2.

Сводная таблица тепловых потоков через теплопроводные включения и узлы

Вид неоднородности	Ед. изм.	Суммарная протяженность линейных элементов, м	Удельная длина l_j , м/м ² , или количество точечных элементов n_k , шт/м ²	Значение величины дополнительного теплового потока ψ_j , Вт/(м·К), или χ_k , Вт/К ¹	Дополнительные потери теплоты через узлы (произведение значений, указанных в кол. 4 и 5), Вт/(м ² ·К)	
1	2	3	4	5	6	
Тарельчатые дюбели	шт	—	6	0,005	0,03	
Оконные откосы	м	305	0,7625	0,06	0,053375	
Углы вогнутые	м	19,2	0,048	−0,2	−0,0096	
Углы выпуклые	м	38,4	0,096	0,15	0,0144	
Примыкание к фундаменту	м	41,7	0,10425	0,34	0,072975	
Примыкание к кровле	м	41,7	0,10425	0,38	0,006672	
1	Суммарные дополнительные удельные теплотери, Вт/(м ² ·К), через теплотехнические неоднородности $\Delta K = \sum \psi_j l_j + \sum \chi_k n_k$, итого по кол.6					0,2279
	Теплотехнические показатели стены					Вар.1 Вар.2
2	Коэффициент теплопередачи K , Вт/(м ² ·К), соответствующий требуемому приведенному сопротивлению теплопередаче R_o^{np} : $K = \frac{1}{R_o^{np}}$					0,351 0,557
3	$U_{тр} = K - \Delta K$					0,123 0,329
4	$R_{ут}$, м ² ·К/Вт – по формуле (1)					7,084 1,998
5	Требуемая толщина слоя утеплителя $\delta_{ут}$, м, где $\lambda_{ут}$ – теплопроводность материала утеплителя, Вт/(м·К): $\delta_{ут} = R_{ут} \lambda_{ут}$					0,290 0,082
6	Коэффициент теплотехнической однородности (для оценки эффективности использования утеплителя) $r = \frac{U_{тр}}{K}$					0,351 0,591

$$R_{ут} = \frac{1}{U_{тр}} - \left(\frac{1}{\alpha_v} + \sum R_{к.и} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \quad (1)$$

Здесь α_v и α_n – соответственно коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·К). Для наружной

¹ СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. – Минстрой России. – 2015.

стены по [4] можно принимать $\alpha_v = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Величина $\sum R_{k,i}$ – это суммарное термическое сопротивление всех слоев однородной части фрагмента конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, кроме теплоизоляционного. При этом для каждого слоя $R_i = \delta_i / \lambda_i$, где δ_i , м, и λ_i , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – соответственно толщина и теплопроводность материала i -го слоя.

Таблица 2а.

Конструкция наружной стены

№	Материал слоя	Плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Толщина δ , м	Удельная теплоемкость C_o , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ (по [4], прил. Т)	Коэффициенты (по [4], прил. Т)		
					теплопроводности λ_b , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	теплоусвоения S_b , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	паропроницаемости μ , $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$
1	Кирпич керамический эффективный красный на цементно-песчаном растворе	1400	0,51	0,88	0,58	7,56	0,16
2	Утеплитель “ROCKWOOL - Лайт баттс”	37	По расчету	0,84	0,041	0,73	0,3
3	Цементно-песчаная штукатурка	1800	0,02	0,84	0,93	11,09	0,09

Таким образом, в первом варианте величина r заметно меньше. Таким образом, повышение уровня теплозащиты приводит к ухудшению эффективности использования теплоизоляции из-за того, что увеличивается относительный вклад дополнительных теплопотерь через точечные и линейные элементы стены, определяемый только ее геометрией и конструкцией. Поэтому общий объем теплоизоляции в первом случае будет больше не только вследствие роста R_o^{np} , но и по причине уменьшения параметра r .

