



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

## **ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

### **ПРАКТИКУМ**

по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 621.311.017(075.8)  
ББК 31.19я73  
О-75

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 2 от 12.12.2005 г.)*

Автор-составитель: Б. А. Верига

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Автоматизированный  
электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого *В. И. Луковников*

О-75

**Основы** энергосбережения : практикум по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост. Б. А. Верига. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 23 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-536-6.

Практикум содержит материалы для выполнения расчетных работ на практических занятиях. Рассматриваются прикладные задачи энергосбережения: энергосбережение тепловых ресурсов методом теплоизоляции, вопросы использования возобновляемых источников энергии (солнечная энергетика; малая ветро- и гидроэнергетика), энергосбережение в трубопроводном транспорте. Имеется большой объем справочного материала, приведены примеры решения ряда задач и представлены примерные задачи для решения на практических занятиях.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника».

УДК 621.311.017(075.8)  
ББК 31.19я73

ISBN 978-985-420-536-6

© Верига Б. А., составление, 2007  
© Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2007.

## ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящего пособия кратко рассмотрены методы анализа и расчета энергосбережения тепла методом теплоизоляции и основы расчета установок, использующих возобновляемые источники энергии: солнечное излучения, ветро- и гидроэнергию.

Во второй части исследуются потери энергии при транспорте газообразных и жидких сред по трубопроводам и технические решения, снижающие эти потери.

### 1. Энергосбережение тепловых ресурсов

*Теплопередача* – процесс переноса теплоты от горячего теплоносителя к более холодному.

Существует три элементарных вида процессов переноса теплоты: теплопроводность, конвективный перенос и лучистый перенос.

Теплопроводность обусловлена обменом энергией между структурными частицами вещества и описывается законом теплопроводности Фурье:

$$\vec{q}_T = -\lambda \cdot \text{grad}T, \quad (1.1)$$

где  $\vec{q}_T$  – плотность теплового потока в направлении уменьшения температуры, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – теплопроводность вещества, Вт/м·К;

$T$  – температура, К.

Уравнение (1.1) известно также как первое уравнение Фика для диффузии.

Конвективный перенос теплоты связан с перемешиванием сред (капельные жидкости, газы, пары, смеси):

$$\vec{q}_k = \vec{v} \cdot \rho \cdot c_v (T - 273) = \vec{v} \cdot \rho \cdot c_v \cdot T_c, \quad (1.2)$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости потока, м/с;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$c_v$  – удельная теплоемкость среды, Дж/кг·К;

$T$  – температура потока, К;

$T_c$  – температура, °С.

Плотность лучистого теплового потока зависит от степени черноты ( $\varepsilon$ ) нагретого тела и равна:

$$q_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \cdot T^4. \quad (1.3)$$

Коэффициент  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4 = \sigma$  называется постоянной Стефана – Больцмана.

Простейшими задачами по расчету стационарных потоков теплоты являются:

а) поток поперек многослойной плоской стенки (рис. 1) можно найти, если известны температуры по разные стороны стенки ( $T_1 > T_2$ ), толщины слоев ( $\delta_n$ ) и теплопроводности материалов каждого слоя ( $\lambda_n$ ):

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{T_1 - T_2}{\sum_{m=1}^n r_m}. \quad (1.4)$$

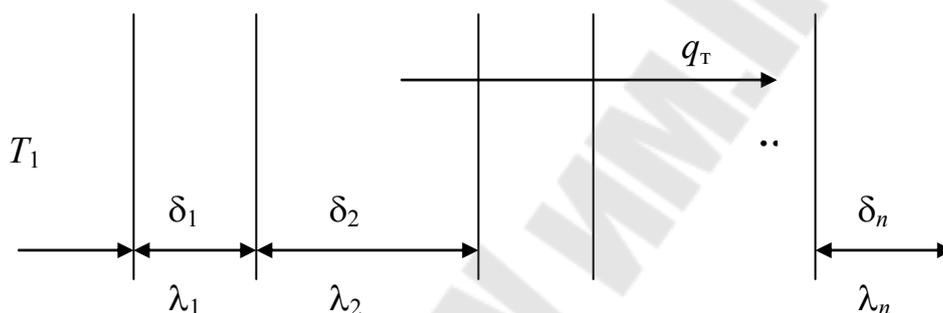


Рис. 1

Величина  $\frac{\delta}{\lambda}$  называется термическим сопротивлением стенки.

