

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением
по химико-технологическому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по химико-технологическим специальностям*

Минск 2018

УДК 620.9(072):332.146:330.322
ББК 31.19я75
Э65

Авторы :

*А. С. Дмитриченко, Т. Б. Карлович,
С. В. Здитовецкая, Г. С. Сидорик*

Рецензенты :

кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые
источники энергии» Белорусского национального
технического университета (заведующий кафедрой доктор
физико-математических наук, профессор *В. Г. Баитовой*;
доктор физико-математических наук, доцент *А. Г. Рекс*);
заведующий кафедрой энергетики
УО «Белорусский государственный аграрно-технический
университет» кандидат технических наук,
доцент *В. А. Коротинский*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или
ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образо-
вания «Белорусский государственный технологический университет».*

Энергосбережение : учеб.-метод. пособие для студентов
Э65 химико-технологических специальностей / А. С. Дмитриченко
[и др.]. – Минск : БГТУ, 2018. – 90 с.
ISBN 978-985-530-665-9.

В учебно-методическое пособие включены разделы, касающиеся
расчета параметров энергосберегающих инвестиционных проектов. Каж-
дый из них содержит теоретическое описание энергосберегающих меро-
приятий, примеры решения и задачи для самостоятельной работы. Также
рассмотрены различные методы и способы экономии энергии на этапах
ее получения, преобразования, транспортировки и потребления.

Пособие предназначено для студентов химико-технологических
специальностей, изучающих дисциплины, связанные с энергосбереже-
нием и энергетическим менеджментом, будет полезно студентам ин-
женерно-технических специальностей.

УДК 620.9(072):332.146:330.322
ББК 31.19я75

ISBN 978-985-530-665-9 © УО «Белорусский государственный
технологический университет, 2018
© Дмитриченко А. С., Карлович Т. Б.,
Здитовецкая С. В., Сидорик Г. С., 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

Использование тепловой и электрической энергии является необходимым условием жизнедеятельности человека и создания благоприятных условий его существования. Для получения энергии требуется топливо (нефть, газ, уголь, ядерное горючее, дрова) или другие первичные источники (солнце, ветер, вода, тепло земли). Энергия, заключенная в этих источниках, бесполезна до тех пор, пока она не преобразуется в необходимые энергетические услуги для конечного потребителя.

Ускорение научно-технического прогресса во всех странах мира требует постоянных и с каждым годом возрастающих выработки и потребления энергетических ресурсов. Это, в свою очередь, вызывает рост потребления углеводородного сырья, запасы которого истощаются. Постоянно растущие цены на природные ресурсы и проблемы с их получением заставляют все страны принимать меры к снижению их потребления, повсеместно использовать нетрадиционные возобновляемые источники энергии, заниматься эффективным расходованием энергоресурсов.

Все эти проблемы являются актуальными и для Республики Беларусь, так как ее энергетика, будучи одним из базовых секторов экономики, включает в себя выработку, преобразование, передачу и распределение всех видов энергии. Она в значительной степени зависит от внешних поставок первичных энергетических ресурсов, импортируемых преимущественно из России. В нашей стране энергозатраты на выпуск продукции превышают аналогичные показатели промышленно развитых стран. Поэтому повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и создание условий для целенаправленного перевода экономики Республики Беларусь на энергосберегающий путь развития является актуальной задачей.

Цель данного учебно-методического пособия – ознакомление студентов с комплексным анализом, который применяется для решения проблем, связанных с эффективным использованием энергии. В основе такого подхода лежат общие принципы, относящиеся к производству, передаче и потреблению энергии. Эти принципы включают два этапа анализа: первый из них касается рационального использования энергии на предприятиях, второй

подразумевает расчет экономической эффективности внедряемых энергосберегающих мероприятий. Обучение практическим навыкам в пособии осуществляется с помощью доступных примеров.

Учебно-методическое пособие состоит из восьми разделов, содержащих как теоретический, так и практический материал. Шесть разделов охватывают описание различных способов экономии тепловой и электрической энергии при ее производстве, распределении и потреблении. Два – посвящены статическим и динамическим методам оценки экономической эффективности инвестиционных проектов.

Структура и содержание рукописи позволяют обеспечить понимание и усвоение студентами основных законов потребления энергии, знакомят с конструкциями наиболее распространенных типов энергосберегающих устройств и основными схемами энергоэффективных технологий, их свойствами и характеристиками, а также позволяют изучить способы применения полученных знаний для решения конкретных инженерных задач.

ТОПЛИВО.

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Топливо – горючее вещество, применяемое для получения теплоты его сжиганием [1].

Топливо по происхождению делят на природное и искусственное. К природному относят органическое топливо, добываемое непосредственно из недр земли (уголь, торф, нефть, горючие сланцы, природный газ и т. п.). Искусственное топливо получают после переработки природного топлива на газоперерабатывающих, нефтеперерабатывающих, металлургических и других предприятиях с целью выделения из него различных ценных продуктов. Примерами искусственного топлива являются кокс, доменный, коксовый и генераторный газы, мазут, различные брикеты, древесный уголь, моторное топливо, бензин, керосин, ядерное топливо и т. п.

Природное органическое топливо является невозобновляемым энергетическим ресурсом, невозполнимым в настоящую геологическую эпоху. Отличительной особенностью невозобновляемых энергетических ресурсов (особенно угля, нефти и газа) является их высокий энергетический потенциал и относительная доступность, поэтому их извлечение целесообразно.

По агрегатному состоянию топливо бывает твердое, жидкое и газообразное.

Твердое топливо. Ископаемое твердое топливо (за исключением сланцев) – это продукт разложения органической массы растений. Торф представляет собой плотную массу, образовавшуюся из перегнивших остатков болотных растений, и является самым молодым видом топлива. Следующими по «возрасту» идут бурые угли, представляющие собой землистую или черную однородную массу, которая при длительном хранении на воздухе частично окисляется и рассыпается в порошок. Затем следуют каменные угли, которые обычно обладают повышенной прочностью и меньшей пористостью. Органическая масса наиболее старых из них – антрацитов претерпела наибольшие изменения и на 93% состоит из углерода. Антрацит отличается высокой твердостью.

Возобновляемым твердым топливом является древесина. Доля ее в энергобалансе мира в данный момент невелика, но в некоторых регионах древесина (чаще ее отходы) используется для получения теплоты.

Более качественным топливом по сравнению с древесиной являются брикеты – прессованные отходы деревообработки (щепа, опилки, стружка и т. п.), сельского хозяйства (солома, шелуха, кукуруза и т. п.), торфа. В основе технологии производства брикетов лежит процесс прессования отходов под высоким давлением (при нагревании или без него).

Жидкое топливо. В основном жидкое топливо получают переработкой нефти. Нефть – это горючее полезное ископаемое, представляющее собой бурюю жидкость, которая содержит в растворе газообразные и легколетучие углеводороды и обладает своеобразным смоляным запахом. При перегонке нефти получают ряд продуктов, имеющих важное техническое значение: бензин, керосин, смазочные масла, а также вазелин, применяемый в медицине и парфюмерии.

Общие запасы нефти в мире ниже, чем угля, но она является более удобным для использования топливом, особенно в переработанном виде. После подъема через скважину нефть направляется потребителям в основном по нефтепроводам, железной дороге или в танкерах.

Газообразное топливо. К газообразному топливу относится прежде всего природный газ, основным компонентом которого является метан CH_4 .

При добыче нефти выделяется так называемый попутный газ, содержащий меньше метана, чем природный, но больше высших углеводородов. Поэтому при его сгорании образуется большее количество теплоты.

В промышленности и быту находит широкое применение сжиженный газ, получаемый при первичной обработке нефти и попутных нефтяных газов. Также производятся технический пропан, технический бутан и их смеси.

Природный газ располагается в залежах, представляющих собой «купола» из водонепроницаемого слоя (типа глины), под которым в пористой среде (песчаник) под давлением находится газ, состоящий в основном из метана CH_4 . На выходе из скважины газ очищается от песчаной взвеси, капель конденсата и других вклю-

чений и подается в магистральный газопровод длиной несколько тысяч километров. Общий расход газа для поддержания давления в газопроводе составляет 10–12% от всего прокачиваемого объема газа. Поэтому транспорт газообразного топлива является весьма энергозатратным.

В последнее время большое применение находит биогаз – продукт анаэробной ферментации (сбраживания) органических отходов (навоза, растительных остатков, мусора, сточных вод и т. д.).

Весьма перспективным видом топлива, обладающим в три раза большей удельной энергоемкостью по сравнению с нефтью, является водород, научно-экспериментальные работы по изысканию экономичных способов промышленного получения которого активно ведутся в настоящее время. Запасы водорода неистощимы и не связаны с каким-то регионом планеты. На Земле водород присутствует только в связанном состоянии (например, в молекулах воды), однако в космическом пространстве запасы водорода не ограничены. При его сжигании образуется вода, не загрязняющая окружающую среду. Водород удобно хранить, распределять по трубопроводам и транспортировать без больших затрат. Одним из способов получения водорода является процесс электролиза. Он имеет значительное преимущество, так как приводит к обогащению кислородом окружающей среды. Широкое применение водородного топлива может уменьшить потребление органического и ядерного топлива, удовлетворить возрастающие потребности в энергии, а также способствовать снижению загрязнения окружающей среды.

Ядерное топливо. Природным видом ядерного топлива являются тяжелые ядра урана и тория. Энергия в виде теплоты высвобождается под действием медленных нейтронов при делении изотопа ^{235}U , который составляет в природном уране 1/140 часть. В качестве сырья могут использоваться ^{238}U и ^{232}Th . При делении всех ядер, содержащихся в 1 кг урана, выделяется энергия, эквивалентная 2,5 тыс. т высококачественного каменного угля с теплотой сгорания 35 МДж/кг (8373 ккал/кг).

Ядерное топливо используется в ядерных реакторах, где оно обычно располагается в герметично закрытых тепловыделяющих элементах (ТВЭЛлах) в виде таблеток размером в несколько сантиметров.

К ядерному топливу предъявляются высокие требования по химической совместимости с оболочками ТВЭЛлов, у него должны

быть достаточная температура плавления и испарения, хорошая теплопроводность, небольшое увеличение объема при нейтронном облучении.

Свойства топлива. Свойства топлива зависят главным образом от его химического состава. Основным элементом любого топлива природного происхождения является углерод (его содержание составляет от 30 до 85% массы). В состав топлива также входят водород, кислород, азот, сера, зола и влага.

Элементный состав твердых и жидких топлив записывается в виде суммы содержания в них углерода С, водорода Н, кислорода О, серы S, азота N, золы А и влаги W (в процентах). В зависимости от того, какая масса топлива берется в расчет, каждому числу присваивается соответствующий надстрочный индекс:

рабочая масса

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100\%; \quad (1.1)$$

сухая масса

$$C^c + H^c + O^c + S^c + N^c + A^c + W^c = 100\%; \quad (1.2)$$

горючая масса

$$C^r + H^r + O^r + S^r + N^r + A^r + W^r = 100\%. \quad (1.3)$$

Для пересчета одного вида топлива в другой используются коэффициенты, представленные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Пересчет массы топлива

Заданная масса топлива	Масса топлива, на которую делается пересчет		
	рабочая	сухая	горючая
Рабочая	1	$100 / (100 - W^p)$	$100 / (100 - W^p - A^p)$
Сухая	$(100 - W^p) / 100$	1	$100 / (100 - A^c)$
Горючая	$(100 - W^p - A^p) / 100$	$(100 - A^c) / 100$	1

Пересчет элементарного состава топлива с одной влажности (зольности) на другую проводится по формулам, %:

$$X_1^p = \frac{X^p(100 - W_1^p)}{(100 - W^p)}; \quad (1.4)$$

$$X_1^p = \frac{X^p(100 - A_1^p)}{(100 - A^p)}, \quad (1.5)$$

где W_1^p и A_1^p – рабочая влажность и зольность топлива, для которого осуществляется пересчет, %.

Углерод является основным горючим элементом топлива. Его содержание на горючую массу составляет: в древесине и торфе 50–65%, в бурых углях – 67–72, каменных углях – 76–90 и в антрацитах – 92–94%, т. е. с увеличением геологического возраста твердого топлива содержание в нем углерода повышается. Состав жидких нефтяных топлив является достаточно стабильным и содержание в них углерода на горючую массу колеблется в узких пределах 86–87%. Углерод характеризуется высоким удельным тепловыделением. При полном сгорании 1 кг углерода выделяется 33 600 кДж теплоты.

Водород является вторым важнейшим горючим элементом топлива. Его содержание на горючую массу составляет: в древесине и торфе 6,0–6,5%, бурых углях – около 5,0, в каменных углях – 4,0–5,5 и антрацитах – 1,5–2,5%. В жидких нефтяных топливах содержание водорода значительно выше и на горючую массу составляет 10–12%. Тепловая ценность водорода почти в четыре раза выше тепловой ценности углерода. При полном сгорании 1 кг водорода и конденсации продуктов сгорания выделяется 141 500 кДж тепла без учета конденсации водяных паров 119 000 кДж.

Сера является третьим горючим элементом топлива. В общем случае сера топлива состоит из серы органической (S_o), входящей в топливо в виде органических соединений, серы колчеданной (S_k), входящей в состав топлива в виде колчедана (FeS_2), и серы сульфатной (S_c), входящей в топливо в виде, например, гипса ($CaSO_4$). Сера органическая и колчеданная образуют серу горючую (летучую) $S_a = S_o + S_k$. Сульфатная же сера не горит и в элементном составе топлива включается в золу. Содержание серы в топливах колеблется от 0 до нескольких процентов. При полном сгорании 1 кг серы летучей выделяется 9000 кДж тепла. Сера является нежелательным элементом топлива.

Кислород и азот также нежелательные элементы топлива. Наличие их в топливе снижает содержание горючих элементов. Кислород, кроме того, связывая часть горючих элементов топлива, обесценивает его. Азот в топливе способствует образованию газообразных продуктов сгорания – окислов азота, обладающих высокой токсичностью, значительно превышающей токсичность окислов серы. Кислород и азот – это внутренний балласт топлива.

Зола представляет собой смесь различных минеральных веществ, которые остаются после полного сгорания горючей части топлива. Содержание золы обычно дается на сухую массу. Зольность жидких топлив нормируется ГОСТами и по своему значению невелика. Например, для дизельного топлива не более 0,02%, для топочных мазутов – не более 0,30%. В твердых топливах содержание золы может достигать значительных величин (до 30% и более на сухую массу). Зола является внешним балластом топлива.

Влага также относится к внешнему балласту топлива. Ее наличие в топливе уменьшает содержание его горючей части. Кроме того, влага снижает полезное тепловыделение топлива, поскольку часть тепла при горении расходуется на превращение ее в пар. Это ведет также к понижению температурного уровня в зоне горения и ухудшает условия теплообмена.

Теплота сгорания топлива – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы топлива. Теплоту сгорания твердого и жидкого топлива относят к 1 кг, а газообразного – к 1 м³. Различают высшую и низшую теплоту сгорания.

Высшая теплота сгорания топлива $Q_{\text{в}}^{\text{п}}$ – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы топлива при нормальных физических условиях ($t = 0^{\circ}\text{C}$, $P = 0,1$ МПа) с учетом того, что образующиеся водяные пары конденсируются и используется теплота их конденсации.

Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы топлива при нормальных физических условиях с учетом потери в окружающую среду теплоты конденсации водяных паров.

Высшая и низшая теплота сгорания твердого и жидкого топлива определяются по формуле Д. И. Менделеева, кДж/кг:

$$Q_{\text{в}}^{\text{п}} = 340C^{\text{п}} + 1030H^{\text{п}} + 109(O^{\text{п}} - S^{\text{п}}); \quad (1.6)$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 340C^{\text{п}} + 1030H^{\text{п}} + 109(O^{\text{п}} - S^{\text{п}}) - 25,2W_{\text{п}}; \quad (1.7)$$

для газообразного топлива по формуле

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 126,4CO + 108H_2 + 358,2CH_4 + 637,5C_2H_6 + \\ + 912,5C_3H_8 + 590,6C_4H_{10} + 234H_2S. \quad (1.8)$$

Условное топливо. Для сопоставления между собой различных видов топлива, сравнения их по качеству принята условная единица

измерения: условное топливо – топливо, теплота сгорания которого равна $Q_{\text{н}y}^p = 29,33 \text{ МДж/кг} = 7000 \text{ ккал/кг} = 8,139 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$.

Реальные виды топлива переводятся в условное топливо с помощью топливных эквивалентов \mathcal{E}_t , которые представляют собой отношение низшей теплоты сгорания нормируемого вида топлива к теплоте сгорания условного топлива:

$$\mathcal{E}_t = \frac{Q_{\text{н}}^p}{Q_{\text{н}y}^p}. \quad (1.9)$$

В табл. 1.2 представлены значения топливных эквивалентов [2] для перевода некоторых видов топлива в тонны условного топлива (т у. т.).

Таблица 1.2

Топливные эквиваленты

Топливо	Единица измерения	Топливный эквивалент
Уголь бурый	т	0,68
Сланцы	т	0,3
Торф топливный	т	0,54
Дрова	м ³ (плотн.)	0,266
Газ природный	тыс. м ³	1,15
Мазут топочный	т	1,37
Электроэнергия	тыс. кВт·ч	0,123
Теплоэнергия	Гкал	0,143

Топливо в том виде, в котором оно сжигается, т. е. поступает в топку, называется «рабочим топливом». Перевод количества (расхода) рабочего (натурального) топлива $V_{\text{н}}$ в условное $V_{\text{у. т.}}$, т у. т., осуществляется по формуле

$$V_{\text{у. т.}} = \mathcal{E}_t V_{\text{н}}. \quad (1.10)$$

Пример 1. Определить состав рабочей массы топлива при увеличении его влажности на 5%. Начальный состав топлива, %: $C^p = 39,5$; $H^p = 2,9$; $O^p = 3,6$; $S^p = 3,9$; $N^p = 0,9$; $A^p = 39,2$; $W^p = 10$. Определить, как изменится низшая теплота сгорания топлива при увеличении его влажности.

Решение. 1. Пересчет элементарного состава топлива из одной влажности в другую осуществляется по формуле (1.4):

$$C_1^P = \frac{C^P(100 - W_1^P)}{(100 - W^P)} = \frac{39,5 \cdot (100 - 15)}{(100 - 10)} = 37,3\%;$$

$$H^P_1 = 2,7\%; S^P_1 = 3,7\%; N^P_1 = 0,85\%; O^P_1 = 3,4\%; A^P_1 = 37,05\%;$$

$$\begin{aligned} C_1^P + H_1^P + S_1^P + N_1^P + O_1^P + A_1^P + W_1^P &= \\ &= 37,3 + 2,7 + 3,7 + 0,85 + 3,4 + 37,05 + 15 = 100\%. \end{aligned}$$

2. Низшая теплота сгорания рассчитывается по формуле Менделеева (1.7):

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 340 \cdot 39,5 + 1030 \cdot 2,9 - 109 \cdot (3,6 - 3,9) - 25,2 \cdot 10 = \\ &= 16\,197,7 \text{ кДж/кг}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{H1}^P &= 340 \cdot 37,3 + 1030 \cdot 2,7 - 109 \cdot (3,4 - 3,7) - 25,2 \cdot 15 = \\ &= 15\,117,7 \text{ кДж/кг}; \end{aligned}$$

$$\frac{Q_{H1}^P}{Q_H^P} = \frac{15\,117,7}{16\,197,7} = 0,937.$$

Таким образом, при увеличении влажности на 5% элементарный состав топлива имеет следующий вид:

$$C^P_1 = 37,3\%; H^P_1 = 2,7\%; S^P_1 = 3,7\%;$$

$$N^P_1 = 0,85\%; O^P_1 = 3,4\%; A^P_1 = 37,05\%;$$

а теплота сгорания уменьшается на 6,3%.

Пример 2. Элементарный состав горючей массы топлива, %: $C^Г = 69,85$; $H^Г = 4,82$; $O^Г = 18,92$; $S^Г = 5$; $N^Г = 1,41$. Определить рабочий состав топлива при $A^P = 18,2\%$ и $W^P = 32\%$.

Решение. Пересчет горючей массы топлива в рабочую осуществляется с помощью коэффициентов, данных в табл. 1.1:

$$C^P = \frac{C^Г(100 - W^P - A^P)}{100} = 69,85 \cdot (100 - 18,2 - 32) = 34,79\%;$$

$$H^P = 2,4\%; O^P = 2,49\%; S^P = 9,42\%; N^P = 0,7\%;$$

$$\begin{aligned} C^P_1 + H^P_1 + S^P_1 + N^P_1 + O^P_1 + A^P_1 + W^P_1 &= \\ &= 34,79 + 2,4 + 9,42 + 0,7 + 2,49 + 18,2 + 32 = 100\%. \end{aligned}$$

Рабочий состав топлива, %: $C^P = 34,79$; $H^P = 2,4$; $O^P = 2,49$; $S^P = 9,42$; $N^P = 0,7$.

