

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. И. Володин

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

**Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 06
«Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»**

Минск 2014

УДК 620.9:662.6(075.8)
ББК 31.3я73
В67

Рассмотрен и рекомендован к изданию редакционно-издательским советом Белорусского государственного технологического университета

Рецензенты:

заведующий кафедрой ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» БНТУ
доктор физико-математических наук, профессор *В. Г. Баитовой*;
доцент кафедры «Процессы и аппараты химических производств»
БГТУ кандидат технических наук *Д. Г. Калишук*

Володин, В. И.

В67 Промышленная теплоэнергетика : лаб. практикум для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / В. И. Володин. – Минск : БГТУ, 2014. – 69 с.

Лабораторные работы, входящие в практикум, проводятся методом вычислительного эксперимента. Практикум позволяет выполнить работы, связанные с изучением свойств топлива, получением теплоты на основе его сжигания в котельных установках, ее преобразованием, транспортировкой и использованием конечными потребителями. Изложены основы теории изучаемых процессов, содержание и методика выполнения лабораторных работ.

УДК 620.9:662.6(075.8)
ББК 31.3я73

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2014
© Володин, В. И., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Процессы, связанные с получением, передачей и использованием теплоты, интересуют специалистов и непосредственно затрагивают каждого человека. В рамках дисциплины «Промышленная теплоэнергетика» рассматриваются вопросы, связанные с изучением свойств топлива, получением теплоты на основе его сжигания в котельных установках, ее преобразованием, транспортировкой и использованием конечными потребителями. Данные процессы и явления играют важную роль, и их правильная организация определяет эффективность использования энергии.

Лабораторный практикум направлен на развитие у студентов навыков анализа и закрепление теоретических знаний. Его проведение основывается на вычислительном эксперименте. *Вычислительный эксперимент* – метод изучения устройств или физических процессов с помощью математического моделирования. Он предполагает, что вслед за построением математической модели проводится ее численное исследование, позволяющее рассмотреть поведение исследуемого объекта в различных условиях или в различных модификациях. Цель расчетов – понимание сущности рассматриваемых технических вопросов, а не числа.

В связи с этим при выполнении лабораторных работ следует выделять основные элементы: адекватная математическая модель изучаемого объекта; реализация модели в виде компьютерной программы; проведение вычислительного эксперимента с учетом характерных параметров его протекания; обработка, анализ и обобщение получаемых результатов. Успешное выполнение каждого из этих элементов требует предварительной подготовки студента к каждому лабораторному занятию и базируется как на знаниях по разделам изучаемой дисциплины, так и по термодинамике, теплопередаче.

Лабораторный практикум позволяет выполнить 8 работ:

- определение влияния состава топлива на его характеристики;
- определение эффективности работы парового котла (2 задания);
- определение энергетической эффективности теплового насоса;
- исследование тепловой эффективности теплопроводов;
- исследование тепловой эффективности помещения (3 задания).

Проведение лабораторных работ регламентируется рядом положений.

Студент ведет отдельную рабочую тетрадь по практикуму. Выполнение работы включает самостоятельную предварительную подготовку с записями в рабочую тетрадь. Записи должны содержать:

- название работы и ее номер;
- цель работы;
- краткую теорию рассматриваемого вопроса с формулами, используемыми для анализа результатов вычислительного эксперимента;
- схему изучаемого объекта;
- таблицы с исходными параметрами и для записи результатов эксперимента.

Перед началом выполнения работы студент знакомится с особенностями используемой компьютерной программы, отвечает на вопросы по теме задания. После разрешения преподавателя он приступает к выполнению работы. Если студент не готов (отсутствуют необходимые записи в тетради, не знает особенностей изучаемого объекта и последовательности работы с программой), то он не допускается к выполнению работы и продолжает подготовку в аудитории с последующей ее отработкой.

После проведения всех предусмотренных вычислений студент анализирует полученные данные и формулирует неформальные выводы по выполненной работе. После завершения выполнения работы в тетради должны содержаться следующие сведения:

- данные вычислительного эксперимента;
- результаты анализа в графическом представлении (если необходимо);
- неформальные выводы и рекомендации по результатам работы с указанием возможных причин расхождения с эталонным результатом.

По каждой работе студент должен отчитаться устно после ее окончательного оформления. Автор выражает благодарность профессору В. Б. Кунтышу за замечания, которые были учтены при написании лабораторного практикума.

Лабораторная работа 1

Определение влияния состава топлива на его характеристики

Цель работы – закрепить и расширить знания, полученные при изучении свойств топлива. Уметь проводить взаимный пересчет состава рабочей, сухой и горючей массы топлива и сравнивать эффективность топлива по значению теплового эквивалента.

Задание для выполнения работы. В процессе выполнения работы необходимо изучить принцип работы с компьютерной программой «Технические свойства топлива», составленной в среде таблицы Excel, провести вычислительный эксперимент и с помощью его установить особенность изменения теплоты сгорания и приведенных параметров твердого топлива в зависимости от значений:

- 1) зольности топлива;
- 2) влажности топлива.

Исследование проводится методом вычислительного эксперимента. Работа выполняется в течении 2-х академических часов.

Введение. Для выполнения работы необходимо знать классификацию и технические характеристики топлива. Топливо классифицируется по агрегатному состоянию, происхождению и применению.

Жидкое и твердое топливо принято характеризовать *элементным* составом, при этом условно считают, что топливо состоит из элементов, находящихся в свободном состоянии в виде механической смеси. Оно состоит из горючей массы и балласта. В горючую массу входят углерод С, водород Н, сера S, кислород О и азот N. Основными компонентами балласта топлива являются влага *W*, минеральная масса (зольность) *A*.

В топливе содержатся три вида серы: органическая S^o , колчеданная (пиритная) S^k и сульфатная $S^{сульф}$. Органическая и колчеданная сера образуют вместе летучую горючую серу $S_{л}$. Общее содержание серы в топливе

$$S_{общ} = S^o + S^k + S^{сульф} = S_{л} + S^{сульф}. \quad (1)$$

В горючую часть топлива входит только летучая сера, остальная сера в горении участия не принимает и может быть отнесена к балласту (зола топлива).

Минеральная масса содержится в основном в твердом топливе. Азот – основной балласт газообразного топлива.

Состав твердого и жидкого топлива определяют в процессе технического и элементного анализа в процентах по массе. Для рабочей массы топлива элементный состав выражается равенством

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%. \quad (2)$$

Тепловые свойства топлива определяются горючей массой

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g = 100\%. \quad (3)$$

В некоторых случаях удобно использовать понятие сухой массы топлива, характеризующей состав абсолютно сухого топлива

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100\%. \quad (4)$$

При необходимости проводится взаимный пересчет состава рабочей, сухой и горючей массы топлива.

Каменные угли и антрациты в зависимости от выхода летучих веществ и толщины пластического слоя делятся на технологические марки, которые в свою очередь подразделяются на группы. Перечень и обозначение марок и групп приведены в табл. 1.

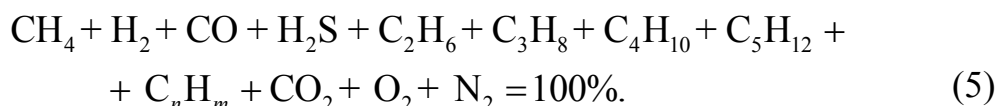
Таблица 1

Перечень и обозначение марок и групп каменных углей

Марка	Группа
Длиннопламенный, Д	–
Длиннопламенный, Д, Г	–
Газовый, Г	1Г, 2Г
Газовый жирный отощенный, ГЖО	1ГЖО, 2ГЖО
Газовый жирный, ГЖ	1ГЖ, 2ГЖ
Жирный, Ж	1Ж, 2Ж
Коксовый жирный, КЖ	–
Коксовый, К	1К, 2К
Коксовый отощенный, КО	1КО, 2КО
Коксовый слабоспекающийся	–
Низкометаморфизованный, КСН	1КС, 2КС
Коксовый слабоспекающийся, КС	–
Отощенный спекающийся, ОС	1ОС, 2ОС
Тощий спекающийся, ТС	–
Слабоспекающийся, СС	1СС, 2СС, 3СС
Тощий, Т	1Т, 2Т
Антрацит, А	1А, 2А, 3А

Бурые угли в зависимости от величины максимальной влагоемкости на беззольное топливо делятся на три группы. К группе 1Б относятся бурые угли с максимальной влагоемкостью, равной 50% и более, к группе 2Б – угли с максимальной влагоемкостью от 30 до 50%, к группе 3Б – угли с максимальной влагоемкостью менее 30%.

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих и негорючих газов. В отличие от твердого и жидкого топлива, состав газообразного топлива фиксируют в процентах по объему, причем определяют не элементный, а компонентный состав газа



Теплота сгорания топлива – это количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 кг (МДж/кг) или 1 м³ топлива (МДж/м³).

Значение объемной теплоты сгорания применяют обычно при расчетах, связанных с использованием газообразного топлива. При этом объемное содержание газа берется при нормальных физических условиях, т. е. при температуре газа $T = 273,15 \text{ К}$ и давлении $p = 101,325 \text{ кПа}$.

Различают *высшую* Q_v и *низшую* Q_n теплоту сгорания. В газообразных продуктах сгорания любого топлива содержатся водяные пары, образующиеся в результате сгорания водорода и испарения влаги топлива. Если продукты сгорания охладить до температуры конденсации водяных паров, в них содержащихся, то выделится тепло, затраченное на парообразование влаги.

Под высшей теплотой сгорания понимают все тепло, выделившееся при сгорании единицы топлива, включая тепло конденсации водяных паров.

Под низшей теплотой сгорания понимают теплоту сгорания, которая не учитывает тепло конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания топлива.

В промышленных установках и в тепловых двигателях различного типа, сжигающих топливо, газообразные продукты сгорания, как правило, выбрасываются в атмосферу при температурах, когда конденсация водяных паров не происходит. Теплотехнические расчеты в подобных случаях производят по низшей теплоте сгорания.

Теплота сгорания любого топлива определяется экспериментально в специальной калориметрической установке. Теплота сгорания может быть также определена расчетом по составу топлива.

Для сравнения тепловой ценности различных топлив пользуются понятием условного топлива, под которым понимают топливо, теплота сгорания которого равна 29,33 МДж/кг. Эта величина применяется при суммировании различных топливных ресурсов, сравнении удельных расходов топлива и при проведении технико-экономических расчетов.

Для пересчета данного натурального топлива с теплотой сгорания Q_n в условное топливо служит безразмерный коэффициент \mathcal{E} , называемый тепловым эквивалентом этого топлива. Его величина определяется

$$\mathcal{E} = \frac{Q_n}{29,33}. \quad (6)$$

Среднее значение теплоты сгорания различных топлив приводится в табл. А1 и А2.

Работа с компьютерной программой. Вид интерфейса компьютерной программы «Теплота сгорания» показан на рис. 1. На данной форме имеется несколько таблиц. Варианты исходных данных, которые назначаются преподавателем индивидуально для каждого студента, даны в «Таблице 1». Заданный состав копируется и переносится в «Таблицу 2». После этого, в соответствии с порядком выполнения работы, проводится вычислительный эксперимент путем изменения в «Таблице 3» содержания зольности и влажности в топливе. Конечные результаты эксперимента, характеризующие свойства исследуемого топлива, фиксируются в «Таблице 4».

Порядок выполнения работы. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Ознакомиться с особенностями состава твердого, жидкого и газового топлива и его энергетической характеристикой – теплотой сгорания.

2. Подготовить исходные данные для проведения вычислительного эксперимента в соответствии с индивидуальным заданием преподавателя и записать в рабочую тетрадь в форме табл. 2.

3. Активизировать программу «Теплота сгорания», изучить ее интерфейс и порядок работы с ней.

4. Исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние зольности и влажности топлива на его энергетическую эффективность в соответствии с заданными исходными данными. В процессе проведения эксперимента путем изменения A_p и W_p его результаты записываются в рабочую тетрадь в форме табл. 2.

5. После завершения вычислительного эксперимента провести анализ результатов и оформить работу.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА

Исходные данные

Таблица 2 - Состав горючей массы топлива, %

C	H	S	O	N
92.8	1.8	1.8	2.8	0.8

Таблица 3 - Переменные

Зольность (A), %	5
Влажность (W), %	2

Результаты расчета

Коэффициент пересчета на рабочую массу	0.93
--	------

Таблица 4 - Характеристика и состав рабочей массы топлива (%)

C	H	S	O	N	A	W
86.304	1.674	1.674	2.604	0.744	5	2

Теплота сгорания низшая (Q _н), кДж/кг	30735.7
Теплота сгорания высшая (Q _в), кДж/кг	31162.3
Q _н /Q _в	1.01388
Теплота конденсации (Q _{кон}), кДж/кг	426.65
Приведенная влажность, кг %/МДж	0.06507
Приведенная зольность, кг %/МДж	0.16268
Приведенная сернистость, кг %/МДж	0.05446
Тепловой эквивалент топлива	1.04793

Таблица 1 - Состав горючей массы твердого топлив (%)

Вариант	Топливо, марка	C	H	S	O	N
1	Древесная щепа	50.9	6.1	0.2	37.9	4.9
2	Торф фрезерный	56.5	5.9	0.2	34.9	2.7
3	Торф кусковой	55.9	6.0	0.0	35.8	2.3
4	Сланцы эстонские	74.0	9.7	5.2	10.7	0.4
5	Сланцы ленинградские	73.9	9.4	5.5	10.7	0.4
6	Сланцы кашпирские	58.0	7.4	12.8	20.2	1.6
7	Уголь донецкий Д	76.7	5.6	2.9	13.2	1.6
8	Уголь донецкий А	92.8	1.8	1.8	2.8	0.8
9	Уголь кузнецкий Т	88.3	3.7	0.5	5.5	2.2
10	Уголь красноярский Б1	69.6	4.9	1.0	23.9	0.6
11	Уголь челябинский Б3	70.8	5.2	1.8	20.2	2.0
12	Уголь подмосковный Б2	66.0	5.3	6.8	20.8	1.1
13	Уголь свердловский Б3	63.5	5.1	0.4	29.7	1.3
14	Уголь львовско-волынский Г	79.0	5.3	4.4	9.9	1.4
15	Уголь канско-ачинский Б2	71.5	5	0.3	22.2	1

Рис. 1. Интерфейс компьютерной программы «Теплота сгорания»

Анализ результатов вычислительного эксперимента. После завершения вычислительного эксперимента необходимо:

1. Представить в графическом виде закономерность изменения теплоты сгорания рабочей массы топлива от зольности и влажности.
2. Сравнить полученные данные с характеристикой реального топлива в табл. А1 и выбрать наиболее близкий базовый вариант по результатам вычислительного эксперимента.
3. Относительно базового варианта провести сравнительный количественный анализ влияния зольности и влажности топлива на его энергетические характеристики.
4. Обратить внимание на характер изменения приведенных характеристик топлива: зольности, влажности, сернистости. Провести классификацию состояния топлива по значению приведенной влажности.
5. На основе проведенного количественного анализа сформулировать неформальные выводы с рекомендацией по выбору эффективно-го топлива с использованием понятия теплового эквивалента топлива.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение органического топлива.
2. По каким признакам классифицируют органическое топливо?
3. Укажите, какие горючие и какие негорючие вещества входят в состав рабочей массы твердого и жидкого органического топлива?

Таблица 2

Характеристики рабочей массы топлива

(Топливо – ; $C^r =$, $H^r =$, $S^r =$, $O^p =$, $N^p =$)

A^p , %	W^p , %	C^p , %	H^p , %	S^p , %	O^p , %	N^p , %	\bar{A} , кг % /МДж	\bar{W} , кг % /МДж	\bar{S} , кг % /МДж	Q_H , МДж/кг	Q_B , МДж/кг	Э
0	0											
4	0											
4	10											
4	20											
4	30											
4	40											
4	50											
4	60											
0	25											
10	25											
20	25											
30	25											
40	25											
50	25											
60	25											

4. Какие компоненты входят в состав сухой массы газообразного топлива?

5. В чем состоит отличие между высшей и низшей теплотой сгорания органического топлива?

6. Что называют условным топливом? С какой целью вводится понятие условного топлива?

Лабораторная работа 2

Определение эффективности работы парового котла

Цель работы – закрепить и расширить знания, полученные при изучении парового энергетического котла.

Задание для выполнения работы. В процессе выполнения работы необходимо изучить руководство по использованию компьютерной программы *ТерлоККД*, провести вычислительный эксперимент и с помощью его установить закономерность изменения коэффициента полезного действия (КПД) котла в зависимости от значений:

- 1) коэффициента избытка воздуха (состава продуктов горения) на выходе из топки и котла с учетом присосов;
- 2) температуры воздуха, подаваемого на горение;
- 3) температуры уходящих газов;
- 4) температуры шлака при сжигании твердого топлива;
- 5) содержания горючих в шлаке и уносе;
- 6) режима работы котла.

Исследование проводится методом вычислительного эксперимента с использованием компьютерной программы *ТерлоККД*, который позволяет определить условия достижения высокой энергоэффективности котла при его эксплуатации.

Работа выполняется в течении 4-х академических часов.

Введение. Для выполнения работы необходимо знать устройство, принцип работы котла и процессы, которые определяют его эффективность. Схема парового энергетического котла с естественной циркуляцией дана на рис. 2. На рисунке показаны поверхности нагрева, значения коэффициента избытка воздуха α_i и его присосы $\Delta\alpha_i$, относящиеся к соответствующим поверхностям нагрева. Показаны также материальные потоки рабочих веществ – расхода топлива B , воздуха V_i , золы G_i и нагреваемых сред D_i .

В реальных котлах на выходе из топки $\alpha_t > 1$, так как не достигается идеальное перемешивание топлива и окислителя, что исключает химический недожог топлива. Величина присосов воздуха $\Delta\alpha_i$ определяется режимом работы газоздушного тракта котла и его конструкцией.