Принимаем коэффициенты теплотехнической однородности для стены $r_{нс}$ в каждом варианте по таблице 2, а для покрытия и перекрытия над подвалом возьмем ориентировочно $r_{пт} = r_{пл} = 0,95$. Капитальные затраты на теплоизоля-

цию $K_{\text{ти}}$, руб., в каждом варианте рассчитываются, исходя из объема теплоизоляционного материала в конструкциях $V_{\text{ти}}$, м³, определяемого с учетом величины $\lambda_{\text{ут}}$, и его стоимости $C_{\text{ти}}$, руб./м³. В рассматриваемом примере считаем $\lambda_{\text{ут}} = 0,041$ Вт/(м·К) и $C_{\text{ти}} = 2600$ руб./м³ по среднерыночным ценам 2015 года. Принимаем также стоимость тепловой энергии по данным ОАО «МОЭК» для нежилых зданий $C_{\text{т}} = 1720,9$ руб./Гкал. Коэффициент учета дополнительных теплотерь $\beta = 1,13$ для общественного протяженного здания из прил. Г СП 50.13330.2012. Расчетный срок эксплуатации здания $T_{\text{ам}} = 50$ лет. В данном случае разницей в расходе электроэнергии на системы отопления и в заработной плате рабочих можно пренебречь, поэтому годовые эксплуатационные затраты можно считать как $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{ам}} + \mathcal{E}_{\text{т.от}}$ (только амортизационные отчисления и тепловая энергия), руб./г. Вычисления сводим в таблицы 3 и 3а.

Таблица 3.

Технико-экономические показатели здания (вар. 1)

Ограждение	$A_i, \text{ м}^2$	$R_i, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	r_i	n_i	$\delta_{\text{ти}}, \text{ м}$	$V_{\text{ти},i}, \text{ м}^3$ – объем теплоизоляции	$n_i A_i / R_i, \text{ Вт/К}$		
Наружная стена	1014	2,85	0,35	1	0,29	294	356		
Бесчердачное покрытие	1397	4,27	0,95	1	206		327		
Пол над тех-подпольем	1397	3,76	0,95	0,6	181		223		
Окна	464	0.46	–	1	-		1007		
Здесь $\Sigma Q_{\text{от}}$ – суммарная мощность системы отопления здания, Вт; $V_{\text{ти},i} = 0.8 \lambda_{\text{ут}} R_i A_i / r_i$ – объем теплоизоляции. Для наружных стен более точно $V_{\text{ти}} = \delta_{\text{ти}} A_{\text{нс}}$, где $\delta_{\text{ти}}$ принимается по таблице 2.						$\Sigma V_{\text{ти}} =$	682	$\Sigma n_i A_i / R_i =$	1913
								$\Sigma Q_{\text{от}} =$	99,9
						$K_{\text{ти}} =$	1774025 руб.	$\mathcal{E}_{\text{т.от}} =$	346916 руб./г.

$\Xi_{ам} =$	53221^2 руб./г.	$\Xi =$	400137 руб./г.
--------------	----------------------	---------	---------------------

Таблица 3а.

Технико-экономические показатели здания (вар. 2)

Ограждение	$A_i, \text{м}^2$	$R_i,$ $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	r_i	n_i	$\delta_{\text{ти}},$ м	$V_{\text{ти},i}, \text{м}^3$ – объем теплоизоляции	$n_i A_i / R_i, \text{Вт}/\text{К}$
Наружная стена	1014	1,795	0,59	1	0,05	50,7	565
Бесчердачное покрытие	1397	3,416	0,95	1	165		409
Пол над тех-подпольем	1397	3,763	0,95	0,6	181		223
Окна	464	0,461	–	1	–		1007
					$\Sigma V_{\text{ти}} =$	397	$\Sigma n_i A_i / R_i =$ 2204
							$\Sigma Q_{\text{от}} =$ 115.1
					$K_{\text{ти}} =$	1032350	$\Xi_{\text{т.от}} =$ 399645 руб./г.
					$\Xi_{ам} =$	30970 руб./г.	$\Xi =$ 430615 руб./г.