Видно, что эти сопротивления соединены последовательно. Электрическая модель позволяет легко найти температуры на границе каждого из слоев, если считать  $T_1$  и  $T_2$  эквивалентными потенциалами в этой последовательной схеме. Если большая стена содержит участки площадью  $S_m$  любых произвольных стенок, тогда суммарный тепловой поток будет равен:

$$Q = \sum_k q_m S_m ; \quad (1.5)$$

б) поток поперек многослойной цилиндрической стенки если длина цилиндра равна  $L$ , а  $d_i, d_{i+1}$  – внутренний и наружный диаметры  $i$ -го слоя с теплопроводностью  $\lambda_i$ , тогда

$$Q = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} L ; \quad (1.6)$$

в) поток через многослойную сферическую стенку:

$$Q = \frac{4\pi(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_{i+1}} \right)}, \quad (1.7)$$

где  $R_i$  и  $R_{i+1}$  – внутренний и наружный радиусы  $i$ -го сферического слоя, м.

Формулы (1.4), (1.6) и (1.7) справедливы в том случае, когда температуры на поверхности граничных стенок ( $T_1, T_2$ ) поддерживаются неизменными. В реальных случаях на границах раздела фаз существует переходная область с промежуточными температурами, зависящими от формы границ, условий обтекания и пр. Например, при температуре в комнате  $+20^\circ\text{C}$ , а на улице  $0^\circ\text{C}$ , у поверхности стены в комнате существует более холодная переходная область воздуха ( $T_c < 20^\circ\text{C}$ ), а снаружи подобная область с температурой больше  $0^\circ\text{C}$ .

*Теплоотдача* – это процесс теплообмена между жидким или газообразным (парообразным) теплоносителем и твердой поверхностью (в общем случае поверхностью раздела фаз):

$$q = \alpha(T_2 - T_1). \quad (1.8)$$

Уравнение теплоотдачи определяет плотность теплового потока, которым обменивается теплоноситель и контактирующая с ним поверхность раздела фаз. Методы определения коэффициента  $\alpha$  рассмотрены в [1, с. 126–144].

В качестве примера отметим, что формула (1.4) строго может быть записана в виде:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_m \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \sum r_T + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.9)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной сторон,  $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ;  $\sum r_T$  – сумма термических сопротивлений стенки (или стенок), включая слои загрязнений,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ . Средние значения  $1/r_T$  для загрязненной твердой поверхности при теплоотдаче из различных сред составляют:

воздух –  $2800 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ;

водяной пар –  $5800 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ;

нефть – 1200 Вт/м<sup>2</sup>·К;

чистые нефтепродукты – 2600 Вт/м<sup>2</sup>·К;

вода среднего качества – 1800–2900 Вт/м<sup>2</sup>·К.

Коэффициенты  $\alpha$  зависят от вида, обтекаемых поверхностей и др. Для оценочных расчетов при естественной конвекции и нормальном атмосферном давлении рекомендуется брать  $\alpha$ , равными:

вода – твердая поверхность – 250–900 Вт/м<sup>2</sup>·К;

воздух – твердая поверхность – 3–10 Вт/м<sup>2</sup>·К.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  является неким усредненным параметром для таких сложных процессов как конвекционное движение, обусловленное разностью температур, действием силы тяжести и вязкостных свойств омывающей фазы. Поэтому при решении ряда задач члены  $1/\alpha$  в формуле (1.9) становятся определяющими. Например, при расчете потерь через стеклянные окна следует учитывать сами стекла, значения  $\alpha$ , но можно исключить из (1.9) члены  $\delta_m/\lambda_m$ , относящиеся к воздушным слоям между стеклами, т. к. в действительности в пространстве между стеклами существует непрерывное конвективное движение воздуха, обусловленное разностью температур стекол.

В качестве примера рассмотрим стенку толщиной  $S$  из материала с теплопроводностью  $\lambda$  и будем считать, что на достаточном удалении от стенки температура окружающей среды  $T_n$  с одной стороны и  $T_b$  – с другой стороны. Тогда из условия сохранения энергии можно считать:

$$\varepsilon_n \cdot \sigma (T_2^4 - T_n^4) + \lambda_n (T_2 - T_n) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta}{\lambda} + r_n + r_b} = \varepsilon_b \cdot \sigma (T_b^4 - T_1^4) + \lambda_b (T_b - T_1). \quad (1.10)$$

Уравнение (1.10) содержит, подлежащие определению, абсолютные температуры стенки  $T_1$  и  $T_2$  при заданных коэффициентах черноты  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_b$ , термических сопротивлений  $r_n$ ,  $r_b$  и коэффициентах теплоотдачи  $\lambda_n$ ,  $\lambda_b$ . В этом случае задача полностью решается и вопрос о реальных температурах граничных стенок снимается.

Для решения задач по расчету тепловых потерь необходимо знание физических постоянных: теплоемкость, теплопроводность, степень черноты материалов. Ниже в табл. 1–3 приведены эти параметры для ряда веществ и материалов.