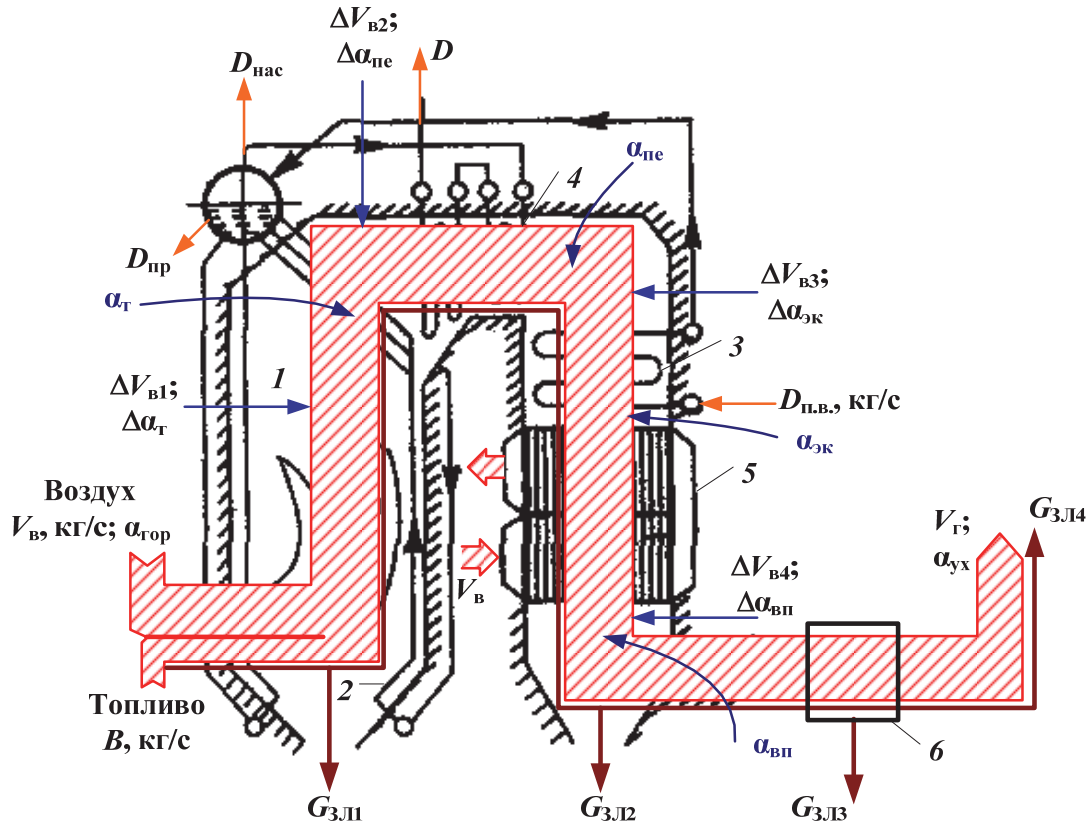


Рис. 2. Схема парового котла с распределением присосов воздуха, материальных потоков рабочих веществ и нагреваемых сред:
 1 – топка; 2 – испаритель; 3 – экономайзер; 4 – пароперегреватель;
 5 – воздухоподогреватель; 6 – золоуловитель

Эффективность работы парового котла определяется из анализа его теплового баланса. Общее уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (7)$$

где Q_p – располагаемая теплота; Q_1 – полезное количество теплоты, затраченное на получение пара; Q_2 – потеря тепла с уходящими газами; Q_3 – потеря тепла от химической неполноты сгорания; Q_4 – потеря тепла от механической неполноты сгорания; Q_5 – потеря тепла от наружного охлаждения; Q_6 – потеря с теплом шлака.

Располагаемая теплота включает низшую теплоту сгорания рабочей массы топлива Q_n^p , физическую теплоту топлива Q_t , теплоту воздуха, подогретого вне агрегата Q_v , теплоту пара при использовании форсунок для распыления мазута $Q_{п.в.}$, теплоту, необходимую для разложения карбонатов при сжигании сланцев Q_k

$$Q_p = Q_n^p + Q_t + Q_b + Q_n - Q_k.$$

Уравнение теплового баланса в процентах располагаемой теплоты:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%. \quad (8)$$

Различают КПД агрегата брутто и нетто. Если КПД агрегата определяется по выработанной теплоте, то его называют *брутто*, а если по отпущенной теплоте – *нетто*. Разность между выработанной и отпущенной теплотой представляет собой расход на собственные нужды. КПД брутто агрегата характеризует степень его технического совершенства, а КПД нетто – коммерческую экономичность.

Коэффициент полезного действия котла брутто (%) по методу прямого теплового баланса:

$$\eta_{к.бр} = \frac{Q_1}{Q_p} 100. \quad (9)$$

Коэффициент полезного действия котла брутто (%) по методу обратного теплового баланса:

$$\eta_{к.бр} = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (10)$$

Определение КПД по уравнению прямого баланса применяется преимущественно при отчетности за длительный промежуток времени (декада, месяц), а по уравнению обратного баланса – при испытании котельных агрегатов. Определение КПД по обратному балансу значительно точнее, так как погрешности при измерении потерь тепла меньше, чем при определении расхода топлива, особенно при сжигании твердого топлива.

Подготовка исходных данных. Исходные данные (используемое топливо, тип топки, параметры питательной воды и пара) задаются преподавателем индивидуально для каждого студента и записываются в рабочую тетрадь в виде табл. 3. Дополнительно из табл. А1 и А2 берутся состав топлива и теплота сгорания. Составляющие потерь тепла определяются при выполнении вычислительного эксперимента с использованием компьютерной программы в зависимости от его режима работы. Коэффициент уноса берется из табл. Б1–Б4 с учетом сжигаемого топлива и типа топки.

Исходные данные для компьютерного расчета котла

Параметр, обозначение, размерность	Значение (название)
Топливо и его состав:	
C^p (CH_4) ¹ , %	
S_l^p (C_2H_6), %	
H^p (C_3H_8), %	
O^p (C_4H_{10}), %	
N^p (C_5H_{12} и остальные), %	
W^p (N_2), %	
$A^p + S_{op}^p$ (CO_2), %	
	(H_2S), %
	(O_2), %
	(CO), %
	(H_2), %
Низшая теплота сгорания Q_n^p , МДж/кг (МДж/м ³) ккал/кг (ккал/м ³)	
Тип топки	
Коэффициент уноса a_{yn}	
Температура золы (шлака) $t_{ш}$, °С	
– при твердом шлакоудалении;	600
– при жидком шлакоудалении	1400
Содержание горючих в шлаке $\Gamma_{шл}$, %	12
Содержание горючих в уносе $\Gamma_{вн}$, %	19
Номинальная паропроизводительность $D_{ном}$, кг/с т/ч	
Температура питательной воды $t_{пв}$, °С	
Давление пара в котле $p_{пп}$, МПа	
Температура перегретого пара $t_{пп}$, °С	
Тепловая мощность котла брутто $Q_{к.бр}$, МВт Гкал/ч	

¹Параметры в скобках относятся к газовому топливу

При слоевом сжигании содержание горючих в шлаке может достигать 30–40%, в уносе 50–60 %. Содержание горючих в уносе при камерном сжигании составляет для бурых углей 0,5–1,5, для каменных углей 4–9, для тощих углей 10–20, для антрацитов 20–35%.

Тепловая мощность котла брутто приближенно рассчитывается по зависимости:

$$Q_{к.бр} = D_{ном} (h_{пп} - h'), \quad (11)$$

где $h_{пп}$ – энтальпия перегретого пара (определяется по hs -диаграмме, рис. В1), кДж/кг; h' – энтальпия питательной воды (определяется из табл. В1), кДж/кг.


Расчет параметров с использованием программы TerloKKD проводится в системе единиц МКГСС, где теплота измеряется в *ккал*, что соответствует единице измерения тепла, принятой в Беларуси. Коэффициенты пересчета при переходе к данной системе единиц имеют следующие значения: $1 \text{ МДж} = 239 \text{ ккал}$, $1 \text{ МВт} = 0,86 \text{ Гкал/ч}$.

Работа с компьютерной программой. Компьютерная программа TerloKKD предназначена для расчета коэффициентов полезного действия котла заданной тепловой мощности при сжигании твердых, газовых топлив и их смесей, а также теплоты сгорания и расхода топлива, составляющих потери тепла, объемов продуктов сгорания. Можно также проводить расчет котла при сжигании жидкого котельного топлива, задавая его состав в блоке ввода данных для твердого топлива.

Дополнительно предусмотрен учет полезно используемого тепла продувки при расчете производительности барабанного или прямооточного котлов.

Для активизации программы необходимо запустить файл TERLOKKD.exe (путь к файлу указывается преподавателем). После запуска программы на экране дисплея появляется главная форма с вложенными страницами в виде закладок (рис. 3, *а*). Выбираем русский язык, нажимая на клавишу с изображением российского флага.

Затем переходим к форме для ввода исходных данных (рис. 3, *б*), нажав на закладку «Расчет КПД». После расчета варианты подробные результаты можно увидеть на вкладке «Просмотр данных и результатов».

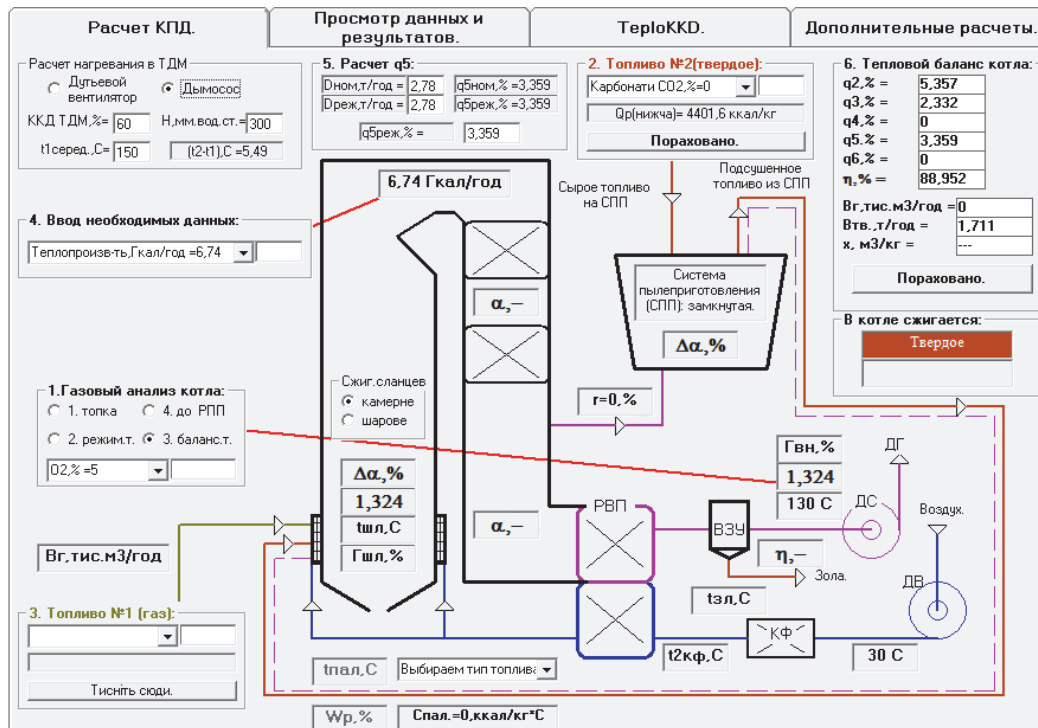
На активной форме закладки «Расчет КПД» имеются нумерованные блоки 1–5 для ввода исходных данных с раскрывающимися списками. Ввод каждого параметра завершается нажатием клавиши «Enter». После этого осуществляется автоматический переход на следующую строку к новому параметру. Если параметр не используется или его значение не меняется, нажатием клавиши  переходим к следующему параметру. Операция повторяется до конца списка.

Работа с программой начинается с активизации кнопки «Дымо-сос» в блоке «Расчет нагревания в ТДМ».

Далее в зависимости от вида топлива в блок 2 «Топливо №2 (твердое)» вводится состав твердого или жидкого топлива с заданием коэффициента уноса $a_{ун}$, или в блок 3 «Топливо №1 (газ)» состав газового топлива. После ввода всех необходимых данных в этих блоках соответственно нажимаются клавиши «Пораховано» или «Тисніть сюди».



а



б

Рис. 3. Вид форм программы ТерлоKKD:
 а – заставка; б – форма «Расчет КПД» для ввода исходных данных

В блоке 1 «Газовый анализ котла» активизируем кнопку «1. топка» и вводим в процентах содержание O_2 , RO_2 и CO на выходе из топки, которым будет соответствовать коэффициент избытка воздуха. Содержание CH_4 и H_2 принимаем равным нулю. Завершая ввод данных в данном блоке, активизируем кнопку «3. баланс т.», аналогично вводим в процентах содержание продуктов сгорания на выходе из котла. После этого мы получаем распределение коэффициента избытка воздуха по тракту котла с учетом присосов по газоздушному тракту.

В блок 4 «Ввод необходимых данных» вводим значения тепловой мощности котла брутто, температуры уходящих газов $t_{вг}$, холодного воздуха $t_{хп}$, присосы в топку $\Delta\alpha$ (%). При сжигании твердого топлива дополнительно вводятся значения температуры шлака $t_{шл}$, процентное содержание горючих в шлаке $\Gamma_{шл}$ и уносе $\Gamma_{вн}$.

В блок 5 «Расчет q_5 » вводим значение номинальной паропроизводительности $D_{ном}$ (т/ч) и текущей эксплуатационной паропроизводительности $D_{реж}$ (т/ч). Первоначально $D_{ном} = D_{реж}$.

После ввода всех исходных данных в блоке 6 нажимаем клавишу «Пораховано» и получаем результаты расчета составляющих теплового баланса q_i , КПД $\eta_{к.бр}$ и значение расхода топлива B .

Порядок выполнения работы. Задание 1. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Ознакомиться со схемой парового котла и вспомнить из лекционного курса особенности его работы.

2. Изобразить схему котла с основным оборудованием в рабочей тетради.

3. Подготовить исходные данные для проведения вычислительного эксперимента в соответствии с индивидуальным заданием преподавателя и записать в рабочую тетрадь в форме табл. 3. Эксперимент проводится для газового топлива.

4. Активизировать программу ТеплоККД, изучить ее интерфейс и порядок работы с ней (см. выше).

5. Исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние коэффициента избытка воздуха и присосов воздуха по газоздушному тракту котла на эффективность его работы в соответствии с дополнительными исходными данными табл. 4. В процессе проведения эксперимента его результаты записываются в рабочую тетрадь в эту же таблицу.

Подробные данные с промежуточными результатами вычислительного эксперимента для каждого варианта выводятся на вкладку «Просмотр данных и результатов» (рис. 4). В частности, в блоке 3

можно проверить правильность задания состава топлива. Сумма всех его компонентов должна быть равна 100%.