Пример 3. В котельную подается ежедневно 16 500 т дров со следующим рабочим составом, %: $C^P = 35,3$; $H^P = 4,3$; $O^P = 29$; $S^P = 0$; $N^P = 0,7$; $A^P = 0,7$; $W^P = 30$. Определить массу сжигаемого ежедневно условного топлива.

Решение. 1. Низшая теплота сгорания дров рассчитывается по формуле Менделеева (1.7):

$$Q_n^P = 340 \cdot 35,3 + 1030 \cdot 4,3 - 109 \cdot (29 - 0) - 25,2 \cdot 30 = 12\,514 \text{ кДж/кг.}$$

2. Для пересчета массы дров в условное топливо необходимо найти топливный эквивалент:

$$\mathcal{E}_T = \frac{Q_n^P}{Q_{нy}^P} = \frac{12\,514}{29\,330} = 0,427.$$

Тогда масса ежедневно сжигаемого в котельной условного топлива составит

$$B_{y.t.} = 16\,500 \cdot 0,427 = 7\,045,5 \text{ т.}$$

Задачи

1.1. За год предприятие потребило электрической энергии $\mathcal{E}_{эл} = 2,44 \cdot 10^6$ кВт·ч; газа в объеме 425,7 тыс. м³; угля массой 85,4 т; тепла в количестве 2800 Гкал. Теплота сгорания газа 41,3 МДж/м³; угля – 34,3 МДж/кг. Определить потребление каждого из видов энергетических ресурсов в ГДж, Гкал, кВт·ч и т. у. т. Определить общее потребление энергоресурсов в т у. т.

1.2. При лабораторных испытаниях определили элементарный состав кузнецкого угля на горючую массу, %: $C^r = 84$; $H^r = 4,5$; $O^r = 9$; $S^r = 0,5$; $N^r = 2$. Влажность и зольность топлива на рабочую массу при его анализе составили, %: $A^P = 11,4$; $W^P = 12$. Определить состав рабочей массы топлива.

1.3. Низшая теплота сгорания угля на горючую массу равна $Q_n^r = 7332,2$ ккал/кг. Влажность и зольность топлива на рабочую массу при его анализе составляют, %: $A^P = 11,4$; $W^P = 12$. Определить теплоту сгорания рабочей массы топлива в международной системе единиц.

1.4. На сколько увеличится теплота сгорания бурого угля при переходе электростанции от замкнутой к разомкнутой системе

сушки топлива с получением подсушенного топлива окончательной влажности $W^p = 10\%$. Исходная рабочая масса топлива имеет влажность $W^p = 39\%$ и низшую рабочую теплоту сгорания $13,02$ МДж/кг.

1.5. Какому количеству условного топлива эквивалентен 1 кг сырой нефти, если $Q_{н, нефть}^p = 42$ МДж/кг, 1 м³ (при нормальных условиях), природного газа при $Q_{н, газ}^p = 35$ МДж/м³, а также 1 кг каменного угля при $Q_{н, уг.}^p = 21$ МДж/кг.

1.6. Определить состав рабочей массы челябинского угля, если состав горючей массы, %: $C^g = 71,1$; $H^g = 5,3$; $O^g = 20$; $S^g = 1,9$; $N^g = 1,7$. Зольность сухой массы топлива составляет $A^c = 36\%$; влажность угля на рабочую массу $W^p = 18\%$.

1.7. Определить состав горючей массы черногорского угля и его низшую рабочую теплоту сгорания, если состав рабочей массы, %: $C^p = 58,7$; $H^p = 4,2$; $O^p = 9,7$; $S^p = 0,3$; $N^p = 1,9$. Зольность сухой массы топлива составляет $A^c = 15\%$; влажность угля на рабочую массу $W^p = 12\%$.

1.8. При транспортировании 3106 кг подмосковного угля марки Б2 его влажность увеличилась с $W^{p1} = 32\%$ до $W^{p2} = 35\%$. Определить потерю условного топлива при повышении его влажности, если известно, что при $W^{p1} = 32\%$ низшая теплота сгорания рабочей массы угля $Q^{pн1} = 10\,435$ кДж/кг.

1.9. Определить низшую теплоту сгорания сухого природного газа Саратовского месторождения состава, %: $CO = 0,8$; $CH_4 = 84,5$; $C_2H_6 = 3,8$; $C_3H_8 = 1,9$; $C_4H_{10} = 1,2$; $H_2 = 7,8$.

1.10. На складе котельной имеется $60\,103$ кг ангренского угля, состав которого по горючей массе, %: $C^g = 76,0$; $H^g = 3,8$; $S^g = 2,5$; $N^g = 0,4$; $O^g = 17,3$, зольность сухой массы $A^c = 20,0\%$ и влажность рабочая $W^p = 34,5\%$. Определить запас угля на складе в кг у. т.

ИСТОЧНИКИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Тепловая и электрическая энергия для нужд народного хозяйства страны производится:

- на тепловых электрических станциях, работающих на органическом топливе (ТЭС);
- гидроэлектростанциях (ГЭС), использующих энергию потока воды;
- атомных электрических станциях (АЭС), использующих энергию ядерного распада.

Тепловые электростанции подразделяются на конденсационные (КЭС), осуществляющие производство только электрической энергии, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), осуществляющие производство электрической и тепловой энергии. Общая схема ТЭС представлена на рис. 2.1.

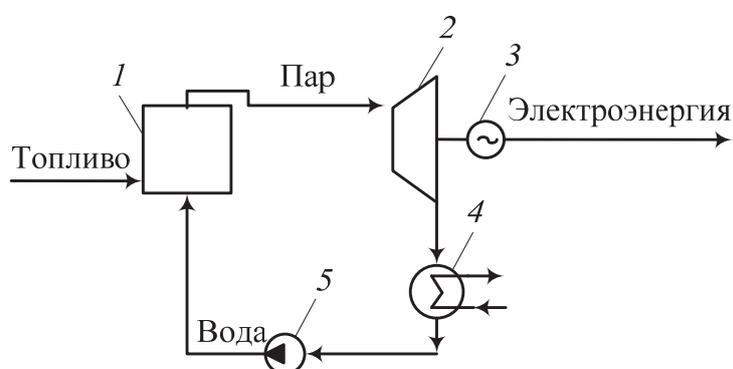


Рис. 2.1. Схема тепловой электростанции:
1 – котел-парогенератор; 2 – турбина; 3 – генератор;
4 – конденсатор; 5 – насос

В котле-парогенераторе при сжигании топлива вырабатывается водяной пар, который поступает в турбину. Давление и температура водяного пара в турбине понижаются. На одном валу с турбиной находится электрогенератор, в котором в результате вращения его турбиной вырабатывается электроэнергия. Отрабо-

танный пар поступает в конденсатор, в котором расширяется, отдает скрытую теплоту парообразования охлаждающей его воде и превращается в конденсат. Далее насосом конденсат подается в котел-парогенератор и цикл замыкается.

На рис. 2.2 показана схема ТЭЦ с теплофикационным отбором. Пар с достаточно высокими параметрами отбирается из промежуточных ступеней турбины и направляется на производство (производственный отбор), откуда возвращается в виде конденсата обратно либо в специальный теплообменник, где нагревается вода, используемая для отопительных целей (теплофикационный отбор).

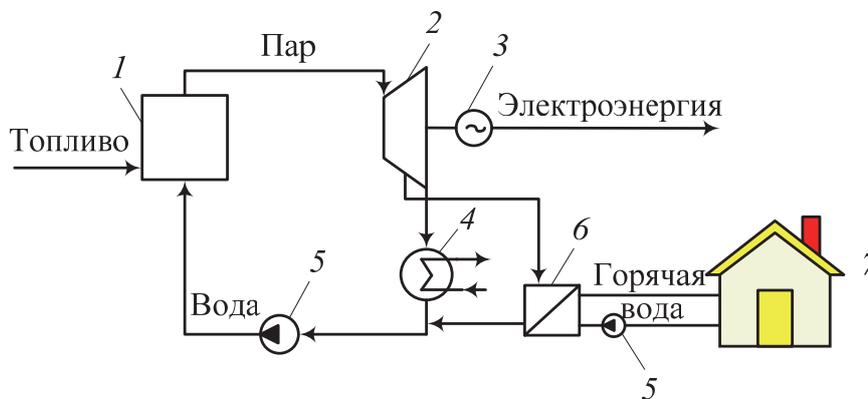


Рис. 2.2. Схема ТЭЦ с теплофикационным отбором:
1 – котел-парогенератор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор;
5 – насос; 6 – подогреватель теплообменник; 7 – потребители

Рассмотренная на рис. 2.1 схема ТЭС является основной, в ней используется котел-парогенератор, в котором водяной пар служит носителем энергии. На ТЭС могут применяться газотурбинные (ГТУ) и парогазовые установки (ПГУ) (рис. 2.3).

В ГТУ в качестве рабочего тела используется смесь продуктов сгорания топлива с воздухом или нагретый воздух при большом давлении и высокой температуре. Недостатком ГТУ является их меньшая экономичность по сравнению с ПТУ. Современные ГТУ имеют КПД порядка 36–38%, в то время как ПТУ – 40–43%.

В ПГУ используется комбинированный (бинарный) цикл, в котором работают два рабочих тела – газ и пар. КПД таких установок свыше 60%.

Коэффициентом полезного действия КЭС называется отношение количества выработанной электроэнергии к энергии, выделившейся при сжигании топлива. КПД брутто определяется по формуле

$$\eta_{\text{эс}} = \frac{\mathcal{E}}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}}, \quad (2.1)$$

где \mathcal{E} – количество выработанной электроэнергии, МДж (кВт·ч); B – расход натурального топлива, кг; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания натурального топлива, МДж/кг (кВт·ч/кг).

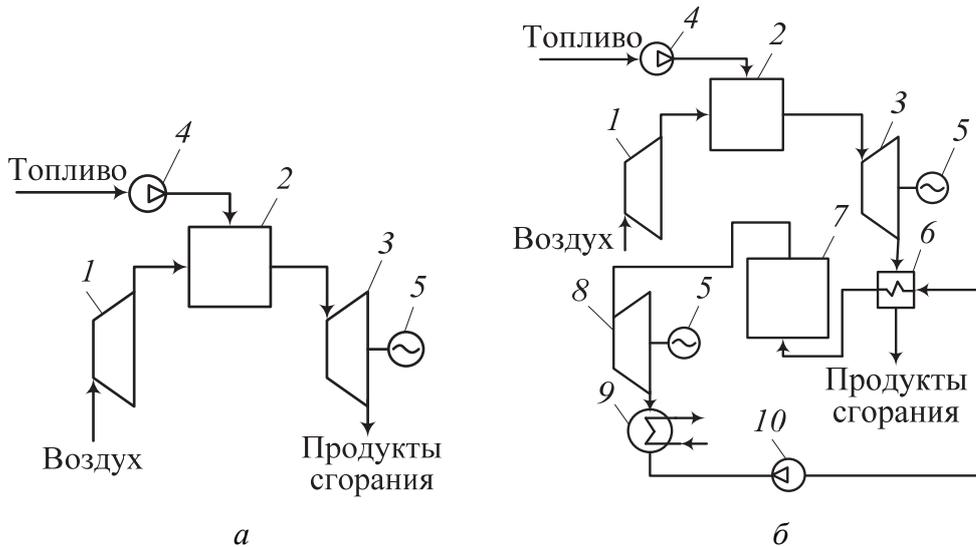


Рис. 2.3. Схема газотурбинной (а) и парогазовой (б) установок:
 1 – воздушный компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина;
 4 – топливный насос; 5 – электрогенератор; 6 – подогреватель; 7 – котел;
 8 – паровая турбина; 9 – конденсатор; 10 – питательный насос

Удельный расход натурального топлива на выработку электрической энергии на КЭС, кг/МДж (кг/кВт·ч) равен

$$b^{\text{н}} = \frac{B}{\mathcal{E}}. \quad (2.2)$$

Удельный расход условного топлива на выработку электрической энергии на КЭС, кг/МДж (кг/кВт·ч), составляет

$$b_{\text{у}}^{\text{н}} = \frac{B_{\text{у}}}{\mathcal{E}}, \quad (2.3)$$

где $B_{\text{у}}$ – расход условного топлива, кг.

Удельный расход тепла на выработку электроэнергии определяется по формуле

$$q^{\text{н}} = b^{\text{н}}Q_{\text{н}}^{\text{п}} = b_{\text{у}}^{\text{н}}Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \quad (2.4)$$

где Q_{Hy}^p – низшая теплота сгорания условного топлива, МДж/кг (кВт·ч/кг). Для условного топлива $Q_{Hy}^p = 29,3$ МДж/кг = = 8,139 кВт·ч/кг.

Если значение выработанной электроэнергии \mathcal{E} задано в кВт·ч, то КПД КЭС переписывается в виде

$$\eta_{эс} = \frac{0,123}{b_y^3}. \quad (2.5)$$

Если значение количества выработанной электроэнергии задано в МДж, то КПД КЭС равно

$$\eta_{эс} = \frac{0,0342}{b_y^3}. \quad (2.6)$$

На любой электростанции часть выработанной электроэнергии расходуется на собственные нужды $\mathcal{E}_{сн}$. Таким образом, количество отпущенной электроэнергии $\mathcal{E}_{отп}$ равно разности выработанной $\mathcal{E}_{выр}$ и израсходованной на собственные нужды электростанции:

$$\mathcal{E}_{отп} = \mathcal{E}_{выр} - \mathcal{E}_{сн}. \quad (2.7)$$

Коэффициент полезного действия электростанции, определяемый без учета расхода энергии на собственные нужды, называют КПД брутто:

$$\eta_{эс}^{бр} = \frac{\mathcal{E}_{выр}}{B Q_H^p}. \quad (2.8)$$

Коэффициент полезного действия электростанции, определяемый с использованием $\mathcal{E}_{сн}$, называют КПД нетто:

$$\eta_{эс}^{нт} = \frac{\mathcal{E}_{отп}}{B Q_H^p}. \quad (2.9)$$

Если известны КПД отдельных узлов установок электростанции, то КПД может определяться по следующей формуле:

$$\eta = \eta_k \eta_t \eta_l \eta_{oi} \eta_m \eta_g, \quad (2.10)$$

где η_k – КПД котельной установки; η_t – КПД трубопровода; η_l – термический КПД цикла Ренкина; η_{oi} – относительный внутренний КПД турбины; η_m – механический КПД турбины; η_g – электрический КПД генератора.

Для централизованного теплоснабжения отдельных районов предназначены районные котельные. Их сооружение требует меньших капиталовложений и может быть проведено в более короткие сроки, чем сооружение ТЭЦ. Основным элементом котельной является котельный агрегат – устройство, служащее для сжигания топлива и получения пара или горячей воды.

Уравнение теплового баланса котельного агрегата можно записать в виде

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = Q_1 + \sum Q_{\text{пот}}, \quad (2.11)$$

где Q_1 – полезно использованное тепло, кДж/кг; $\sum Q_{\text{пот}}$ – сумма всех тепловых потерь в котельном агрегате, кДж/кг.

$$\sum Q_{\text{пот}} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2.12)$$

где Q_2 – потери тепла с уходящими газами, кДж/кг; Q_3 – потери тепла от химической неполноты сгорания, кДж/кг; Q_4 – потери тепла от механической неполноты сгорания, кДж/кг; Q_5 – потери тепла в окружающую среду, кДж/кг.

Тепловые потери могут быть отнесены к теплоте сгорания топлива в процентах, тогда

$$100 = q_1 + \sum q_{\text{пот}}; \quad (2.13)$$

$$\sum q_{\text{пот}} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5,$$

где

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot 100; \quad q_2 = \frac{Q_2}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot 100; \quad q_3 = \frac{Q_3}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot 100; \\ q_4 = \frac{Q_4}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot 100; \quad q_5 = \frac{Q_5}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot 100. \quad (2.14)$$

Полезно использованное тепло топлива в котельном агрегате определяется из уравнения теплового баланса

$$BQ_1 = D(h_{\text{п}} - h_{\text{п.в}}) \quad (2.15)$$

по формуле

$$Q_1 = \frac{D(h_{\text{п}} - h_{\text{п.в}})}{B}, \quad (2.16)$$

где D – паропроизводительность, кг/ч; $h_{\text{п}}$ – энтальпия пара, кДж/кг; $h_{\text{п.в}}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг.

КПД котельного агрегата (КПД брутто) может быть представлен в виде отношения полезно использованного тепла к теплу топлива

$$\eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}} = \frac{Q_1}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \cdot 100\% \quad (2.17)$$

или найден из уравнения теплового баланса котельного агрегата:

$$\eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}} = q_1 = 100 - \sum q_{\text{пот}}, \quad (2.18)$$

где q_1 – полезно использованное тепло, отнесенное к теплоте сгорания топлива, %.

Если известны паропроизводительность котельного агрегата, параметры пара и питательной воды, то КПД котельного агрегата можно определить по формуле

$$\eta_{\text{к.а}} = \frac{D(h_{\text{п}} - h_{\text{п.в}})}{BQ_{\text{H}}^{\text{P}}} \cdot 100\%. \quad (2.19)$$

КПД агрегата по теплоте, отпущенной потребителю (КПД нетто), равен

$$\eta_{\text{к.а}}^{\text{H}} = \eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}} - q_{\text{с.н}}, \quad (2.20)$$

где $q_{\text{с.н}}$ – относительный расход энергии на собственные нужды, %.

Пример. Определить удельный расход тепла на выработку электроэнергии, если удельный расход натурального топлива равен $b^3 = 0,6$ кг/(кВт·ч) при тепловом эквиваленте топлива $\mathcal{E}_\tau = 0,63$.

Решение. Рассчитаем Q_{H}^{P} натурального топлива, пользуясь формулой (1.9):

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 0,63 \cdot 29\,300 = 18\,459 \text{ кДж/кг.}$$

Определим удельный расход тепла на выработку электроэнергии по формуле (2.4):

$$q^3 = 0,6 \cdot 18\,459 = 11\,075,4 \text{ кДж/(кВт·ч).}$$

Задачи

2.1. Определить удельный расход тепла на выработку электроэнергии, если удельный расход условного топлива равен $b_y^3 = 0,4$ кг/(кВт·ч).

2.2. Электростанция за год вырабатывает $8,4 \cdot 10^9$ кВт·ч электроэнергии с удельным расходом условного топлива $b_y^3 =$

= 0,397 кг/(кВт·ч). Определить КПД электростанции и годовой расход натурального топлива. Тепловой эквивалент сжигаемого на электростанции топлива $\mathcal{E}_T = 0,84$.

2.3. Определить КПД электростанции, если удельный расход тепла на выработку электроэнергии равен $q^3 = 11\,313$ кДж/(кВт·ч).

2.4. Определить удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии и КПД электростанции по выработке электроэнергии, если известен удельный расход тепла $q^3 = 8799$ кДж/(кВт·ч).

2.5. Определить потери тепла в окружающую среду, если $q_2 = 6\%$; $q_3 = 0,5\%$; $q_4 = 2\%$. КПД котельного агрегата $\eta_{к.а} = 90,5\%$.

2.6. Потери тепла в окружающую среду составляют $q_5 = 1\%$, теплота сгорания топлива равна $Q_H^p = 22\,000$ кДж/кг. Определить потери тепла в окружающую среду за 1 ч работы котла, если расход топлива составляет $B = 10$ т/ч.

2.7. Определить КПД конденсационной электростанции, если известны следующие величины: начальное давление и температура пара перед турбинами равны $P_1 = 10$ МПа; $t_1 = 560^\circ\text{C}$, КПД котельной установки составляет $\eta_k = 0,88$; КПД трубопроводов $\eta_T = 0,97$; внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,85$; механический КПД турбогенератора $\eta_m = 0,98$; электрический КПД турбогенератора $\eta_\varepsilon = 0,98$. Давление пара в конце расширения равно $P_k = 4$ кПа.

2.8. В топке котельного агрегата паропроизводительностью $D = 6,5$ т/ч сжигается $B = 1300$ кг/ч топлива с теплотой сгорания $Q_H^p = 15\,500$ кДж/кг. Давление пара 14 кгс/см² при температуре 300°C , температура питательной воды 104°C . Определить КПД котельного агрегата.

2.9. Определить расход газообразного топлива котельным агрегатом, если известно, что паропроизводительность $D = 15$ т/ч, затраты тепла на получение 1 кг пара $h_{п} - h_{п.в} = 2380$ кДж/кг. КПД котельного агрегата $\eta_{к.а} = 90,7\%$. Теплота сгорания топлива $Q_H^p = 35\,800$ кДж/кг.

2.10. Определить расход топлива котельным агрегатом по условию задачи 2.9, если КПД котельного агрегата 85% .

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

В настоящее время большое распространение получили жидкие и газообразные энергоносители из-за удобства их транспорта по трубопроводам. При транспортировке данных энергоносителей необходимо учитывать механические (гидравлические), объемные (утечки) и тепловые (только для горячих теплоносителей) потери.

Гидравлические потери (потери давления) определяются соотношением [3]

$$\Delta P = \Delta P_{\tau} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{h}}, \quad (3.1)$$

где ΔP_{τ} – потери давления за счет сопротивления трения; $\Delta P_{\text{м}}$ – потери давления за счет местных сопротивлений (сужений, расширений, поворотов); ΔP_{h} – потери давления за счет перепада высот.