Вычисляем совокупные дисконтированные затраты (СДЗ), руб., по формуле: $\text{СДЗ} = K(1 + p/100)^T + \Xi[(1 + p/100)^T - 1](100/p)$, для каждого из вариантов по данным таблиц 3 и 3а при норме дисконта в размере 14% годовых, исходя из величины ключевой ставки ЦБ РФ на рассматриваемый период. По полученным данным строим графики СДЗ для каждого из вариантов (рисунок 1). Легко видеть, что графики СДЗ не пересекаются, что свидетельствует об отсутствии окупаемости дополнительных капитальных затрат на доведение теплозащиты наружных стен и покрытия до базового уровня. Поэтому для дальнейшей разработки принимаем второй вариант теплозащиты с уменьшенными значениями R_i .

² При расчетном сроке службы здания $T_{ам} = 50$ лет.

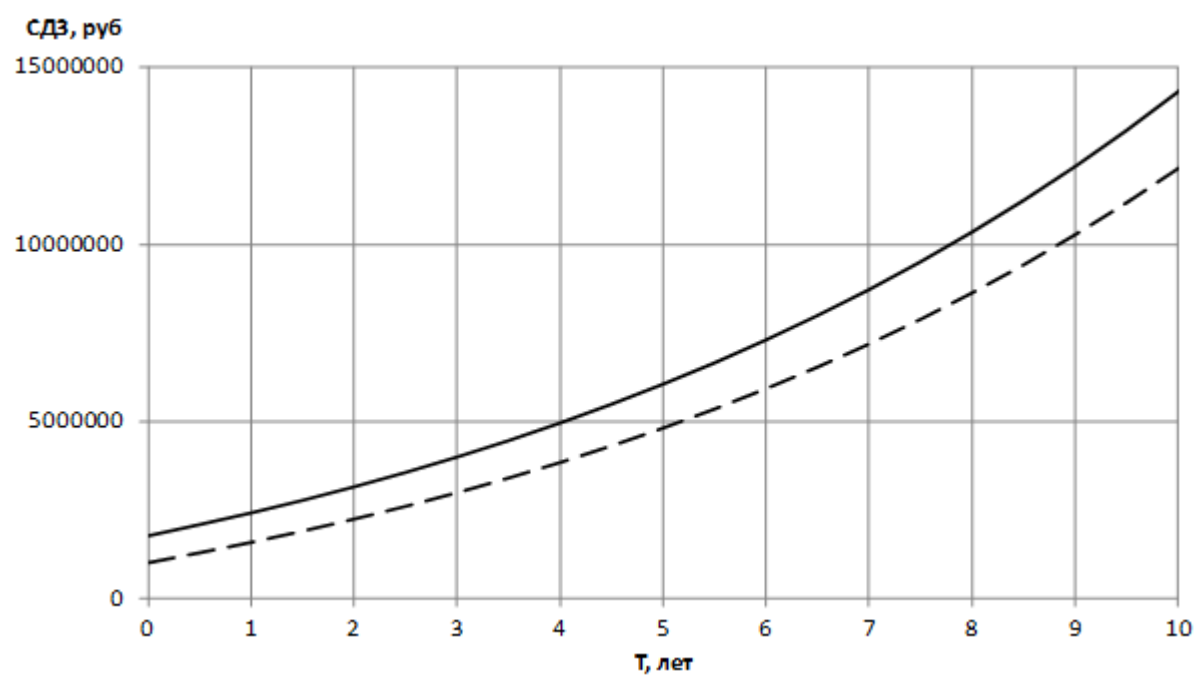


Рис.1. Зависимость СДЗ от T для сравниваемых вариантов

Глава 3. Энергосберегающая климатизация зданий

Подбор энергосберегающего климатического оборудования

Подбор выполняется для оборудования по утилизации теплоты вытяжного воздуха в системе механической вентиляции с использованием схемы с промежуточным теплоносителем.