Расчет КПД.	Просмотр данных и результатов.	ТермоККД.	Дополнительные расчеты.																																																												
1. Теорет. объемы продуктов горения: <table border="1"> <tr> <td>Топливо:</td> <td>Твердое:</td> <td>Газ:</td> <td>Смесь:</td> </tr> <tr> <td>V_o =</td> <td>4,868</td> <td>0</td> <td>4,868</td> </tr> <tr> <td>V_o N₂ =</td> <td>3,854</td> <td>0</td> <td>3,854</td> </tr> <tr> <td>V_o RO₂ =</td> <td>0,888</td> <td>0</td> <td>0,888</td> </tr> <tr> <td>V_o H₂O =</td> <td>0,615</td> <td>0</td> <td>0,615</td> </tr> <tr> <td>V_o(r) =</td> <td>5,359</td> <td>0</td> <td>5,359</td> </tr> </table>				Топливо:	Твердое:	Газ:	Смесь:	V _o =	4,868	0	4,868	V _o N ₂ =	3,854	0	3,854	V _o RO ₂ =	0,888	0	0,888	V _o H ₂ O =	0,615	0	0,615	V _o (r) =	5,359	0	5,359																																				
Топливо:	Твердое:	Газ:	Смесь:																																																												
V _o =	4,868	0	4,868																																																												
V _o N ₂ =	3,854	0	3,854																																																												
V _o RO ₂ =	0,888	0	0,888																																																												
V _o H ₂ O =	0,615	0	0,615																																																												
V _o (r) =	5,359	0	5,359																																																												
2. Газовый анализ и присосы: <table border="1"> <tr> <td></td> <td>Топка:</td> <td>Режима т.:</td> <td>До РВП:</td> <td>Балансова т.:</td> </tr> <tr> <td>O₂ % =</td> <td>5</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>RO₂ % =</td> <td>25</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>CO % =</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>CH₄ % =</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>H₂ % =</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>α_г =</td> <td>1,324</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1,324</td> </tr> <tr> <td>Δα_г % =</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>32,488</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Присосы в топку % =</td> <td>0</td> <td colspan="2">β_г =</td> <td>1,649</td> </tr> <tr> <td>Присосы в пылесистему % =</td> <td>0</td> <td colspan="3"></td> </tr> </table>					Топка:	Режима т.:	До РВП:	Балансова т.:	O ₂ % =	5	0	0	5	RO ₂ % =	25	0	0	25	CO % =	1	0	0	1	CH ₄ % =	0	0	0	0	H ₂ % =	0	0	0	0	α_г =	1,324	1	1	1,324	Δα_г % =	0	0	32,488		Присосы в топку % =	0	β_г =		1,649	Присосы в пылесистему % =	0													
	Топка:	Режима т.:	До РВП:	Балансова т.:																																																											
O ₂ % =	5	0	0	5																																																											
RO ₂ % =	25	0	0	25																																																											
CO % =	1	0	0	1																																																											
CH ₄ % =	0	0	0	0																																																											
H ₂ % =	0	0	0	0																																																											
α_г =	1,324	1	1	1,324																																																											
Δα_г % =	0	0	32,488																																																												
Присосы в топку % =	0	β_г =		1,649																																																											
Присосы в пылесистему % =	0																																																														
3. Элементарный состав топлив: <table border="1"> <tr> <td colspan="2">Твердое рабочее:</td> <td colspan="2">Газ:</td> </tr> <tr> <td>Ср % =</td> <td>47</td> <td>СН₄ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Sp % =</td> <td>1,8</td> <td>С₂H₆ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Нр % =</td> <td>3,4</td> <td>С₃H₈ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Or % =</td> <td>8,1</td> <td>С₄H₁₀ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Np % =</td> <td>1</td> <td>С₅H₁₂... % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Wp % =</td> <td>13</td> <td>N₂ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Ar % =</td> <td>25,7</td> <td>CO₂ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Карб. CO₂ % =</td> <td>0</td> <td>H₂ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Σ % =</td> <td>100</td> <td>O₂ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>CO % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>H₂ % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>С₂H₄... % =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Q_p(н), ккал/кг =</td> <td>4421,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Коефф-т пересчета,...</td> <td>1</td> <td>Σ % =</td> <td>0</td> </tr> </table>				Твердое рабочее:		Газ:		Ср % =	47	СН ₄ % =	0	Sp % =	1,8	С ₂ H ₆ % =	0	Нр % =	3,4	С ₃ H ₈ % =	0	Or % =	8,1	С ₄ H ₁₀ % =	0	Np % =	1	С ₅ H ₁₂ ... % =	0	Wp % =	13	N ₂ % =	0	Ar % =	25,7	CO ₂ % =	0	Карб. CO ₂ % =	0	H ₂ % =	0	Σ % =	100	O ₂ % =	0			CO % =	0			H ₂ % =	0			С ₂ H ₄ ... % =	0	Q _p (н), ккал/кг =	4421,5			Коефф-т пересчета,...	1	Σ % =	0
Твердое рабочее:		Газ:																																																													
Ср % =	47	СН ₄ % =	0																																																												
Sp % =	1,8	С ₂ H ₆ % =	0																																																												
Нр % =	3,4	С ₃ H ₈ % =	0																																																												
Or % =	8,1	С ₄ H ₁₀ % =	0																																																												
Np % =	1	С ₅ H ₁₂ ... % =	0																																																												
Wp % =	13	N ₂ % =	0																																																												
Ar % =	25,7	CO ₂ % =	0																																																												
Карб. CO ₂ % =	0	H ₂ % =	0																																																												
Σ % =	100	O ₂ % =	0																																																												
		CO % =	0																																																												
		H ₂ % =	0																																																												
		С ₂ H ₄ ... % =	0																																																												
Q _p (н), ккал/кг =	4421,5																																																														
Коефф-т пересчета,...	1	Σ % =	0																																																												
4. Расчет составляющих располагаемого тепла Q_p(р), ккал/кг(м3): <table border="1"> <tr> <td>1. Калорийность (низшая) смеси =</td> <td>4421,5</td> <td>Энтальпия 1 м3 хол. воздуха =</td> <td>9,39</td> </tr> <tr> <td>2. Тепло внесенное от нагрева в КФ =</td> <td>0</td> <td>Энтальпия 1 м3 возд. за КФ =</td> <td>9,39</td> </tr> <tr> <td>3. Физическое тепло твердого топлива =</td> <td>0</td> <td>Располаг. тепло Q_p(р) (п.4.1+п.4.2+п.4.3+п.4.4) =</td> <td>4427,8</td> </tr> <tr> <td>4. Тепло разложения карбонатов =</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				1. Калорийность (низшая) смеси =	4421,5	Энтальпия 1 м3 хол. воздуха =	9,39	2. Тепло внесенное от нагрева в КФ =	0	Энтальпия 1 м3 возд. за КФ =	9,39	3. Физическое тепло твердого топлива =	0	Располаг. тепло Q _p (р) (п.4.1+п.4.2+п.4.3+п.4.4) =	4427,8	4. Тепло разложения карбонатов =	0																																														
1. Калорийность (низшая) смеси =	4421,5	Энтальпия 1 м3 хол. воздуха =	9,39																																																												
2. Тепло внесенное от нагрева в КФ =	0	Энтальпия 1 м3 возд. за КФ =	9,39																																																												
3. Физическое тепло твердого топлива =	0	Располаг. тепло Q _p (р) (п.4.1+п.4.2+п.4.3+п.4.4) =	4427,8																																																												
4. Тепло разложения карбонатов =	0																																																														
5. Расчет Q₆, ккал/кг <table border="1"> <tr> <td>Температура шлака(зола), С =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Ar с учетом неразложив. карбонатов, % =</td> <td>25,7</td> </tr> <tr> <td>ашл=1-аун. =</td> <td>0,79</td> </tr> <tr> <td>Энтальпия шлака(зола) =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Потеря тепла Q₆ с теплом шлака =</td> <td>0</td> </tr> </table>				Температура шлака(зола), С =	0	Ar с учетом неразложив. карбонатов, % =	25,7	ашл=1-аун. =	0,79	Энтальпия шлака(зола) =	0	Потеря тепла Q ₆ с теплом шлака =	0																																																		
Температура шлака(зола), С =	0																																																														
Ar с учетом неразложив. карбонатов, % =	25,7																																																														
ашл=1-аун. =	0,79																																																														
Энтальпия шлака(зола) =	0																																																														
Потеря тепла Q ₆ с теплом шлака =	0																																																														
6. Расчет Q₃, ккал/кг <table border="1"> <tr> <td>V_{сг}- объем сухих продуктов горения топлива(смеси), м3/кг(м3) =</td> <td>3,42</td> </tr> <tr> <td>Q неполн. горения, ккал/м3 =</td> <td>30,17</td> </tr> <tr> <td>Потеря тепла Q₃, ккал/кг =</td> <td>103,2</td> </tr> </table>				V _{сг} - объем сухих продуктов горения топлива(смеси), м3/кг(м3) =	3,42	Q неполн. горения, ккал/м3 =	30,17	Потеря тепла Q ₃ , ккал/кг =	103,2																																																						
V _{сг} - объем сухих продуктов горения топлива(смеси), м3/кг(м3) =	3,42																																																														
Q неполн. горения, ккал/м3 =	30,17																																																														
Потеря тепла Q ₃ , ккал/кг =	103,2																																																														
7. Расчет Q₄, ккал/кг <table border="1"> <tr> <td>1. Горючие в шлаке, % =</td> <td>0</td> <td>3. Составл. Q₄ (шл+пр) =</td> <td>0</td> <td>Потеря тепла Q₄ (п.7.3+п.7.4), ккал/кг =</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2. Горючие в уносе, % =</td> <td>0</td> <td>4. Составл. Q₄ ун. =</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				1. Горючие в шлаке, % =	0	3. Составл. Q ₄ (шл+пр) =	0	Потеря тепла Q ₄ (п.7.3+п.7.4), ккал/кг =	0	2. Горючие в уносе, % =	0	4. Составл. Q ₄ ун. =	0																																																		
1. Горючие в шлаке, % =	0	3. Составл. Q ₄ (шл+пр) =	0	Потеря тепла Q ₄ (п.7.3+п.7.4), ккал/кг =	0																																																										
2. Горючие в уносе, % =	0	4. Составл. Q ₄ ун. =	0																																																												
8. Расчет составляющих Q₂, ккал/кг(м3): <table border="1"> <tr> <td>1. Темп-ра дым.газов, С =</td> <td>130</td> <td>7. Энтальпия холодного воздуха, =</td> <td>60,63</td> </tr> <tr> <td>2. Энтальпия дым.г. (без золы) =</td> <td>296,48</td> <td>8. Потеря тепла с уходящими газами (п.8.6-п.8.7) =</td> <td>237,2</td> </tr> <tr> <td>3. Энтальпия золы в дым.газах =</td> <td>1,37</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4. Темп-ра золы за ВЗУ, С =</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5. Энтальпия золы за ВЗУ =</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6. Энтальпия дым.газов с учетом составляющих (п.8.2+п.8.3+п.8.5) =</td> <td>297,85</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				1. Темп-ра дым.газов, С =	130	7. Энтальпия холодного воздуха, =	60,63	2. Энтальпия дым.г. (без золы) =	296,48	8. Потеря тепла с уходящими газами (п.8.6-п.8.7) =	237,2	3. Энтальпия золы в дым.газах =	1,37			4. Темп-ра золы за ВЗУ, С =	0			5. Энтальпия золы за ВЗУ =	0			6. Энтальпия дым.газов с учетом составляющих (п.8.2+п.8.3+п.8.5) =	297,85																																						
1. Темп-ра дым.газов, С =	130	7. Энтальпия холодного воздуха, =	60,63																																																												
2. Энтальпия дым.г. (без золы) =	296,48	8. Потеря тепла с уходящими газами (п.8.6-п.8.7) =	237,2																																																												
3. Энтальпия золы в дым.газах =	1,37																																																														
4. Темп-ра золы за ВЗУ, С =	0																																																														
5. Энтальпия золы за ВЗУ =	0																																																														
6. Энтальпия дым.газов с учетом составляющих (п.8.2+п.8.3+п.8.5) =	297,85																																																														
9. Перерасчет на рабочее(сырое) топливо: <table border="1"> <tr> <td>1. Влажность подсушенного топлива, % =</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>2. Темп-ра подсушенного топлива, С =</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>3. Расход подсушенного топлива, т/час =</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>4. КПД на подсушенное топливо, % =</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>5. Расход рабочего топлива, т/час =</td> <td>1,711</td> </tr> <tr> <td>6. х, м3/кг =</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>7. Q_p(р) на рабочее топливо, ккал/кг =</td> <td>4427,8</td> </tr> <tr> <td>8. КПД на рабочее топливо, % =</td> <td>88,951</td> </tr> </table>				1. Влажность подсушенного топлива, % =	---	2. Темп-ра подсушенного топлива, С =	---	3. Расход подсушенного топлива, т/час =	---	4. КПД на подсушенное топливо, % =	---	5. Расход рабочего топлива, т/час =	1,711	6. х, м3/кг =	---	7. Q _p (р) на рабочее топливо, ккал/кг =	4427,8	8. КПД на рабочее топливо, % =	88,951																																												
1. Влажность подсушенного топлива, % =	---																																																														
2. Темп-ра подсушенного топлива, С =	---																																																														
3. Расход подсушенного топлива, т/час =	---																																																														
4. КПД на подсушенное топливо, % =	---																																																														
5. Расход рабочего топлива, т/час =	1,711																																																														
6. х, м3/кг =	---																																																														
7. Q _p (р) на рабочее топливо, ккал/кг =	4427,8																																																														
8. КПД на рабочее топливо, % =	88,951																																																														

Рис. 4. Вид формы «Просмотр данных и результатов»

6. Определить суммарные присосы воздуха по газовоздушному тракту котла после топки

$$\Delta\alpha_{\Sigma} = \alpha_{yx} - \alpha_{т}, \quad (12)$$

где α_{yx} , $\alpha_{т}$ – коэффициенты избытка воздуха уходящих газов и на выходе из топки соответственно.

Результаты расчета записать в табл. 4.

7. Проанализировать полученные результаты и представить их в виде функциональных зависимостей $\eta_{к.бр} = f(\alpha)$, $\eta_{к.бр} = f(\Delta\alpha)$, $q_2 = f(\alpha)$, и $q_3 = f(\alpha)$, используя наиболее значимые закономерности.

Задание 2. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Подготовить исходные данные для проведения вычислительно-эксперимента в соответствии с индивидуальным заданием преподавателя и записать в рабочую тетрадь в форме табл. 2. Эксперимент проводится для твердого топлива.

Результаты вычислительного эксперимента исследования работы котла

$(D = D_0, \Gamma_{\text{пл}} = \Gamma_{\text{вн}} = 0, t_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}, t_{\text{хп}} = 30^\circ\text{C}, t_{\text{вг}} = 130^\circ\text{C})$

Продукты сгорания в топке			Уходящие газы					$\eta_{\text{бр}}, \%$	$q_2, \%$	$q_3, \%$	$q_4, \%$	$q_5, \%$	$q_6, \%$	$B, \text{ т/ч (М}^3\text{/ч)}$
$\text{O}_2, \%$	$\text{RO}_2, \%$	$\text{CO}, \%$	α^*_τ	$\text{O}_2, \%$	$\text{RO}_2, \%$	$\text{CO}, \%$	α^*_{yx}							
Влияние коэффициента избытка воздуха														
0,0	25,0	5,0		0,0	25,0	5,0		0,0						
0,0	25,0	3,0		0,0	25,0	3,0		0,0						
0,0	25,0	1,0		0,0	25,0	1,0		0,0						
0,0	25,0	0,0		0,0	25,0	0,0		0,0						
2,0	25,0	0,0		2,0	25,0	0,0		0,0						
5,0	25,0	0,0		5,0	25,0	0,0		0,0						
0,0	30,0	0,0		0,0	30,0	0,0		0,0						
1,0	30,0	0,0		1,0	30,0	0,0		0,0						
2,0	30,0	0,0		2,0	30,0	0,0		0,0						
3,0	30,0	0,0		3,0	30,0	0,0		0,0						
5,0	30,0	0,0		5,0	30,0	0,0		0,0						
Суммарное влияние присосов воздуха по газовоздушному тракту котла														
1,0	30,0	0,0		1,0	30,0	0,0								
1,0	30,0	0,0		2,0	30,0	0,0								
1,0	30,0	0,0		3,0	30,0	0,0								
1,0	30,0	0,0		4,0	30,0	0,0								
1,0	30,0	0,0		5,0	30,0	0,0								
1,0	30,0	0,0		6,0	30,0	0,0								

* Коэффициенты избытка воздуха рассчитываются по содержанию кислорода по тракту котла.

2. Активизировать программу ТеплоККД.

3. Исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние температурного режима котла, провала со шлаком и уноса дымовыми газами горючих в соответствии с табл. 5. В процессе проведения эксперимента его результаты записываются в рабочую тетрадь в эту же таблицу.

Подробные данные с промежуточными результатами вычислительного эксперимента для каждого варианта выводятся на вкладку «Просмотр данных и результатов» (рис. 4). В блоке 3 можно проверить правильность задания состава топлива. Сумма всех его компонентов должна быть равна 100%.

4. Провести анализ полученных результатов и представить их в виде функциональных зависимостей $\eta_{к.бр} = f(t)$, $\eta_{к.бр} = f(D_э)$, $\eta_{к.бр} = f(\Gamma)$, $q_2 = f(t_{вг})$, $q_4 = f(\Gamma)$, $q_5 = f(D_э)$ и $q_6 = f(t_{ш})$, используя наиболее значимые закономерности.

Анализ результатов вычислительного эксперимента. После полного завершения вычислительного эксперимента необходимо:

1. Из массива полученных результатов выбрать базовые варианты для заданного газового и твердого топлива. Сравнить их для рассматриваемого типа топки с данными приложения Б для составляющих потерь теплоты от химического и механического недожога при соответствующих значениях коэффициента избытка воздуха.

2. Провести относительно базовых вариантов итоговый сравнительный количественный анализ результатов расчета, используя их графическое представление, в отношении решения задачи по увеличению эффективности работы парового котла. Обратит внимание на изменение КПД и составляющих теплового баланса котла.

3. Сформулировать неформальные выводы с рекомендацией по повышению тепловой эффективности работы котла.

Таблица 5

Результаты вычислительного эксперимента исследования работы котла

(Состав газов в топке и уходящих газов: $O_2 = 5\%$, $RO_2 = 25\%$, $CO = 1\%$)

D^* , т/ч	Q^* _{к.бр.} , Гкал/ч	$t_{хп}$, °С	$t_{вг}$, °С	$t_{ш}$, °С	$\Gamma_{шл}$, %	$\Gamma_{вн}$, %	$\eta_{бр}$, %	q_2 , %	q_3 , %	q_4 , %	q_5 , %	q_6 , %	B , т/ч ($M^3/ч$)
Влияние температуры воздуха, подаваемого на горение													
D	Q	30	130										
D	Q	50	130										

Окончание табл. 5

D^* , т/ч	Q^* _{к.бр.} , Гкал/ч	$t_{хп}$, °С	$t_{вг}$, °С	$t_{ш}$, °С	$\Gamma_{шл}$, %	$\Gamma_{вн}$, %	$\eta_{бр}$, %	q_2 , %	q_3 , %	q_4 , %	q_5 , %	q_6 , %	B , т/ч ($M^3/ч$)
D	Q	100	130										
D	Q	150	130										
D	Q	250	130										
Влияние температуры уходящих газов													
D	Q	30	110										
D	Q	30	150										
D	Q	30	190										
D	Q	30	230										
Влияние режима работы котла													
D	Q	30	130										
$0,8D$	$0,8Q$	30	130										
$0,5D$	$0,5Q$	30	130										
$0,3D$	$0,3Q$	30	130										
Влияние температуры шлака													
D	Q	30	130	0									
D	Q	30	130	600									
D	Q	30	130	900									
D	Q	30	130	1200									
D	Q	30	130	1500									
Влияние содержания горючих в шлаке													
D	Q	30	130		10	19							
D	Q	30	130		20	19							
D	Q	30	130		30	19							
D	Q	30	130		40	19							
Влияние содержания горючих в уносе													
D	Q	30	130		12	10							
D	Q	30	130		12	20							
D	Q	30	130		12	30							
D	Q	30	130		12	40							
* Параметры D , $Q_{к.бр.}$, $t_{ш}$, $\Gamma_{шл}$, $\Gamma_{вн}$ задаются в соответствии с данными табл. 3.													

Контрольные вопросы

1. Что называют котельной установкой?
2. Какое устройство называют паровым котлом?
3. Каким образом классифицируются котлы?
4. Какое устройство называют топкой?
5. Как классифицируются топочные устройства в зависимости от способа сжигания топлива?
6. Какое устройство называют горелкой?
7. Назовите основные элементы парового котла.

8. Для каких целей в паровом котле используется пароперегреватель?
9. Для каких целей в паровом котле используется водяной экономайзер?
10. Для каких целей в паровом котле используется воздухоподогреватель?
11. Опишите принцип работы парового барабанного котла с естественной циркуляцией.
12. Что называется коэффициентом избытка воздуха?
13. Почему в реальных условиях приходится подавать большее количество воздуха на горение, чем это теоретически необходимо?
14. Что называют тепловым балансом котла?
15. Дайте характеристику потерь теплоты в котле.
16. Какими способами, и в каких случаях можно определить КПД брутто котельного агрегата?
17. Укажите, чем отличаются КПД нетто и КПД брутто котельного агрегата?

Лабораторная работа 3

Энергетическая эффективность теплового насоса

Цель работы – знакомство с принципом работы теплового насоса; определение его характеристики в зависимости от изменения температуры низкопотенциального источника тепла; исследования влияния необратимых потерь в конденсаторе и испарителе на энергетические характеристики теплового насоса.

Задание для выполнения работы. В процессе выполнения работы необходимо изучить принцип работы с компьютерной программой HEATR, провести вычислительный эксперимент и с помощью его установить закономерность изменения коэффициента преобразования теплового насоса:

- 1) от температуры низкопотенциального источника тепла t_x ;
- 2) при наличии необратимых потерь в испарителе и конденсаторе.

Кроме того, необходимо обосновать целесообразность использования исследуемого теплового насоса.

Исследование проводится методом вычислительного эксперимента.

Работа выполняется в течение 2-х академических часов.

Введение. В настоящее время тепловые насосы получили широкое распространение и являются альтернативой традиционного способа получения тепла путем сжигания топлива.