Потери давления за счет сопротивления трения имеют вид

$$\Delta P_{\tau} = \lambda_{\tau} \frac{l \rho v^2}{d \cdot 2}, \quad (3.2)$$

где λ_{τ} – коэффициент сопротивления трения; l – длина участка теплопровода, м; d – внутренний диаметр теплопровода, м; ρ – средняя плотность энергоносителя, кг/м³; v – средняя скорость энергоносителя, м/с.

Коэффициент сопротивления трения λ_{τ} зависит от режима течения жидкости [3], который определяется значением числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{d v}{\nu}, \quad (3.3)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Различают ламинарный ($\text{Re} < 2320$) и турбулентный ($\text{Re} > 2320$) режимы течения жидкости.

Коэффициент сопротивления трения при ламинарном режиме течения равен

$$\lambda_{\tau} = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (3.4)$$

Коэффициент сопротивления трения при турбулентном режиме течения для гидравлически гладких труб при $2320 < \text{Re} < 20/\varepsilon$ ($\varepsilon = \Delta/d$, где ε – относительная шероховатость; Δ – абсолютная шероховатость труб, м) задается выражением

$$\lambda_{\tau} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}. \quad (3.5)$$

Коэффициент сопротивления трения при турбулентном режиме течения для шероховатых труб при $20/\varepsilon < \text{Re} < 500/\varepsilon$ имеет вид

$$\lambda_{\tau} = 0,11 \left(\varepsilon + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}. \quad (3.6)$$

Коэффициент сопротивления трения при турбулентном режиме течения для шероховатых труб при $\text{Re} > 500/\varepsilon$ определяется выражением

$$\lambda_{\tau} = 0,11 \varepsilon^{0,25}. \quad (3.7)$$

Потери давления за счет местных сопротивлений рассчитываются по формуле

$$\Delta P_{\text{м}} = \xi_{\text{м}} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.8)$$

где $\xi_{\text{м}}$ – коэффициент местного сопротивления.

Для типичных геометрий коэффициент местного сопротивления $\xi_{\text{м}}$ определяется на основании эмпирических формул или справочных данных [4].

Потери давления за счет перепада высот равны

$$\Delta P_h = \rho g \Delta h, \quad (3.9)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; Δh – перепад высот, м. Затраты энергии, потребляемой приводом насоса, на прокачку энергоносителя имеют вид

$$N = \frac{G\Delta P}{\rho\eta_n}, \quad (3.10)$$

где G – массовый расход энергоносителя, кг/с; $G = V\rho$; V – объемный расход жидкости, м³/с; ρ – плотность энергоносителя, кг/м³; η_n – КПД нагнетательного устройства.

Объемный расход жидкости связан с ее средней скоростью соотношением

$$V = f v, \quad (3.11)$$

где f – площадь поперечного сечения, м².

При транспортировке горячих энергоносителей, кроме преодоления гидравлических сопротивлений, присутствуют и потери энергии в виде теплоты.

Передача теплоты от источника потребителям осуществляется с помощью *системы теплоснабжения*, которая включает источник, тепловую сеть и потребителей (рис. 3.1).

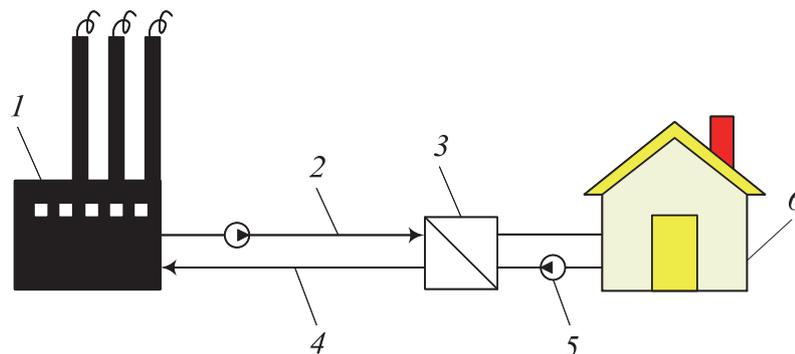


Рис. 3.1. Схема системы теплоснабжения:

1 – энергетическая установка; 2 – подающий теплопровод;

3 – теплообменник; 4 – обратный теплопровод;

5 – насос; 6 – потребители

Распространенными источниками теплоснабжения являются теплоэлектроцентрали, атомные электростанции, котельные. Потребителями тепловой энергии выступают промышленные предприятия, коммунально-бытовой сектор, жилые и административные здания.

Тепловая сеть состоит из разветвленной системы теплопроводов, с помощью которых осуществляется транспортировка тепловой энергии. Современные теплопроводы изготавливаются в завод-

ских условиях и включают стальную трубу, слой теплоизоляционного материала, защитный кожух (рис. 3.2).

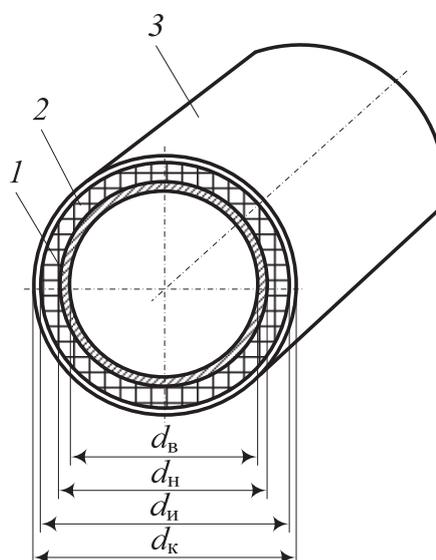


Рис. 3.2. Схема изолированного теплопровода:
 1 – труба; 2 – слой теплоизоляционного материала; 3 – кожух;
 $d_{в}$ – диаметр внутренний; $d_{н}$ – диаметр наружный;
 $d_{и}$ – диаметр изоляции; $d_{к}$ – диаметр защитного кожуха

К теплоизоляционным материалам относятся полиуретан и производные на его основе, минеральная вата и др. Основной характеристикой теплоизоляции является коэффициент теплопроводности, который зависит от свойств применяемого материала и его влажности.

Прокладка трубопроводов производится надземным и подземным способами. При подземной прокладке трубопроводы размещаются либо непосредственно в грунте (бесканальная прокладка), либо в непроходных, полупроходных и проходных каналах.

При транспортировке потери теплоты обусловлены охлаждением теплоносителя, а при использовании пара появляются дополнительные потери, связанные с конденсацией.

Потери теплоты в окружающую среду при транспортировке можно рассчитать на основании уравнения теплового баланса:

$$Q = Gc_p(t_1 - t_2) + rG_k, \quad (3.12)$$

где G – массовый расход однофазного теплоносителя, кг/с; c_p – удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении,

Дж/(кг·К); t_1 , t_2 – температура теплоносителя на входе и выходе соответственно, °С; r – теплота конденсации, кДж/кг; G_k – массовый расход сконденсировавшегося теплоносителя.

Потери тепловой энергии надземным теплопроводом в окружающую среду можно оценить на основании уравнения теплопередачи:

$$Q = q_l l = k_l \pi \Delta t l, \quad (3.13)$$

где q_l – линейная плотность теплового потока, Вт/м; l – длина теплопровода, м; k_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К); Δt – температурный напор, °С.

Линейный коэффициент теплопередачи через многослойную стенку теплопровода определяется соотношением

$$k_l = \left(\frac{1}{\alpha_1 d_b} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_n}{d_b} + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_n} + \frac{1}{2\lambda_k} \ln \frac{d_k}{d_n} + \frac{1}{\alpha_2 d_k} \right)^{-1}, \quad (3.14)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, Вт/(м²·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха, Вт/(м²·К); λ , λ_n , λ_k – коэффициенты теплопроводности соответственно трубы, изоляции и защитного кожуха, Вт/(м·К); d_b , d_n , d_k – диаметры соответственно внутренний и наружный стальной трубы, изоляции, защитного кожуха, м.

В уравнении (3.14) первый член выражает термическое сопротивление теплоотдачи со стороны теплоносителя, второй, третий, четвертый – термическое сопротивление трубы, слоя изоляции, защитного кожуха соответственно, пятый – теплоотдачи со стороны окружающей среды.

Пример 1. По стальному теплопроводу диаметром 57×3,0 мм движется вода с температурой 150°С. Коэффициент теплоотдачи от воды к трубе 1500 Вт/(м²·К). Окружающий наружный воздух имеет температуру 20°С. Найти удельные тепловые потери, если теплопровод изолирован слоем пеношамота толщиной 70 мм, а коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха 15 Вт/(м²·К). Коэффициент теплопроводности стали равен 50 Вт/(м·К), а пеношамота – 0,29 Вт/(м·К).

Решение. Коэффициент теплопередачи находим по формуле (3.14):

$$k_l = \left(\frac{1}{1500 \cdot 0,051} + \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{0,057}{0,051} + \frac{1}{2 \cdot 0,29} \ln \frac{0,197}{0,057} + \frac{1}{15 \cdot 0,197} \right)^{-1} =$$

$$= 0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Удельные потери теплоты

$$q_1 = k_l \pi \Delta t = 0,4 \cdot 3,14 \cdot (150 - 20) = 163,9 \text{ Вт/м}.$$

Пример 2. Какую мощность необходимо затратить на прокачку горячей воды по теплопроводу, если потери давления в трубопроводе составляют $\Delta P = 10$ кПа? Производительность насоса $G = 800$ кг/ч, КПД – 0,9. Плотность воды $\rho = 965,4$ кг/м³.

Решение. Мощность, потребляемую приводом насоса, определим по формуле (3.10):

$$N = \frac{800 \cdot 10\,000}{3600 \cdot 965,4 \cdot 0,9} = 2,56 \text{ Вт}.$$

Задачи

3.1. Стальной паропровод диаметром $d_n \times \delta = 219 \times 6$ мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К) покрыт слоем теплоизоляционного материала толщиной $\delta_2 = 50$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0,06$ Вт/(м·К). Сверху этого изоляционного слоя находится защитный слой толщиной $\delta_3 = 50$ мм и $\lambda_3 = 0,18$ Вт/(м·К). Температура протекающего внутри пара $t_1 = 427^\circ\text{C}$, температура наружного воздуха $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от пара к трубе равен $\alpha_1 = 200$ Вт/(м²·К), коэффициент теплоотдачи от поверхности пробковой изоляции к воздуху $\alpha_2 = 10$ Вт/(м²·К). Определить потери теплоты на 1 м трубопровода.

3.2. Определить удельные потери теплоты на 1 м для неизолированного стального теплопровода $d_n \times \delta = 273 \times 7,0$ мм, не удовлетворяющего современным теплотехническим требованиям. По теплопроводу движется вода с температурой $t_1 = 150^\circ\text{C}$, окружающий наружный воздух имеет температуру $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от воды к трубе $\alpha_1 = 1500$ Вт/(м²·К), а коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_2 = 15$ Вт/(м²·К). Коэффициент теплопроводности стали равен $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К). Как

изменяться тепловые потери, если теплопровод будет изолирован слоем изоляции $\delta_2 = 60$ мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К).

3.3. По чугунному теплопроводу диаметром $d_n \times \delta = 60 \times 3,5$ мм движется пар с температурой $t_1 = 325^\circ\text{C}$. Окружающий наружный воздух имеет температуру $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от пара к трубе $\alpha_1 = 110$ Вт/(м²·К), а коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_2 = 15$ Вт/(м²·К). Теплопровод изолирован слоем теплоизоляционного материала толщиной $\delta_2 = 70$ мм. Удельные потери теплоты составляют $q_l = 377$ Вт/м. Коэффициент теплопроводности чугуна равен $\lambda_1 = 90$ Вт/(м·К). Определить коэффициент теплопроводности используемого теплоизоляционного материала.

3.4. Определить толщину изоляции для теплопровода диаметром $d_n \times \delta = 152 \times 5$ мм, по которому движется пар. Термическое сопротивление многослойной цилиндрической стенки $R = 0,982$ (м²·К)/Вт. Коэффициент теплопроводности чугуна равен $\lambda_1 = 90$ Вт/(м·К), а пеношамота – $\lambda_2 = 0,29$ Вт/(м·К).

3.5. Определить толщину изоляции для паропровода, проложенного снаружи помещения. Диаметр трубопровода $d_b = 219$ мм, температура пара $t_1 = 270^\circ\text{C}$, коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала $\lambda_1 = 0,103$ Вт/(м·К). Допустимые удельные тепловые потери $q_l = 261$ Вт/м, $\alpha_2 = 23,26$ Вт/(м²·К). Температура окружающей среды $t_2 = -30^\circ\text{C}$.

3.6. Определить массовый расход горячей воды в трубопроводе с внутренним диаметром $d_b = 412$ мм, если известно, что средняя скорость воды $v = 3$ м/с, а плотность $\rho = 917$ кг/м³.

3.7. По трубопроводу подается $V = 0,314$ м³/с воды. Определить диаметр трубопровода, если скорость воды равна $v = 2$ м/с.

3.8. Определить потери давления за счет сопротивления трения в теплопроводе тепловой сети с внутренним диаметром $d_b = 100$ мм и длиной $l = 1000$ м. Абсолютная шероховатость труб $\Delta = 0,5$ мм. Кинематическая вязкость теплоносителя $\nu = 0,202 \cdot 10^{-6}$ м²/с, плотность $\rho = 917$ кг/м³, скорость $v = 2$ м/с.

3.9. Для целей горячего водоснабжения потребителям подается вода со скоростью $v = 1,05$ м/с. Плотность воды $\rho = 977,7$ кг/м³.

Длина трубопровода $l = 1\,000$ м, внутренний диаметр $d_{\text{в}} = 259$ мм. Отметка оси трубопровода в конечной точке на 2 м выше начальной. Коэффициент сопротивления трения по длине равен $\lambda_{\text{т}} = 0,024$. Потери давления в местных сопротивлениях равны 10% от потерь сопротивления трения. КПД привода насоса $\eta_{\text{н}} = 0,8$. Определить общие потери давления при транспортировке и затраты мощности на прокачку воды.

3.10. Для условий задачи 3.9 определить, как изменятся затраты мощности на прокачку энергоносителя, если внутренний диаметр трубопровода увеличится до 311 мм.

ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

В настоящее время в большинстве развитых стран проводятся активные социальные и экономические мероприятия по энергосбережению в индустрии строительства. Эффективное экономическое развитие Республики Беларусь также в значительной степени связано с решением проблемы энергосбережения, в том числе при эксплуатации зданий и сооружений, на отопление и горячее водоснабжение которых ежегодно приходится свыше трети расходуемых энергоресурсов [5].

Здание (рис. 4.1) – строительная система, состоящая из несущих и ограждающих конструкций, образующих наземный замкнутый объем, предназначенная для пребывания или проживания людей, функционирования технологических систем и проведения технологических процессов [6].

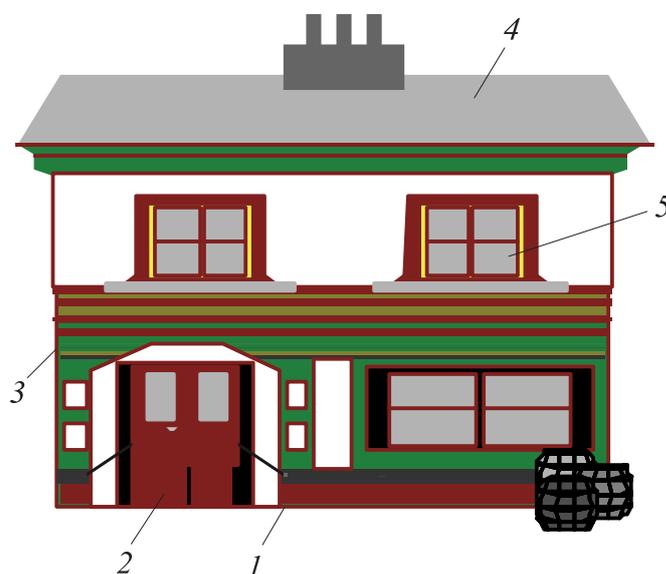


Рис. 4.1. Конструктивные элементы здания:
1 – фундамент; 2 – дверь; 3 – стены;
4 – крыша; 5 – окна

Сооружения – постройки или конструкции, выполняющие технические функции и не связанные с постоянным пребыванием людей.

По назначению здания и сооружения делятся:

- 1) на гражданские:
 - жилищные;
 - культурные;
 - административные;
- 2) промышленные;
- 3) сельскохозяйственного назначения.

К конструктивным элементам здания относятся крыша, окна, стены, двери, перекрытия, перегородки, фундамент. При этом потери теплоты через конструктивные элементы составляют, %:

- крыша – 15–20;
- стены – 20–25;
- окна – 20–25;
- пол – 5–10.

Различают несущие и ограждающие конструкции здания. Несущие конструкции воспринимают все нагрузки, действующие на здания. К таким конструкциям относятся фундамент, стены, крыша, опоры, перегородки. Главными задачами ограждающих конструкций являются изоляция помещения от шума, атмосферных воздействий и обеспечение нормальных условий эксплуатации зданий. К ограждающим конструкциям относят полы, перегородки, окна, двери, покрытия, кровли и т. п.

Фундамент – строительная несущая конструкция, часть здания, сооружения, которая воспринимает все нагрузки от вышележащих конструкций и распределяет их по основанию.

Стена – вертикальная ограждающая конструкция, отделяющая помещение от окружающего пространства или соседнего помещения. Стена здания является несущим и ограждающим элементом здания.

Перекрытие – несущая строительная конструкция, разделяющая смежные по высоте этажи в здании или сооружении или отделяющая этаж от подвала, подпола, чердака либо крыши. Перекрытие воспринимает нагрузки (постоянные и временные) и воздействия (технологические, климатические, температурные и прочие) и передает их на другие строительные конструкции (стены, колонны, ригели, балки и т. п.), с которыми перекрытие связано.

Крыша – верхняя конструкция здания, которая служит для защиты от атмосферных осадков, дождевой и талой воды. Другой основной ее функцией является теплоизоляционная функция (сохранение тепла и защита от перегрева).

Перегородки разделяют внутреннее пространство здания на отдельные помещения.

Дверь – проем в стене для входа и выхода из помещения, а также створ или несколько створов, закрывающих этот проем.

Окна – проем в стене, служащий для поступления света в помещение и вентиляции.

4.1. Потери теплоты в зданиях и сооружениях

Потери теплоты в зданиях обусловлены:

- теплопередачей Q_T ;
- инфильтрацией $Q_{и}$.

Теплота может передаваться тремя способами: **теплопроводностью, конвекцией и излучением**. Эти формы теплообмена различаются по своей природе и описываются разными законами.

Теплопроводность – это молекулярный процесс передачи теплоты. Частицы более нагретой области тела, сталкиваясь при своем беспорядочном движении с соседними частицами тела, сообщают им часть своей кинетической энергии. Этот процесс постепенно распространяется по всему телу.

Конвекция происходит только в газах и жидкостях. Этот вид переноса теплоты осуществляется при перемещении всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа.

Передача теплоты излучением между двумя телами происходит в три стадии: 1) превращение части внутренней энергии одного из тел в энергию электромагнитных волн; 2) распространение электромагнитных волн в пространстве; 3) поглощение энергии излучения другим телом.

В реальности процессы передачи теплоты теплопроводностью, конвекцией и излучением протекают одновременно и влияют друг на друга, так как конвекция сопровождается излучением, излучение – теплопроводностью и конвекцией. Однако в практических расчетах их разделение на элементарные явления не всегда возможно и целесообразно. Обычно результат одновременного действия отдельных элементарных процессов приписывается одному из них, который считается главным. Влияние же остальных (второстепенных) явлений сказывается лишь на количественной характеристике основного процесса [7].

Теплопередачей называется перенос теплоты от одной подвижной среды (горячей) к другой (холодной) через твердую стенку. Теплопередача представляет собой сложный процесс, в котором теплота передается всеми способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Интенсивность теплопередачи характеризуется коэффициентом теплопередачи, численная величина которого определяется количеством теплоты, проходящим через единицу поверхности стенки в единицу времени от горячего к холодному теплоносителю при разности температур между ними в один градус.

Тепловая энергия распространяется от более нагретого тела к менее нагретому. Количество переносимого тепла, проходящее в единицу времени через произвольную площадку, называют **тепловым потоком** Q , Дж/с (Вт). Тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности, называют **плотностью теплового потока**, Вт/м²:

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (4.1)$$

4.1.1. Теплопроводность через однослойную и многослойную плоскую стенку

Уравнение теплопроводности через однослойную плоскую стенку (рис. 4.2) имеет вид

$$Q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})F = R^{-1}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})F, \quad (4.2)$$

где $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{н}}$ – температура внутренней и наружной поверхности стенки, °С; λ – коэффициент теплопроводности стенки (зависит от материала и характеризует его способность проводить тепло, Вт/(м·К); δ – толщина стенки, м; $R = \delta / \lambda$ – термическое сопротивление стенки, (м²·К)/Вт; F – площадь стенки, м².

Для многослойной стенки термическое сопротивление вычисляется по формуле

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.3)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i -того слоя, Вт/(м·К); δ_i – толщина i -того слоя, м.