1. Пример определения параметров воздуха и промежуточного теплоносителя

Пусть расходы приточного и вытяжного воздуха $L_{\text{п}} = L_{\text{у}} = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$; параметры наружного климата в ХП $t_{\text{н}} = -28^\circ\text{C}$; $I_{\text{н}} = -27,3 \text{ кДж/кг}$ (параметры «Б» в холодный период для Москвы по данным СП 131.13330.2012¹); параметры приточного и удаляемого воздуха $t_{\text{п}} = +16^\circ\text{C}$; $t_{\text{у}} = +22^\circ\text{C}$; $I_{\text{у}} = 38,5 \text{ кДж/кг}$, $d_{\text{у}} = 6,25 \text{ г/кг}$ (из расчета процесса изменения состояния воздуха в помещении). Наносим на I - d -диаграмму точку F при температуре $t_F = +2^\circ\text{C}$ и $\phi=100\%$, соединяем ее с $У$ и отмечаем на отрезке $У$ - F точку $О$ при относительной влажности 90%. Параметры точки $О$: $t_o = +4,1^\circ\text{C}$, $I_o = 16,4 \text{ кДж/кг}$, $d_o = 4,35 \text{ г/кг}$. Поскольку $d_o < d_{\text{у}}$, охлаждение будет идти с конденсацией. Условные температуры: $t_{\text{у.усл}} = +27,2^\circ\text{C}$; $t_{o.\text{усл}} = +5^\circ\text{C}$ (на пересечении линии $d_F = \text{const}$ с линиями $I_{\text{у}} = \text{const}$ и $I_o = \text{const}$). Плотность воздуха, кг/м^3 : приточного $\rho_{\text{п}} = \frac{353}{273+16} = 1,221$; удаляемого $\rho_{\text{у}} = \frac{353}{273+22} = 1,197$. Массовый расход уходящего воздуха, кг/ч : $G_{\text{у}} = 10000 \cdot 1,197 = 11970$. Количество передаваемой теплоты, Вт : $Q_{\text{ут}} = 11970 \cdot (38,5 - 16,4)/3,6 = 73483$. Массовый расход нагреваемого воздуха, кг/ч : $G_{\text{н}} = 10000 \cdot 1,221 = 12210$. Температура воздуха после теплоотдающей

¹ Здесь и далее климатические параметры приняты по предыдущей редакции данного СП от 2004 года (СНиП 23-01-99*).

секции, °C: $t_{yt} = \frac{73483 \cdot 3,6}{12210 \cdot 1,005} - 28 = -6,45$; что ниже +2, так что параметры антифриза выбраны правильно. Коэффициент температурной эффективности: $k_{\phi} = \frac{-6,45+28}{22+28} = 0,43$, что лежит в оптимальном диапазоне (большого в данном случае достигнуть трудно из-за опасности обмерзания воздухоохладителя). По таблице 2 Методических указаний к Домашнему заданию № 2 принимаем антифриз с концентрацией этиленгликоля 41,5%. Для него температура замерзания $t_{зам} = -29 < t_n$; удельная теплоемкость $c_w = 3450$ Дж/(кг·К); плотность $\rho_w = 1054$ кг/м³. Расход антифриза: $G_w = \frac{73483}{3450 \cdot (4 - (-2))} = 3,55$ кг/с при температурах нагретого и охлажденного антифриза $T_1 = +4^\circ\text{C}$, $T_2 = -2^\circ\text{C}$.