Таблица 1

## Теплоемкость твердых материалов, жидкостей и газов

Материал, вещество	Теплоемкость		Условия
	Единица измерения	Величина	
алюминий	кДж/(кг·К)	0,92	0–100 °С
асбест		0,84	
бетон		1,13	
древесина (сосна)		2,72	
железо, сталь		0,50	
кирпич красный		0,92	
лед		2,14	
медь		0,385	
песок сухой		0,80	
стекло		0,42–0,84	
шерсть		1,63	
шлак		0,75	
бензин		1,84	
аммиак		4,19	
керосин		1,84	
скипидар		1,76	
вода		4,18	
воздух	кДж/(кмоль·К)	29,0	$\rho = 0,1$ МПа
аммиак		35,3	
водяной пар		35,0	
метан		35,7	
диоксид углерода		38,6	

Таблица 2

## Теплопроводность твердых материалов, жидкостей, газов

Материал, вещество	Теплопроводность, Вт/м·К	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
асбест	0,151	600
бетон	1,28	2300
войлок шерстяной	0,047	300
древесина (сосна)	0,14–0,174	600
поперек волокон		
вдоль волокон	0,384	600
кладка кирпича обычного	0,698–0,814	1700
кладка изоляционного кирпича	0,116–0,209	600
лед	2,33	920
пенопласт	0,047	30
стекло	0,698–0,814	2500
шлаковая вата	0,076	250
шлакобетон	0,12	400
алюминий	203,5	2700
медь	384	8800

Окончание табл. 2

Материал, вещество	Теплопроводность, Вт/м·К	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Сталь	46,5	7850
сталь нержавеющая	17,5	7900
аммиак жидкий	0,541 (0 °С); 0,314 (100 °С)	639
вода	0,58	1000
серная кислота 60 %	0,52 (32 °С)	1490
воздух	0,0244	1,3
водяной пар	0,0163	0,81
водород	0,1628	0,09

Таблица 3

### Степень черноты $\epsilon$ для некоторых материалов

Материал	$\epsilon$
алюминий	0,05–0,07
асбест	0,96
вода	0,93
древесина строганая	0,9
железо (сталь)	0,74–0,96
железо оцинкованное	0,27
кирпичная кладка	0,93
лак, краска	0,8–0,98
лак алюминиевый	0,4
медь	0,57–0,87
свинец	0,28
стекло	0,94
штукатурка	0,93

#### Малая ветро- и гидроэнергетика.

Для оценки мощности ( $P$ ), которая достигается при использовании ветроагрегатов или гидроагрегатов прямого течения необходимо использовать следующие параметры: плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) среды;  $f(v)$  – функция распределения для скоростей потока;  $v$  – скорость потока;  $S$  – площадь сечения энергоагрегата;  $\eta$  – общий коэффициент полезного действия, учитывающий коэффициент перехвата кинетической энергии среды. Так как кинетическая энергия единицы объема движущейся среды  $E_1 = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ , а количество единиц объема, проходящих за одну секунду численно равна  $v$ , тогда

$$P = \eta \cdot S \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \int f(v) v^3 dv. \quad (1.11)$$

Для ветроагрегатов можно приблизительно считать  $\eta = 0,5$ ;  $S = \pi \cdot R^2$ , где  $R$  – радиус лопастей ветроагрегата. Для гидроагрегатов прямого течения

$$S = R \cdot h,$$

где  $h$  – ширина лопастей, зависящая от толщи слоя воды в реке,  $\eta = 0,7$ . Для гидроагрегатов можно считать  $f(v) = \delta(v - \bar{v})$  и тогда мощность определяется средней скоростью  $\bar{v}$  течения.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot S' \cdot \rho \cdot \bar{v}^3. \quad (1.12)$$

Функция распределения для скоростей ветровых потоков может быть в первом приближении принята экспоненциальной  $f(v) = \frac{1}{\bar{v}} \cdot e^{-v/\bar{v}}$ .

Тогда  $P$  можно найти интегрированием (1.11) в пределах от нуля до бесконечности

$$P = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot S \int_0^{\infty} \frac{1}{\bar{v}} \cdot e^{-v/\bar{v}} \cdot v^3 dv = 3 \cdot \eta \cdot \rho \cdot S \cdot \bar{v}^3.$$

Если  $f(v)$  имеет другой вид (распределение Максвелла; нормальное распределение и др.), то необходимо выполнить соответствующее интегрирование.

## 2. Энергосбережение при транспортировании по трубопроводам

Перемещение текучих сред (газов, паров, капельных жидкостей) происходит при наличии разности давлений. Такое движение требует затрат энергии на подъем в потенциальном поле силы тяжести, на придание кинетической энергии, на затраты по преодолению сил трения между слоями в потоке и на взаимодействие со стенками трубопровода.