Рассмотрим схему и принцип работы одноступенчатого наиболее распространенного парокомпрессорного теплового насоса. Принципиальная схема дана на рис. 5. К основному оборудованию трансформатора тепла относятся испаритель (теплоприемник), компрессор, конденсатор (теплоотдатчик) и терморегулирующий вентиль (ТРВ), который необходим для организации циклической работы теплового насоса. В данном тепловом насосе осуществляется самопроизвольный перенос тепла в испарителе от более нагретого источника низкопотенциального тепла с температурой t_x к рабочему веществу (хладагенту) с температурой $t_4 = t_1$ ($t_x > t_4$). Рабочее вещество в процессе испарения аккумулирует подведенную теплоту Q_0 , соответствующую холодопроизводительности. При сжатии рабочего вещества в компрессоре затраченная энергия (работа) на привод N_3 превращается в тепло, и температура рабочего вещества повышается с t_1 до t_2 . Затем теплота высокого потенциала $Q = Q_0 + N_3$ от конденсатора отводится потребителю с температурой $t_r > t_x$, т. к. $t_2 > t_r$. Далее система возвращается в исходное состояние путем изохорного расширения рабочего вещества с частичным его испарением в ТРВ. В испарителе может

также проводится перегрев пара, что обеспечивает более надежную работу компрессора и увеличивает температуру рабочего вещества при сжатии, т. е. увеличивается его энергетический потенциал.

При перемещении рабочего вещества по контуру трансформатора тепла часть энергии потока теряется на преодоление сопротивления трения и местных сопротивлений, что приводит к изменению давления и температур в испарителе и конденсаторе и дополнительному тепловыделению в компрессоре. Эти потери являются необратимыми и влияют на энергетическую эффективность трансформатора тепла.

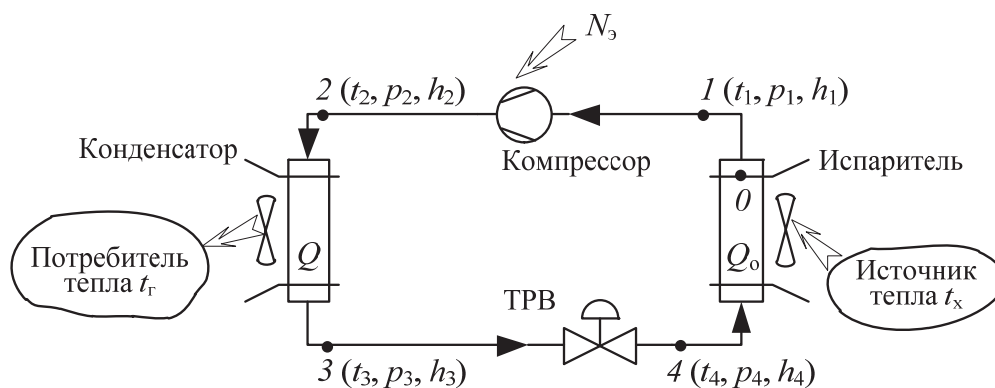


Рис. 5. Принципиальная схема одноступенчатого трансформатора тепла

Основными параметрами, характеризующими эффективность теплового насоса, являются теплопроизводительность и коэффициент преобразования тепла.

Теплопроизводительностью Q называется количество теплоты, которое передается потребителю. Удельная теплопроизводительность равна разности энтальпий в конденсаторе:

$$q = h_2 - h_3, \quad (13)$$

где h_2 и h_3 – энтальпии на входе и выходе конденсатора.

При дополнительном переохлаждении конденсата в идеальном аппарате q содержит также и тепло, отводимое от рабочего вещества в переохладителе.

Теплопроизводительность теплового насоса Q рассчитывается умножением q на массовый расход. Массовый расход определяется на основе характеристики компрессора.

Для переноса теплоты затрачивается внешняя работа для сжатия рабочего вещества в компрессоре с учетом электромеханического КПД $\eta_{эм}$:

$$l = h_2 - h_1, \quad (14)$$

где h_2 и h_1 – энтальпии на выходе и входе в компрессор.

Энергетическое совершенство тепловых насосов определяется коэффициентом преобразования теплоты (отопительным коэффициентом)

$$\varphi_{\tau} = \frac{q}{l}, \quad (15)$$

где φ_{τ} – теоретический коэффициент преобразования.

Коэффициент преобразования теплоты для идеального теплового насоса по циклу Карно равен

$$\varphi_{\kappa} = \frac{\bar{T}_{\kappa}}{\bar{T}_{\kappa} - \bar{T}_{\text{и}}}, \quad (16)$$

где \bar{T}_{κ} – средняя температура рабочего вещества в конденсаторе; $\bar{T}_{\text{и}}$ – средняя температура рабочего вещества в испарителе.

Коэффициент преобразования реального теплового насоса равен отношению теплопроизводительности к мощности привода компрессора с учетом его КПД:

$$\varphi_{\text{э}} = \frac{Q_{\kappa}}{N_{\text{э}}}. \quad (17)$$

На основании сравнительного энергетического анализа традиционного способа получения тепла для конечного потребления путем сжигания топлива с последующим преобразованием в электрическую энергию и с применением теплового насоса делается вывод о целесообразности использования теплового насоса.

Работа с компьютерной программой. Компьютерная программа HEAPR предназначена для расчета параметров парокomppressorных трансформаторов тепла, к которым относится тепловой насос.

Задание исходных данных проводится в диалоговом режиме путем последовательного ответа на запросы, появляющиеся на экране монитора (рис. 6).

Вначале для расчета вводится первый пункт меню с признаком 1. Далее для изменения параметра по запросу первоначально вводится символ <Y> или <y> (латинский). Затем после нажатия клавиши <Enter> – новое значение параметра и т. д. Если текущий параметр не изменяется, то символ <Y> не вводится, а нажимается клавиша <Enter>. Фрагмент диалогового режима приведен на рис. 6.

После завершения ввода исходных данных проводится расчет и на экране монитора появляется таблица (рис. 7) с результатами, в ко-

торой содержатся параметры в характерных точках цикла и общие характеристики исследуемого теплового насоса.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

Тип расчета трансформатора тепла:
1 - расчет энергетической эффективности теплового насоса
2 - расчет экономической эффективности теплового насоса
3 - комбинированный анализ холодильно-нагревательной установки

Введите признак расчета (пункт меню) - 1

ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕПЛА

Текст заголовка листинга для файла результатов расчета СИК:
ОТЛАДКА

Вы изменяете заголовок (Y/<ENTER>)? y

Введите новое значение: Пример

Хладагент - R22

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)?

Марка компрессора (ХГВ-28; ХГВ-14; ХГВ-9; ХГВ-4,5; ХГВ-2,2; ПБ11; 1П10; ХГН-5,5; ХГН-2,8; ХГН-1,4; ХГН-0,7) - ПБ11

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)?

Температура низкпотенциального источника тепла (объекта охлаждения), С - 15.00

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)?

Перегрев пара в испарителе, С - 5.000

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)?

Потери давления в испарителе, Па - .0000

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)? y

Введите новое значение: 50000

Температура конденсации, С - 45.00

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)?

Потери давления в конденсаторе, Па - .0000

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)? y

Введите новое значение: 50000

Перегрев пара в регенераторе, С - .0000

Вы изменяете параметр (Y/<ENTER>)?

Действия при изменении параметра

Каталог компрессоров (в скобках)

Исследуемый компрессор

Размерность

Действия при изменении параметра

Параметр не изменяется

Рис. 6. Диалоговый режим задания исходных данных в программе HEAPR

	0	1	2	2 [^]	3	4
Р, Па	6.300E+05	6.300E+05	1.777E+06	1.777E+06	1.727E+06	6.801E+05
T, °C	7.49	12.5	72.8	64.3	45.0	10.0
H, Дж/кг	6.076E+05	6.117E+05	6.460E+05	6.379E+05	4.579E+05	4.579E+05
S, кДж/(кг·°C)		4.754E+03		4.754E+03		
Удельная массовая холодопроизводительность - 1.538E+05 Дж/кг						
Холодопроизводительность - 2.387E+04 Вт						
Паросодержание на входе испарителя - .233						
Массовый расход - 1.552E-01 кг/с						
Плотность пара - 25.985070 кг/м ³						
Сжатие в компрессоре - 2.82						
Коэффициент подачи компрессора - .699						
Индикаторный КПД - .762						
<u>Теплопроизводительность - 2.920E+04 Вт</u>						
Удельная внутренняя работа компрессора - 3.432E+04 Дж/кг						
Электромеханический КПД - .440						
Удельная работа компрессора - 7.799E+04 Дж/кг						
Электрическая мощность компрессора - 1.210E+04 Вт						
Теоретический холодильный коэффициент - 4.48						
Холодильный коэффициент (электрический) - 1.97						
Коэффициент преобразования по Карно - 8.483E+00						
Теоретический коэффициент преобразования - 5.483E+00						
<u>Коэффициент преобразования (электрический) - 2.41</u>						
Температура низкопотенциального источника (объекта охлаждения) - 15.0 °C						
Температура окружающей среды (объекта нагревания) - 50.0 °C						
Эксергетический КПД - .299						

Рис. 7. Пример представления результатов расчета энергетической эффективности трансформатора тепла на экране монитора

Подготовка исходных данных. Исходные данные (хладагент, марка компрессора и его электромеханический КПД, температура низкопотенциального источника тепла t_x) задаются преподавателем индивидуально для каждого студента с использованием табл. 7 и записываются в рабочую тетрадь в виде табл. 6. В этой же таблице в процессе выполнения работы фиксируются результаты вычислительного эксперимента.

Порядок выполнения работы. При выполнении работы необходимо:

1. Ознакомиться с назначением, принципом работы и характеристиками пароконденсационного трансформатора тепла. В рабочей тетради сделать рисунок принципиальной схемы теплового насоса (см. рис. 5).

Варианты исходных данных для расчета теплового насоса

№ п/п	$t_x, ^\circ\text{C}$							$t_3,$ $^\circ\text{C}$	Компрессор ¹⁾	$\eta_{\text{эм}}$	Рабочее вещество
	1	2	3	4	5	6	7				
1	-15	-11	-7	-3	1	5	9	25	ПБ11	0,45	R22
2	0	4	8	12	16	20	24	40	ХГВ-2,2	0,70	R22
3	0	4	8	12	16	20	24	40	ХГВ-14	0,75	R22
4	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	25	1П10	0,85	R22
5	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	25	ХГН-5,5	0,55	R22
6	0	4	8	12	16	20	24	40	ХГВ-9	0,65	R22
7	0	4	8	12	16	20	24	40	ХГВ-4,5	0,65	R22
8	0	4	8	12	16	20	24	40	ХГВ-28	0,80	R22
9	-15	-11	-7	-3	1	5	9	35	ПБ11	0,45	R22
10	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	35	ХГН-5,5	0,55	R22
11	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	35	1П10	0,85	R22
12	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-14	0,75	R22
13	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-9	0,65	R22
14	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-4,5	0,65	R22
15	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-28	0,80	R22
16	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-2,2	0,70	R22
17	-10	-6	-2	2	6	10	14	35	ПБ11	0,45	RXX
18	-10	-6	-2	2	6	10	14	35	ХГН-5,5	0,55	RXX
19	-10	-6	-2	2	6	10	14	35	1П10	0,85	RXX
20	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-14	0,75	RXX
21	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-9	0,65	RXX
22	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-4,5	0,65	RXX
23	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-28	0,80	RXX
24	0	4	8	12	16	20	24	45	ХГВ-2,2	0,70	RXX

¹⁾Последние цифры маркировки компрессора (после символов) приближенно соответствуют его номинальной мощности.

5. Провести расчет текущего варианта.

5.1. После запуска программы выполнить пункт меню: «1 – расчет энергетической эффективности теплового насоса». Далее в соответствии с таблицей исходных данных в рабочей тетради последовательно изменить требуемые параметры для расчета текущего варианта. Для этого при необходимости вводится символ <Y>, нажимается клавиша <Enter> и вводится новое значение параметра. Затем опять нажимается клавиша <Enter>. Эта операция повторяется вплоть до завершения расчета текущего варианта по программе.

5.2. После расчета варианта и появления таблицы на экране монитора необходимо выписать требуемые результаты (теплопроизводительность

Q_k , коэффициент преобразования электрической (φ_3) в рабочую тетрадь. Пример представления расчетных теплотехнических данных на экране монитора дан на рис. 7.

5.3. Для одного из вариантов выписать значения удельных энтальпий h , температур t и давлений p , коэффициента преобразования φ_k для цикла Карно во вторую половину таблицы рабочей тетради.

6. В соответствии с п. 5 провести расчет всех требуемых вариантов.

Анализ результатов вычислительного эксперимента. После завершения вычислительного эксперимента необходимо:

1. Построить характеристику теплового насоса в виде функциональных зависимостей $Q_k = f_1(t_x)$ и $\varphi = f_2(t_x)$, где параметрами являются Δp_n и Δp_k .

2. Для значений параметров, полученных в соответствии с п.5.3, построить p, h -диаграмму процесса, где h – абсцисса, а p – ордината.

3. Провести сравнительный количественный анализ результатов расчета. Показать, как влияют потери давления и температура низкопотенциального источника тепла на энергетическую эффективность теплового насоса.

4. Сформулировать неформальные выводы. Дать обоснованную рекомендацию о целесообразности использования исследованного парокomppressorного теплового насоса.

Контрольные вопросы

1. Какие источники теплоты могут быть использованы для работы тепловых насосов?

2. Имеют ли сходство тепловые насосы и холодильные установки?

3. Объясните, как работает тепловой насос?

4. Чем определяется эффективность работы теплового насоса?

5. Объясните, почему коэффициент преобразования тепла в тепловых насосах превышает единицу. Не противоречит ли это закону сохранения энергии?

6. Назовите основные элементы, входящие в состав теплового насоса, и объясните их назначение.

7. Из каких процессов складывается цикл теплового насоса?

8. Назовите факторы, сдерживающие широкое применение тепловых насосов в Беларуси.

Лабораторная работа 4

Исследование тепловой эффективности теплопроводов

Цель работы – исследовать закономерность изменения оптимальной тепловой изоляции конструкций подающих теплопроводов надземной прокладки водяных тепловых сетей с учетом конструктивных и режимных факторов.

Задание для выполнения работы. В процессе выполнения работы необходимо изучить принцип работы с компьютерной программой SCT, провести вычислительный эксперимент и на основании полученных результатов:

1) выбрать материалы и изделия для основного и покровного слоев теплоизоляционной конструкции теплопроводов надземной прокладки;

2) определить толщину основного изоляционного слоя, удельные и суммарные потери теплоты теплопроводом заданной длины;

3) сравнить потери теплоты от теплоизолированного и голого теплопроводов;

3) установить эффективность тепловой изоляции.

Введение. Тепловая изоляция трубопроводов предназначена для снижения тепловых потерь в окружающую среду до допустимых норм, величина которых устанавливается в соответствии с условиями работы теплопроводов при надземной или подземной прокладке.

В данной лабораторной работе рассматривают случай *надземной* прокладки теплопроводов водяной тепловой сети на низких опорах, которую иначе называют *наземной* прокладкой. При этом тепловой поток от теплоносителя в окружающую среду – наружный воздух – последовательно преодолевает термическое сопротивление следующих поверхностей и слоев цилиндрической формы: внутренняя поверхность стенки трубопровода – стенка трубопровода – антикоррозионное покрытие – основной изоляционный слой – покровный слой (рис. 8).

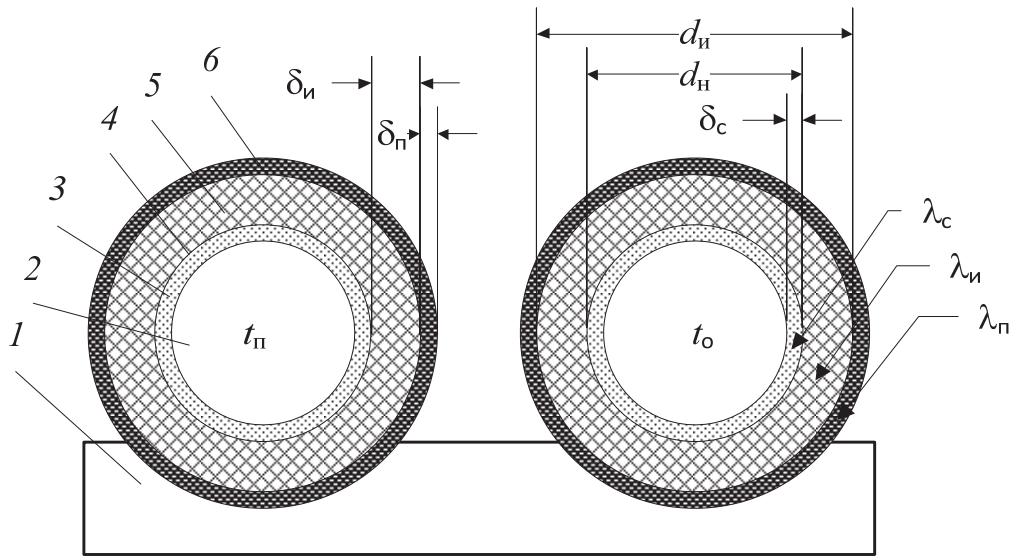


Рис. 8. Схема двухтрубной теплоизолированной конструкции теплопровода надземной прокладки:

- 1 – опора; 2 – теплоноситель; 3 – стенка трубопровода;
 4 – антикоррозионное покрытие; 5 – основной слой тепловой изоляции;
 6 – слой гидроизоляционного покрытия

Для водяных тепловых сетей по нормам предельная толщина изоляционной конструкции ограничена и зависит от наружного диаметра надземного теплопровода d_n (табл. 8).

Таблица 8

Предельные толщины теплоизоляционных конструкций надземных трубопроводов

d_n , мм	133	159	219	273	325	377	426	476	530	630	720	820	920	1020
δ_{n-max} , мм	200	220	230	230	240	240	250	250	260	280	280	300	300	320

Согласно ТКП 45-4.02-129-2009 (02250) толщина теплоизоляционного слоя для трубопроводов диаметром менее 2 м с положительными температурами определяется по формулам

$$\delta_n = \frac{d_n}{2}(B - 1), \quad (18)$$

$$\ln B = 2\pi\lambda_n \left[r_k - r_c - \frac{1}{\pi d_n \alpha_B} \right], \quad (19)$$

где $B = d_{\text{н}} / d_{\text{н}}$ – отношение наружного диаметра изоляционного слоя к наружному диаметру изолируемого объекта; $\lambda_{\text{и}}$ – теплопроводность теплоизоляционного слоя, Вт/(м·°С); r_k – линейное термическое сопротивление теплопередаче, (м·°С)/Вт; r_c – линейное термическое сопротивление стенки трубопровода, (м·°С)/Вт; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции, Вт/(м²·°С).