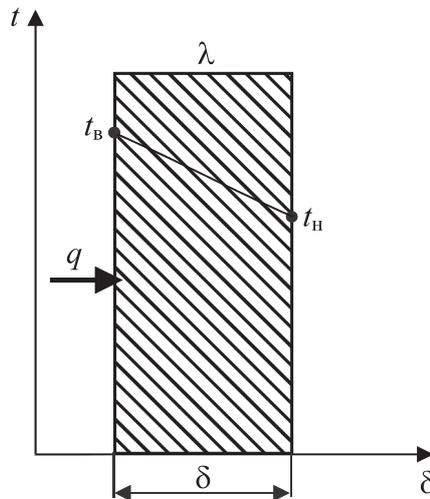


Рис. 4.2. Теплопроводность
через однослойную плоскую стенку

Пример. Стена из силикатного кирпича толщиной 115 мм имеет наружную температуру -13°C . Температура в помещении составляет 21°C . Найти плотность теплового потока через стенку, если ее теплопроводность равна $0,82 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Решение. Плотность теплового потока рассчитывается по формуле

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) = \frac{0,82}{115 \cdot 10^{-3}} \cdot [21 - (-13)] = 242,43 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

4.1.2. Теплопередача через многослойную плоскую стенку

Уравнение теплопередачи через многослойную плоскую стенку (рис. 4.3) имеет вид

$$Q_{\text{T}} = k \Delta t F = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \right)^{-1} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) F, \quad (4.4)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; Δt – температурный напор; $t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха внутри помещения, $^{\circ}\text{C}$; F – площадь поверхности стенки, м^2 ; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи воздуха со стороны помещения; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружного воздуха, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; R – термическое сопротивление многослойного ограждения, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

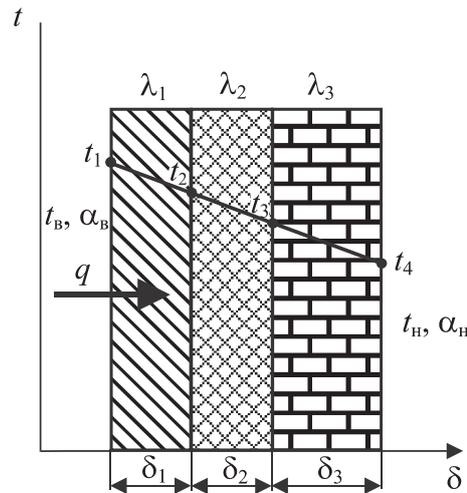


Рис. 4.3. Теплопередача через многослойную плоскую стенку

Пример. Бетонная стена толщиной 138 мм с коэффициентом теплопроводности 1 Вт/(м·К) утеплена стекловолокном толщиной 10 мм с коэффициентом теплопроводности 0,06 Вт/(м·К). Определить коэффициент теплопередачи утепленной бетонной стены, если $\alpha_B = 5$ Вт/(м²·К), $\alpha_H = 25$ Вт/(м²·К).

Решение. Термическое сопротивление утепленной стенки вычисляется по формуле (4.3):

$$R_{\text{ст}} = R_{\text{б}} + R_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{б}}}{\lambda_{\text{б}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0,138}{1} + \frac{0,01}{0,06} = 0,305 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

Коэффициент теплопередачи утепленной бетонной стены вычисляется по формуле (4.4):

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_B} + R_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_H} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{5} + 0,305 + \frac{1}{25} \right)^{-1} = 1,835 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

4.1.3. Инfiltrация

Тепловой поток за счет воздухообмена через неплотности в конструкции здания определяется объемным расходом воздуха V_B , м³/ч, который может быть выражен через коэффициент инfiltrации m .

Инfiltrация – проникновение холодного наружного воздуха в помещение через неплотности ограждения.

Коэффициент инфильтрации m – кратность воздухообмена помещения объемом V_{Π} за 1 ч:

$$m = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\Pi}}. \quad (4.5)$$

Тепловой поток за счет инфильтрации в помещении рассчитывается по формуле, Вт

$$\begin{aligned} Q_{\text{и}} &= \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} c_{p,\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) = \\ &= \frac{m V_{\Pi} \rho_{\text{в}} c_{p,\text{в}}}{3600} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) = \frac{m V_{\Pi}}{3} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \end{aligned} \quad (4.6)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $c_{p,\text{в}}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Потери теплоты через стены, полы и потолки различны, и для каждой поверхности их необходимо рассчитывать отдельно. В общем случае суммарные потери теплоты в помещении составляют

$$Q = \left(\sum_{i=1}^n k_i F_i + \frac{m V_{\Pi}}{3} \right) (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (4.7)$$

где k_i – коэффициент теплопередачи i -той поверхности, Вт/(м²·К).

Пример. Температура воздуха в помещении составляет 19°C, а температура наружного воздуха равна –15°C. Объем помещения 43 м³. Потери теплоты за счет инфильтрации составляют 135 Вт. Найти коэффициент инфильтрации воздуха.

Решение. Коэффициент инфильтрации рассчитывается по формуле (4.7):

$$m = \frac{3Q_{\text{и}}}{V_{\Pi}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})} = \frac{3 \cdot 135}{43 \cdot [19 - (-15)]} = 0,277.$$

4.2. Технические системы зданий

1. **Система отопления** – это совокупность конструктивных элементов со связями между ними, предназначенными для получения, переноса и передачи необходимого количества теплоты в обогреваемое помещение.

Основными элементами системы отопления являются тепловой источник, теплопровод и отопительные приборы.

Системы отопления бывают централизованные и децентрализованные. В децентрализованных системах источник теплоты и теплоприемники потребителей либо совмещены в одном агрегате, либо размещены столь близко, что передача теплоты от источника до теплоприемников может осуществляться практически без промежуточного звена – тепловой сети.

Системы децентрализованного теплоснабжения разделяются на индивидуальные и местные. В индивидуальных системах теплоснабжение каждого помещения (участка цеха, комнаты, квартиры) обеспечивается от отдельного источника. К таким системам, в частности, относятся печное и поквартирное отопление. В местных системах теплоснабжение каждого здания обеспечивается от отдельного источника теплоты, обычно от местной или индивидуальной котельной. К этой системе, в частности, относится так называемое центральное отопление зданий.

В системах централизованного теплоснабжения источник теплоты и теплоприемники потребителей размещены отдельно, часто на значительном расстоянии, поэтому теплота от источника до потребителей передается по тепловым сетям.

В зависимости от степени централизации системы централизованного теплоснабжения можно разделить на следующие четыре группы:

- групповое – теплоснабжение от одного источника группы зданий;
- районное – теплоснабжение от одного источника нескольких групп зданий (района);
- городское – теплоснабжение от одного источника нескольких районов;
- межгородское – теплоснабжение от одного источника нескольких городов.

Отопительные приборы предназначены для теплопередачи теплоты от теплоносителя в обогреваемое помещение. Различают радиационные (излучатели, потолочные панели), конвективно-радиационные (радиаторы, гладкотрубные приборы) и конвективные отопительные приборы (конвекторы, теплый пол).

2. Система вентиляции воздуха – совокупность технических средств, обеспечивающих регулируемый воздухообмен, осуществляемый с целью создания в помещениях воздушной среды,

благоприятной для здоровья и трудовой деятельности человека или проведения технологических процессов.

Системы вентиляции делятся на естественную вентиляцию, в которой воздухообмен осуществляется из-за разницы давления снаружи и внутри здания, и вентиляцию с механическим побуждением, в которой воздухообмен происходит за счет разности давления, создаваемой вентилятором или эжектором. Механический способ вентиляции более эффективен, так как воздух предварительно может быть очищен от пыли и доведен до требуемой температуры и влажности. В механических системах вентиляции используются вентиляторы, электродвигатели, воздухонагреватели, шумоглушители, пылеуловители, автоматика и др., т. е. приборы, позволяющие перемещать воздух в больших пространствах.

3. **Система кондиционирования воздуха** – совокупность устройств, предназначенных для создания и автоматического поддержания в помещении параметров воздушной среды (температуры, влажности, состава, подвижности), наиболее благоприятных для самочувствия человека, ведения технологического процесса, обеспечения сохранности ценностей культуры и искусства, независимо от изменения параметров наружного воздуха.

4. **Система водоснабжения** – комплекс сооружений для обеспечения определенной группы потребителей водой в требуемых количествах и требуемого качества. Кроме того, система водоснабжения должна обеспечивать снабжение потребителей водой без недопустимого снижения установленных показателей своей работы в отношении количества или качества подаваемой воды (перерывы или снижение подачи воды или ухудшение ее качества недопустимы).

По назначению системы водоснабжения делятся:

- на системы водоснабжения населенных мест (городов, поселков);
- системы производственного водоснабжения;
- системы сельскохозяйственного водоснабжения;
- системы противопожарного водоснабжения;
- комбинированные системы водоснабжения (хозяйственно-производственные, хозяйственно-противопожарные и т. д.).

По способу использования воды:

- системы прямоточного водоснабжения (с однократным использованием воды);
- системы оборотного водоснабжения;
- системы с повторным использованием воды.

Система водоснабжения должна обеспечивать получение воды из природных источников, ее очистку, если это вызывается требованиями потребителей, и подачу к местам потребления.

Канализация – составная часть системы водоснабжения и водоотведения, предназначенная для удаления твердых и жидких продуктов жизнедеятельности человека, хозяйственно-бытовых и дождевых сточных вод с целью их очистки от загрязнений и дальнейшей эксплуатации или возвращения в водоем.

Задачи

4.1. Определить суммарные потери теплоты в гараже, стенка которого состоит из шлакобетона толщиной $\delta = 0,18$ м, высотой $H = 3,1$ м и длиной $L = 5$ м, если температуры на ее поверхностях $t_1 = 19^\circ\text{C}$ и $t_2 = -8^\circ\text{C}$, а коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,6$ Вт/(м·К). Ширина помещения составляет 4,5 м. Коэффициент инфильтрации воздуха 0,8.

4.2. Во сколько раз уменьшатся тепловые потери через стенку здания, если между двумя слоями кирпичей толщиной $\delta_k = 0,25$ м, установить прокладку из минеральной ваты толщиной $\delta_{y.t.} = 0,05$ м? Коэффициенты теплопроводности кирпичной кладки и минеральной ваты соответственно равны $\lambda_k = 0,5$ Вт/(м·К) и $\lambda_{y.t.} = 0,047$ Вт/(м·К).

4.3. Стенка печи состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича ($\delta_1 = 500$ мм) и строительного кирпича ($\delta_2 = 250$ мм). Температура внутри печи 1300°C , температура окружающего пространства 25°C . Определить: а) потери теплоты с 1 м^2 поверхности стенки; б) температуру t_3 на границе между огнеупорным и строительным кирпичом. Коэффициент теплоотдачи от печных газов к стенке $\alpha_1 = 34,8$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$); коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2 = 16,2$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). Коэффициент теплопроводности огнеупорного кирпича $\lambda_1 = 1,16$ Вт/(м·К); коэффициент теплопроводности строительного кирпича $\lambda_2 = 0,58$ Вт/(м·К).

4.4. Аппарат диаметром 2 м и высотой 5 м покрыт слоем теплоизоляции из асбеста толщиной 75 мм. Температура стенки аппарата 146°C , температура наружной поверхности изоляции 40°C . Определить расход теплоты (тепловой поток) через слой изоляции.

4.5. Определить тепловой поток через стены здания общей поверхностью $F = 2000 \text{ м}^2$ для трех вариантов:

1) стена бетонная толщиной $\delta = 300 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_b = 1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$;

2) стена кирпичная толщиной $\delta = 300 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_k = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$;

3) стена кирпичная, между двумя слоями кирпичной кладки с толщиной каждого слоя $\delta = 150 \text{ мм}$ установлена прокладка пенопласта толщиной $\delta_p = 50 \text{ мм}$ с коэффициентом теплопроводности $\lambda_p = 0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$.

Температура на внутренней и внешней поверхностях стен соответственно равна $t_{\text{вн}} = 16^\circ\text{C}$ и $t_{\text{н}} = -21^\circ\text{C}$. Рассчитать снижение потерь тепла через стены здания по сравнению с комбинированной стеной.

4.6. Здание старой постройки не удовлетворяет современным теплотехническим требованиям, что приводит к значительным потерям теплоты через наружные стеновые ограждения толщиной $\delta_c = 0,2 \text{ м}$ с коэффициентом теплопроводности $\lambda_c = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. После утепления здания теплоизоляционным материалом с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{и}} = 0,085 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ термическое сопротивление наружной стены $R = 2,5 \text{ м}^2\text{C/Вт}$ стало соответствовать нормативу. Во время отопительного сезона, длящегося с октября по апрель, температура помещения поддерживается равной $t_{\text{п}} = 21^\circ\text{C}$, средняя температура наружного воздуха самого холодного месяца года равна $t_{\text{н}} = (-10)^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха помещения и наружного воздуха соответственно равны $\alpha_{\text{п}} = 5 \text{ Вт/(м}^2\text{C)}$ и $\alpha_{\text{н}} = 25 \text{ Вт/(м}^2\text{C)}$. Определить толщину изоляции и экономию условного топлива за отопительный сезон после реконструкции здания, приходящейся на 1 м^2 ограждения.

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В БЫТУ

5.1. Передача электрической энергии по линиям электропередач

Транспортирование электрической энергии от источника к потребителю осуществляется по линиям электропередач. Потери в ЛЭП можно оценить исходя из тепловых потерь в проводнике, обусловленных законом Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 R \tau, \quad R = \frac{\rho l}{S}, \quad (5.1)$$

где Q – количество теплоты, выделяемое в проводнике, Дж; I – сила тока в проводнике, А; R – его сопротивление, Ом; τ – время, с; ρ – удельное сопротивление, Ом·мм²/м; l – длина проводника, м; S – площадь его поперечного сечения, мм². Для расчета передаваемой мощности можно воспользоваться средними значениями тока и напряжения в сети:

$$P = UI. \quad (5.2)$$

Для уменьшения тепловых потерь согласно (5.1) необходимо уменьшить сопротивление проводов или силу тока в них. Уменьшение сопротивления возможно при увеличении площади поперечного сечения провода, однако это утяжеляет провод и увеличивает затраты на материалы для его изготовления.

Например, для уменьшения количества тепловых потерь за счет уменьшения R в 100 раз нужно увеличить массу провода также в 100 раз. Аналогичный эффект может быть достигнут за счет уменьшения тока в 10 раз.

Значит, необходимо снижать силу тока в ЛЭП. Тогда согласно формуле (5.2) для сохранения передаваемой мощности надо увеличивать напряжение в сети. Таким образом, экономически целесообразно при передаче электрической энергии на большие расстояния использовать высокие и сверхвысокие напряжения.

Линии электропередач делятся на воздушные (ВЛЭП) и подземные (КЛЭП). Воздушные ЛЭП выполняют в основном из легких, прочных и хорошо проводящих ток металлов и сплавов: алюминия и сталеалюминия. Кабельные линии электропередач изготавливают с добавлением меди – наиболее токопроводящего металла, что позволяет снизить потери при транспортировке электрической энергии при высоких нагрузках.

Пример. В ЛЭП силу тока уменьшили в 2 раза и произвели замену провода, уменьшив диаметр провода в 2 раза. Как изменятся тепловые потери в линии электропередач?

Решение. Тепловые потери до замены провода и после замены определяются по формуле (5.1):

$$Q_1 = I_1^2 R_1 t = 4I_1^2 \frac{\rho l}{\pi d_1^2}, \quad Q_2 = I_2^2 R_2 t = 4I_2^2 \frac{\rho l}{\pi d_2^2}.$$

Поскольку тепловые потери прямо пропорциональны квадрату силы тока и обратно пропорциональны квадрату диаметра провода, то общие тепловые потери не изменятся:

$$Q_1 = Q_2.$$

5.2. Потери энергии в трансформаторах

При транспортировке электроэнергии потребителям для снижения напряжения в сети используются понижающие трансформаторы.

Пусть у трансформатора имеются две индуктивно связанные между собой обмотки на общем магнитопроводе. На первичную обмотку трансформатора подаются переменные ток и напряжение U_1, I_1 , а со вторичной обмотки трансформатора снимаются переменные ток и напряжение U_2, I_2 (см. рис. 5.1).

Предположим, что мощность без потерь передается из первичной обмотки трансформатора во вторичную обмотку. Тогда для идеального трансформатора справедливы равенства

$$P_1 = P_2, \quad I_1 U_1 = I_2 U_2. \quad (5.3)$$

ЭДС, индуцируемая в первичной и вторичной обмотке трансформатора, оценивается по количеству витков и изменению магнитного потока, проходящего через один виток:

$$U_1 \approx \varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad U_2 \approx \varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (5.4)$$

где N_1 и N_2 – число витков в первичной и вторичной обмотке; Φ_0 – магнитный поток. Из формул (5.3) и (5.4) следует

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (5.5)$$

Здесь K – это коэффициент трансформации и для понижающего трансформатора ($U_2 < U_1$) он всегда превышает единицу. Также из формулы (5.5) следует, что число витков во вторичной обмотке понижающего трансформатора будет меньше, чем число витков в первичной обмотке при постоянном сечении проводников.

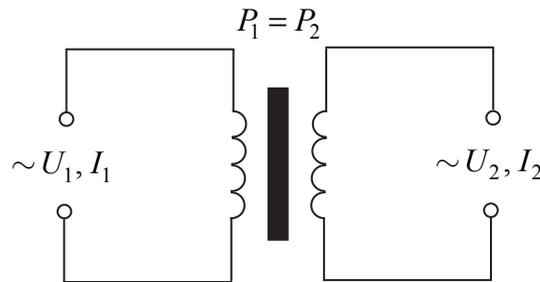


Рис. 5.1. Схема трансформатора

Трансформатору можно сопоставить электрическую цепь, представленную на рис. 5.2, *а*, причем, кроме нагрузки потребителей R , в ней будет присутствовать и индуктивное сопротивление X_L обмоток трансформатора. Наличие индуктивного сопротивления в трансформаторах приводит к дополнительным потерям за счет реактивной мощности в цепи переменного тока. Однако эта реактивная мощность может быть уменьшена путем введения в электрическую цепь конденсатора (рис. 5.2, *б*).

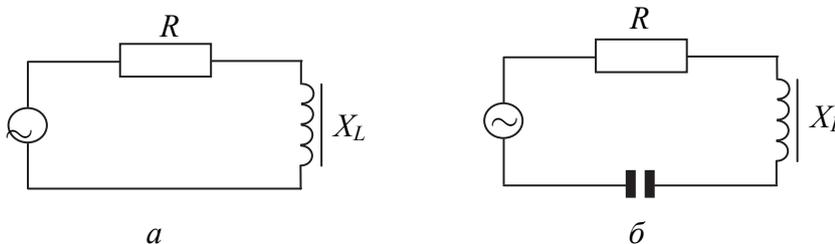


Рис. 5.2. Электрическая цепь для трансформатора:
а – без компенсатора; *б* – с компенсатором в виде батареи конденсаторов

Чтобы разобраться, каким образом действуют компенсаторные устройства, необходимо ввести понятие полного сопротивления цепи, или импеданса. В общем случае импеданс представляет собой комплексное число, действительная часть которого описывает активное сопротивление цепи R , а мнимая часть – реактивное сопротивление цепи X :

$$Z = R + jX, \quad (5.6)$$

где j – мнимая единица. Реактивное сопротивление цепи определяется выражением

$$X = X_L - X_C. \quad (5.7)$$

Именно это соотношение «подсказывает», что для уменьшения реактивного сопротивления цепи, обусловленного индуктивностью, необходимо ввести в цепь емкостное сопротивление X_C , близкое по значению к X_L . Знак «–» в формуле (5.7) возникает вследствие разности фаз между током и напряжением на индуктивном и емкостном сопротивлении (рис. 5.3). Известно, что на индуктивности ток по фазе отстает от напряжения на $\pi/2$, а на емкости ток по фазе опережает напряжение на $\pi/2$. Таким образом, общая разность фаз для напряжений на индуктивности и емкости будет равна π , что соответствует противоположному направлению векторов U_L и U_C (см. рис. 5.3, б). Аналогичную векторную диаграмму можно построить и для сопротивлений (см. рис. 5.4, а).

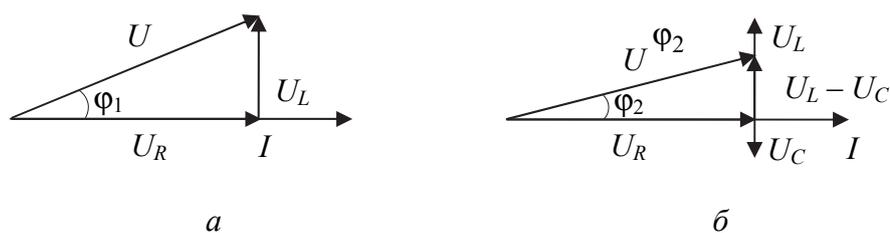


Рис. 5.3. Векторные диаграммы для токов и напряжений:

а – для цепи с индуктивностью; б – для цепи с индуктивностью и емкостью

Для наглядной интерпретации полного сопротивления цепи в рассмотрение вводят понятие треугольника сопротивлений. Гипотенуза этого треугольника равна модулю импеданса:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (5.8)$$

а катеты равны соответственно активному и реактивному сопротивлению цепи (рис. 5.4, а).