Массовый расход потока  $M_c$  (кг/с) в трубопроводе равен:

$$M_c = V_c \cdot \rho = v \cdot S \cdot \rho, \quad (2.1)$$

где  $V_c$  – объемный расход потока, м<sup>3</sup>/с;  $v$  – средняя скорость потока;  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода;  $\rho$  – плотность вещества в потоке, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда требуемый диаметр круглого трубопровода:

$$d = \sqrt{V_c / \left(\frac{\pi}{4} v\right)}. \quad (2.2)$$

При описании движения потока используется в основном критерий Рейнольдса

$$Re = v d_3 \rho / \mu = v d_3 / \nu, \quad (2.3)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость вещества, Па·с;  $\nu = \mu/\rho$  – кинематическая вязкость вещества, м<sup>2</sup>/с.

Для потоков в прямых трубопроводах различают режимы:

ламинарный –  $Re < 2300$ ;

переходной –  $2300 < Re < 10000$ ;

турбулентный  $Re > 10000$ .

Параметры потока в трубопроводе в сечениях 1 и 2 описываются соотношением:

$$\left( \frac{\rho \cdot v^2}{2} + p + \rho \cdot g \cdot z \right)_1 - \left( \frac{\rho \cdot v^2}{2} + p + \rho \cdot g \cdot z \right)_2 = \Delta P_{\text{пот}}. \quad (2.4)$$

Здесь  $p_1$  и  $p_2$  – статическое давление в сечениях;  $\Delta P_{\text{пот}}$  – потери части механической энергии на участке 1–2, Дж/м<sup>3</sup>.

Профиль скоростей по сечению потока зависит от  $Re$ , для ламинарных потоков

$$v(r) = v_m (1 - r^2 / R^2), \quad R = d/2. \quad (2.5)$$

При этом средняя скорость  $v = 0,5v_m$ . При росте  $Re$  профиль становится более прямоугольным и может быть описан примерно как

$$v(r) = v_m \left(1 - r^2 / R^2\right)^m. \quad (2.6)$$

Мощность  $N$ , потребляемая электродвигателем при создании расхода  $V_c$  можно найти по формуле:

$$N = \frac{\Delta p \cdot V_c}{\eta} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot V_c}{\eta}, \quad (2.7)$$

где  $H$  – напор, создаваемый насосом;  $\Delta p$  – общая разность давлений;  $\eta$  – КПД насосной установки.

Для газов при  $\Delta p > 10^4$  Па следует использовать формулу:

$$N = \frac{\rho V_c (i_2 - i_1)}{\eta}, \quad (2.8)$$

где  $i_1, i_2$  – энтальпии газов в состоянии 1 и 2, соответственно.

Общая разность давлений образуется как алгебраическая сумма  $\Delta p_{\text{ск}} = \rho v^2/2$  – следствие прибавки кинетической энергии потоку,  $\Delta p_{\text{тр}}$  – на преодоление сил трения,  $\Delta p_{\text{под}} = \rho g h$  – на подъем на высоту  $h$ ,  $\Delta p_{\text{доп}} = p_2 - p_1$  – преодоление разности статических дополнительных давлений,  $\Delta p_{\text{мс}}$  – на преодоление местных сопротивлений

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ск}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{под}} + \Delta p_{\text{доп}} + \Delta p_{\text{мс}}. \quad (2.9)$$

Для гладкой, однородной и расположенной горизонтально трубы:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ск}} + \Delta p_{\text{тр}}. \quad (2.10)$$

Для изотермических потоков

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (2.11)$$

где  $l$  – длина трубопровода;  $\lambda$  – коэффициент трения.

При ламинарном течении в круглой трубе

$$\lambda = 64/\text{Re}. \quad (2.12)$$

И тогда

$$\Delta p_{\text{тр}} = 32\mu v l / d^2. \quad (2.13)$$

Для трубопроводов с малой шероховатостью стенок и  $\text{Re} < 10^5$

$$\lambda = 0,136/\text{Re}^{0,25} \quad (2.14)$$

и при  $\text{Re} > 10^5$

$$\lambda = (0,82 \lg \text{Re} - 0,64)^{-2}. \quad (2.15)$$

Другие случаи движения можно изучить в [1, с. 5–61].

Для решения задач по транспорту жидкостей и газов по трубопроводам необходимо знание физических характеристик  $\mu, \nu, \rho$ . Для ряда случаев они приведены в табл. 4–5.