Расчетные коэффициенты теплоотдачи от наружной поверхности покровного слоя $\alpha_{\text{в}}$ зависят от используемого материала слоя и скорости ветра (табл. 9).

Таблица 9

Расчетный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{в}}$, Вт/(м²·°С)

Изолированный объект	В закрытом помещении		На открытом воздухе при скорости ветра ³⁾ , м/с		
	Покрытия с малым коэффициентом излучения ¹⁾	Покрытия с высоким коэффициентом излучения ²⁾	5	10	15
Горизонтальные трубопроводы	7	10	20	26	35

¹⁾ К данным покрытиям относятся кожухи из оцинкованной стали, листов алюминиевых сплавов и алюминия с оксидной пленкой.

²⁾ К данным покрытиям относятся штукатурки, асбестоцементные покрытия, стеклопластики, различные краски (кроме краски с алюминиевой пудрой).

³⁾ При отсутствии сведений о скорости ветра принимают значения, соответствующие скорости 10 м/с.

Сопротивление теплопередаче по нормированной линейной плотности теплового потока $q_{\text{в}}$ (табл. 10) определяется по формуле

$$r_k = \frac{t_{\text{т}} - t_{\text{в}}}{q_{\text{в}}}, \quad (20)$$

где $t_{\text{т}}$ – температура теплоносителя, °С; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °С.

Для трубопроводов водяных тепловых сетей за расчетную температуру теплоносителя принимают для подающего трубопровода при постоянной температуре сетевой воды и количественном регулировании – максимальную температуру теплоносителя; для подающего трубопровода при переменной температуре сетевой воды и качественном регулировании – в зависимости от температурного режима сети. При режиме 95–70°С расчетная температура принимается 55°С, при 150–70°С – 90°С и при 180–70°С – 110°С. Для обратных трубопроводов водяных тепловых сетей расчетная температура 50°С.

**Нормы плотности теплового потока через изолированную поверхность
для надземных трубопроводов при расположении на открытом воздухе
и продолжительности работы более 5000 ч в год**

Условный проход трубопровода d_y , мм	Температура теплоносителя $t_{п}$				
	100	150	200	250	300
	Нормы линейной плотности теплового потока q_v , Вт/м				
125	38	55	74	92	115
150	42	61	80	100	126
200	52	75	98	121	153
250	60	86	113	139	171
300	68	97	126	156	189
350	76	107	139	172	206
400	83	116	151	186	221
450	90	126	162	199	237
500	97	135	174	214	254
600	111	153	196	240	284
700	124	169	216	263	312
800	137	188	237	289	342
900	150	205	259	315	372
1000	163	222	282	341	401

За расчетную температуру наружной среды при круглогодичной работе тепловой сети принимают среднегодовую температуру наружного воздуха, а при работе только в отопительный период – среднюю за отопительный период.

Система уравнений (18–20) решается методом последовательных приближений, так как искомый параметр – толщина изоляции – входит неявным образом.

При применении неметаллических трубопроводов следует учитывать термическое сопротивление стенки, определяемое по формуле

$$r_c = \frac{\ln \frac{d_{н}}{d_{в}}}{2\pi\lambda_c}, \quad (21)$$

где λ_c – теплопроводность материала стенки, Вт/(м · °С).

Таким образом, при расчете тепловых потерь термическими сопротивлениями теплоотдаче от теплоносителя к стальной стенке трубопровода, самой стенки и антикоррозионного покрытия пренебрегают из-за их малости, обусловленной в первом случае турбулентным

течением воды в трубопроводе, во втором – высокой теплопроводностью и в третьем – малой толщиной слоя. Поэтому в расчетах учитывают только сопротивления основного изоляционного и покровного слоев и теплоотдаче от поверхности изоляционной конструкции к воздуху.

Полный тепловой поток Q с поверхности теплоизоляции трубопроводов диаметром до 2,0 м определяют по формуле

$$Q = q_b L K, \quad (22)$$

где L – длина трубопровода, м; K – коэффициент дополнительных тепловых потерь, учитывающий потери теплоты через опоры, подвески и иные элементы крепления изолируемого объекта (табл. 11).

Таблица 11

Коэффициент дополнительных потерь

Изолируемый объект	Коэффициент K
Трубопроводы надземной прокладки на открытом воздухе, в непроходных каналах, тоннелях и помещениях:	
стальные трубопроводы на подвижных опорах, условным проходом, мм:	
до 150	1,20
150 и более	1,15
стальные трубопроводы на подвесных опорах	1,05
неметаллические трубопроводы на подвижных и подвесных опорах	1,70
Бесканальная прокладка трубопроводов	1,00
Оборудование	1,10

Работа с компьютерной программой. Алгоритм расчета теплопровода заложен в многофункциональную компьютерную программу SCT. Вид начальной формы интерфейса компьютерной программы показан на рис. 9. Вначале необходимо активизировать кнопку для выполнения лабораторной работы «Тепловой расчет изоляционных конструкций» и нажать кнопку для выполнения действия «Далее». После этого откроется форма для ввода исходных данных (рис. 10, а). В соответствии с индивидуальным заданием вводятся исходные данные, и нажимается кнопка для выполнения действия «Далее». На экран монитора выводятся результаты вычислительного эксперимента (рис. 10, б).

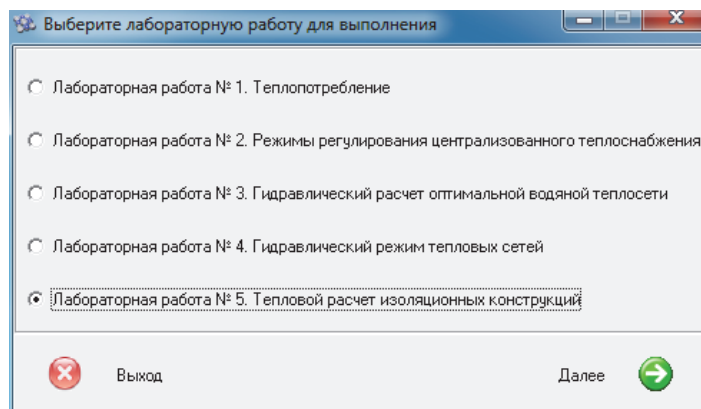
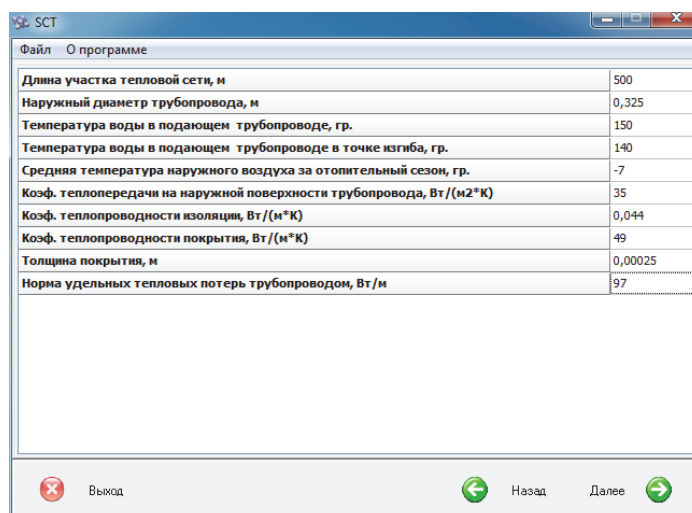
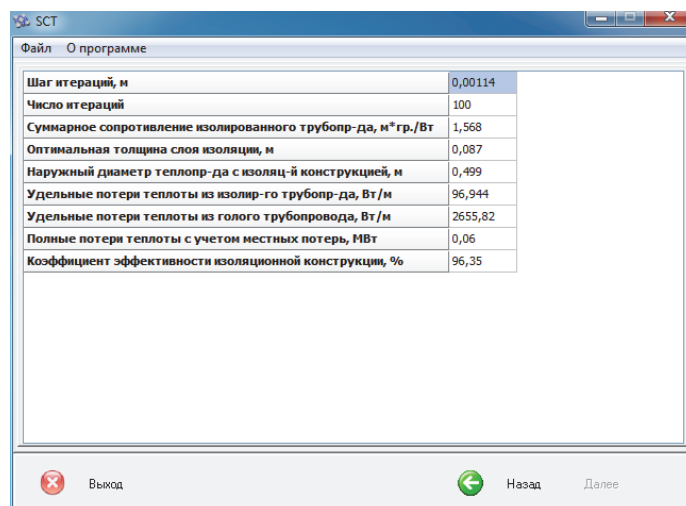


Рис. 9. Начальная форма интерфейса компьютерной программы SCT



a



б

Рис. 10. Интерфейс компьютерной программы SCT:
a – форма для ввода исходных данных; *б* – форма результатов расчета

Порядок выполнения работы. Работа выполняется в следующем порядке.

1. Ознакомиться с конструкцией и нормативным методом расчета тепловой изоляции теплопроводов.

2. В соответствии с заданным вариантом из табл. 12 берутся индивидуальные исходные данные и записываются в рабочую тетрадь в форме табл. 13, в которой также имеются общие исходные данные и проводится фиксация результатов вычислительного эксперимента. Нормативные удельные тепловые потери теплопровода q_v предварительно берутся из табл. 10 с учетом заданных диаметра d_y теплопровода и температуры теплоносителя $t_{п}$ в подающем теплопроводе.

3. Активизировать программу с помощью файла SCT.exe, изучить ее интерфейс и порядок работы с ней.

Таблица 12

Индивидуальные исходные данные теплопроводов

Вариант	$d_n \times \delta$, мм	d_y , мм	L , м	t_b , °C
1	133×4,0	125	250	-4,2
2	159×4,5	150	300	-0,9
3	194×5,0	175	350	-5,0
4	219×6,0	200	400	-1,3
5	273×7,0	250	450	-5,4
6	325×7,0	300	500	-2,4
7	377×9,0	350	225	-1,9
8	426×6,0	400	325	-2,2
9	476×6,0	450	425	-1,1
10	530×7,0	500	125	-0,7
11	630×8,0	600	175	-0,1
12	720×9,0	700	275	-4,3
13	820×11	800	375	-1,2
14	920×12	900	475	-2,1
15	159×4,0	150	550	-0,5
16	219×5,0	200	600	-0,4
17	325×8,0	300	450	-4,8
18	426×7,0	400	600	-5,1
19	530×9,0	500	900	-1,4
20	720×12,0	700	1200	-1,5
21	1020×10,0	1000	1500	-1,6

4. Исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние материала изоляции и покрытия, интенсивности теплообмена со стороны атмосферного воздуха и нормативной плотности теплового потока. Результаты всех требуемых вариантов записываются в рабочую тетрадь в форме табл. 13.

5. После завершения вычислительного эксперимента провести анализ результатов и оформить работу.

Анализ результатов вычислительного эксперимента. После завершения вычислительного эксперимента необходимо:

1. По результатам вычислительного эксперимента для заданного варианта в выбранном масштабе построить поперечный разрез теплопровода с указанием диаметров отдельных слоев изолированной конструкции.

Таблица 13

Исходные данные и результаты расчета

$(d_n \times \delta =$ мм, $d_y =$ мм, $L =$ м, $t_B =$ °С, $t_{п2} = t_{п} - 10^\circ\text{C}$)

$t_{п},$ °С	$\lambda_{и},$ Вт/(м·К)	$\lambda_{п},$ Вт/(м·К)	$\delta_{п},$ мм	$\alpha_{в},$ Вт/(м ² ·К)	$q_{в},$ Вт/м	$\delta_{и},$ мм	$q_{и},$ Вт/м	$q_{г},$ Вт/м	$Q,$ МВт	$K_3,$ %
Влияние температуры теплоносителя										
100	0,041	0,17	3,0	20						
150	0,041	0,17	3,0	20						
200	0,041	0,17	3,0	20						
250	0,041	0,17	3,0	20						
300	0,041	0,17	3,0	20						
Влияние материала изоляции										
150	0,022	0,17	3,0	20						
150	0,028	0,17	3,0	20						
150	0,041	0,17	3,0	20						
150	0,051	0,17	3,0	20						
150	0,070	0,17	3,0	20						
Влияние материала покрытия										
150	0,041	0,0344	4,0	20						
150	0,041	0,44	6,5	20						
150	0,041	0,17	3,0	20						
150	0,041	49,0	0,5	20						
150	0,041	203,5	0,2	20						
Влияние интенсивности теплообмена со стороны атмосферного воздуха										
150	0,041	0,17	3,0	10						
150	0,041	0,17	3,0	15						
150	0,041	0,17	3,0	20						
150	0,041	0,17	3,0	25						
150	0,041	0,17	3,0	30						

$t_{п},$ °С	$\lambda_{и},$ Вт/(м·К)	$\lambda_{п},$ Вт/(м·К)	$\delta_{п},$ мм	$\alpha_{в},$ Вт/(м ² ·К)	$q_{в},$ Вт/м	$\delta_{и},$ мм	$q_{и},$ Вт/м	$q_{г},$ Вт/м	$Q,$ МВт	$K_{э},$ %
Влияние нормативной плотности теплового потока										
150	0,041	0,17	3,0	20	75					
150	0,041	0,17	3,0	20	100					
150	0,041	0,17	3,0	20	150					
150	0,041	0,17	3,0	20	225					
150	0,041	0,17	3,0	20	300					

$t_{п}$ – температура воды в подающем теплопроводе, °С;

$t_{п2}$ – температура воды в подающем теплопроводе в точке изгиба;

$\lambda_{и}$ – теплопроводность материала изоляции, Вт/(м·К);

$\lambda_{п}$ – теплопроводность гидроизоляционного покрытия, Вт/(м·К);

$\delta_{п}$ – толщина гидроизоляционного слоя покрытия, мм;

$\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности теплопровода, Вт/(м²·К);

$\delta_{и}$ – оптимальная толщина слоя изоляции, мм;

$q_{и}$ – удельные потери теплоты от изолированного теплопровода, Вт/м;

$q_{г}$ – удельные потери теплоты от голого теплопровода, Вт/м;

$K_{э}$ – коэффициент эффективности теплоизолированной конструкции, %.

2. Провести количественный анализ результатов расчета относительно выбранного базового варианта теплопровода, используя графическое представление результатов, в отношении решения задачи по снижению потерь теплоты из теплопроводов. Обратить внимание на соответствие оптимальной толщины изоляции нормативным требованиям.

3. Сформулировать неформальные выводы с рекомендацией.

Контрольные вопросы

1. Какие типы теплопроводов Вы знаете?
2. Что влияет на потери тепла при транспортировке теплоты с помощью теплопроводов?
3. В чем особенность расчета тепловой изоляции теплопроводов?
4. С помощью каких мероприятий можно повысить эффективность передачи теплоты от источника к потребителю?

Лабораторная работа 5

Исследование теплового режима помещения

Цель работы – изучить совокупность факторов и процессов, определяющих тепловую обстановку в помещении, уметь выбирать оптимальные параметры микроклимата помещения и элементов конструкции его наружных ограждений, чтобы минимизировать потребление теплоты на отопление.

Задание для выполнения работы. В процессе выполнения работы необходимо изучить принцип работы с компьютерной программой «Heatcalc», провести вычислительный эксперимент и с помощью его установить влияние всех факторов и процессов, влияющих на тепловой режим помещения:

- 1) параметров наружного климата и внутреннего микроклимата помещения;
- 2) ориентации здания;
- 3) тепловой эффективности наружных стен;
- 4) тепловой эффективности окон.

Исследование проводится методом вычислительного эксперимента.

Работа выполняется в течение 6-ти академических часов.

Введение. Для выполнения работы необходимо знать основные конструктивные элементы здания, их особенности и назначение. В данной работе ограничиваемся рассмотрением влияния температуры помещения и наружного воздуха, термического сопротивления элементов наружного ограждения и инфильтрации воздуха на теплотребление помещения в холодное время года. В действительности на его тепловой режим, кроме теплопередачи и воздухообмена через ограждения, влияют и дополнительные параметры микроклимата помещения: влажность, подвижность и состав воздуха. Также на теплотреблении здания сказываются параметры наружного климата: ветер, инсоляция, влажность и осадки.

Рассмотрим теплопередачу через наружные ограждения здания. *Теплопередача* – теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку или через поверхность раздела между ними. Наиболее простой случай теплопередачи в здании реализуется в холодное время года от воздуха помещения через плоское ограждение к наружному воздуху. Каждый из теплоносителей характеризу-

ется температурой и коэффициентом теплоотдачи, а стенка – термическим сопротивлением. Разность характерных температур двух сред, между которыми происходит теплообмен, называется *температурным напором*. В нашем случае температурный напор $\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$. Уравнение теплопередачи

$$Q = k\Delta tF, \quad (23)$$

где Q – тепловой поток, Вт; $k = 1 / R_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К); $R_{\text{т}}$ – термическое сопротивление теплопередаче, (м² · К)/Вт; F – площадь поверхности ограждения, через которое передается теплота, м².

Термическое сопротивление теплопередаче равно сумме термических сопротивлений:

$$R_{\text{т}} = R_{\text{в}} + R_{\text{с}} + R_{\text{вп}} + R_{\text{н}}, \quad (24)$$

где $R_{\text{в}} = 1 / \alpha_{\text{в}}$ – термическое сопротивление теплоотдаче со стороны воздуха помещения; $R_{\text{с}} = \delta / \lambda$ – термическое сопротивление стенки толщиной δ с теплопроводностью материала λ ; $R_{\text{вп}}$ – термическое сопротивление воздушной прослойки; $R_{\text{н}} = 1 / \alpha_{\text{н}}$ – термическое сопротивление теплоотдаче со стороны наружного воздуха; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха помещения; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи со стороны наружного воздуха.

Нормируемые значения коэффициентов теплоотдачи равны 8,7 и 21,3 Вт/(м² · К) соответственно со стороны внутренней и наружной стен.

Для обеспечения необходимого теплового режима здания должно соблюдаться условие

$$R_{\text{т}} \geq R_{\text{т}}^{\text{норм}}, \quad (25)$$

где $R_{\text{т}}^{\text{норм}}$ – нормативное сопротивление теплопередаче в соответствии с существующим стандартом Беларуси.

Сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций $R_{\text{т}}$ при строительстве, реконструкции и модернизации, за исключением наружных дверей, ворот и ограждающих конструкций помещений с избытками явной теплоты, следует принимать не менее нормативного сопротивления теплопередаче $R_{\text{т}}^{\text{норм}}$, указанного в табл. 14.

Нормативные сопротивления теплопередаче

Ограждающие конструкции	Нормативное сопротивление теплопередаче $R_T^{\text{норм}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$
Жилые и общественные здания	
Наружные стены зданий	3,2
Совмещенные покрытия, чердачные перекрытия и перекрытия над проездами	6,0
Перекрытия над неотапливаемыми подвалами и техническими подпольями	2,5
Заполнения световых проемов	1,0
Здания производственного назначения	
Наружные стены зданий	2,0
Совмещенные покрытия, чердачные перекрытия и перекрытия над проездами	3,0
Перекрытия над неотапливаемыми подвалами и техническими подпольями	По расчету, обеспечивая перепад между температурой пола и температурой воздуха помещения первого этажа не более 2°C
Заполнения световых проемов	0,6

Воздухообмен в зданиях включает обмен воздуха помещений с наружным воздухом и между помещениями. Различают организованный и неорганизованный воздухообмен.

Неорганизованный воздухообмен в здании происходит под действием естественных процессов – гравитационного и ветрового давления. Этот вид воздухообмена связан с прохождением воздуха через неплотности наружного ограждения здания. Проникновение холодного наружного воздуха в помещение называют *инфильтрацией*. Интенсивность инфильтрации характеризуется коэффициентом инфильтрации m – кратностью воздухообмена помещения объемом $V_{\text{п}}$ за 1 час.

Затраты теплоты, Вт, на подогрев инфильтрующегося воздуха можно также найти из уравнения теплового баланса:

$$\Delta Q_{\text{и}} = \rho_{\text{в}} \dot{V}_{\text{в}} C_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (26)$$

где $\dot{V} = mV_{\text{п}}/3600$ – объемный расход инфильтрующегося воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$, в помещении объемом $V_{\text{п}}$, м^3 , с кратностью воздухообмена m , 1/ч.

Приближенно при $t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$ можно принять $\rho_{\text{в}} \approx 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $c_{\text{в}} = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Тогда формула (26) примет вид

$$\Delta Q_{\text{н}} = \frac{mV_{\text{п}}}{3}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}). \quad (27)$$

Уравнение (27) можно также использовать для определения расхода теплоты на нагрев воздуха через естественную вытяжку с учетом нормативного воздухообмена m .

Подготовка исходных данных. Исходные данные (размер помещения, его ориентация, тип и материал стен; конструктивные особенности, количество окон и дверей; материал пола и потолка), характеризующие особенности помещения, даны в табл. Г1. В соответствии с вариантом, заданным преподавателем индивидуально для каждого студента, они записываются в рабочую тетрадь в виде табл. 15.

В рабочей тетради необходимо изобразить в масштабе план исследуемого помещения в виде горизонтального разреза, образованного секущей плоскостью, проведенной на уровне окон. Пример плана дан на рис. 11. На плане помещения показаны размеры и ориентация помещения, размещение окон и дверей, наружной (С) и внутренних стен (А, В, D).

Работа с компьютерной программой. Компьютерная программа Heatcalc предназначена для расчета тепловых потерь помещения в зависимости от конструктивных особенностей ограждающих конструкций: стен, окон, дверей, перекрытия пола и потолка. Учитывается также материал, из которого они сооружаются, и ориентация помещения.

Таблица 15

Характеристика исследуемого помещения

Параметр, размерность	Значение	Особенность (материал, конструктивное исполнение)
Помещение		
ориентация	–	
стена А, м		
стена В, м		
стена С, м		
стена D, м		
высота, м		–
толщина стены, м		–
Окна		
ширина $s_{\text{о}}$, м		–
высота $h_{\text{о}}$, м		–
количество, стена		

Параметр, размерность	Значение	Особенность (материал, конструктивное исполнение)
Двери		
ширина $s_{д}$, м		–
высота $h_{д}$, м		–
количество, стена		
Пол (перекрытие)		
толщина		
Потолок (перекрытие)		
толщина		

Дополнительно предусмотрен учет воздухообмена при инфильтрации наружного воздуха.

Для активизации программы необходимо запустить файл Heatcalc.exe (путь к файлу указывается преподавателем). После запуска программы на экране дисплея появляется форма с вложенными страницами в виде закладок (рис. 12). Интерфейс программы имеет интуитивный характер, и работа с ней не требует специальных навыков.

На формах имеется несколько блоков. В первом показана ориентация здания. Во втором вводятся данные, характеризующие температурный режим эксплуатации помещения и его высоту. При учете инфильтрации воздуха необходимо установить флажок в поле «Учитывать инфильтрацию».

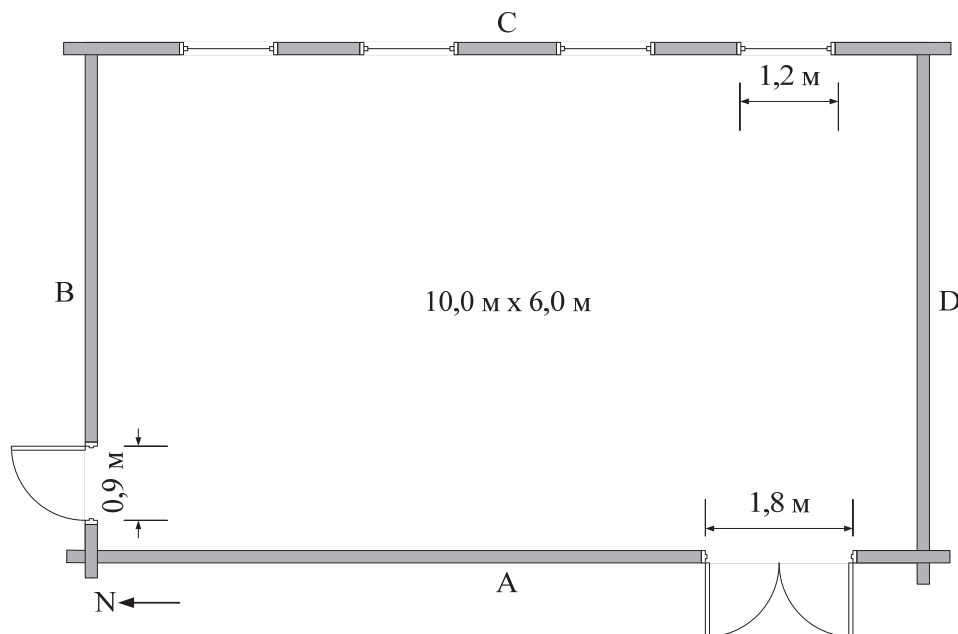


Рис. 11. План помещения в масштабе с западной ориентацией стены А

Macromedia Flash Player 7

Расчет теплопотерь прямоугольного помещения (нормативный метод)

Ориентация помещения

Температурные режимы и высота помещения

Высота помещения, мм: 3500

Температура воздуха в помещении, °C: 18

Температура наружного воздуха, -°C: 5

Учитывать инфильтрацию:

Общие теплопотери ограждений, Вт: 4440

Суммарные теплопотери помещения, Вт: 2640

Удельные теплопотери, Вт/кв.м: 44

Стена А	Стена В	Стена С	Стена D	Пол	Потолок
Материал: Кирпич керамический пустотный					
Тип стены: Внутренняя					
Ориентация: Запад					
Длина, мм: 10000					
Толщина, мм: 250					
Суммарные теплопотери, Вт: 300					
Площадь, кв.м: 35					

Окна

Двери

Тип: Деревянная филенчатая

Ширина, мм: 1800

Высота, мм: 2500

Кол-во, шт: 1

Площадь, кв.м: 4.5

Теплопотери дверей, Вт: 31

Помощь Сводка

a

Macromedia Flash Player 7

Расчет теплопотерь прямоугольного помещения (нормативный метод)

Ориентация помещения

Температурные режимы и высота помещения

Высота помещения, мм: 3500

Температура воздуха в помещении, °C: 18

Температура наружного воздуха, -°C: 5

Учитывать инфильтрацию:

Общие теплопотери ограждений, Вт: 4440

Суммарные теплопотери помещения, Вт: 2640

Удельные теплопотери, Вт/кв.м: 44

Стена А	Стена В	Стена С	Стена D	Пол	Потолок
Материал: Кирпич керамический пустотный					
Тип стены: Наружная					
Ориентация: Восток					
Длина, м: 10000					
Толщина, мм: 250					
Суммарные теплопотери, Вт: 2504					
Площадь, кв.м: 35					

Окна

Тип: 2-камерный стеклопакет 2x8 мм

Ширина, мм: 800

Высота, мм: 1200

Кол-во, шт: 4

Площадь, кв.м: 3.84

К, Вт/кв.м°C: 1.96

Теплопотери окон, Вт: 134

Двери

Тип: Деревянная филенчатая

Ширина, мм: 800

Высота, мм: 2000

Кол-во, шт: 0

Площадь, кв.м: 0

Теплопотери дверей, Вт: 0

Помощь Сводка

б

Рис. 12. Вид форм для ввода исходных данных программы Heatcalc:
a – общая характеристика помещения и стены А; *б* – характеристика стены С

Затем для стены А задается ее ориентация, материал, толщина и длина ограждения, а также указывается, является она наружной или внутренней. Ее особенности выбираются из раскрывающихся списков. В блоках с характеристиками окон и дверей задаются их размеры и из раскрывающихся списков выбираются характерные конструктивные признаки.

Аналогично задаются параметры для стен В, С, D, пола и потолка. Ориентация этих стен определяется автоматически.

После задания всех необходимых данных переходим на вкладку с результатами расчета, нажав кнопку «Сводка». После нажатия открывается форма с результатами расчета (рис. 13). На форме имеются данные с характеристикой помещения и основные показатели, характеризующие теплотехнические свойства отдельных ограждений и помещения в целом.

Суммарные тепловые потери ограждений включают потери через стены А, В, С, D без учета окон и дверей. В общие теплотери дополнительно входят потери через окна, двери, пол и потолок.

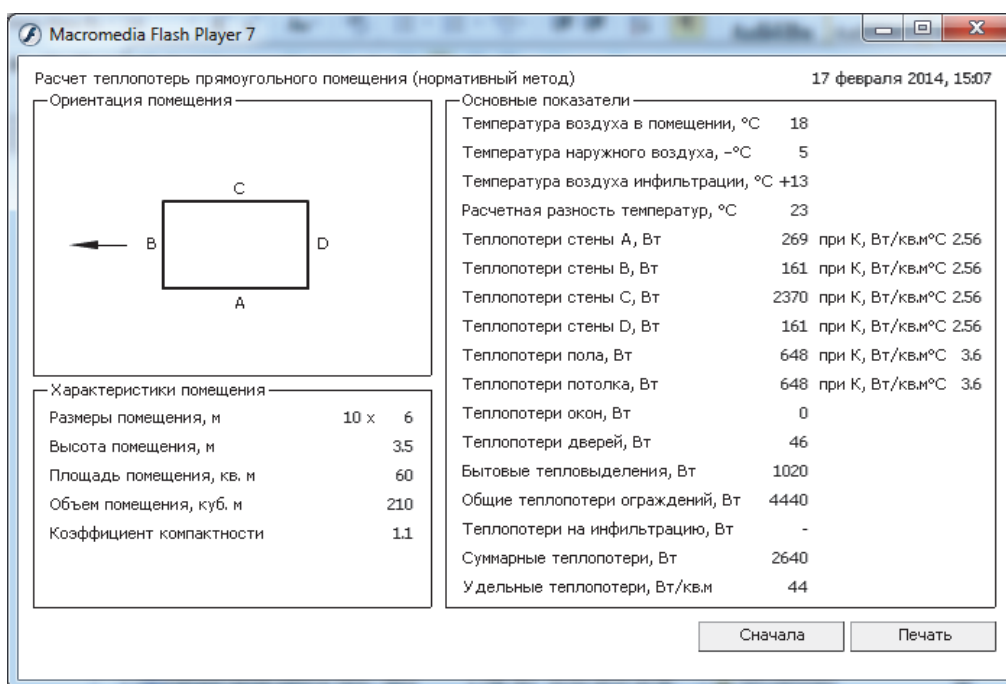


Рис. 13. Вид формы с результатами расчета теплового режима помещения

Порядок выполнения работы. Задание 1. Цель – исследовать влияние температур наружного воздуха и помещения, ориентации здания на суммарные тепловые потери $Q_{\text{сум}}$, потери через окна Q_o и двери Q_d .

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Подготовить основные и вспомогательные исходные данные для проведения вычислительного эксперимента в соответствии с индивидуальным заданием преподавателя. Основные исходные данные, которые будут использоваться на протяжении всего цикла работ, записать в рабочую тетрадь в форме табл. 15. Вспомогательные исходные данные для выполнения текущего задания записать в виде табл. 16.

2. В рабочей тетради составить в масштабе схему помещения с основными элементами конструкции.

3. Активизировать программу Heatcalc, изучить ее интерфейс и порядок работы с ней (см. выше).

4. Исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние параметров наружного климата и параметров микроклимата помещения без учета инфильтрации на его тепловой режим в соответствии с дополнительными исходными данными табл. 16. В процессе проведения эксперимента его результаты записываются в рабочую тетрадь в эту же таблицу. Результирующее значение суммарных теплопотерь помещения выводится в левой нижней части формы в пункте «Суммарные теплопотери помещения, Вт» (рис. 12).

Таблица 16

Исходные данные изменения характерных параметров микроклимата и результаты вычислительного эксперимента

$t_{в},$ °C	$t_{н},$ °C	Ориентация	$Q_{сум},$ Вт	$Q_{о},$ Вт	$Q_{д},$ Вт	$q,$ Вт/м ²
18	-10	См. табл. Г1				
20	-10	“				
22	-10	“				
24	-10	“				
22	0	“				
22	-5	“				
22	-10	“				
22	-15	“				
22	-20	“				
22	-25	“				
22	-10	Юг				
22	-10	Запад				
22	-10	Север				
22	-10	Восток				

Подробные данные с результатами вычислительного эксперимента для каждого варианта выводятся на вкладку (рис. 13), которая открывается с помощью кнопки «Сводка» (рис. 12). В частности в левом верхнем и нижнем блоке можно проверить правильность задания ориентации и размеров помещения.

5. Проанализировать полученные результаты и представить их в виде функциональных зависимостей $Q_{\text{сум}} = f(t_{\text{в}}, t_{\text{н}})$, $Q_o = f(t_{\text{в}}, t_{\text{н}})$, $Q_d = f(t_{\text{в}}, t_{\text{н}})$. Влияние ориентации здания представить в виде столбчатой диаграммы.

6. Сформулировать на основе проведенного количественного анализа неформальные выводы и рекомендации по повышению энергоэффективности помещения.

Задание 2. Цель – исследовать влияние теплотехнических свойств материалов наружных стен помещения на суммарные тепловые потери.

Работа выполняется в следующем порядке:

1. В качестве основных исходных данных используется базовый вариант задания 1 выполняемой лабораторной работы.

2. Записать вспомогательные исходные данные для выполнения текущего задания в виде табл. 17. Температура воздуха в помещении $t_{\text{в}}$ и наружного воздуха $t_{\text{н}}$, соответствующая наиболее холодной пятидневке для отдельного региона Беларуси, дополнительно выдаются преподавателем.

Таблица 17

Конструкционные материалы наружных ограждений и результаты вычислительного эксперимента ($t_{\text{в}} =$ °С, $t_{\text{н}} =$ °С)

Материал наружных ограждений	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	Суммарные потери $Q_{\text{сум}}$, Вт	Потери через наружные стены, Вт	
				Q_i , Вт	Q_j , Вт
Брус хвойный	500	0,09			
Сруб бревенчатый	700	0,1			
Кирпич керамический полнотелый	1800	0,56			
Кирпич керамический пустотелый	1400	0,41			
Кирпич силикатный	1800	0,70			
Газобетон D500	500	0,12			
Газобетон D700	700	0,18			
Пенобетон D800	800	0,21			
Пенобетон D1000	1000	0,29			

Материал наружных ограждений	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	Суммарные потери $Q_{\text{сум}}$, Вт	Потери через наружные стены, Вт
Полистеролбетон	600	0,1		
Шлакобетон	1200	0,35		
Керамзитобетон	1600	0,58		
Железобетон	2500	1,69		
Каркас с заполнителем минеральной ватой	125	0,044		
Каркас с заполнителем стекловатой	75	0,045		
Каркас с заполнителем шлаковатой	350 450	0,04 0,07		
Каркас с заполнителем пенополистеролом	50	0,041		
Каркас с заполнителем керамзитом	400	0,12		

3. Активизировать программу Heatcalc и исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние теплотехнических свойств материала наружных стен помещения на его тепловой режим без учета инфильтрации воздуха в соответствии с исходными данными табл. 17. В процессе проведения эксперимента его результаты записываются в рабочую тетрадь в эту же таблицу.

Подробные данные с результатами вычислительного эксперимента для каждого варианта выводятся на вкладку (рис. 13), которая открывается с помощью кнопки «Сводка» (рис. 12).

4. Проанализировать полученные результаты и представить их в виде столбчатой диаграммы.

5. Сформулировать на основе проведенного количественного анализа неформальные выводы и рекомендации по повышению энергоэффективности помещения.

Задание 3. Цель – исследовать влияние теплотехнических свойств окон помещения на суммарные тепловые потери.

Работа выполняется в следующем порядке:

1. В качестве основных исходных данных используется базовый вариант задания 1 выполняемой лабораторной работы.

2. Записать вспомогательные исходные данные для выполнения текущего задания в виде табл. 18. Температура воздуха в помещении $t_{\text{в}}$ и наружного воздуха $t_{\text{н}}$ берутся в соответствии с заданием 2 выполняемой лабораторной работы.

3. Активизировать программу Heatcalc и исследовать с помощью вычислительного эксперимента влияние теплотехнических свойств окон помещения на его тепловой режим с учетом и без учета инфильтрации воздуха в соответствии с исходными данными табл. 18. В процессе проведения эксперимента его результаты записываются в рабочую тетрадь в эту же таблицу.