2. Пример подбора теплоотдающей секции

Пусть $G_n = 12210$ кг/ч, $t_n = -28^\circ\text{C}$, $t_{yt} = -6,45^\circ\text{C}$, $T_1 = +4^\circ\text{C}$, $T_2 = -2^\circ\text{C}$, $\rho_w = 1054$ кг/м³, $G_w = 3,55$ кг/с, $Q_{yt} = 73483$ Вт (см. п.1). Расчет ведем для установки КЦКП-10 (см. п.2 Методических указаний к Домашнему заданию № 2). Для соответствующего воздухонагревателя по таблице 3 данного Методического указания геометрическое сечение для прохода воздуха $f_r = 0,927$ м²; живое сечение для прохода воды в трубках $f_w = 0,000476 \cdot 5 = 0,00238$ м² (для начального числа рядов $N_{нач} = 5$ и 4 ходов).

Массовая скорость воздуха в сечении воздухонагревателя, кг/(м²·с): $(\nu\rho)_в = \frac{12210}{0,927 \cdot 3600} = 3,66$ — лежит в оптимальных пределах. Скорость теплоносителя в трубках, м/с: $w = \frac{3,55}{0,00238 \cdot 1054} = 1,42$ — также лежит в оптимальных пределах. Коэффициент теплопередачи воздухонагревателя, Вт/(м²·К): $K = 21 \cdot 3,66^{0,37} \cdot 1,42^{0,18} = 36,3$.

Средняя логарифмическая разность температур $\Delta t_{cp} = \frac{-2+28-4-6,45}{\ln\left(\frac{-2+28}{4+6,45}\right)} = 17,1^\circ\text{C}$. Требуемая поверхность нагрева, м²: $F = \frac{73483}{36,3 \cdot 17,1} = 120$. Требуемое

число рядов воздухонагревателя при шаге пластин 1,8 мм $N = 120/25,3 = 4,75$.
 Запас поверхности нагрева: $\frac{5-4,75}{5} \cdot 100\% = 5\%$ — лежит в допустимых пределах, поэтому шаг пластин можно не менять. Таким образом, принимаем $N_{\text{расч}} = 5 = N_{\text{нач}}$, следовательно, величина f_w была принята правильно, и пересчет не требуется. Аэродинамическое сопротивление воздухонагревателя, Па: $\Delta P_K = 2,69 \cdot 5 \cdot 3,66^{1,74} = 128$. Длина воздухонагревателя равна 360 мм (см. п.2). Вычисляем гидравлическое сопротивление воздухонагревателя по промежуточному теплоносителю: $\Delta P_W = 9720 \cdot 1,42^{1,82} = 18400 \text{ Па} < 25 \text{ кПа}$. Обозначение воздухонагревателя: УВНВ-243.1-103-090-5-2.2-6-2.

3.Пример подбора воздухоохладителя

Пусть $G_y = 11970 \text{ кг/ч}$, $t_{y,\text{усл}} = +27,2^\circ\text{C}$, $t_{o,\text{усл}} = +5^\circ\text{C}$, $T_1 = +4^\circ\text{C}$, $T_2 = -2^\circ\text{C}$, $\rho_w = 1054 \text{ кг/м}^3$, $G_w = 3,55 \text{ кг/с}$, $Q_{\text{ут}} = 73483 \text{ Вт}$, $d_y = 6,25 \text{ г/кг}$, $d_o = 4,35 \text{ г/кг}$ (см. п.1). Расчет ведем для установки КЦКП-10 (см. п.2). Для соответствующего воздухонагревателя по таблице 3 Методических указаний к Домашнему заданию № 2 $f_\Gamma = 0,927 \text{ м}^2$; $f_w = 0,000317 \cdot 8 = 0,002536 \text{ м}^2$ (для $N_{\text{нач}} = 8$ и 6 ходов).

Массовая скорость воздуха в сечении охладителя, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$: $(\nu\rho)_\varepsilon = \frac{11970}{0,927 \cdot 3600} = 3,59$ — лежит в оптимальных пределах. Скорость воды в трубках, м/с : $w = \frac{3,55}{0,002536 \cdot 1054} = 1,33$ — также лежит в оптимальных пределах.