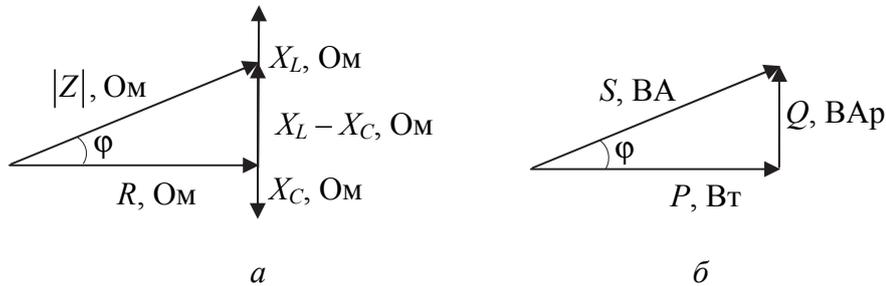


Рис. 5.4. Векторные диаграммы:
а – для сопротивлений; б – для мощностей

Аналогичным образом можно ввести понятие полной мощности S , активной мощности P и реактивной мощности Q (рис. 5.4, б). Из рис. 5.4 видно, что реактивное сопротивление и реактивная мощность будут тем меньше, чем меньше будет угол φ в треугольнике сопротивлений или в треугольнике мощностей. Косинус этого угла называют коэффициентом мощности, по определению он равен

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{P}{S}. \quad (5.9)$$

Чем меньше $\cos \varphi$, тем больше потребляемая реактивная мощность устройствами. Кроме трансформаторов, потребителями реактивной мощности являются электродвигатели, сварочные аппараты, индукционные электроплиты и другое электротехническое оборудование. Реактивная мощность таких устройств может быть уменьшена за счет введения различных компенсаторов.

Пример 1. В цепь переменного тока включены последовательно соединенные резистор $R = 60$ Ом и катушка индуктивности $X_L = 80$ Ом. Для компенсации реактивной мощности последовательно в цепь включен конденсатор с емкостным сопротивлением $X_C = 50$ Ом. Напряжение в питающей электросети равно $U = 220$ В. Найти коэффициенты мощности до установки компенсатора и после. Определить, на какую величину изменилась активная потребляемая мощность.

Решение. Для цепи без компенсатора импеданс и модуль импеданса определяются по следующим формулам:

$$Z_1 = R + jX_L = 60 + 80j;$$

$$|Z_1| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = 100 \text{ Ом.}$$

Для цепи с компенсатором импеданс и модуль импеданса соответственно равны:

$$Z_2 = R + j(X_L - X_C) = 60 + 30j,$$

$$|Z_2| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = 67 \text{ Ом.}$$

Расчет коэффициентов мощности произведем по формуле (5.9):

$$\cos \varphi_1 = \frac{60}{100} = 0,6; \quad \cos \varphi_2 = \frac{60}{67} = 0,9.$$

Вычислим активную потребляемую мощность при отсутствии компенсатора. Векторная диаграмма для токов и напряжений будет выглядеть аналогично рис. 5.3, а. Из прямоугольного треугольника имеем

$$P_1 = U_R I = U \cos \varphi_1 \frac{U}{|Z_1|} = \frac{220^2 \cdot 0,6}{100} = 290 \text{ Вт.}$$

Аналогично проводим расчет активной потребляемой мощности при наличии компенсатора, воспользовавшись векторной диаграммой (рис. 5.3, б):

$$P_2 = U_R I = U \cos \varphi_2 \frac{U}{|Z_2|} = \frac{220^2 \cdot 0,9}{67} = 650 \text{ Вт.}$$

При введении компенсатора активная потребляемая мощность выросла на величину

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 650 - 290 = 360 \text{ Вт.}$$

Однако на практике обычно встречаются ситуации, когда мощность нагрузки остается постоянной величиной $P = \text{const}$ и требуется рассчитать, какую реактивную мощность необходимо компенсировать, чтобы значение коэффициента мощности возросло до определенной величины. Эта мощность рассчитывается по формуле

$$Q_C = Pk = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2), \quad (5.10)$$

где k – коэффициент преобразования активной мощности в реактивную мощность компенсирующего устройства (конденсатора). Значения коэффициента k можно найти в табулированном виде.

Годовая экономия электроэнергии в кВт·ч при установке компенсирующих устройств рассчитывается по следующей формуле [7]:

$$\Delta \mathcal{E} = Q_C K_3 \tau, \quad (5.11)$$

где K_3 – экономический эквивалент, равный 0,1 кВт/кВАр; τ – количество часов работы компенсирующего устройства в год.

Пример 2. Коэффициент мощности установки равен 0,63. Определить, какую реактивную мощность необходимо компенсировать, чтобы требуемый коэффициент мощности стал равным 0,97. Активная потребляемая мощность составляет 120 Вт.

Решение. Выразим тангенс угла через коэффициент мощности и воспользуемся формулой (5.10):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}.$$

Тогда реактивная мощность конденсатора будет равна

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 120 \cdot (1,23 - 0,25) = 117,6 \text{ ВАр}.$$

5.3. Использование электрической энергии на производстве. Электропривод

Для производственных нужд электрическая энергия используется в электропотребляющих процессах и установках, где преобразуется в механическую (электропривод), тепловую (электротермические установки) и химическую (гальваника, электролиз).

Наибольшие возможности по энергосбережению как при проектировании новых, так и при модернизации действующих электроприводов (в основном, это асинхронные двигатели) предоставляют регулируемые электроприводы: тиристорный регулятор напряжения в двигателе и преобразователи частоты вращения двигателя. Тиристорные регуляторы широко используются в качестве так называемых «мягких» пускателей или «мягких» стартеров. За счет постепенного повышения подаваемого на двигатель напряжения они обеспечивают ограничение пусковых токов асинхронных и синхронных двигателей, что повышает надежность работы электропривода и продляет межремонтный период его эксплуатации.

Применение частотно-управляемых регуляторов пуска и торможения двигателей позволяет снизить потери энергии в переходных процессах за счет возможности ее возврата в сеть при торможении. В промышленности более половины энергии приходится на привод центробежных механизмов: насосов, компрессоров, вентиляторов. Здесь с помощью регулируемого электропривода изменяется мощность механизма в зависимости от потребностей.

Пример. Экономия воды в системах водоснабжения связана с устранением ненужных избытков давления (напора) без ущерба для потребителей. С этой целью сетевой насос снабдили частотным преобразователем, позволяющим снизить расход воды на 9%. Номинальная производительность насоса составляет $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$, номинальное число оборотов электродвигателя равно 1500 об/мин. Определить годовую экономию электроэнергии за счет внедрения частотного регулятора, если мощность электродвигателя насоса составляет 630 Вт, число часов работы в год равно 4600 ч.

Решение. При неизменном давлении производительность насоса прямо пропорциональна числу оборотов электродвигателя:

$$\frac{Q_{\text{НОМ}}}{Q} = \frac{n_{\text{НОМ}}}{n},$$

где $Q_{\text{НОМ}}$ – номинальная производительность насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$; Q – производительность насоса на пониженных оборотах, $\text{м}^3/\text{ч}$. Согласно условию она равна

$$Q = 0,91Q_{\text{НОМ}} = 0,91 \cdot 1250 = 1138 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тогда пониженное число оборотов электродвигателя определится по формуле

$$n = \frac{Q}{Q_{\text{НОМ}}} n_{\text{НОМ}} = \frac{1138}{1250} \cdot 1500 = 1366 \text{ об/мин},$$

а соответствующая мощность будет равна

$$N = N_{\text{НОМ}} \frac{n^3}{n_{\text{НОМ}}^3} = 630 \cdot \frac{1366^3}{1500^3} = 475 \text{ кВт}.$$

Экономия электрической энергии за год рассчитывается по формуле

$$\Delta W = (N - N_{\text{ном}})TK_{\text{и}} = 155 \cdot 4600 \cdot 1 = 7,13 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования электрической мощности, принят равным единице.

5.4. Электротермические установки

Электротермические установки (электродуговые печи) служат для преобразования электрической энергии в теплоту, которая передается обрабатываемому материалу для качественного изменения его характеристик. Они классифицируются по способу преобразования электрической энергии в тепловую: 1) прямой и косвенный нагрев за счет сопротивления; 2) электродуговой разогрев; 3) нагрев в переменном магнитном поле; 4) нагрев в переменном электрическом поле; 5) нагрев электронным пучком; 6) лазерный разогрев; 7) плазменный разогрев.

По рабочей температуре печи делят на низкотемпературные (до 500–600°C), среднетемпературные (до 1250°C) и высокотемпературные (свыше 1250°C). Чем выше температура печи, тем более огнеупорные материалы используются в кладке и футеровке.

По режиму работы электродуговые печи делят на 2 группы: 1) непрерывного действия; 2) периодического действия.

Энергосбережение при эксплуатации электродуговых печей может быть достигнуто за счет:

- поддержания низкой температуры наружной поверхности печи 40–50°C;
- использования современных теплоизоляционных материалов;
- улучшения герметичности печей;
- применения автоматического регулирования температуры, форсированного разогрева в начале процесса.

Электрическая мощность P электродуговых печей определяется полезным тепловым потоком, требуемым для нагрева обрабатываемого материала. Тогда установленную мощность печи можно оценить по формуле [8]:

$$P_{\text{уст}} = k \frac{P}{\eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}}}, \quad (5.12)$$

где $k = 1,1–1,6$ – коэффициент запаса мощности печи, учитывающий увеличение тепловых потерь в процессе эксплуатации; $\eta_{\text{э}}$ и

η_T – электрический и тепловой КПД. Коэффициент запаса зависит от типа электротермической установки и ее мощности. Самым высоким КПД обладают печи и установки нагрева за счет сопротивления с $\eta_э = 0,9–1,0$ и $\eta_T = 0,7–0,9$.

Пример 1. В результате замены тепловой изоляции электропечи тепловые потери сократились на 40%. Определить увеличение полезно используемой теплоты, если до реконструкции печи соотношение полезно используемого тепла и тепловых потерь составляло 7 : 3.

Решение. Запишем тепловой баланс для печи до реконструкции и после реконструкции:

$$Q = Q_{\text{пол.1}} + Q_{\text{пот.1}};$$

$$Q = Q_{\text{пол.2}} + Q_{\text{пот.2}} = Q_{\text{пол.2}} + 0,6Q_{\text{пот.1}}.$$

Отсюда следует, что после реконструкции печи полезное количество тепла определяется выражением

$$Q_{\text{пол.2}} = Q_{\text{пол.1}} + Q_{\text{пот.1}} - 0,6Q_{\text{пот.1}} = Q_{\text{пол.1}} + 0,4Q_{\text{пот.1}}.$$

Согласно соотношениям для полезно используемого тепла и потерь

$$Q_{\text{пол.1}} = 0,7Q;$$

$$Q_{\text{пот.1}} = 0,3Q.$$

Полезно используемое тепло $Q_{\text{пот.2}}$ переписывается в виде

$$Q_{\text{пол.2}} = 0,7Q + 0,3 \cdot 0,4Q = 0,82Q.$$

Таким образом, количество полезно используемого тепла увеличится в

$$\frac{Q_{\text{пол.2}}}{Q_{\text{пол.1}}} = \frac{0,82Q}{0,7Q} = 1,17 \text{ раза, или на } 17\%.$$

Пример 2. Рассчитать установочную мощность электропечи, полагая электрическую мощность равной 500 кВт, коэффициент запаса мощности равным $k = 1,3$, электрический КПД равным 95% и термический КПД равным 65%.

Решение. Воспользуемся формулой (5.12):

$$P_{\text{уст}} = k \frac{P_2}{\eta_э \eta_T} = 1,3 \cdot \frac{500}{0,95 \cdot 0,65} = 1053 \text{ кВт.}$$

5.5. Использование электрической энергии для освещения

Электрическая энергия используется для освещения помещений при недостатке естественного света. В промышленности на освещение в среднем расходуется до 10% потребляемой электроэнергии. Для организации рационального освещения зданий применяют общее, местное или комбинированное освещение.

Основными элементами системы искусственного освещения служат лампы и осветительные приборы (светильники). *Лампа* – это электрическое устройство, предназначенное для излучения света. *Светильник* – прибор, перераспределяющий, фильтрующий и преобразующий свет, излучаемый одной или несколькими лампами и содержащий все необходимые детали для установки, крепления его и ламп. Среди видов ламп можно выделить следующие: лампы накаливания, галогенные лампы, люминесцентные лампы (газоразрядные лампы низкого давления), светодиоды и газоразрядные лампы высокого давления, используемые в основном в промышленных зданиях и сооружениях и для освещения больших территорий.

Осветительные приборы характеризуются потребляемой электрической мощностью и световым потоком. *Световой поток Φ* – количество энергии, переносимое излучением через какую-либо поверхность за единицу времени и оцененное в соответствии с относительной спектральной чувствительностью среднего человеческого глаза. Световой поток измеряется в люменах (лм). Для характеристики освещения рабочей поверхности вводится понятие освещенности. *Освещенностью поверхности E* называют отношение падающего светового потока к ее площади S :

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (5.13)$$

Освещенность измеряется в люксах (лк). Освещенность рабочих поверхностей должна быть достаточной. Она определяется санитарно-гигиеническими нормативами и зависит от вида выполняемой работы. Ее значение можно измерить при помощи люксметра.

Энергетическая эффективность работы светильников характеризуется световой отдачей H , которая равна отношению светового потока Φ к потребляемой мощности P

$$H = \frac{\Phi}{P} \quad (5.14)$$

и измеряется в лм/Вт. Световая отдача различных видов ламп представлена в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Характеристики источников освещения

Тип источника света	Маркировка	Светоотдача, лм/Вт	Коэффициент запаса, $K_{эл}$	Срок службы, ч
Лампы накаливания	ЛН	12	1,1	1 000
Галогенные лампы накаливания	КГ	18	1,1	2 000
Люминесцентные лампы	ЛБ	70	1,3	12 000
Светодиоды	LED	90	1,1	50 000
Ртутные лампы высокого давления	ДРЛ	50	1,3	12 000
Металлогалогенные лампы высокого давления	ДРИ	80	1,3	12 000
Натриевые лампы высокого давления	ДНаТ	100	1,3	12 000

Из таблицы видно, что наибольшей световой отдачей обладают натриевые лампы – 100 лм/Вт, а наибольший срок службы у светодиодных ламп – 50 000 ч.

Пример 1. Определить экономию электрической энергии на освещение за год при замене люминесцентных ламп со световой отдачей 70 лм/Вт на светодиодные лампы со световой отдачей 90 лм/Вт, если годовое потребление электроэнергии составляет 600 кВт·ч/год. Коэффициент запаса считать равным 1,1.

Решение. Экономия электрической энергии определим по формуле

$$\Delta W = W_{\text{год}} (1 - K_{\text{ист}} K_{\text{эл}}),$$

где $K_{\text{ист}} = H / H_{\text{зам}}$, H – световая отдача существующих ламп; $H_{\text{зам}}$ – световая отдача ламп после замены. Подставляя численные значения, имеем

$$\Delta W = 600 \cdot \left(\frac{1 - 1,1 \cdot 70}{90} \right) = 87 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Для достижения энергосберегающего эффекта в газоразрядных лампах применяются различные электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА), способные уменьшать подводенную мощность и осуществлять пуск газового разряда в щадящем режиме с предварительным разогревом электродов. Эффект от их использования может достигать до 20% экономии энергии, при этом еще возрастает срок службы ламп.

Пример 2. Для освещения открытой территории в ночное время используются 4 лампы ДРЛ мощностью 250 Вт. Определить годовую экономию электрической энергии при использовании ЭПРА, если количество часов работы ламп составляет 3600 ч в год, а экономия электрической энергии за счет использования ЭПРА составит 10% ее годового потребления.

Решение. При работе освещения потребление электрической энергии рассчитывается по формуле

$$W = \sum n_i P_i \tau_i,$$

где n_i – количество осветительных приборов одинаковой мощности, шт.; P_i – мощность применяемых одинаковых ламп, кВт; τ_i – число часов работы в году, ч.

Поскольку экономия энергии составит 10% от годового потребления W , то она определится выражением

$$\Delta W = 0,1 \cdot 4 \cdot 0,25 \cdot 3600 = 360 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}.$$

5.6. Экономия электрической энергии бытовыми электроприборами

В быту электроэнергия в основном расходуется для питания бытовых электроприборов и на освещение. Расчет экономии энергии при замене старых ламп на энергосберегающие лампы в этом случае осуществляется точно таким же образом, как и для промышленных предприятий.

Среди большого многообразия бытовых электроприборов, используемых в повседневной жизни, можно выделить устройства, потребляющие значительное количество электрической энергии: электроплиты и электрические духовые шкафы, кондиционеры, посудомоечные машины, утюги, чайники, пылесосы, морозильные и холодильные камеры, стиральные машины, бойлеры, телевизоры

с жидкокристаллическим экраном, мониторы, компьютеры и др. Для удобства расчетов экономии электрической энергии при замене старых электроприборов новыми электроприборы разбиваются на классы по энергопотреблению. Самым экономным по расходованию электроэнергии считается класс А, далее идут классы В, С, D, E, G. Классы А+, А++, А+++ еще более энергосберегающие, чем класс А.

Класс энергоэффективности холодильника определяется индексом I :

$$I = \frac{E_{\text{факт. год}}}{E_{\text{станд. год}}} \cdot 100\%, \quad (5.15)$$

где $E_{\text{факт. год}}$, $E_{\text{станд. год}}$ – фактическое и стандартное (класс D) годовое потребление электрической энергии.

В табл. 5.2 представлено сравнение энергопотребления некоторых видов бытовой техники в зависимости от класса.

Таблица 5.2

Энергопотребление бытовой техники

Наименование	A++	A+	A	B	C
Стиральная машина без сушки, кВт·ч/кг (хлопок 6 кг $t = 60^\circ\text{C}$)	<0,12	0,12–0,14	0,14–0,17	0,35–0,39	0,35–0,39
Стиральная машина с сушкой, кВт·ч/кг (хлопок 6 кг $t = 60^\circ\text{C}$)	<0,48	0,48–0,58	0,58–0,68	0,68–0,81	0,81–0,93
Холодильник	$I < 30$	$30 \leq I < 42$	$42 \leq I < 55$	$55 \leq I < 75$	$75 \leq I < 90$
Посудомоечная машина, кВт·ч/(12 предметов)	<0,74	0,74–0,90	0,90–1,06	1,06–1,25	1,25–1,45

На классы по энергопотреблению разбивается также офисная техника и техника промышленного назначения.

Задачи

5.1. Рассчитать уменьшение тепловых потерь (в процентах) при замене алюминиевого провода на медный, если удельное сопротивление алюминия равно $0,03 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, удельное сопротивление меди составляет $0,018 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

5.2. Активная мощность электродвигателя составляет 5 кВт, полная мощность – 5,88 ВА. Определить коэффициент мощности электродвигателя и его реактивную мощность.

5.3. В электрическую цепь трансформатора с активным сопротивлением 50 Ом и индуктивным сопротивлением 120 Ом последовательно включили конденсатор с емкостным сопротивлением 100 Ом. Вычислить коэффициент мощности для цепи с конденсатором и без конденсатора. Определить, как изменится при этом потребляемая реактивная мощность.

5.4. Рассчитать импеданс, коэффициент мощности и реактивное сопротивление электрической цепи, если в треугольнике сопротивлений гипотенуза равна 125 Ом, а прилежащий катет – 100 Ом.

5.5. Вычислить реактивную мощность конденсатора, который необходимо подключить к электрической цепи с активной потребляемой мощностью 150 Вт, если коэффициент мощности нужно увеличить с 0,65 до 0,93.

5.6. Номинальная производительность центробежного насоса составляет 1100 м³/ч с номинальным числом оборотов электродвигателя 1600 об/мин. Требуемая производительность насоса с учетом неравномерности расхода воды в дневное и ночное время суток равна 1000 м³/ч. Определить годовую экономию электроэнергии за счет внедрения ЧРЭП, если мощность электродвигателя насоса составляет 550 Вт, число часов работы в году равно 8760 ч.

5.7. В результате износа тепловой изоляции электропечи тепловые потери увеличились на 30%. Определить, на сколько процентов снизилось количество полезно используемого тепла, если в начале срока эксплуатации соотношение полезно используемого тепла и тепловых потерь составляло 8 : 2.

5.8. Рассчитать установочную мощность электропечи, если электрическая мощность равна 800 кВт, коэффициент запаса мощности равен $k = 1,1$, электрический КПД равен 90% и термический КПД равен 85%.

5.9. Определить экономию электрической энергии на освещение за год при замене ламп накаливания со световой отдачей 12 лм/Вт светодиодными лампами со световой отдачей 80 лм/Вт, если годовое потребление электроэнергии составляет 600 кВт·ч/год. Коэффициент запаса считать равным 1,1.