Подробные данные с результатами вычислительного эксперимента для каждого варианта выводятся на вкладку (рис. 13), которая открывается с помощью кнопки «Сводка» (рис. 12).

4. Проанализировать полученные результаты и представить их в виде столбчатой диаграммы.

5. Сформулировать на основе проведенного количественного анализа неформальные выводы и рекомендации по повышению энергоэффективности помещения.

Таблица 18

Конструкция окон и результаты вычислительного эксперимента
($t_{в} = \quad \text{°C}$, $t_{н} = \quad \text{°C}$)

Конструкция окон	Потери теплоты, Вт			
	Общие Q	Суммарные $Q_{\text{сум}}$	Через окна Q_o	Инфильтрация $Q_{и}$
Инфильтрация не учитывается				
1 стекло				–
2 стекла, спаренные переплеты				–
2 стекла, отдельные переплеты				–
1-камерный стеклопакет				–
2-камерный стеклопакет 2×8 мм				–
2-камерный стеклопакет 2×12 мм				–
Тройное остекление				–
Стекло и 1-камерный стеклопакет				–
Стекло и 2-камерный стеклопакет				–
Инфильтрация учитывается				
1 стекло				
2 стекла, спаренные переплеты				
2 стекла, отдельные переплеты				

Конструкция окон	Потери теплоты, Вт			
	Общие Q	Суммарные $Q_{\text{сум}}$	Через окна Q_o	Инфильтрация $Q_{\text{и}}$
2-камерный стеклопакет 2×8 мм				
2-камерный стеклопакет 2×12 мм				
Тройное остекление				
Стекло и 1-камерный стеклопакет				
Стекло и 2-камерный стеклопакет				

Контрольные вопросы

1. Какие конструктивные элементы здания влияют на его теплотребление?
2. Какими процессами определяются основные теплотери в здании?
3. Какие факторы и процессы определяют тепловой режим здания?
4. В чем сущность процесса переноса теплоты теплопроводностью?
5. Что такое теплопередача? Какие параметры входят в уравнение теплопередачи для плоской многослойной стенки?
6. К какому процессу относится инфильтрация воздуха?
7. Как устроены стеклопакеты и на какие виды они подразделяются?
8. Каким образом можно уменьшить теплотери через стены здания?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свойства топлива

Таблица А1

Состав рабочей массы и теплота сгорания твердых и жидких топлив

Бассейн, месторождение	Марка	Состав рабочей массы топлива, %								Теплота сгорания, МДж/кг
		W^p	A^p	$S_{л}^p$	$S_{ор}^p$	C^p	H^p	N^p	O^p	Q_n^p
Уголь										
Донецкий	Д	13,0	24,4	1,8	1,3	47,0	3,4	1,0	8,1	18,50
	Г	10,0	25,2	2,1	1,1	51,2	3,6	0,9	5,9	20,47
	Г	17,0	34,9	1,7	0,8	36,8	2,7	0,7	5,4	14,44
	ОС	5,0	23,8	2,1	0,7	61,9	3,2	1,1	2,2	24,20
	Т	6,0	25,4	1,6	0,8	61,1	2,9	1,0	1,2	23,40
	А	8,5	30,2	1,1	0,5	56,4	1,1	0,5	1,7	19,97
Львовско-Волын- ский	Г	10,0	22,5	2,1	0,9	53,3	3,5	1,0	6,7	20,85
	ГЖ	8,0	32,2	2,1	0,7	48,7	3,3	0,7	4,3	35,0
Подмосковный	2Б	32,0	28,6	1,7	1,0	26,0	2,1	0,4	8,2	9,34
Кизловский	Г	6,0	34,9	3,5	1,8	45,4	3,4	0,8	4,2	18,38
Печорский	Д	11,5	27,4	1,6	0,9	45,2	3,1	1,5	8,2	17,54
	Ж	5,5	28,5	0,9		55,5	3,6	1,7	4,4	22,02
Челябинский	3Б	17,0	32,4	0,9		35,9	2,6	1,0	10,2	13,44
Свердловская об- ласть										
Волчанское	3Б	22,0	31,2	0,2		29,7	2,4	0,6	13,9	10,63
Богословское	3Б	22,0	31,2	0,2		30,4	2,3	0,6	13,3	10,47
Кузнецкий	Д	12,0	13,2	0,4		58,6	4,2	1,9	9,7	22,86
	Г	8,0	14,3	0,5		63,3	4,4	2,1	7,4	25,25
	1СС	9,0	18,2	0,3		61,5	3,6	1,5	5,9	23,57
	Т	7,0	18,6	0,5		67,0	2,8	1,6	2,5	25,12
	Г	12,0	23,8	0,5		51,4	3,8	1,9	6,6	20,01
	ОС	21,0	16,6	0,4		56,2	2,8	1,3	1,7	20,98
	А	10,0	11,7	0,3		72,8	1,6	1,0	2,6	26,04
Кузнецкий, угле- разрезы	Г	11,0	13,4	0,3		59,3	4,1	1,9	10,0	22,94
	1СС	12,0	11,4	0,4		63,6	3,4	1,5	7,7	23,99
	Т	9,0	15,5	0,4		66,7	2,8	1,6	4,0	24,70
Кемеровская об- ласть										
Уропское	Д	16,6	8,3	0,3		58,0	3,8	1,7	11,3	22,02
Караканское	Д	17,3	11,2	0,3		54,7	3,6	1,6	11,3	20,43
Сибиргинское	Т, А	8,0	20,7	0,3		66,7	1,5	1,4	1,4	23,49
Канско-Ачинский										
	Назаровское	2Б	39,0	7,3	0,4	37,6	2,6	0,4	12,7	13,02
Березовское	2Б	33,0	4,7	0,2	44,2	3,1	0,4	14,4	15,66	
Красноярский край										
Боготольское	1Б	44,0	6,7	0,5	34,3	2,4	0,3	11,8	11,81	
Черногорское	Д	14,0	17,2	0,5	52,9	3,5	1,4	10,5	20,10	

Окончание табл. А1

Бассейн, месторождение	Марка	Состав рабочей массы топлива, %								Теплота сгорания, МДж/кг
		W^p	A^p	$S_{л}^p$	$S_{оп}^p$	C^p	H^p	N^p	O^p	Q_H^p
Иркутская область Черемховское Мугунское	Д	13,0	27,0	1,0		46,2	3,4	0,7	8,7	17,88
	ЗБ	22,0	14,3	0,9	0,5	46,6	3,7	0,9	11,1	17,50
Бурятская АССР Гусиноозерское Никольское	ЗБ	23,0	19,3	0,7		43,6	3,0	0,6	9,8	16,16
	Д,ДГ	6,0	18,2	0,4		59,6	4,2	1,1	10,5	19,4
Читинская область Букачачинское Черновское	Г	8,0	10,1	0,6		67,2	4,7	0,8	8,6	26,04
	Б2	33,5	9,6	0,5		42,7	2,8	0,7	10,2	15,37
Хабаровский край Райчихинское Ургальское	2Б	37,5	9,4	0,3		37,7	2,3	0,5	12,3	12,73
	Г	7,5	29,6	0,4		50,9	3,6	0,6	7,4	19,97
Якутская АССР Сангарское Нерюнгринское	Д	10,0	13,5	0,2		61,2	4,7	0,8	9,6	24,24
	СС	10,0	19,8	0,2		60,0	3,1	0,6	6,3	22,48
Приморский край Липовецкое Подгородненское Артемовское Партизанское	Д	6,0	33,8	0,4		46,1	3,6	0,5	9,6	18,13
	Т	4,0	40,3	0,4		48,7	2,6	0,3	3,7	18,38
	ЗБ	23,0	30,8	0,3		31,6	2,6	0,6	11,0	11,74
	Г6	5,5	34,0	0,4		49,8	3,2	0,8	6,3	19,47
Горючие сланцы ¹⁾										
Эстонсланец. Шахты, разрезы	–	12,0	44,4 +16,7	1,0	0,4	19,9	2,6	0,1	2,9	9,00
Ленинград – сланец	–	11,0	48,2 +17,4	1,0	0,3	17,3	2,2	0,1	2,5	7,66
Кашпирский	–	14,0	58,9 +8,3	1,2	1,2	10,9	1,4	0,3	3,8	4,60
Коцебинское	–	35,0	32,5 +8,5	0,6	1,7	15,6	1,9	0,2	4,0	6,3
Торф, дрова										
Росторф: фрезерный кусковой	–	50,0	6,3	0,1		24,7	2,6	1,1	15,2	8,12
	–	40,0	6,6			29,85	3,2	1,23	19,12	10,2
Древесная щепа	–	30,0	1,1	0,1		35,1	4,2	3,4	26,1	12,6
Дрова	–	40,0	0,6	–	–	30,0	3,6	0,4	25,4	10,2
Мазут										
Мазут низкосерни- стый	40 и 100	0,15	0,03	0,39		87,33	11,90	–	0,20	41,68
Мазут малосерни- стый	40 и 100	0,20	0,03	0,85		86,58	12,04	–	0,30	40,53
Мазут сернистый	40 и 100	0,49	0,05	1,80		85,71	11,45	–	0,50	39,57
Мазут высокосер- нистый	40 и 100	1,00	0,06	2,55		85,04	10,64	–	0,71	39,06

¹⁾ Минеральная масса горючих сланцев включает золу (первое слагаемое) и диоксид углерода карбонатов (второе слагаемое).

Таблица А2

Состав и теплота сгорания газобразных топлив

№ п/п	Газопровод	Состав газа по объему, %										Низшая теплота сгорания Q_n^p , МДж/м ³		
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	CO	CO ₂	N ₂	O ₂		H ₂ S	H ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Природные газы													
1	Уренгой – Надым – Пунга-Ухта	98,72	0,12	0,01	<0,01	–	–	–	0,14	1,00	–	–	–	35,50
2	Уренгой – Ужгород	98,90	0,12	0,01	0,01	–	–	–	0,06	0,90	–	–	–	35,59
3	Уренгой – Новопсков	98,90	0,13	0,01	<0,01	–	–	–	0,08	0,87	–	–	–	35,59
4	Уренгой – Сургут – Челябинск	98,24	0,29	0,20	0,09	0,04	–	–	0,14	1,00	–	–	–	35,80
5	Надым – Пунга-Н. Тура – Свердловск – Челябинск	98,67	0,16	0,08	0,01	–	–	–	0,08	1,00	–	–	–	35,59
6	Н. Новгород – Иваново-Череповец	98,99	0,25	0,04	0,02	–	–	–	0,10	0,60	–	–	–	35,75
7	Бухара – Урал	94,24	3,00	0,89	0,39	0,17	0,13	–	0,28	0,90	–	–	–	37,56
8	Средняя Азия – Центр	94,08	2,80	0,73	0,30	0,07	0,02	–	1,00	1,00	–	–	–	36,76
9	Саратов – Москва	90,29	2,80	1,10	0,75	0,34	0,20	–	0,32	4,20	–	–	–	37,01
10	Мострансгаз (кольцо)	96,57	1,40	0,40	0,18	0,07	0,03	–	0,15	1,20	–	–	–	36,30
11	Оренбург – Александров Гай	86,43	3,90	1,72	0,87	0,30	0,07	–	0,01	6,70	–	–	–	36,80

№ п/п	Газопровод	Состав газа по объему, %											Низшая теплота сгорания $Q_{н}^p$, МДж/м ³				
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ S		H ₂			
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15		
1	2																
Полупные газы																	
12	Каменный Лог – Пермь	38,70	22,60	10,70	2,70	0,70	-	-	-	23,80	-	-	0,80	-	-	-	42,37
13	Ярино – Пермь	38,00	25,10	12,50	3,30	1,302	-	-	-	18,70	-	-	1,10	-	-	-	46,89
14	Кулешовка – Самара	58,00	17,20	7,40	2,00	0,502	-	-	0,80	13,60	-	-	0,50	-	-	-	41,74
15	Безенчук – Чапаевск	42,70	19,60	12,60	5,10	1,302	-	-	1,00	16,90	-	-	0,80	-	-	-	46,98
16	Барса – Гельмес – Вышка-Небит – Даг	93,90	3,40	1,30	0,70	0,202	-	-	0,40	0,10	-	-	-	-	-	-	38,10
17	На входе в г. Краснодар, Крымск, Новороссийск	91,20	3,90	2,00	0,90	0,202	-	-	1,80	-	-	-	-	-	-	-	38,27
18	Вознесенская – Грозный, Карабулак – Грозный	76,70	13,20	5,40	2,50	2,202	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47,02
19	Тэбук – Сосновка	48,20	18,20	11,90	3,30	1,002	-	-	0,90	16,50	-	-	-	-	-	-	45,13
20	Туймазы – Уфа	50,00	22,00	9,80	1,20	0,402	-	-	-	16,60	-	-	-	-	-	-	43,04
21	Шкапово – Туймазы	44,10	22,00	5,20	1,40	0,302	-	-	-	27,00	-	-	-	-	-	-	36,63
22	Казань – Булульма – Лениногорск – Альметьевск	53,60	22,80	6,10	0,90	0,202	-	-	0,20	15,80	-	-	-	-	-	-	40,61
Промышленные газы																	
23	Газ доменных печей	0,30	-	-	-	-	-	28,00	10,50	58,50	-	-	-	-	2,70	-	3,94
24	Газ коксовых печей	25,00	2,00	-	-	-	-	7,00	3,00	4,00	1,00	-	-	58,00	-	-	18,00

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Характеристики топок

Таблица Б1

Расчетные характеристики камерных топок с жидким шлакоудалением для котлов производительностью $D \geq 45$ кг/с

№ п/п	Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	Тепловое напряжение сечения зоны активного горения	Тепловое напряжение объема		Потери тепла от механической неполноты сгорания		Доля зола, уносимой газами
				топки по условиям горения	камеры сгорания	в зоне активного горения	в топке	
		α_t	$q_F, \text{кВт/м}^2$	$q_v, \text{кВт/м}^3$	$q_{\text{рк.г}}, \text{кВт/м}^3$	$q_{4\text{а.г}}, \%$	$q_4, \%$	$a_{\text{ун}}$
1	Открытые топки							
1.1	Антрацитовый штыб	1,20–1,25	3,8–4,0	145	450–500	12	6	0,90
1.2	Тощие угли	1,20–1,25	5,2	185	640–700	10	4	0,85
1.3	Каменные угли	1,15–1,20	5,2	185	700–800	8	0,5	0,80
1.4	Бурые угли	1,15–1,20	5,2	210	700–800	5	0,3	0,65–0,80
2	Полуоткрытые топки							
2.1	Антрацитовый штыб	1,20–1,25	4,8–5,0	170	600–700	12	5	0,90
2.2	Тощие угли	1,20–1,25	5,7	200	600–700	10	4	0,85
2.3	Каменные угли	1,15–1,20	5,2	200	700–800	8	0,5	0,70–0,80
2.4	Бурые угли	1,15–1,20	5,2	230	700–800	5	0,3	0,65–0,70

Потери теплоты от химической неполноты сгорания в топке котла принимаются $q_3 = 0$.

Таблица Б2
Расчетные характеристики камерных топок с твердым шлакоудалением для котлов производительностью $D \geq 10$ кг/с

№ п/п	Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_T	Тепловое напряжение объема топки по условиям горения $q_v, \text{кВт/м}^3$	Потери тепла от механической неполноты сгорания		Доля золы, уносимой газами $a_{\text{ун}}$
				в зоне активно- го горения $q_{4\text{акт}}, \%$	в топке $q_4, \%$	
1	Антрацитовый штыб	1,20–1,25	140	15	7–8	0,95
2	Тощие угли	1,20–1,25	160	10	5	0,95
3	Каменные угли	1,15–1,20	175	8	1,0–1,5	0,95
4	с выходом летучих $V^{\text{л}} \geq 25\%$	1,15–1,20	160	10	2–3	0,95
5	Отходы углеобогащения и ОК-П					
	Бурые угли	1,20–1,25	180	3–4	0,5	0,95
	малозольные с $A_{\text{п}} \leq 1$ кг·%/МДж	1,20–1,25	180	5	1–2	0,95
	многозольные с $A_{\text{п}} > 1$ кг·%/МДж					
	многозольные с теплотой сгорания летучих $Q_{\text{л}} < 20$ МДж/кг	1,20–1,25	180	10	3–4	0,95
6	Фрезерный торф	1,20	160	–	0,5–1,0	0,95
7	Сланцы	1,15–1,20	120	3	0,5	0,95

Меньшие значения α_T берутся для топок с газоплотными экранами, большие – при газовой сушке и низкотемпературном сжигании углей.

Меньшие значения q_4 берутся для малозольных топлив с $A_{\text{п}} \leq 1,4$ кг·%/МДж, большие – для топлив повышенной зольности.
 Потери теплоты от химической неполноты сгорания в топке котла принимаются $q_3 = 0$.

Таблица Б3

Расчетные характеристики камерных топок газомазутных котлов производительностью $D \geq 45 \text{ кг/с}$

№ п/п	Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_t	Тепловое напряжение объема топки по условиям горения $q_v, \text{ кВт/м}^3$	Суммарный недожог $q_3 + q_4, \%$ при нагрузках котла в процентах от номинальной	
				$D = 100$	$70 \leq D < 100$
1	Мазут	1,02–1,03 ¹⁾	200–220	0,10–0,15 (0,15–0,20) ²⁾	0,15–0,20 (0,20–0,25) ²⁾
2	Природный газ	1,03–1,05 ¹⁾	200–220	0,05–0,07	0,05–0,10 0,10–0,15

¹⁾ Меньшее значение – для топок с газоплотными экранами.

²⁾ Значения в скобках – для топок, не оборудованных газоплотными цельносварными экранами.