Коэффициент теплопередачи охладителя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$: $K = 21 \cdot 3,59^{0,37} \cdot 1,33^{0,18} = 35,6$. Средняя логарифмическая разность температур $\Delta t_{\text{ср}} = \frac{27,2-4-5-2}{\ln\left(\frac{27,2-4}{5+2}\right)} = 13,52^\circ\text{C}$. Требуемая поверхность охлаждения, м^2 : $F = \frac{73483}{35,6 \cdot 13,52} =$

152,7. Число рядов охладителя при шаге пластин 2,5 мм $N = 152,7/19,1 = 7,99$ — почти полностью совпадает с $N_{\text{нач}}$. Следовательно, менять шаг пластин не нужно, а запас поверхности охлаждения равен: $\Delta = \frac{8-7,99}{8} \cdot 100\% = 0,12\%$ — лежит в допустимых пределах. Принимаем $N_{\text{тр}} = 8 = N_{\text{нач}}$, поэтому f_w была определена правильно, и пересчет не требуется. Аэродинамическое

сопротивление охладителя с учетом наличия конденсации, Па: $\Delta P_x = 1,38 \cdot (2,00 \cdot 8 \cdot 3,59^{1,74}) = 204$. Количество удаляемого конденсата, кг/ч: $G_{\text{конд}} = 11970 \cdot (6,25 - 4,35) \cdot 10^{-3} = 22,7$. Из-за наличия конденсата требуется установка охладителя с каплеуловителем. Каплеуловитель для охладителей в установках КЦКП предусмотрен стандартным исполнением, и его длина составит 700 мм (см. п.2 Методических указаний к Домашнему заданию № 2). Вычисляем гидравлическое сопротивление охладителя по воде: $\Delta P_w = 9720 \cdot 1,15^{1,82} = 12540 < 25$ кПа. Обозначение воздухонагревателя: УВОВ-243.1-103-090-8-2.5-6-2.

Глава 4. Экономика энергосбережения

Обоснование применения энергосберегающего оборудования

Проведем оценку капитальных и эксплуатационных затрат и технико-экономическое обоснование применения утилизации теплоты вытяжного воздуха в системе вентиляции здания средней школы в г. Москве по типовому проекту 221-1-25-387. Расчеты ведем в ценах 2010 года (см. О.Д. Самарин. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ. – 2015.– 134 с.). Отапливаемый объем здания $V_{зд} = 10,1$ тыс. м^3 – определяем по архитектурно-строительным чертежам. Принимаем среднюю кратность воздухообмена $n_a = 1,5$, тогда ориентировочная воздухопроизводительность системы $L = 1,5 \cdot 10,1 = 15,2$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$. Удельную стоимость приточной установки в базовой комплектации при такой величине L можно взять в размере 27 тыс. руб. на 1 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, тогда общая стоимость этой установки будет равна $K_{пу} = 15,2 \cdot 27 = 410,4$ тыс. руб. (см. Методические указания к выполнению Домашнего задания № 3). Массовый расход воздуха составит $G_{п} = 15,2 \cdot 10^3 \cdot 1,2 = 18240$ кг/ч, где 1,2 – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В 1-м варианте предусматриваем теплоутилизацию с промежуточным теплоносителем, во 2-м теплоутилизация отсутствует, поэтому будем рассматривать капитальные затраты только на теплоутилизационное оборудование. Для 1-го варианта они составят примерно 33% от $K_{пу}$, а с учетом автоматики (30% от стоимости дополнительного оборудования) и добавки в 60% на монтаж и наладку (к общей сумме с учетом автоматики) будут равны:

$$K_1 = 1,6 \cdot (410400 \cdot 0,33 \cdot (1 + 0,3)) = 281699 \text{ руб.}$$

Во втором варианте, очевидно, $K_2 = 0$.