5.10. Для освещения стройплощадки в темное время суток используются 3 натриевые лампы мощностью 400 Вт. Определить годовую экономию электрической энергии при использовании ЭПРА с КПД 95%, если количество часов работы ламп составляет 3200 ч в год, а экономия электрической энергии за счет использования ЭПРА составит 15% ее годового потребления.

5.11. Для холодильника энергосберегающего класса В потребляемая мощность составляет 1,2 кВт, а для холодильника энергосберегающего класса А потребляемая мощность – 0,7 кВт. Определить экономию энергии за год при замене холодильника класса В на холодильник класса А, если компрессор холодильника в среднем половину времени работает, половину времени простаивает.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – это источники энергии, запасы которых восполняются естественным образом. К ВИЭ относятся энергия Солнца, Земли, ветра, растительной биомассы, водных потоков.

Использование ВИЭ, как правило, не оказывает серьезного вредного воздействия на окружающую среду, в большинстве своем они являются экологически чистыми и повсеместно доступными источниками энергии. К недостаткам ВИЭ относятся невысокая плотность энергетических потоков и их непостоянство во времени. Следствием этого являются значительные затраты на оборудование, обеспечивающее сбор, аккумулирование и преобразование энергии.

Вместе с тем технологии использования различных ВИЭ активно развиваются во многих странах мира, значительная часть их успешно конкурируют на рынке энергетических услуг, в том числе при производстве электрической и тепловой энергии.

6.1. Солнечная энергия

Энергия Солнца является одним из главных ВИЭ. Она широко используется для нагрева различных теплоносителей (горячее водоснабжение, отопление, сушка, термохимические холодильные установки и др.) и производства электроэнергии (фотоэлектрические преобразователи и солнечные энергоустановки с термодинамическим преобразованием энергии).

Преобразование солнечной энергии в тепловую обеспечивается системами солнечного отопления, основным компонентом которых служит коллектор. Он предназначен для улавливания солнечной радиации и преобразования ее в тепловую энергию. Системы солнечного отопления подразделяются на пассивные и активные (рис. 6.1).

В пассивных системах отопления солнечное излучение воспринимается самим зданием или его отдельными архитектурными

элементами. В активных системах отопления солнечный коллектор является самостоятельным отдельным устройством и включает контур циркуляции теплоносителя.

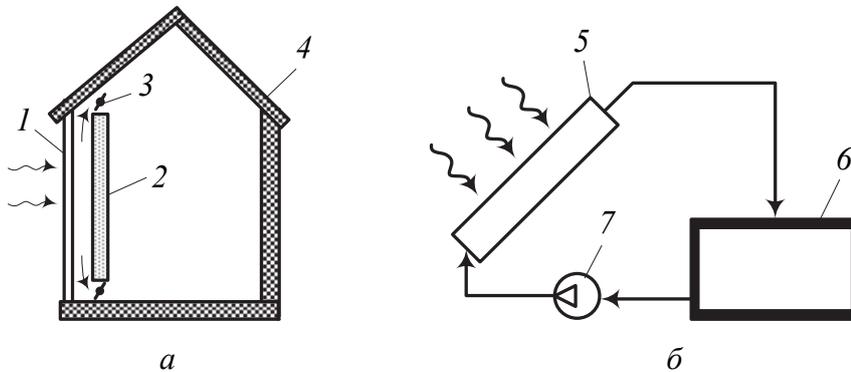


Рис. 6.1. Системы пассивного (а) и активного (б) солнечного отопления:
 1 – стекло; 2 – аккумулирующая стена; 3 – заслонка; 4 – здание;
 5 – коллектор; 6 – накопительный резервуар; 7 – насос

Для получения более высоких температур чем те, которые можно получить с помощью плоских коллекторов, используются концентрирующие коллекторы (рис. 6.2).

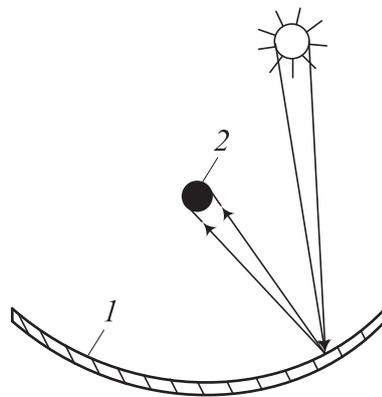


Рис. 6.2. Концентрирующий коллектор:
 1 – концентратор; 2 – приемник

Концентрирующий коллектор включает в себя приемник, поглощающий излучение и преобразующий его в какой-либо другой вид энергии, и концентратор, который является оптической системой, собирающей солнечное излучение с большой поверхности и направляющей его на приемник. Концентратор представляет собой параболическое вогнутое зеркало, выполненное из полиро-

ванного металла. Также могут использоваться линзы, которые концентрируют проходящее через них излучение.

В отличие от плоских нагревателей концентраторы в основном поглощают прямое солнечное излучение. Для обеспечения высокой эффективности процесса улавливания и преобразования солнечной радиации концентрирующий коллектор снабжают системой слежения за Солнцем.

Суммарный тепловой поток, поступающий к теплоносителю, определяется энергетическим балансом:

$$Q = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{пот}}, \quad (6.1)$$

где $Q_{\text{погл}}$ – поток излучения, поглощаемый приемником; $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери приемника.

Поток солнечного излучения, поглощаемого панелью приемника, пропорционален плотности солнечного потока и площади приемной поверхности:

$$Q_{\text{погл}} = \tau_{\text{пок}} \alpha_{\text{п}} S_{\text{п}} E, \quad (6.2)$$

где $\tau_{\text{пок}}$ – коэффициент пропускания прозрачного покрытия, защищающего приемную поверхность ($\tau_{\text{пок}} = 0,8-0,9$); $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения приемной поверхности; $S_{\text{п}}$ – площадь освещенной поверхности, м^2 ; E – плотность солнечного потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

В процессе поглощения температура приемной поверхности повышается. Превышение температуры поглощающей панели $t_{\text{п}}$ над температурой окружающей среды $t_{\text{ос}}$ приводит к потере тепла от приемника:

$$Q_{\text{пот}} = k_{\text{пот}} (t_{\text{п}} - t_{\text{ос}}) S_{\text{п}}, \quad (6.3)$$

где $k_{\text{пот}}$ – коэффициент тепловых потерь, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коэффициент тепловых потерь находится из равенства

$$k_{\text{пот}} = \frac{1}{R} = \frac{1}{\alpha_{\text{возд}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ос}}}, \quad (6.4)$$

где R – термическое сопротивление поверхности приемника, зависящее от его теплоизоляции и от покрытия, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; $\alpha_{\text{возд}}$ – коэффициент теплоотдачи от поглощающей к лучепрозрачной поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_{\text{ос}}$ – коэффициент теплоотдачи от лучепрозрачной поверхности к окружающей среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\delta_{ст}$ – толщина лучепрозрачной поверхности, м; $\lambda_{ст}$ – теплопроводность лучепрозрачной поверхности, Вт/(м·К).

Количество тепла, требуемого для нагрева жидкости, оценивается согласно выражению

$$Q_{ж} = mc(t_{в2} - t_{в1}), \quad (6.5)$$

где m – масса теплоносителя, кг; c – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); $t_{в2}$, $t_{в1}$ – конечная и начальная температуры теплоносителя, °С.

КПД коллектора определяется по формуле

$$\eta = \frac{Q}{S_{п}E} = \eta_0 - k_{пот} \frac{t_{п} - t_{ос}}{E}, \quad (6.6)$$

где η_0 – оптический КПД коллектора.

Преобразование энергии Солнца в электрическую энергию возможно реализовать двумя способами: 1) термодинамическим, при котором солнечная энергия передается теплоносителю с генерацией пара, далее расширяющемуся в турбоагрегатах согласно типичной для ТЭС схеме; 2) фотоэлектрическим, в котором преобразование протекает прямо, без промежуточных этапов.

Для прямого преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию используются фотоэлементы, изготовленные из полупроводниковых материалов, например кремния (рис. 6.3, а). В основе действия фотоэлементов лежит явление возникновения электрического тока при попадании излучения на пластину, состоящую из двух полупроводников с различными электрическими свойствами, находящимися в контакте друг с другом.

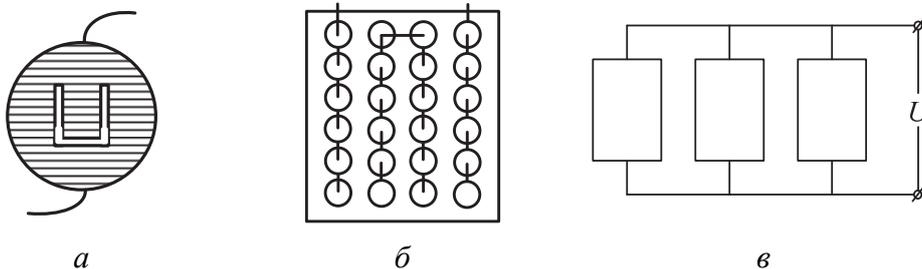


Рис. 6.3. Фотопреобразователи:

а – фотоэлемент; б – солнечный модуль; в – солнечная батарея

Фотоэлементы последовательно соединяют в солнечные модули (рис. 6.3, б), а те, в свою очередь, параллельно соединяются

друг с другом в батарее (рис. 6.3, в). Таким образом, можно строить крупные фотоэлектрические станции.

Мощность солнечной батареи определяется по формуле

$$N = \eta S E, \quad (6.7)$$

где η – КПД солнечной батареи, Вт; S – площадь солнечной батареи, м²; E – плотность потока солнечного излучения, Вт/м².

ЭДС солнечной батареи определяется выражением

$$\text{ЭДС} = \frac{N}{iS}, \quad (6.8)$$

где i – плотность тока, А/см².

Пример 1. Вода нагревается в солнечном коллекторе площадью $S = 3$ м² от температуры 20°С до 25°С. Плотность потока солнечного излучения $E = 700$ Вт/м². Коэффициент поглощения $\alpha = 0,9$, пропускная способность $\tau = 0,9$. Определить, какой объем воды можно нагреть в коллекторе за 1 час. Параметры воды $c_p = 4,182$ кДж/(кг·К), $\rho = 997,2$ кг/м³.

Решение. Определим поток солнечного излучения, который поглощается панелью приемника за 1 ч, по формуле (6.2):

$$Q = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 3 \cdot 700 \cdot 3600 = 6\,123\,600 \text{ Дж.}$$

Из формулы (6.5) определим количество воды, нагреваемой в солнечном коллекторе:

$$m = \frac{Q}{c(t_{B2} - t_{B1})} = \frac{6\,123\,600}{4182 \cdot (25 - 20)} = 292,8 \text{ кг.}$$

Объем воды равен

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{292,8}{997,2} = 0,294 \text{ м}^3.$$

Пример 2. Плотность потока излучения, падающего на поверхность солнечной батареи, составляет $E = 500$ Вт/м². Какую площадь S должна иметь солнечная батарея мощностью $N = 90$ Вт, если ее КПД $\eta = 18\%$?

Решение. Площадь батареи определим из формулы (6.7):

$$S = \frac{N}{\eta E} = \frac{90}{0,18 \cdot 500} = 1 \text{ м}^2.$$

6.2. Энергия ветра

Ветер представляет собой движение воздушных масс земной атмосферы, вызванное перепадом температуры в атмосфере из-за неравномерного ее нагрева солнцем. Устройства, обеспечивающие преобразование энергии ветра в полезную механическую, электрическую или тепловую энергии, называются ветроэнергетическими установками (ВЭУ).

Наиболее эффективным способом утилизации энергии ветра является использование ВЭУ для производства электроэнергии.

Основной элемент ВЭУ – ветроколесо. Вращение ветроколеса при набегающем ветровом потоке обусловлено действием силы, которую можно разложить на две составляющие (рис. 6.4):

- силу лобового сопротивления F_c , направленную вдоль скорости набегающего потока;
- подъемную силу F_n , направленную перпендикулярно скорости набегающего потока.

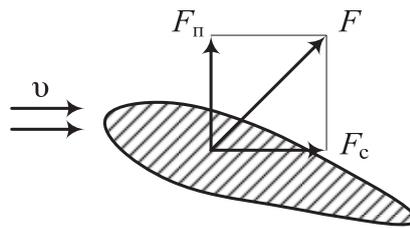


Рис. 6.4. Силы, действующие на тело, обтекаемое потоком газа

Ветроустановки классифицируются по двум основным признакам: геометрии ветроколеса и его положению относительно направления ветра. Если ось вращения ветроколеса параллельна воздушному потоку, то установка называется горизонтально-осевой, если перпендикулярна – вертикально-осевой (рис. 6.5).

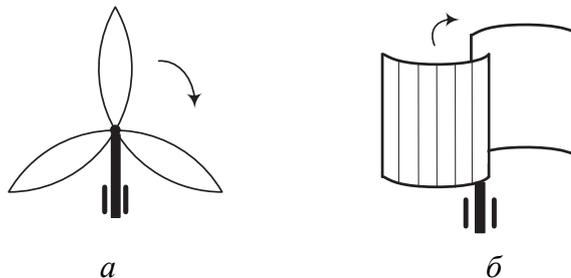


Рис. 6.5. Ветроколесо с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осью

Показателем работы ветроустановки является ее мощность:

$$N = N_{\text{вп}} \eta, \quad (6.9)$$

где $N_{\text{вп}}$ – мощность ветрового колеса, Вт; $\eta = \xi_i \eta_a \eta_m \eta_{\text{пр}}$ – КПД ветровой установки; ξ_i – коэффициент использования энергии ветра; η_a – коэффициент аэродинамических потерь в ветроколесе; η_m – коэффициент механических потерь; $\eta_{\text{пр}}$ – коэффициент потерь в системе преобразования энергии после редуктора.

Мощность ветрового потока определяется выражением

$$N_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \rho v^3 S = \frac{\pi}{8} \rho v^3 d^2, \quad (6.10)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; v_h – скорость ветрового потока, м/с; S – площадь, ометаемая ветроколесом, м²; d – диаметр ветроколеса, м.

Скорость ветра увеличивается с высотой над поверхностью Земли. Ветроколесо должно устанавливаться достаточно высоко над местными препятствиями, чтобы набегающий поток ветра был сильным, однородным, с минимальными изменениями скорости и направления. Для определения скорости на заданной высоте часто используют аппроксимационную формулу, в которую входит значение стандартной скорости ветра для данной местности, измеренное на высоте 10 м:

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^b, \quad (6.11)$$

где v_h – скорость ветра на определяемой высоте, м/с; v_{10} – стандартное значение скорости ветра для данной местности на высоте флюгера 10 м; h – высота, на которой определяется скорость ветра, м; b – параметр соотношения, зависящий от времени года и рельефа местности. Для открытой местности значения параметра принимаются равными $b = 1/7 = 0,14$ [9], для холмистой, лесистой или с большим количеством зданий параметр равен $b = 0,3-0,6$.

Пример. Рассчитать мощность ветроустановки с радиусом ветроколеса $R = 5$ м при скорости ветра $v = 8$ м/с. Коэффициенты $\xi_i = 0,35$; $\eta_a = 0,8$; $\eta_m = 0,9$; $\eta_{\text{пр}} = 0,9$. Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³.

Решение. Определим мощность ветроустановки по формуле (6.9):

$$N = S \frac{\rho v^3}{2} \eta = \frac{3,14 \cdot 10^2}{4} \cdot \frac{1,2 \cdot 8^3}{2} \cdot 0,35 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 5469,3 \text{ Вт.}$$

6.3. Гидроэнергия

Источником гидроэнергии является преобразованная энергия Солнца в виде запасенной потенциальной энергии воды, которая затем преобразуется в механическую работу и электроэнергию. Преобразование потенциальной энергии воды в электрическую энергию производится на гидроэлектростанции. Схема ГЭС представлена на рис. 6.6.

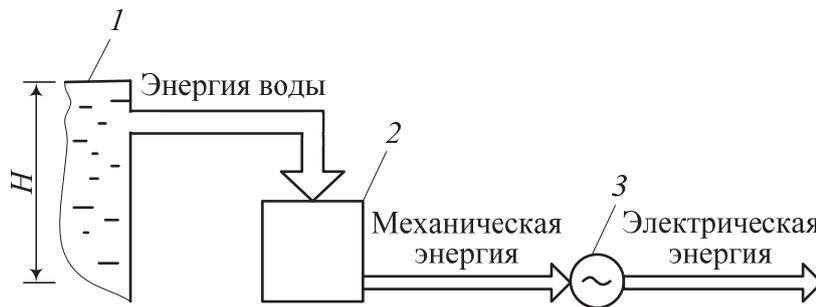


Рис. 6.6. Схема гидроэлектростанции:
1 – водохранилище; 2 – турбина; 3 – генератор

Основным рабочим элементом ГЭС, непосредственно преобразующим энергию движущейся воды в кинетическую энергию своего вращения, является гидротурбина. Гидротурбины бывают:

- активные, рабочее колесо которых вращается в воздухе под действием струи воды;
- реактивные, рабочее колесо которых полностью погружено в воду и вращается в основном за счет разницы давлений перед и за колесом.

Основными параметрами, характеризующими работу турбин в установившемся режиме, являются: расход V , напор H , потребляемая N и полезная $N_{\text{п}}$ мощности, коэффициент полезного действия η .

Потребляемая мощность (мощность водного потока) равна

$$N = \rho g V H, \quad (6.12)$$

где ρ – плотность воды, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; V – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напор (высота падения жидкости), м.

Полезная мощность – это мощность, передаваемая на вал генератора. Определяется по формуле

$$N_{\text{п}} = \omega M_{\text{кр}} = 2\pi n M_{\text{кр}}, \quad (6.13)$$

где ω – угловая скорость вращения, рад/с; n – частота вращения, мин⁻¹; $M_{\text{кр}}$ – крутящий момент, Н·м.

Потребляемая мощность больше полезной мощности на величину потерь и может определяться через КПД турбины:

$$N = \frac{N_{\text{п}}}{\eta}, \quad (6.14)$$

где η – КПД турбины.

Скорость потока вычисляется по формуле

$$v = \sqrt{2gH}. \quad (6.15)$$

Пример. Рассчитать КПД гидроэлектростанции, если расход воды равен $V = 6 \text{ м}^3/\text{с}$, напор воды $H = 20 \text{ м}$, а мощность станции $N_{\text{п}} = 883 \text{ кВт}$.

Решение. КПД гидроэлектростанции определим, используя формулу (6.14):

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N} = \frac{N_{\text{п}}}{\rho g V H} = \frac{883\,000}{1000 \cdot 9,81 \cdot 6 \cdot 20} = 0,75.$$

6.4. Энергия биомассы

Биомассой принято называть сложный комплекс веществ, из которых состоят растения и животные. Основа биомассы – органические соединения углерода, которые в процессе взаимодействия с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют теплоту.

Источниками биомассы являются древесная биомасса (дерева, продукты их переработки), отходы сельского хозяйства (солома, ботва, навоз, помет), промышленные и бытовые отходы (мусор), специально выращиваемые энергетические растения.

Существуют следующие способы переработки биомассы:

– термохимические (прямое сжигание, пиролиз, газификация, гидрогенизация);

– биохимические (спиртовая ферментация, анаэробная переработка);

– агрохимические (экстракция).

Рассмотрим более подробно термохимические и биохимические способы переработки биомассы.

При *прямом сжигании* связанная в биомассе химическая энергия в процессе окисления непосредственно превращается в тепло. Данный способ является наиболее простым и хорошо изученным. Выбор способа сжигания зависит от влажности и состава биомассы. Прямое сжигание осуществляется в топках котлов и печей. Полученное тепло используется для подогрева воды, отопления, технологических нужд или производства электроэнергии.

Элементарный состав горючей массы древесины различных пород примерно одинаков и содержит следующие массовые доли: $C^r = 50,9\%$; $H^r = 6,1\%$; $O^r = 41,9\%$; $N^r = 0,8\%$; $S^r = 0,3\%$ [10]. Низшая теплота сгорания древесины сильно зависит от ее влажности и приближенно определяется по формуле Менделеева (1.7):

$$Q_H^p = 189 \cdot (100 - A^p - 1,13W^p). \quad (6.16)$$

Высшая теплота сгорания ствольной древесины практически не зависит от вида древесины и примерно равна 9 МДж/кг.

Теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива, можно определить по формуле

$$V^o = 0,0889C^p + 0,265H^p + 0,033(S^p - O^p), \quad (6.17)$$

где V^o – теоретический объемный расход воздуха, м³/кг.

Сгорание является полным, если все горючие компоненты топлива полностью прореагировали с кислородом. Для обеспечения полного сгорания воздуха обычно подводят больше, чем теоретически необходимо. Отношение действительно поданного воздуха к теоретически необходимому называется **коэффициентом избытка воздуха**:

$$\alpha = \frac{V}{V^o}, \quad (6.18)$$

где V – действительный объемный расход воздуха, м³/кг.

Для древесного топлива требуемый коэффициент избытка воздуха составляет от 1,25–1,40 [10].

КПД топки определяется по формуле

$$\eta_T = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_H^p}, \quad (6.19)$$

где $Q_{\text{пол}}$ – полезно используемое тепло; Q_H^p – низшая теплота сгорания.