Таблица 4

**Плотность (кг/м<sup>3</sup>) и вязкость (мПа·с) веществ  
в зависимости от температуры**

Вещество	0 °С		10 °С		20 °С		60 °С		100 °С		120 °С	
	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ
Глицерин	1136	12100	1131	3950	1126	1480	1106	102	996	13	986	5,2
Азотная кислота 50 %	1547	3,05	1530	2,4	1513	1,88	1443	0,9	1373	0,53	1338	0,44
Вода	1000	1,8	999	1,3	998	1,0	983	0,5	958	0,24	943	-
Аммиачная вода	918	-	912	1,72	907	1,36	887	0,6	866	0,32	856	0,23
Изопропиловый спирт	801	4,6	793	3,26	785	2,39	752	0,8	718	0,38	700	0,29
NaCl 20 %	1157	2,67	1152	1,99	1148	1,56	1130	0,74	1110	0,46	1100	0,38
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 94 %	1845	48,0	1834	32,0	1824	23,1	1783	6,7	1744	2,5	1723	1,95
Уксусная кислота 50 %	1074	4,35	1066	3,03	1058	2,21	1026	0,92	994	0,5	978	0,4
Этиловый спирт 40 %	947	4,14	970	4,39	935	2,91	910	0,89	885	0,44	872	0,34
Минеральное масло	980	73	970	7,2	940	2,6	880	0,16	840	0,11	-	-

Таблица 5

**Основные физические свойства газов при 0 °С и ρ = 0,1 МПа**

Название	Формула	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Молекулярная масса	Удельная теплоемкость		Вязкость μ <sub>0</sub>	
				C <sub>p</sub>	C <sub>v</sub>	10 <sup>6</sup> Па·с	С
Азот		1,25	28	1,05	0,746	17	114
Аммиак		0,77	17	2,22	1,68	9,18	626
Воздух		1,293	(29,0)	1,0	0,721	17,3	124
Кислород		1,429	32,0	0,913	0,654	20,3	131
Метан		0,72	16,0	2,23	1,70	10,3	162
Пропан		2,02	44,1	1,87	1,65	7,95	278
Этан		1,36	30,1	1,73	1,45	8,5	287

Зависимость вязкости газов от температуры описывается формулой Сатерленда

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^2, \quad (2.16)$$

где μ<sub>0</sub> – вязкость при 0 °С; T – в градусах К; C – постоянная (табл. 5).

### 3. Примеры решения задач

#### Задача 1

Найти плотность теплового потока через плоскую двухслойную стенку, состоящую из пенопласта толщиной  $\delta_1 = 10$  мм и бетонной стены  $\delta_2 = 250$  мм. Температура с одной стороны  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , а с другой стороны  $T_2 = -20^\circ\text{C}$ .

#### Решение

Используем формулу (1.4):

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{40}{\frac{10^{-2}}{0,047} + \frac{0,25}{1,28}} = 98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Если условием не определено, что стенки находятся при постоянной температуре, следует использовать формулы (1.9), (1.10). Принимая, например,  $d_1 = d_2 = 10$ ;  $r_T = 1400$ , получим:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{2}{r_T}} = \frac{40}{0,1 + 0,21 + 0,195 + 0,0007 + 0,1} = \frac{40}{0,605} = 66 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

#### Задача 2

Медный шар  $r = 10$  см находится в фокусе параболического зеркала диаметром  $D = 6$  м. Зеркалом на шар собирает поток солнечной энергии мощность  $q_c = 10^3$  Дж/м<sup>2</sup> · с. Найти установившуюся температуру шара, если температура окружающей среды  $T_0 = 300$  К. Коэффициент полезного действия зеркала  $\eta = 90$  %, плотность потока солнечной энергии  $q_c = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>.

#### Решение

В установившемся режиме поток энергии, падающий на шар от зеркала  $Q_c = \varepsilon \cdot \eta \cdot q_c \frac{\pi \cdot D^2}{4}$  равен потерям за счет теплового излучения

$$Q_U = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) 4 \cdot \pi \cdot r^2;$$

$$T^4 = \frac{\eta \cdot q_c \cdot D^2}{16 \cdot \sigma} + T_0^4;$$

$$T^4 = \frac{0,9 \cdot 1000 \cdot 36}{16 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} + 300^4 = 3,58 \cdot 10^{12} \text{ К};$$

$$T = \sqrt[4]{3,58 \cdot 10^{12}} = 1375 \text{ К} = 1102 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Это решение справедливо, если шар теплоизолирован (например, помещен в прозрачный для излучения корпус и в промежуточном объеме откачан воздух). Для шара, находящегося свободно в воздухе, необходимо добавить конвекционные потери (теплоотдачу в воздух).

$$Q_c = Q_U + Q_K,$$

где  $Q_c = \alpha \cdot S(T - T_0)$ ;

$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$  – поверхность шара.

Принимая при расчете  $\alpha = 10$ ,  $\varepsilon = 0,8$ , находим

$$2,035 \cdot 10^4 = 57 \cdot 10^{-10} (T^4 - 300^4) + 1/255 (T - 300).$$

Решая уравнение относительно  $T$ , получаем  $T = 1350 \text{ К} = 1077 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Как следует из примера, различие температур, полученных по приближенному и более строгому методу, незначительно. Основным механизмом потерь энергии в этой задаче является тепловое излучение.