Определим годовые эксплуатационные расходы. Затраты на тепловую энергию будут различаться, поскольку в 1-м варианте используется теплоутилизация. Принимаем коэффициент температурной эффективности утилизатора в 1-м варианте $k_{эф.1} = 0,45$ (среднее для схемы с промежуточным теплоносителем). Тогда во

втором варианте $k_{эф.2} = 0$. Время работы системы вентиляции в течение недели считаем равным $Z_p = 12$ час/сут. Тогда получим:

$$\mathcal{E}_{\text{т.вент1}} = \frac{12 \cdot 18240 \cdot 1,005 \cdot 4515 \cdot (1 - 0,45) \cdot 1290,81 \cdot 10^{-6}}{4,19} = 168284 \text{ руб./г.}$$

$$\mathcal{E}_{\text{т.вент2}} = \frac{12 \cdot 18240 \cdot 1,005 \cdot 4515 \cdot (1 - 0) \cdot 1290,81 \cdot 10^{-6}}{4,19} = 305971 \text{ руб./г.}$$

Пренебрегать разницей в затратах электроэнергии в данном случае тоже нельзя. При наличии теплоутилизации установленная мощность вентиляторов $N_{уст}$ будет выше из-за повышенного аэродинамического сопротивления установок. Принимаем по таблице 4.1 Лекционного курса удельную мощность приточной системы в размере 0,35 кВт на тыс. м³/ч и ее приращение за счет установки теплоутилизационного оборудования 0,05 кВт на тыс. м³/ч, а для вытяжной – соответственно 0,27 и 0,1. Тогда для второго варианта (без утилизации) $N_{уст.2} = (0,35 + 0,27) \cdot 15,2 = 9,42$ кВт, а для первого варианта $N_{уст.1} = (0,35 + 0,05 + 0,27 + 0,1) \cdot 15,2 = 11,7$ кВт. Тогда при $Z_p = 12$ час/сут и при стоимости электроэнергии для прочих потребителей 3,01 руб./(кВт·ч) (см. О.Д. Самарин. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ. – 2015. – 134 с.) получаем:

$$\mathcal{E}_{эл1} = 12 \cdot 365 \cdot 11,7 \cdot 3,01 = 154250 \text{ руб./г.};$$

$$\mathcal{E}_{эл2} = 12 \cdot 365 \cdot 9,42 \cdot 3,01 = 124191 \text{ руб./г.}$$

Амортизационные отчисления при расчетном сроке службы системы $T_{ам} = 15$ лет: $\mathcal{E}_{ам.1} = 1,5 \cdot K_1 / T_{ам} = 1,5 \cdot 281699 / 15 = 28170$ руб./г.; и очевидно, что $\mathcal{E}_{ам.2} = 0$. Суммарные годовые эксплуатационные затраты: $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_{\text{т.вент1}} + \mathcal{E}_{эл1} + \mathcal{E}_{ам1} = 168284 + 154250 + 28170 = 350704$ руб./г.; $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_{\text{т.вент2}} + \mathcal{E}_{эл2} + \mathcal{E}_{ам2} = 305971 + 124191 + 0 = 430162$ руб./г.

Вычисляем совокупные дисконтированные затраты при $p = 10\%$ и строим графики их зависимости от времени T по вариантам (рис. 1). Из графика видно, что расчетный срок окупаемости $T_{ок}$ схемы с промежуточным теплоносителем составляет примерно 4,5 года, что существенно меньше, чем $T_{ам} = 15$ лет. Поэтому к дальнейшей разработке принимаем вариант с теплоутилизацией.