Пиролиз – процесс нагревания биомассы без доступа кислорода или при недостаточном его доступе для получения производных топлив. Продуктами пиролиза являются газы, жидкий конденсат в виде смол и масел, твердые остатки в виде угля и золы.

Пиролиз может проводиться в присутствии малого количества кислорода, тогда процесс называется *газификацией*. Газификация осуществляется в специальном устройстве – газогенераторе и включает последовательные фазы: сушку, пиролиз и газификацию топлива.

Для осуществления процесса газификации древесины необходимо поддерживать равновесную температуру порядка 900°C, а для получения угля в результате пиролиза – температуру 600–700°C [11].

Анаэробное сбраживание – процесс брожения биомассы при недостатке кислорода и света под воздействием различных групп бактерий с образованием биогаза, который состоит из метана (55–70%) и углекислого газа (25–35%).

Анаэробное сбраживание реализуется в биогазогенераторе, конструкция которого зависит от организации процесса и вида биомассы. В результате исключается загрязнение окружающей среды, производится топливо (биогаз) и получают высокоэффективные органические удобрения.

Объем биогаза, получаемого в биогазогенераторе, определяется по формуле

$$V_{\text{г}} = c m_0, \quad (6.20)$$

где c – выход биогаза из сухой массы, м³; m_0 – масса сухого сбраживаемого материала, получаемого из всех источников.

Объем жидкой массы, заполняющей биогазогенератор, определяется выражением

$$V_{\text{ж}} = \frac{m_0}{\rho}, \quad (6.21)$$

где ρ – плотность сухого материала.

Объем биогазогенератора равен

$$V_{\text{г}} = V_{\text{ж}} \tau, \quad (6.22)$$

где τ – время пребывания сбраживаемой массы в генераторе.

Выражение для тепловой мощности имеет вид

$$N = \eta Q_{\text{н}}^{\text{п}} V_{\text{г}} f_{\text{м}}, \quad (6.23)$$

где η – КПД; Q_{H}^{P} – теплота сгорания метана при нормальных условиях; f_{M} – содержание метана.

Пример. Каким должен быть КПД печи для сжигания 5 кг дров при приготовлении пищи для 4 человек? Норма расхода тепла 1200 кДж на одного человека. Теплота сгорания дров 9 МДж/кг.

Решение. КПД печи определим по формуле (6.19):

$$\eta = \frac{4 \cdot 1200}{5 \cdot 9 \cdot 10^3} = 0,11.$$

Задачи

6.1. Какой поток солнечной энергии необходим для нагревания воздуха в помещении на 10°C выше температуры наружного воздуха? Коэффициент поглощения $\alpha = 0,9$, пропускная способность $\tau = 0,9$. Сопротивление теплопотерям $R = 0,07$ ($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)/Вт. Крыша и стены дома теплоизолированы, все потери происходят через окна.

6.2. Солнечная батарея состоит из 1000 фотоэлементов, мощность каждого $N_{\text{эл}} = 1,5$ Вт, размер 20×30 см. Определить КПД солнечной батареи, если плотность потока излучения $E = 450$ Вт/ m^2 .

6.3. Определить ЭДС солнечной батареи, если плотность тока $i = 4 \cdot 10^{-3}$, А/ cm^2 . Плотность потока излучения $E = 500$ Вт/ m^2 , КПД батареи $\eta = 26\%$.

6.4. В нижнесаксонской деревне Бимольтен на высоте 98 м установлены 14 ВЭУ. Определите их мощность, если диаметр ветроколеса составляет $d = 10$ м. Известно, что на высоте 10 м скорость ветра $v_{10} = 6,8$ м/с. КПД ветроустановки $\eta = 0,2$, параметр соотношения $b = 0,14$, плотность воздуха $1,2$ кг/ m^3 .

6.5. В населенном пункте, расположенном на острове в Северном море, проживают 100 человек. На острове существуют проблемы с поставкой энергоресурсов. Определить число и мощность ветроустановок, которые смогут обеспечить энергией данный населенный пункт, если средняя скорость ветра $v = 8$ м/с. Структура энергопотребления следующая: освещение, бытовые приборы – 3 кВт; отопительные установки, электроплиты – 35 кВт;

теплицы – 7 кВт; зарядка электромобилей – 5 кВт. Диаметр ветроколеса $d = 10$ м. КПД ветроустановки $\eta = 0,3$, плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³.

6.6. Турбина гидроэлектростанции имеет мощность $N_{\text{п}} = 500$ МВт и КПД 93%. Определить расход воды для гидротурбины, если напор составляет $H = 90$ м.

6.7. Высота падения воды на Нурекской ГЭС равна $H = 275$ м. Через одну турбину ГЭС проходит $V = 155$ м³/с воды. Определить скорость потока воды и мощность турбины. Чему равен КПД турбины, если ее электрическая мощность равна $N = 300$ МВт?

6.8. Определить количество древесины, которое потребуется для получения 150 МДж тепла, если КПД установки 75%. Теплота сгорания древесины 9 МДж/кг.

6.9. Определить теоретически необходимое количество воздуха для сгорания древесного топлива следующего состава, %: $C^{\text{p}} = 25$, $H^{\text{p}} = 5,1$; $S^{\text{p}} = 0,2$; $O^{\text{p}} = 22$; $N^{\text{p}} = 0,9$; $A^{\text{p}} = 1,8$; $W^{\text{p}} = 45$. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

6.10. Определить объем биогазогенератора и суточный выход биогаза, получаемого из отходов жизнедеятельности 18 животных, а также обеспечиваемую тепловую мощность. Время пребывания в биогазогенераторе – 14 сут при температуре 25°C. Подача сухого сбраживаемого материала от одного животного идет со скоростью 2 кг/сут. Выход биогаза из сухой массы $c = 0,24$ м³/кг. Содержание метана в биогазе составляет $f_{\text{м}} = 0,7$, КПД горелочного устройства $\eta = 0,68$. Плотность сухого материала $\rho = 50$ кг/м³. Теплота сгорания метана при нормальных физических условиях $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 35,8$ МДж/м³.

ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ. СТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

7.1. Инвестиции при покупке технологического оборудования

Инвестиционным проектом в соответствии с Инвестиционным кодексом Республики Беларусь признается совокупность документов, характеризующих замысел о вложении и использовании инвестиций и его практическую реализацию до достижения заданного результата за определенный период времени.

Под *инвестициями* понимается любое имущество, включая денежные средства, ценные бумаги, оборудование и результаты интеллектуальной деятельности, вкладываемые инвестором в объекты инвестиционной деятельности в целях получения прибыли или достижения иного значимого результата.

Под *инвестиционной деятельностью* понимаются действия юридических или физических лиц по вложению инвестиций в производство продукции (работ, услуг) или их иному использованию для получения дохода или достижения иного значимого результата.

Большой экономический эффект можно получить при инвестировании денежных средств в новое энергосберегающее технологическое оборудование, позволяющее производить конкурентоспособную продукцию на мировом рынке. Однако, замена старого технологического оборудования, потребляющего много энергии, на новое современное оборудование требует больших финансовых затрат и единовременного вывода из оборота предприятия значительных денежных средств. Разрешением финансовых вопросов может служить использование инвестиций, которые должны окупиться за определенный период времени. Поскольку этот период может составлять несколько лет, необходимо учитывать все неопределенности и риски, возникающие при реализации инвестиционных проектов. Для экономической оценки инвестиционных проектов используется ряд параметров, помогающих рассчитать прибыльность или убыточность проекта к концу срока его реализации. Эти параметры раз-

бываются на две большие группы: статические (без учета фактора времени) и динамические (с учетом фактора времени).

7.2. Статические параметры оценки энергосберегающих инвестиционных проектов

Статические методы оценки инвестиционных проектов применяются в тех случаях, когда затраты на проект и получаемая прибыль неравномерно распределены по годам и срок окупаемости инвестиций охватывает небольшой промежуток времени – до пяти лет. Например, в энергетике при сравнении различных проектов между собой могут калькулироваться затраты на производство единицы генерируемой энергии. Более выгодным будет считаться тот проект, в котором себестоимость производства единицы энергии меньше.

Благодаря своей простоте, высокой скорости расчета эффективности инвестиционных проектов и доступности получения необходимых данных статические методы приобрели самое широкое распространение на практике. Основные их недостатки – охват короткого периода времени и игнорирование временного аспекта стоимости денег (дисконтирования во времени).

Статические методы, описывающие инвестиционные проекты без учета временного дисконта, характеризуются следующими параметрами:

1. Срок окупаемости инвестиций (PP – *Pay-Back Period*), который показывает, за какой период времени инвестор получит доход, численно равный инвестированному капиталу:

$$PP = \frac{IC}{PN}, \quad (7.1)$$

где IC (*Invested Capital*) – объем капиталовложений в проект, ден. ед.; PN (*Net Profit*) – годовая прибыль по проекту, ден. ед.

Срок окупаемости рассчитывается по формуле (7.1) в случае равномерного распределения прибыли по годам. Если поток доходов неравномерный, расчет показателя PP предполагает определение величины денежных поступлений от реализации проекта нарастающим итогом и сравнением его с инвестированным капиталом:

$$PN_1 + PN_2 + \dots + PN_n \geq IC. \quad (7.2)$$

При выполнении неравенства (7.2) индекс последнего слагаемого будет соответствовать периоду окупаемости проекта в годах $n = PP$. Однако, не всегда период окупаемости кратен целому числу лет. Более точный расчет выполняется по формуле

$$PP = n + \Delta n, \quad (7.3)$$

где n – целое число лет, для которых кумулятивная сумма (7.2) наиболее близка к капиталовложениям, но меньше данной величины; Δn – отрезок времени меньше года, определяемый отношением непокрытой части капиталовложений к прибыли следующего года:

$$\Delta n = \frac{IC - \sum_{t=1}^n PN_t}{PN_{n+1}}. \quad (7.4)$$

2. Учетная норма прибыли (*Accounting Rate of Return*), называемая также коэффициентом эффективности инвестиций, рассчитывается делением среднегодовой прибыли на среднюю величину инвестиций [12]:

$$ARR = \frac{\overline{PN}}{\overline{IC}}. \quad (7.5)$$

Если предполагается, что по истечении срока реализации проекта все капитальные затраты будут списаны, то средняя величина инвестиций находится делением суммы капитальных вложений на два. Если допускается наличие остаточной или ликвидационной стоимости RV (*Residual Value*), то среднее значение инвестиций находится по формуле

$$\overline{IC} = \frac{(IC + RV)}{2}. \quad (7.6)$$

3. *Cash Flow* (CF) или накопленное сальдо денежного потока. *Cash Flow* есть разность между суммой доходов и расходов (затрат) предприятия за весь срок использования инвестиционного проекта.

4. Приведенные затраты на производство продукции (минимизируются):

$$RC = C + E_n IC \rightarrow \min, \quad (7.7)$$

где RC (*Reduced Costs*) – приведенные затраты; C (*Costs*) – текущие затраты на производство какого-либо вида продукции; E_n – норматив эффективности капитальных вложений, устанавливаемый инвестором (не ниже 0,12–0,15) [13].

Таким образом, в приведенных затратах учитывается не только затратная часть на производство продукции, формирующая ее себестоимость, но и размер капитальных вложений в проект, который также должен быть минимальным.

5. Масса прибыли (метод сравнения прибыли). Проводится анализ прибыльности проекта за время его реализации, выбирается проект с максимальной прибылью.

Пример 1. Инвестиции в проект составляют 60 000 руб. За 1-й год реализации проекта получена прибыль 10 000 руб., за 2-й год – 15 000 руб., за 3-й год – 20 000 руб. и за 4-й год – 30 000 руб. Определить период окупаемости проекта.

Решение. Прибыль за 4 года составит 75 000 руб., что превышает размер инвестиций. Прибыль за 3 года составит 45 000 руб., что меньше размера инвестиций. Для определения периода окупаемости воспользуемся формулой (7.3), полагая $n = 3$:

$$\Delta n = \frac{IC - \sum_{t=1}^3 PN_t}{PN_4} = \frac{60\,000 - (10\,000 + 15\,000 + 20\,000)}{30\,000} = 0,5 \text{ лет.}$$

Значит, период окупаемости проекта составит 3,5 года.

Пример 2. Сравнить два проекта по критерию «учетная норма прибыли», если объем инвестиций составляет 40 000 руб., амортизационные отчисления предусмотрены в размере 10 000 руб. Исходные данные представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Исходные данные

Годы	Проект 1		Проект 2	
	Ден. поток	Прибыль	Ден. поток	Прибыль
1	7 000	–3 000	10 000	–1 000
2	12 000	2 000	15 000	5 000
3	14 000	4 000	15 000	5 000
4	19 000	9 000	19 000	9 000

Решение. Согласно условию средние инвестиционные затраты равны

$$\overline{IC} = \frac{40\,000}{2} = 20\,000 \text{ руб.}$$

Средняя прибыль по первому проекту составляет

$$\overline{PN}_1 = \frac{(-3000 + 2000 + 4000 + 9000)}{4} = 3000 \text{ руб.}$$

Средняя прибыль по второму проекту равна

$$\overline{PN}_2 = \frac{-1000 + 5000 + 5000 + 9000}{4} = 4500 \text{ руб.}$$

Учетная норма прибыли по первому проекту определяется выражением

$$ARR_1 = \frac{\overline{PN}_1}{\overline{IC}_1} = \frac{3000}{20\,000} = 0,15.$$

Учетная норма прибыли по второму проекту есть отношение

$$ARR_2 = \frac{\overline{PN}_2}{\overline{IC}_2} = \frac{4500}{20\,000} = 0,225.$$

На основании расчетов выбираем второй проект с учетной нормой прибыли 22,5%.

7.3. Расчет денежных потоков предприятия

Показатель *Cash Flow* (*CF*) характеризует денежные потоки предприятия за определенный период времени (разность между суммой поступлений (положительный поток) и суммой расходов (отрицательный поток)). *Cash Flow* может быть подсчитан для периода в один год и периода в несколько лет.

Прямого эквивалента для *Cash Flow* в отечественной экономической терминологии не имеется, он учитывает движение денежных средств по операционной, инвестиционной и финансовой деятельности. При составлении бизнес-плана для расчета *Cash Flow* могут использоваться отчет о движении денежных средств и отчет о прибылях и убытках из бухгалтерского баланса предприятия.

Пример. Рассчитать поток *Cash Flow* для двух проектов по освоению нефтегазового месторождения на основании данных табл. 7.2, предполагая, что периоды реализации проектов одинаковы и равны 25 лет. Выбрать лучший проект.

Таблица 7.2

Проекты по освоению нефтегазового месторождения

Финансовые операции и их содержание	Проект 1	Проект 2
	Сумма, млн долл.	Сумма, млн долл.
I. Выплаты капитала		
1. Капиталовложения (включая первоначальные)	3 030,73	4 078,50
2. Эксплуатационные расходы (включая первоначальные)	7 731,75	10 450,25
3. Уплата налога на прибыль	1 218,80	1 699,43
4. Погашение ссуд	1 026,99	1 546,98
5. Выплата процентов по ссудам	820,29	1 189,22
6. Возврат вкладов в уставной фонд	281,04	–
II. Поступления капитала		
7. Прием вкладов в уставной фонд	281,04	–
8. Получение ссуд	1 026,99	1 546,98
9. Получение выручки за продукцию	19 140,72	22 754,53
III. CashFlow (CF)		
Сальдо денежных потоков	–	–

Решение. Финансовый итог по первому проекту:

$$CF_1^- = 3030,73 + 7731,75 + 1218,80 + 1026,99 + \\ + 820,29 + 281,04 = 14109,60 \text{ млн долл.},$$

$$CF_1^+ = 281,04 + 1026,99 + 19140,72 = 20448,75 \text{ млн долл.},$$

$$CF_1 = -CF_1^- + CF_1^+ = -14109,6 + 20448,75 = 6339,15 \text{ млн долл.}$$

Финансовый итог по второму проекту:

$$CF_2^- = 4078,50 + 10450,25 + 1699,43 + \\ + 1546,98 + 1189,22 = 18968,38 \text{ млн долл.},$$

$$CF_2^+ = 1546,98 + 22754,53 = 24301,51 \text{ млн долл.},$$

$$CF_2 = -CF_2^- + CF_2^+ = -18968,38 + 24301,51 = 5337,13 \text{ млн долл.}$$

Cash Flow первого проекта превышает *Cash Flow* второго проекта, поэтому выбирается для реализации первый проект.

Задачи

7.1. Определить простой срок окупаемости инвестиционного проекта, предполагающего инвестирование 50 000 руб. и получение затем в течение 8 лет денежных поступлений в размере: 1-й год – 4000 руб., 2-й – 4000 руб., 3-й – 20 000 руб., 4-й – 30 000 руб., 5-й – 30 000 руб. и т. д.

7.2. Инвестиции в проект составляют 48 000 руб. За 1-й год реализации проекта получена прибыль 8000 руб., за 2-й год – 13 000 руб., за 3-й год – 18 000 руб. Период окупаемости проекта равен 3,6 года. Определить прибыль за 4-й год реализации проекта.

7.3. Сравнить два проекта по критерию «учетная норма прибыли», если объем инвестиций составляет 50 000 руб. Распределение прибыли по годам для двух проектов представлено в табл. 7.3. Предполагается, что вся прибыль идет на погашение задолженности инвестору.

Таблица 7.3

Исходные данные

Годы	1	2	3	4
Проект 1, прибыль	0	5 000	7 000	9 000
Проект 2, прибыль	0	3 000	8 000	12 000

7.4. Рассчитать среднее значение инвестиционного капитала за 4 года, если известно, что проект рассчитан на 5 лет. Начальные инвестиции составляют 10 000 руб. Предполагается, что к концу срока действия проекта оборудование полностью амортизируется.

7.5. Рассчитать поток *Cash Flow* для двух проектов по возведению солнечной электростанции на основании данных табл. 7.4, предполагая, что периоды реализации проектов одинаковы и равны двум годам. Выбрать проект для реализации.

Таблица 7.4

Проекты по возведению солнечной электростанции

Финансовые операции и их содержание	Проект 1	Проект 2
	Сумма, тыс. долл.	Сумма, тыс. долл.
I. Выплаты капитала		
1. Капиталовложения (включая первоначальные)	600,33	730,28
2. Эксплуатационные расходы (включая первоначальные)	110,18	132,25
3. Уплата налога на прибыль	121,47	119,52
4. Погашение ссуд	226,95	128,91
5. Выплата процентов по ссудам	72,76	38,24
II. Поступления капитала		
1. Получение ссуд	377,12	398,41
2. Выручка от реализации продукции	9250,72	7556,63
III. <i>Cash Flow (CF)</i>		
Сальдо денежных потоков		

ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

8.1. Дисконтирование денежных потоков

Динамические методы оценки энергосберегающих инвестиционных проектов используются в случае длительного срока реализации проекта. При этом необходимо учитывать вероятностный характер развития событий и риски, сопутствующие реализации проекта, рассчитывать параметры с некоторым «запасом прочности» [14]. В этом случае обычно прибегают к использованию дисконтированных величин, учитывающих меру обесценивания денежных средств с течением времени. Величина временного дисконта описывается коэффициентом дисконтирования следующего вида:

$$a_t = \frac{1}{(1+r)^t}, \quad (8.1)$$

где r – это норма или ставка дисконта, характеризующая минимальную потребную прибыль предприятия. Она показывает, под какую минимальную доходность участники рынка готовы инвестировать средства в проект. Коэффициент t – это шаг расчета, обычно измеряется в годах ($t = 0, 1, 2, \dots, T$), где T – горизонт расчета (последний год действия проекта). Обычно предполагается, что проект действует до тех пор, пока работает оборудование, в которое инвестирован капитал, тогда горизонт расчета соответствует сроку амортизации оборудования.

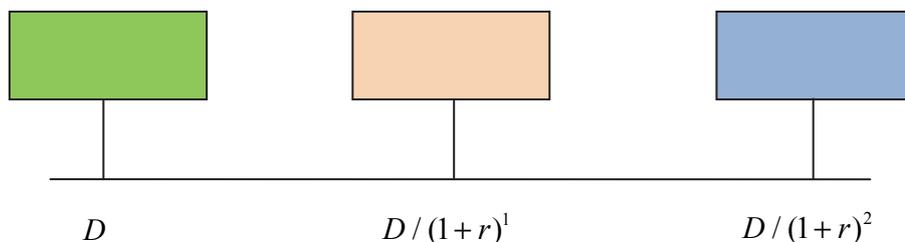


Рис. 8.1. Преобразование датированной суммы D к другой дате

Коэффициент дисконтирования (8.1) позволяет приводить будущие денежные потоки к текущему моменту времени (рис. 8.1).

Например, если на текущий момент времени планируется прибыль D , то через два года эта прибыль станет равной $D/(1+r)^2$, т. е. дисконтируется в $1/(1+r)^2$ раз.

Для анализа энергосберегающих инвестиционных проектов используются следующие параметры, учитывающие дисконтирование во времени:

- чистый дисконтированный доход;
- внутренняя норма прибыли;
- динамический срок окупаемости инвестиций;
- индекс доходности.