### Задача 3

В задаче 2 половину поверхности шара образуют Fe–Ni термопары, выполнены из проводов сечением  $S_0 = 0,01 \text{ мм}^2$  и длиной  $l = 0,1 \text{ м}$  каждый. Термопары соединены так, что образуют последовательно-параллельную матрицу с равным количеством строк и столбцов. Холодные спаи поддерживаются при температуре  $T_0 = 300 \text{ К}$ . Найти параметры такого электрического генератора.

### Решение

Находим вначале количество термопар находящихся на полусфере радиуса  $r = 10 \text{ см}$ .

$$N = \frac{2 \cdot \pi \cdot r^2}{2 \cdot S_0} \xi,$$

где  $\xi$  – коэффициент заполнения, который для проводов круглого сечения принимаем равным 0,7.

$$N = \frac{\pi \cdot 0,01}{10^{-8}} \xi = 2,355 \cdot 10^6.$$

Количество строк  $N_1$  равно количеству столбцов  $N_2$

$$N_1 = N_2 = \sqrt{N} = 153 \cdot 10^3 = 1530.$$

Находим ЭДС на выходе генератора

$$E = N_1 \cdot \Delta T (E_1 - E_2),$$

где  $E_1 = 16,6$  мкВ/град.;  $E_2 = -19,3$  мкВ/град. – абсолютные термо-ЭДС железа и никеля, соответственно;

$$\Delta T = 1370 - 300 = 1070^\circ.$$

$$E = 1530 \cdot 1070 (16,6 + 19,3) 10^{-6} \approx 58,8 \text{ В.}$$

Внутреннее сопротивление генератора равно

$$r_{\text{вн}} = r_{\text{Ni}} + r_{\text{Fe}},$$

$$r_{\text{Ni}} = \frac{N_1 \rho_{\text{Ni}} \cdot l}{S_0 \cdot N_2} \left(1 + \frac{T_K \cdot l_{\text{Ni}} \cdot \Delta T}{2}\right); \quad r_{\text{Fe}} = \frac{N_1 \rho_{\text{Fe}} \cdot l}{S_0 \cdot N_2} \left(1 + \frac{T_K \cdot l_{\text{Fe}} \cdot \Delta T}{2}\right).$$

Здесь мы приняли, что температура проводов термопар линейно изменяется от горячего спая к холодному.

Удельное сопротивление никеля  $\rho_{\text{Ni}} = 0,068 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,

ТКС<sub>Ni</sub> =  $6,7 \cdot 10^{-3}$  1/град.: удельное сопротивление железа

$\rho_{\text{Fe}} = 0,097 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, ТКС<sub>Fe</sub> =  $6,25 \cdot 10^{-3}$  1/град.

Так как  $N_1 = N_2$

$$r_{\text{Ni}} = \frac{0,068 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1}{10^{-8}} \left(1 + \frac{6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1070}{2}\right) = 3,12 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{Fe}} = \frac{0,097 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1}{10^{-8}} \left(1 + \frac{6,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1070}{2}\right) = 3,24 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{вн}} = 3,12 + 3,24 = 6,36 \text{ Ом.}$$

Ток короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = \frac{E}{2r_{\text{вн}}} = \frac{58,8}{6,36} = 9,25 \text{ А.}$$

Максимальная энергия, извлекаемая из генератора

$$P_{\text{макс}} = \frac{E^2}{2r_{\text{вн}}} = \frac{(58,8)^2}{2 \cdot 6,36} = 270 \text{ Вт.}$$

Отметим, что при прямом преобразовании солнечного потока с помощью фотоэлементов для рассматриваемого примера можно получить энергию до 3 кВт.

#### Задача 4

Найти мощность вентилятора  $\eta = 0,9$ , если расход воздуха по трубопроводу диаметром  $d = 200$  мм и длиной  $l = 50$  м составляет  $V_c = 3600 \text{ м}^3/\text{час} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### Решение

Находим среднюю скорость течения воздуха в трубопроводе

$$V_c = v \cdot S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} v;$$
$$v = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 1}{3,14 \cdot 0,01} = 31,8 \text{ м/с.}$$

Определим число Рейнольдса по формуле (2.3)

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d\rho}{\mu} = \frac{31,8 \cdot 1,293}{17,3 \cdot 10^{-6}} = 4,75 \cdot 10^5.$$

Находим коэффициент трения для турбулентного потока по формуле (2.15)

$$\lambda = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot 5,68 - 1,64)^{-2} = 0,0132.$$

Определяем потери на трение по формуле (2.11):