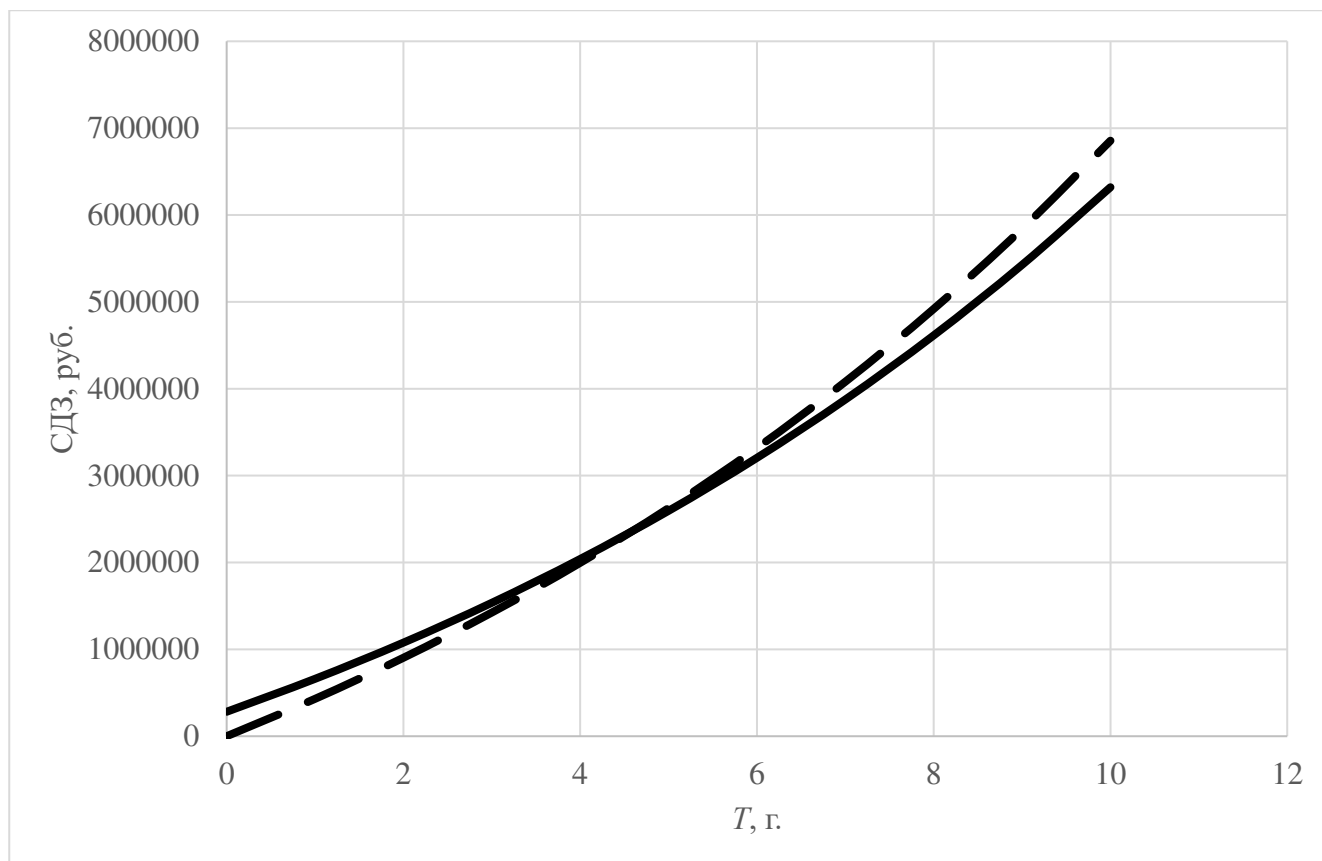


Рис. 1. Зависимость СДЗ от T по вариантам для рассмотренного примера (вариант 1 – сплошная линия, вариант 2 – пунктир)

Уточняем $T_{\text{ок}}$ по формуле:

$$T_0 = \frac{281699 - 0}{430162 - 350704} = \frac{281699}{79458} = 3,55 \text{ г.};$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{10 \cdot 3,55}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10}{100}\right)} = 4,6 \text{ г.}$$