8.2. Чистый дисконтированный доход

Чистый дисконтированный доход (NPV – *Net Present Value*) определяется как разницу между всеми денежными притоками и оттоками, приведенными к текущему моменту времени:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t^+}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^T \frac{CF_t^-}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}. \quad (8.2)$$

Для инвестиционных проектов, связанных с закупкой основных средств производства, в качестве оттока денежных средств можно рассматривать однократные инвестиции IC , производимые до начала реализации проекта, т. е. в нулевом году. Тогда инвестиционный капитал не дисконтируется, а формула для расчета дисконтированной прибыли (8.2) преобразуется к виду

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t^+}{(1+r)^t} - IC. \quad (8.3)$$

В случае $NPV > 0$ приток денежных средств за время действия проекта превысит инвестированный капитал на величину предполагаемого дохода. Если $NPV < 0$, проект – убыточный. Таким образом, из нескольких проектов необходимо выбирать проект с наибольшим показателем NPV .

Если предприятие каждый год рассчитывает получать один и тот же приток денежных средств

$$PN = CF_t^+, \quad (8.4)$$

то выражение (8.3) упрощается:

$$NPV = P NA_T - IC = PV - IC, \quad (8.5)$$

где PV – текущая ценность проекта, ден. ед.; A_T – коэффициент, рассчитываемый по формуле для T членов ряда геометрической прогрессии:

$$A_T = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^T} \right). \quad (8.6)$$

Пример. На предприятии требуется внедрение энергосберегающего мероприятия с инвестициями в размере 35 000 у. е. Годовая экономия составит 7000 у. е. Расчетный срок амортизации 10 лет, норма дисконта 0,1. Рассчитать экономическую эффективность мероприятия на основании показателей чистая «текущая ценность» и «период окупаемости».

Решение. Вычислим текущую ценность проекта по формуле

$$\begin{aligned} PV &= P NA_{10} = 7000 \cdot \frac{1}{0,1} \left(1 - \frac{1}{(1+0,1)^{10}} \right) = \\ &= 7000 \cdot 10 \cdot (1 - 0,3855) = 43\,015 \text{ у. е.} \end{aligned}$$

Тогда чистая текущая ценность равна

$$NPV = PV - IC = 43\,015 - 35\,000 = 8015 \text{ у. е.}$$

Период окупаемости определим из выражения

$$PP = \frac{IC}{PN} = \frac{35\,000}{7000} = 5 \text{ лет.}$$

8.3. Дисконтированный период окупаемости

Простой период окупаемости определяется по формуле (7.1) без учета временного дисконта. Для проектов с большим сроком реализации необходимо рассчитывать дисконтированный период окупаемости. Рассмотрим аналитический и графический методы его определения.

Инвестиционный проект окупится, если дисконтированная прибыль будет больше или равна инвестициям:

$$\sum_{t=1}^{DPP} \frac{PN}{(1+r)^t} \geq IC, \quad (8.7)$$

где DPP (*Discounted Payback Period*) – дисконтированный период окупаемости. В случае равенства в выражении (8.7) для расчета DPP используется следующая формула:

$$DPP = -\frac{\ln\left(1 - r \frac{IC}{PN}\right)}{\ln(1+r)}. \quad (8.8)$$

Дисконтированный период окупаемости можно определить и графическим методом. Для этого сопоставим выражению (8.7) систему уравнений:

$$\begin{cases} y = IC, \\ y = \sum_{t=1}^n \frac{PN}{(1+r)^t}. \end{cases} \quad (8.9)$$

Отложим по оси x годы реализации проекта, а по оси y – накапливаемые денежные средства. Первое уравнение из системы (8.9) описывает прямую, перпендикулярную оси y , соответствующую капитальным вложениям IC . Второе уравнение отражает накопленный дисконтированный доход за n лет. С ростом n будет расти и доход, изображаемый точкой на графике. Соединив точки, соответствующие различным годам, мы получим кривую роста дисконтированных денежных потоков во времени. Кривая роста будет иметь точку пересечения с прямой капитальных вложений, а абсцисса этой точки будет соответствовать дисконтированному периоду окупаемости проекта.

Пример. Определить дисконтированный период окупаемости для задачи из примера п. 8.2 двумя способами: аналитическим и графическим. Сравнить простой и дисконтированный периоды окупаемости между собой.

Решение. 1. Подставим данные из примера п. 8.2 в формулу (8.8):

$$DPP = -\frac{\ln\left(1 - r \frac{IC}{PN}\right)}{\ln(1+r)} = -\frac{\ln\left(1 - 0,1 \frac{35\,000}{7000}\right)}{\ln(1+0,1)} = 7,3 \text{ лет.}$$

2. Рассчитаем накопленную дисконтированную прибыль:

$$PV_1 = 6364 \text{ у. е.}, PV_2 = 12\,149 \text{ у. е.}, PV_3 = 17\,408 \text{ у. е.},$$

$$PV_4 = 22\,189 \text{ у. е.}, PV_5 = 26\,535 \text{ у. е.},$$

$$PV_7 = 34\,032 \text{ у. е.}, PV_8 = 37\,278 \text{ у. е.}$$

Построим график согласно системе (8.9) (рис. 8.2). Точка пересечения на графике соответствует дисконтированному периоду окупаемости $DPP = 7,3$ лет.

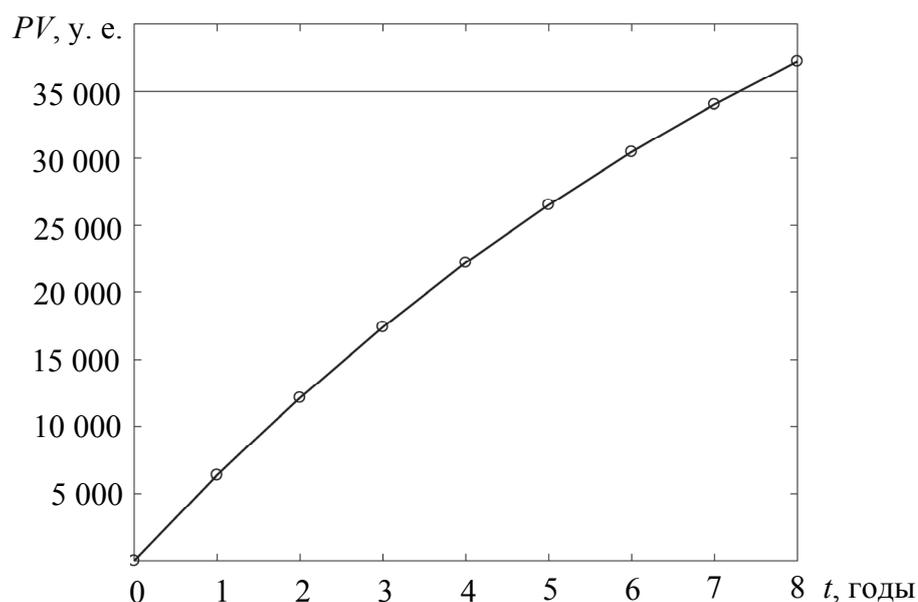


Рис. 8.2. Расчет дисконтированного периода окупаемости

Таким образом, аналитический и графический способы расчета дают один и тот же результат. Заметим, что дисконтированный период окупаемости всегда будет больше, чем простой период окупаемости. Этот факт необходимо учитывать при составлении бизнес-плана инвестиционного проекта.

8.4. Внутренняя норма рентабельности

Внутренняя норма рентабельности (доходности) (IRR – *Internal Rate of Return*) – это такая ставка дисконта, при которой сумма дисконтированных доходов за весь период реализации инвестиционного проекта равна сумме первоначальных затрат (инвестициям). Ее можно трактовать как максимальную ставку – процент, под ко-

торый можно взять кредит для финансирования проекта с помощью заемного капитала. Для определения IRR нужно решить уравнение $NPV = 0$, которое с учетом формул (8.5), (8.6) трансформируется в нелинейное уравнение степени $T + 1$ относительно барьерной ставки IRR :

$$\frac{PN}{IRR} \left(1 - \frac{1}{(1 + IRR)^T} \right) = IC. \quad (8.10)$$

В общем случае для нахождения внутренней нормы доходности используются приближенные методы. Один из них – метод последовательных приближений, в котором в качестве начального приближения используется норма дисконта проекта $IRR_0 = r$. Тогда равенство (8.10) записывается в виде рекуррентной последовательности:

$$IRR_1 = \frac{PN}{IC} \left(1 - \frac{1}{(1 + IRR_0)^T} \right). \quad (8.11)$$

Подставляя найденное значение IRR_1 в формулу (8.11) для получения следующего приближения IRR_2 и повторяя эту процедуру многократно, для произвольного IRR_n имеем

$$IRR_{n+1} = \frac{PN}{IC} \left(1 - \frac{1}{(1 + IRR_n)^T} \right). \quad (8.12)$$

Процедура прекращается, как только разница между двумя последними значениями станет меньше заданной точности расчетов ε :

$$IRR = IRR_{n+1}, \quad \text{если} \quad |IRR_{n+1} - IRR_n| \leq \varepsilon. \quad (8.13)$$

Еще один метод отыскания внутренней нормы доходности основан на приближенном методе нахождения корней уравнения путем деления отрезка пополам. Для этого необходимо найти два таких значения $IRR_1 = r_1$ и $IRR_2 = r_2$, чтобы рассчитанные с их помощью NPV имели разные знаки, например $NPV_1 < 0$, $NPV_2 > 0$ (см. рис. 8.3), тогда барьерная ставка определяется с использованием формулы линейной интерполяции:

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} (r_2 - r_1). \quad (8.14)$$

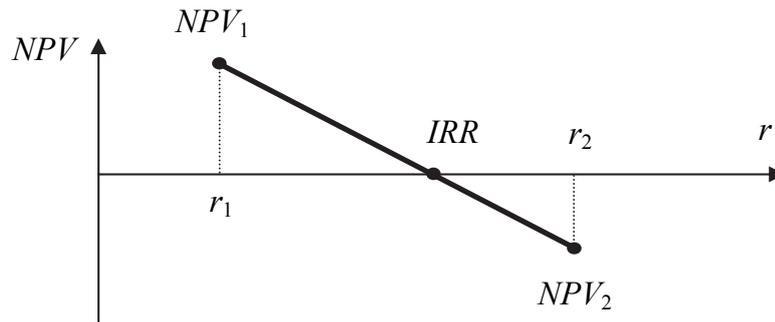


Рис. 8.3 Расчет внутренней нормы доходности при помощи линейной интерполяции

Для нахождения IRR также можно воспользоваться финансовой функцией ВНД в программе *Excel*, входящей в *Microsoft Office*. Сначала формируется массив данных, содержащий суммарные денежные потоки *Cash Flow* за годы реализации проекта. Далее в строке формул выбирается функция «=ВНД(ссылка1:ссылка2)», где «ссылка1:ссылка2» – массив ячеек с числовыми значениями CF , для которых необходимо рассчитать внутреннюю норму доходности.

Внутреннюю норму доходности обычно сравнивают с нормой дисконта. Если $IRR > r$, то проект будет прибыльным, если $IRR < r$, то проект будет убыточным.

Пример 1. Определить внутреннюю норму доходности для энергосберегающего инвестиционного проекта методом последовательных приближений с точностью $\varepsilon = 0,001$. Данные для расчетов взять из табл. 8.1. Ставку дисконта принять равной 10%.

Таблица 8.1

Исходные данные

Годы	0	1	2	3	4
CF^- , у. е.	-6500	-	-	-	-
CF^+ , у. е.		3000	3000	3000	3000

Решение. По условию задачи инвестиции $IC = 6500$ у. е., ежегодный приток денежных средств $PN = 3000$ у. е. Тогда для расчета IRR будет использоваться рекуррентная формула:

$$r_{n+1} = \frac{3000}{6500} \left(1 - \frac{1}{(1+r_n)^4} \right),$$

которая дает следующие расчетные значения для r_n :

$$\begin{array}{llll} r_0 = 0,1; & r_3 = 0,2346; & r_6 = 0,2897; & r_9 = 0,2986; \\ r_1 = 0,1463; & r_4 = 0,2629; & r_7 = 0,2947; & r_{10} = 0,2992 \\ r_2 = 0,1942; & r_5 = 0,1463; & r_8 = 0,2973; & \end{array}$$

Поскольку разница $r_{10} - r_9 < 0,001$, то в качестве внутренней нормы доходности можно рассматривать величину $IRR = 0,2992 \approx 0,30$.

Пример 2. Вычислить IRR проекта с помощью метода линейной интерполяции, если известно, что для ставки $r_1 = 0,20$ чистая текущая ценность составляет 3950 у. е., а для ставки $r_2 = 0,24$ она равна 2870 у. е.

Решение. Используем для расчетов формулу (8.14):

$$\begin{aligned} IRR &= r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} (r_2 - r_1) = \\ &= 0,20 + \frac{3950}{3950 + 2874} (0,20 + 0,02) \approx 0,22. \end{aligned}$$

Барьерная ставка $IRR \approx 0,22$. Если ставка по проекту будет взята больше, чем 22%, то проект окажется убыточным, если меньше – то прибыльным.

8.5. Индекс рентабельности

Индекс рентабельности PI (*Profitability Index*) определяется отношением текущей ценности проекта к инвестициям:

$$PI = \frac{PV}{IC}. \quad (8.15)$$

В отличие от параметра NPV этот параметр является относительным, поэтому может использоваться при сравнении разнородных проектов между собой.

Если индекс рентабельности больше единицы, значит, выгоды преобладают над затратами и проект принимается. Если индекс рентабельности меньше единицы, проект убыточный, он отвергается. Из нескольких проектов наиболее предпочтительным будет проект с максимальным индексом рентабельности.

Пример. Предприятие планирует приобрести новое технологическое оборудование стоимостью 70 000 руб. и сроком эксплуатации 5 лет. Оно рассчитывает на ежегодный приток денежных средств в размере 25 000 руб. На третьем году эксплуатации оборудованию потребуется плановый предупредительный ремонт стоимостью 300 руб. Рассчитать снижение индекса рентабельности проекта за счет планового ремонта. Ставка дисконта $r = 20\%$.

Решение. Поскольку приток денежных средств равномерный по годам, для расчета индекса рентабельности без учета средств на плановый ремонт оборудования воспользуемся формулой (8.6) и вычислим вначале текущую ценность:

$$PV_1 = PNA_5 = 25\,000 \cdot \frac{1}{0,2} \left(1 - \frac{1}{1,2^5} \right) = 74\,760 \text{ руб.}$$

Аналогичным образом можно вычислить текущую ценность и во втором случае, только надо вычесть из ежегодного притока денежных средств стоимость ремонта:

$$PV_2 = PNA_5 = 25\,000 \cdot \frac{1}{0,2} \left(1 - \frac{1}{1,2^5} \right) - \frac{3000}{(1+0,2)^3} = 73\,020 \text{ руб.}$$

Находим индексы рентабельности в первом и втором случае по формуле (8.15):

$$PI_1 = \frac{PV_1}{IC} = \frac{74\,760}{70\,000} = 1,07; \quad PI_2 = \frac{PV_2}{IC} = \frac{73\,020}{70\,000} = 1,04.$$

Итого уменьшение индекса рентабельности проекта составит

$$PI_1 - PI_2 = 1,07 - 1,04 = 0,03.$$

Задачи

8.1. Определить чистый дисконтированный доход по проекту, если известно, что чистый годовой доход составляет 80 000 руб., ставка дисконта равна 12%, срок эксплуатации проекта составляет 6 лет. Первоначальные инвестиции (до реализации проекта) составляют 250 000 руб. Рассчитать период окупаемости проекта.

8.2. Определить дисконтированный период окупаемости для задачи 8.1 двумя способами: аналитическим и графическим. Сравнить простой и дисконтированный периоды окупаемости.

8.3. Оценить эффективность реализации проекта по показателю NPV . Денежные потоки указаны в табл. 8.2, ставку дисконта принять равной 15%.

Таблица 8.2

Исходные данные

Годы	0	1	2	3
CF^- , у. е.	6000	500	500	–
CF^+ , у. е.	–	3000	4000	6000

8.4. Определить максимальную ставку дисконта, при которой проект будет целесообразен для реализации. Денежные потоки указаны в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Исходные данные

Годы	0	1	2	3
IC , у. е.	5500	–	–	–
CF^+ , у. е.	–	1500	2500	3000

8.5. Определить внутреннюю норму доходности для энергосберегающего инвестиционного проекта методом последовательных приближений с точностью $\varepsilon = 0,001$. Данные для расчетов взять из табл. 8.4. Ставку дисконта положить равной 12%.

Таблица 8.4

Исходные данные

Годы	0	1	2	3	4
CF^- , у. е.	–13 000	–	–	–	–
CF^+ , у. е.	–	5000	5000	5000	5000

8.6. Вычислить IRR проекта с помощью метода линейной интерполяции, если известно, что для ставки $r_1 = 0,15$ чистая текущая ценность составляет 9700 у. е., а для ставки $r_2 = 0,25$ она равна –4580 у. е.

8.7. Для утилизации древесных отходов предприятие планирует приобрести котел-утилизатор стоимостью 10 000 руб. и сроком эксплуатации 10 лет. Предприятие рассчитывает на ежегодный приток денежных средств в размере 2000 руб. На третьем и седьмом году эксплуатации оборудованию потребуется плановый ремонт стоимостью 400 руб. Рассчитать снижение индекса рентабельности проекта за счет проведения плановых ремонтов. Ставка дисконта $r = 13\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника: учеб. для студентов вузов / А. М. Архаров [и др.]; под общ. ред. В. И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
2. Колпакова, Н. В. Газоснабжение: учеб. пособие / Н. В. Колпакова, А. С. Колпаков; под ред. Н. П. Ширяева; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.
3. Андрижиевский, А. А. Энергосбережение и энергетический менеджмент / А. А. Андрижиевский, В. И. Володин. – Минск: Выш. шк., 2005. – 294 с.
4. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
5. Селезнев А. Энергоэффективность в строительстве / А. Селезнев // Энергоэффективность и энергосбережение. Архитектура и строительство. – 2009. – № 10. – С. 33–35.
6. Володин, В. И. Теплофизика и энергетический менеджмент в строительстве / В. И. Володин. – Минск: БГТУ, 2006.
7. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/>. – Дата доступа: 08.02.2018.
8. Володин, В. И. Энергосбережение: учеб. пособие / В. И. Володин. – Минск: БГТУ, 2001. – 168 с.
9. Хутская, Н. Г. Основы энергосбережения: курс лекций / Н. Г. Хутская. – Минск: Тэхналогія, 1999. – 100 с.
10. Сухоцкий, А. Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / А. Б. Сухоцкий, В. Н. Фарафонов. – Минск: БГТУ, 2009. – 244 с.
11. Алешина, А. С. Газификация твердого топлива / А. С. Алешина, В. В. Сергеев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с.
12. Ковалев, В. В. Методы оценки инвестиционных проектов / В. В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 143 с.
13. Манжинский, С. А. Инвестиционное проектирование: метод. указания / А. С. Манжинский, Л. А. Радкевич. – Минск: БГТУ, 2010. – 57 с.
14. Дмитриченко, А. С. Энергетическое планирование и финансы в сфере энергосбережения: метод. указания / А. С. Дмитриченко, С. А. Манжинский. – Минск: БГТУ, 2013. – 75 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ТОПЛИВО. ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.....	5
2. ИСТОЧНИКИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	15
3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ	22
4. ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	30
4.1. Потери теплоты в зданиях и сооружениях.....	32
4.1.1. Теплопроводность через однослойную и много- слойную плоскую стенку	33
4.1.2. Теплопередача через многослойную плоскую стенку	34
4.1.3. Инфильтрация	35
4.2. Технические системы зданий	36
5. ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В БЫТУ	41
5.1. Передача электрической энергии по линиям электропередач	41
5.2. Потери энергии в трансформаторах	42
5.3. Использование электрической энергии на производстве. Электропривод	47
5.4. Электротермические установки	49
5.5. Использование электрической энергии для освещения	51
5.6. Экономия электрической энергии бытовыми электроприборами.....	53
6. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	57
6.1. Солнечная энергия.....	57
6.2. Энергия ветра	62
6.3. Гидроэнергия.....	64
6.4. Энергия биомассы.....	65

7. ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ.	
СТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ	70
7.1. Инвестиции при закупке технологического оборудования.....	70
7.2. Статические параметры оценки энергосберегающих инвестиционных проектов	71
7.3. Расчет денежных потоков предприятия	74
8. ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ	
ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ	78
8.1. Дисконтирование денежных потоков	78
8.2. Чистый дисконтированный доход.....	79
8.3. Дисконтированный период окупаемости	80
8.4. Внутренняя норма рентабельности.....	82
8.5. Индекс рентабельности	85
ЛИТЕРАТУРА	88

Учебное издание

Дмитриченко Александр Степанович
Карлович Татьяна Борисовна
Здитовецкая Светлана Валентиновна
Сидорик Галина Сергеевна

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е. И. Гоман*
Компьютерная верстка *О. Ю. Шантарович*
Корректор *Е. И. Гоман*

Подписано в печать 31.05.2018. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 5,7.
Тираж 200 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
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.