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2} = 0,0132 \frac{50}{0,2} 1,293 \frac{31,8^2}{2} = 2157 \text{ Па.}$$

$$\text{Находим } \Delta p_{\text{ск}} = \rho \frac{v^2}{2} = 1,293 \frac{31,8^2}{2} = 654 \text{ Па.}$$

Находим общие потери по формуле (2.10):

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{ск}} = 2157 + 654 = 2811 \text{ Па.}$$

Мощность вентилятора составит по формуле (2.7)

$$N = \frac{\Delta p \cdot V_c}{\eta} = \frac{2811 \cdot 1}{0,9} = 3123 \approx 3,0 \text{ кВт.}$$

#### Задача 5

Во сколько раз уменьшатся потери давления на трение при перекачке воды если ее нагреть с 10 °С до 60 °С. Поток ламинарный.

#### Решение

Так как по формулам (2.11), (2.13)

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2} = \frac{32\mu \cdot v \cdot l}{d^2},$$

то

$$\frac{\Delta p_{\text{тр}}(10 \text{ °С})}{\Delta p_{\text{тр}}(60 \text{ °С})} = \frac{\mu(10 \text{ °С})}{\mu(60 \text{ °С})} = \frac{1,3}{0,5} = 2,6 \text{ раза.}$$

#### Задача 6

Оценить снижение требуемой мощности насоса для перекачки минерального масла по условию задач 4 и 5, если объемный расход составляет  $V_c = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### Решение

$$\text{Скорость потока: } v = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot d^2} = 1,59 \text{ м/с;}$$

$$\text{число Рейнольдса: } Re = \frac{v \cdot d\rho}{\mu} = 42,8;$$

$$\text{коэффициент трения: } \lambda = 64 / Re = 1,50;$$

$$\text{потери на трение: } \Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2} = 470400 \text{ Па (10 °С),}$$

(9930 Па (60 °С));

$$\Delta p_{\text{ск}} = \rho \frac{v^2}{2} = 1280 \text{ Па.}$$

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{ск}} = 471680 \text{ Па (10 °С), (11210 Па (60 °С)).}$$

Разность потерь  $\delta_p = 471680 - 11210 = 460470 \text{ Па}$ .

Снижение мощности двигателя

$$\Delta N = \frac{\Delta p \cdot V_c}{l} = \frac{460470 \cdot 0,05}{0,9} = 22,58 \text{ кВт.}$$

*Задача 7*

Сравнить мощности ветроагрегата на основе «ветряка» с радиусом лопастей  $R = 10$  м и «водяного колеса» шириной  $l = 20$  м при глубине погружения  $h = 1$  м. Считать для ветра  $\bar{v}_1 = 7$  м/с; для воды  $\bar{v}_2 = 1$  м/с.

*Решение*

Считаем, что для ветра имеет место экспоненциальный закон распределения по скорости

$$P_1 = 3 \cdot \eta_1 \cdot \rho_1 \cdot S_1 \cdot \bar{v}_1^3 = 3 \cdot 0,5 \cdot 1,3 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 7^3 = 21 \text{ кВт.}$$

$$P_2 = \eta_2 \cdot \rho_2 \cdot S_2 \cdot \bar{v}_2^3 = 0,7 \cdot 1000 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 1^3 = 14 \text{ кВт.}$$

#### 4. Задания для практических занятий

*Задание 1*

Двухкомнатная квартира имеет три наружных стены размером  $3 \times 2,8$  м<sup>2</sup> с окнами размером  $1,2 \times 1,4$  м<sup>2</sup> каждое. Стены выполнены из таких материалов, как бетон, кирпич, изоляционный кирпич и имеют дополнительную теплоизоляцию из пенопласта, древесины, шлакобетона. Окна имеют двойное остекление из стекла толщиной 3 мм и расстояние между стеклами составляет 80 мм.

*Найти:*

1) тепловые потери через стены, если температура в квартире поддерживается равной 20 °С, а наружная температура изменяется от –40 °С до +40 °С;

2) температуру в квартире если поток энергии отопления поддерживается на постоянном уровне, соответствует требуемому уровню при температуре 0 °С снаружи;

3) температуру на границе теплоизолятор- основной материал для случая расположения изоляционного материала внутри помещения;

4) провести расчеты по п. 1 и п. 2 для случая когда теплоизоляция отсутствует, построить графические зависимости с дискретом 5 °С по наружной температуре.