Таблица Б4

Расчетные характеристики слоевых топок для котлов производительностью $D \geq 1 \text{ кг/с}$

Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_t	Видимое теплонпряжение		Потери тепла		Доля золы, уносимой газами $\alpha_{ун}$	Температура дутьевого воздуха $t_{в}, ^\circ\text{C}$
		зеркала горения $q_F, \text{ кВт/м}^2$	объема топки $q_v, \text{ кВт/м}^3$	от химической неполноты сгорания $q_3, \%$	от механического недожета $q_4, \%$		
1. Топки с пневмомеханическими забрасывателями и цепными решетками обратного хода							
1.1. Каменные угли							
– типа донецкого, печерского и других марок Г, Д, Ж; $A_{п} = 5,5$	1,3–1,6	1390–1750	290–470	до 0,1	7,0	0,15	30
– типа сучанского марок Г, Д; $A_{п} = 6,5$	1,3–1,6	1270–1520	290–470	до 0,1	8,0	0,15	30

Продолжение табл. Б4

Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки $\alpha_{\text{т}}$	Видимое теплонепряжение		Потери тепла		Доля золы, уносимой газами $\alpha_{\text{ун}}$	Температура дутьевого воздуха $t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$
		зеркала горения $q_{\text{F}}, \text{кВт/м}^2$	объема топки $q_{\text{v}}, \text{кВт/м}^3$	от химической неполноты сгорания $q_3, \%$	от механического недожога $q_4, \%$		
1.2. Бурые угли – кузнецкие марок Г, Д; $A_{\text{п}} = 2,7$ – кузнецкие марок ГСС (выход летучих > 20%); $A_{\text{п}} = 2,2$ 1.2. Бурые угли – типа ирша-бородинского; $A_{\text{п}} = 1,8; W_{\text{п}} = 8,9$ – типа Назаровского; $A_{\text{п}} = 2,4; W_{\text{п}} = 12,5$ – типа азейского; $A_{\text{п}} = 4,0; W_{\text{п}} = 6,5$	1,3–1,6	1390–1750	290–470	до 0,1	4,0–7,0	0,15	30
	1,3–1,6	1390–1750	290–470	до 0,1	15,0	0,35	30
	1,3–1,6	1390–1750	290–470	до 0,1	4,5	0,50	до 200
	1,3–1,6	1270–1520	290–470	до 0,1	5,0	0,50	до 200
	1,3–1,6	1390–1750	290–470	до 0,1	5,5	0,50	до 200
2. Топки с пневмомеханическими забрасывателями и решеткой с поворотными колосниками							
2.1. Донецкий антрацит марок АС, АМ, АО; $A_{\text{п}} = 4,0$	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	11,0	0,15	30
2.2. Каменные угли							
– типа донецкого, печерского и других марок Г, Д, Ж; $A_{\text{п}} = 5,5$	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	8,0	0,15	30
– кузнецкие марок Г, Д; $A_{\text{п}} = 2,7$	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	6,5	0,20	30
– кузнецкие марок ГСС (выход летучих > 20%); $A_{\text{п}} = 2,2$	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	12,5	0,20	30

Продолжение табл. Б4

Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки $\alpha_{\text{г}}$	Видимое теплонапряжение		Потери тепла		Доля золы, уносимой газами $a_{\text{ун}}$	Температура дутьевого воздуха $t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$
		зеркала горения $q_{\text{F}}, \text{кВт/м}^2$	объема топки $q_{\text{v}}, \text{кВт/м}^3$	от химической неполноты сгорания $q_3, \%$	от механического недожога $q_4, \%$		
2.3. Бурые угли – типа ирша-бородинокого; $A_{\text{п}} = 1,8; W_{\text{п}} = 8,9$ – типа Назаровского; $A_{\text{п}} = 2,4; W_{\text{п}} = 12,5$ – типа азейского; $A_{\text{п}} = 4,0; W_{\text{п}} = 6,5$	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	5,0	0,20	до 200
	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	–	0,20	до 200
	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	6,5	0,20	до 200
3. Топки с цепной решеткой прямого хода							
3.1. Донецкий антрацит марок АС, АМ, АО; $A_{\text{п}} = 4,0$	до 1,6	900–1200	290–470	до 1,0	100	0,10	30
4. Топки с ручным забросом на неподвижные горизонтальные колосники							
4.1 Антрацит АК, АС, АМ	1,30–1,35	988–1047	291–465	2,0	6,5–9,3	32–55	25
4.2 Каменные угли – марок Д, Г; $A_{\text{п}} = 0,4–1,0$ – марок СС, Т; $A_{\text{п}} = 0,4–0,7$ – с шнурующей планкой	1,4	930	291–465	5,0	5,3	0,21	25; 150–200
	1,35	814–930	291–465	3,0	6–6,5	0,19	25; 150–200
	1,35	930	291	2,0	7,0	0,21	до 200

Окончание табл. Б4

Топливо	Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_t	Видимое теплонапряжение		Потери тепла		Доля золы, уносимой газами $a_{ун}$	Температура дутьевого воздуха $t_{в}, ^\circ\text{C}$
		зеркала горения $q_F, \text{кВт/м}^2$	объема топки $q_v, \text{кВт/м}^3$	от химической неполноты сгорания $q_3, \%$	от механического недожега $q_4, \%$		
4.3. Бурые угли – с $A_n = 1,6$ – с $A_n = 1,6; W_n = 2,4-3,1$ – сортированные с $A_n = 1,4-2,1; W_n = 3,1$ – с шурующей планкой	1,35/1,45	843–930	291–465	2/2,5	9,2/7,7	21/19	до 200
	1,4/1,55	581–756	291–465	3,5/4	9,3/7,6	18	до 200
	1,3	1047	291–465	2,0	7,1	20	до 200
	1,3	930	267	0,5	4,5–5,5	18	200
5. Топки с наклонными неподвижными колосниками							
5.1. Торф кусковой с $W^p = 40\%$	1,4	1279	233	до 2,0	2,0	15	200–250
5.2. Древесные отходы с $W^p = 50\%$	1,4	581	349	до 2,0	2,0	20/13	200–250
5.3. Древесная щепа	1,3–1,4	–	–	0,5–1,0	3,0–13,0	20,0	30
6. Топки скоростного горения							
6.1. Рубленая щепа с $W^p = 40-50\%$	1,2	580–698	291–349	1,0	2,0	–	200–250
6.2. Дробленые отходы и опилки с $W^p = 40-50\%$	1,3	233–465	291–349	1,0	2,0	–	200–250

Большее значение α_t – для котлов производительностью менее 3 кг/с.

Большее значение q_4 – для углей марки Г.

Цифры в знаменателе относятся к топкам с золовым помещением, в числителе – без золового помещения

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свойства воды и водяного пара

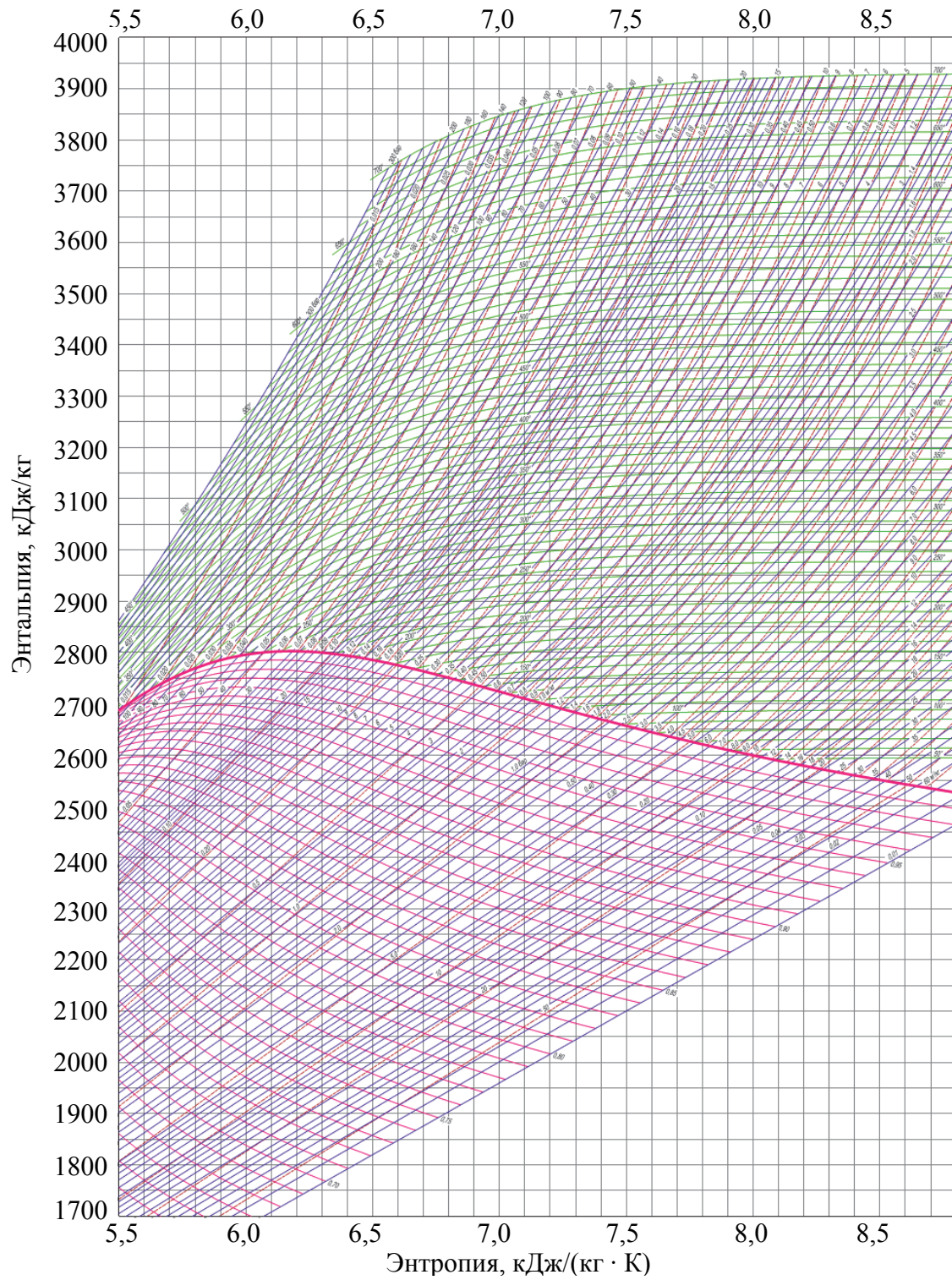


Рис. В1. hs -диаграмма водяного пара

Параметры воды и сухого насыщенного пара на линии насыщения

t	p	v'	v''	h'	h''	s'	s''
°С	МПа	м ³ /кг		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,000	2500,8	0,000	9,1544
10	0,0012271	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	0,1511	8,8995
20	0,002337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	0,2964	8,6663
30	0,004241	0,0010044	32,93	125,69	2555,6	0,4367	8,4523
40	0,007375	0,0010079	19,55	167,51	2573,6	0,5723	8,2560
50	0,012335	0,0010124	12,05	209,30	2591,6	0,7038	8,0751
60	0,01992	0,0010171	7,678	251,12	2609,2	0,8311	7,9084
70	0,03116	0,0010228	5,045	292,99	2626,4	0,9550	7,7544
80	0,04736	0,0010290	3,409	334,94	2643,1	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	376,98	2659,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	419,10	2675,8	1,3071	7,3545
110	0,14327	0,0010515	1,210	461,34	2691,3	1,4185	7,2386
120	0,19854	0,0010603	0,8917	503,7	2706,3	1,5278	7,1289
130	0,27011	0,0010697	0,6683	546,4	2720,6	1,6345	7,0271
140	0,3614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	1,7392	6,9304
150	0,4760	0,0010906	0,3926	633,2	2746,5	1,8418	6,8383
160	0,6180	0,0011021	0,3068	675,3	2757,8	1,9427	6,7508
170	0,7920	0,0011144	0,2426	719,3	2768,7	2,0419	6,6666
180	1,0027	0,0011275	0,1939	763,3	2778,4	2,1395	6,5858
190	1,2553	0,0011415	0,1564	807,6	2786,3	2,2358	6,5075
200	1,5550	0,0011565	0,1272	852,4	2793,0	2,3308	6,4318
210	1,9080	0,0011726	0,1044	897,6	2798,0	2,4246	6,3577
220	2,3202	0,0011900	0,08606	943,7	2801,4	2,5179	6,2848
230	2,7979	0,0012087	0,07147	990,2	2803,1	2,6101	6,2132
240	3,3480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803,1	2,7022	6,1425
250	3,978	0,0012512	0,05005	1086,1	2801,0	2,7934	6,0721
260	4,694	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,4	2,8851	6,0014
270	5,505	0,0013023	0,03560	1185,3	2789,7	2,9764	5,9298

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1

Характеристика помещений

Вариант	Помещение					Окна			Двери			Материал и толщина пола / потолка
	Ориентация	Размер $A \times B \times H$, м	Толщина стен δ , м	Стены наружные	Материал стен	Количество окон и стена	Размер окон $s_o \times h_o$, м	Тип окон	Количество дверей и стена	Размер дверей $s_d \times h_d$, м	Тип дверей	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Ю	4×5×2,5	0,5	А	Кирпич керамический пустотелый	1,А	1,2×1,5	Тройное остекление	1С	0,9×2,0	Деревянная филленчатая	Утепленный минватой 200 мм / деревянное перекрытие
2	3	4×4×2,5	0,3	А	Шлакобетон	1,А	1,0×1,5	1 стекло	1В	0,9×2,0	Щитовая	Утепленный стекловатой 200 мм / железобетон 100 мм
3	В	5×5×2,5	0,16	А, В, D	Брус	2,А; 1, D	1,0×1,5	2 стекла, раздельные переплеты	1С	0,9×2,0	Деревянная филленчатая	Пенополистирол 200 мм / деревянное перекрытие
4	С	5×6×2,5	0,15	А	Каркас с минватой	2,А	1,0×1,5	2-камерн., 2×8	1В	1,2×2,0	Щитовая с пенополистиролом	Газобетон 200 мм / утепленный минватой 10 мм

Продолжение табл. Г1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	Ю-3	6×6×2,5	0,25	А, В	Газобетон D500	2А, 1В	1,0×1,0	1 камерный	1С	1,2×2,0	Щитовая с минватой	Железобетон 200 мм / утепленный стекловатой 100 мм
6	С	4×5×3,2	0,5	А	Кирпич керамический полнотельный	1А	1,0×2,0	2 стекла, спаренные переплеты	1С	0,9×2,0	Щитовая с сотовым заполнением	Деревянное перекрытие / утепленный шлаковатой 100 мм
7	В	4×4×3,2	0,15	А	Каркас с текловатой	1А	1,0×2,0	2-камерн., 2×12	1В	1,2×2,4	Двойная	Утепленный минватой 200 мм / пенополистерол 100 мм
8	Ю	5×5×3,2	0,35	А	Каркас с пенополистеролом	2А	1,0×2,0	2-камерн., 2×8	1С	0,9×2,2	Филленчатая	Утепленный стекловатой 200 мм / утепленный керазитом 100 мм
9	3	5×6×3,2	0,4	А, В	Пенобетон D800	1А, 2В	1,0×2,0	2 стекла, раздельные переплеты	1С	1,2×2,2	Филленчатая	Утепленный шлаковатой 200 мм / деревянное перекрытие
10	Ю-В	6×6×3,2	0,3	А, В	Пенобетон D800	1А, 2В	1,5×2,0	2 стекла, спаренные переплеты	1D	1,2×2,2	Двойные	Пенополистерол 200 мм / железобетон 100 мм
11	С-В	6×7×4	0,16	А, В	Брус хвойный	2А, 3В	1,2×2,4	2-камерн., 2×8	1С	1,2×2,5	Двойные	Деревянные / деревянное перекрытие

Окончание табл. Г1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12	3	4×4×3,0	0,14	А	Брус хвойный	1А	1,0×2,0	2 стекла, раздельные переплетные плиты	1С	0,9×2,2	Филленчатая	Утепленный минерватой 120 мм / деревянное перекрытие
13	В	5×5×3,0	0,20	А, В	Газобетон D700	2В	1,0×2,0	Тройное остекление	1А	0,9×2,2	Двойные	Пенополистерол 150 мм / пенополистерол 150 мм
14	3	4×6×2,4	0,16	А, В	Брус хвойный	1А, 2В	1,0×1,5	2 стекла, раздельные переплетные плиты	1D	0,9×2,1	Филленчатая	Деревянные / деревянное перекрытие
15	С-3	6×6×3,0	0,25	А	Кирпич керамический полнотелый	2А	1,0×2,2	2-камерн., 2×8	1D	0,9×2,2	Филленчатая	Утепленный керамзитом 100 мм / железобетон 160 мм
16	В	6×6×3,0	0,4	А	Кирпич керамический пустотелый	3А	1,5×2,0	2-камерн., 2×8	1С	0,9×2,2	Щитовая с пенополистиролом	Пенополистерол 100 мм / пенополистерол 100 мм
17	3	5×6×2,5	0,1	В, С	Каркас с минерватой	2В, 1С	1,0×1,5	2 стекла, раздельные переплетные плиты	1D	0,9×2,0	Щитовая с сотовым заполнением	Пенополистерол 100 мм / утепленный минватой 50 мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника: учебник для вузов / под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 712 с.
2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред А. В. Клименко и В. М. Зорина. – М.: МЭИ, 2004. – 564 с.
3. Быстрицкий, Г. Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий: учеб. пособие / Г. Ф. Быстрицкий – М.: Издат. центр «Академия», 2003. – 304 с.
4. Липов, Ю. М. Котельные установки и парогенераторы / Ю. М. Липов, Ю. М. Третьяков. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592 с.
5. Володин, В. И. Теплофизика и энергетический менеджмент в строительстве: учеб. пособие / В. И. Володин. – Минск: БГТУ, 2006. – 200 с.
6. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод / Центральный котлотурбинный институт. – СПб., 1998. – 258 с.
7. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.02-91-2009 (02250). – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – 27 с.
8. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Правила расчета: ТКП 45-4.02-129-2009 (02250). – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – 53 с.
9. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006 (02250) с изменениями. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2007. – 32 с.
10. Программа расчета коэффициентов полезного действия котельных агрегатов по результатам балансовых испытаний [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: http://energosoft.info/soft_teplotex_221_230.html.
11. Программа расчета систем теплоснабжения [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.enek.ru/soft.htm#sct>.
12. Расчет теплопотерь помещения [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: http://www.energosoft.info/soft_teplotex_211_220.html.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Лабораторная работа № 1. Определение влияния состава топлива на его характеристики	5
Лабораторная работа № 2. Определение эффективности работы парового котла	11
Лабораторная работа № 3. Определение энергетической эффективности теплового насоса.....	23
Лабораторная работа № 4. Исследование тепловой эффективности теплопроводов	31
Лабораторная работа № 5. Исследование теплового режима помещения	40
Приложение А	52
Приложение Б	56
Приложение В	62
Приложение Г	64
Литература.....	67

Учебное издание

Володин Виктор Иванович

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Лабораторный практикум

Редактор *Ю. Д. Нежикова*
Компьютерная верстка *Я. Ч. Болбот*
Корректор *Ю. Д. Нежикова*

Издатель:

УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.