Таблица 6

## Исходные данные по вариантам к заданию 1

Номер варианта	Материал стены	Толщина стены, м	Материал теплоизолятора	Толщина теплоизолятора, см
0	бетон	0,25	пенопласт	1,0
1	бетон	0,25	древесина	3,0
2	бетон	0,25	шлакобетон	5,0
3	кирпич	0,45	пенопласт	1,0
4	кирпич	0,45	древесина	3,0
5	кирпич	0,45	шлакобетон	5,0
6	изоляционный кирпич	0,40	пенопласт	1,0
7	изоляционный кирпич	0,40	древесина	3,0
8	изоляционный кирпич	0,40	шлакобетон	5,0
9	бетон	0,25	изоляционный кирпич	20,0

## Задание 2

Гелиостанция для подогрева воды выполнена в виде плоской панели размером  $a \times b$ , м<sup>2</sup>, имеющей нижний слой теплоизолятора на основе пенопласта толщиной  $t$ , черный ( $\varepsilon = 1$ ) радиатор, прикрытый стеклом толщиной  $\delta$  и расположенным на расстояние  $l$  от радиатора. Нормаль панели направлена на юг под углом, обеспечивающим нормальное падение солнечных лучей в полдень в день весеннего (осеннего) равноденствия. Гелиостанцию используют на географической широте  $\varphi$ .

Найти:

- 1) температуру воды на выходе по месяцам в зависимости от ее расхода, температура воды на входе составляет 20 °С;
- 2) экономию условного топлива за период в течение года и по месяцам;
- 3) сравнить показатели гелиостанции с подобной, но без остекления.

Дополнительное указание.

1. Считать, что дневная температура по месяцам описывается функцией

$$T_0 = 20 \cos \frac{\pi}{6} (n - 7) \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $n$  – номер месяца в году.

2. Принять коэффициент прохождения солнечной энергии через стекло равным 0,8,  $q_c$  (макс) = 1300 Дж/м<sup>2</sup> · с .

Таблица 7

**Исходные данные по вариантам к заданию 2**

Номер варианта	a, м	b, м	Ф °	t, мм	δ, мм	l, мм	примечание
0	10	3	45	50	4	50	Двойное остекление
1	20	3	45	100	4	100	
2	10	3	50	75	4	75	
3	20	3	50	150	4	150	
4	20	5	55	75	4	75	
5	40	5	55	150	4	150	
6	20	5	60	100	4	50	
7	40	5	60	200	4	75	
8	20	5	65	100	4	100	
9	40	5	65	200	4	150	

### Задание 3

Подготовить к практическому занятию сообщение на одну из следующих тем:

1. Аккумуляция энергии.
2. Энергосбережение в сельском хозяйстве.
3. Централизованное и децентрализованное энергосбережение.
4. Энергетика будущего.
5. Малая гидроэнергетика.
6. История энергосбережения.
7. Организация учета энергосбережения.
8. Культура энергосбережения.
9. Способы преобразования различных видов энергии в электрическую.
10. Основные задачи энергосбережения РБ.
11. Водородная энергетика.
12. Потери в электросетях.
13. Информационные технологии в энергосбережении.
14. Энерго-экономичное освещение.
15. Преобразователи энергии.
16. Солнечная энергия.
17. Энергетический кризис и пути его преодоления.
18. Энергосберегающие технологии и оборудование.
19. Влияние энергетики на биосферу.

20. Ветроэнергетика.
21. Менеджмент в энергосбережении.
22. Законодательство РБ в области энергосбережения.
23. Передовой опыт в энергосбережении.
24. Тепловые насосы.
25. Энергосбережение в быту.
26. Транспортирование энергоресурсов.
27. Задачи инженера в области энергосбережения.
28. Белорусская энергетика.
29. Электрохимические источники энергии.
30. Биоэнергетика и ее перспективы.
31. Конкретную тему студенту выдает преподаватель.

## Литература

1. Поспелова, Т. Г. Основы энергосбережения / Т. Г. Поспелова. – Минск : Технопринт, 2000. – 352 с.
2. Свидерская, О. В. Основы энергосбережения : курс лекций / О. В. Свидерская. – 4-е изд. стер. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2004. – 296 с.
3. Самойлов, М. В. Основы энергосбережения : учеб. пособие / М. В. Самойлов, В. В. Паневчик, А. Н. Ковалев. – Минск : БГЭУ, 2002. – 198 с.
4. Романков, П. Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П. Г. Романков. – Санкт-Петербург : Химия, 1993. – 432 с.
5. Научно-технический журнал «Энергоэффективность».

## Содержание

Введение .....	3
1. Энергосбережение тепловых ресурсов .....	3
2. Энергосбережение при транспортировании по трубопроводам.....	9
3. Примеры решения задач.....	13
4. Задания для практических занятий.....	18
Литература.....	22

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

# **ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

**Практикум  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения**

Автор-составитель: **Верига Бронислав Антонович**

Редактор  
Компьютерная верстка

*Н. И. Жукова  
Н. В. Широглазова*

Подписано в печать 06.02.07.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,33.  
Изд. № 18.  
E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)  
<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр  
Учреждения образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого».  
ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.

