

31.3яг  
Е-78

В.Л. ЕРОФЕЕВ, П.Д. СЕМЕНОВ, А.С. ПРЯХИН

# Тепло- техника



УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ

МН-294382

В.Л. ЕРОФЕЕВ, П.Д. СЕМЕНОВ, А.С. ПРЯХИН

# Тепло- техника

CA-294382  
08

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Эксплуатация транспортных средств», специальности «Эксплуатация судовых энергетических установок» направления подготовки дипломированных специалистов «Эксплуатация водного транспорта и транспортного оборудования» и специальности «Эксплуатация перегрузочного оборудования портов и транспортных терминалов» направления подготовки дипломированных специалистов «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»



МОСКВА  
ИКЦ «АКАДЕМКНИГА»  
2006

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ КУЛЬТУРЫ  
"ОРЕНБУРГСКАЯ ОБЛАСТНАЯ  
УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
ИМ.Н.К.КРУПСКОЙ"

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5

## РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОДИНАМИКА

<i>Глава 1.</i>	<b>ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ</b> .....	7
1.1.	Предмет, метод исследования и область применения феноменологической термодинамики .....	7
1.2.	Термодинамическая система. Параметры и уравнения состояния. Идеальный и реальный газ .....	10
1.3.	Смеси идеальных газов .....	13
1.4.	Теплоемкость газов и их смесей .....	15
1.5.	Дифференциальные уравнения термодинамики. Термодинамические потенциалы .....	19
1.6.	Основные законы термодинамики .....	21
<i>Глава 2.</i>	<b>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ</b> .....	29
2.1.	Постановка задачи исследования процессов. Равновесные (обратимые) и неравновесные (необратимые) процессы .....	29
2.2.	Термодинамические процессы с идеальным газом .....	31
2.3.	Термодинамические процессы с водяным паром .....	44
2.4.	Влажный воздух .....	57
<i>Глава 3.</i>	<b>РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТУРБИНЫ И КОМПРЕССОРА</b> .....	65
3.1.	Идеальная газовая турбина и идеальный компрессор .....	65
3.2.	Многоступенчатые компрессоры .....	68
3.3.	Работа и коэффициент полезного действия реальных компрессоров .....	70
3.4.	Принципиальная схема и работа газотурбинной установки .....	71
<i>Глава 4.</i>	<b>ТЕРМОДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ</b> .....	72
4.1.	Особенности преобразования энергии в потоке упругой жидкости. Параметры торможения .....	72
4.2.	Сопловое и диффузорное течения. Закон обращения воздействий на поток. Формы каналов сопел и диффузоров .....	73
4.3.	Истечение газа через суживающееся сопло и сопло Лавала. Скачки уплотнения .....	78
<i>Глава 5.</i>	<b>ЦИКЛЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК</b> .....	84
5.1.	Круговые процессы (циклы), прямые и обратные. Циклы теплосиловых установок, холодильных машин и тепловых насосов .....	84

5.2.	Цикл Карно, теорема Карно. Обобщенные и эквивалентные циклы Карно .....	87
5.3.	Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания .....	90
5.4.	Циклы газотурбинных установок .....	99
5.5.	Циклы пароэнергетических установок .....	104
5.6.	Обратные циклы .....	110
<b>Глава 6.</b>	<b>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ..</b>	<b>114</b>
6.1.	Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Закон возрастания энтропии .....	114
6.2.	Необратимость и производство работы. Техническая работоспособность — эксергия. Формула Гюи—Стодола. Эксергетический КПД .....	118
6.3.	Анализ необратимых циклов с помощью системы коэффициентов полезного действия .....	122
6.4.	Энтропийный и эксергетический методы анализа .....	124
6.5.	Тепловой и эксергетический балансы теплоэнергетических установок. Вторичные энергетические ресурсы .....	125
<b>Глава 7.</b>	<b>ЭЛЕМЕНТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ .....</b>	<b>129</b>
7.1.	Приложение первого и второго начал термодинамики к различным физико-химическим системам .....	129
7.2.	Термодинамическая вероятность химической реакции. Химическое сродство .....	133
7.3.	Термодинамика растворов .....	137

## РАЗДЕЛ 2. ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

<b>Глава 8.</b>	<b>ТЕОРИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....</b>	<b>143</b>
8.1.	Процессы теплообмена .....	143
8.2.	Основные понятия теории теплопроводности .....	145
8.3.	Определение теплопроводности материала .....	148
8.4.	Дифференциальные уравнения теплопроводности .....	149
8.5.	Условия однозначности .....	151
8.6.	Распространение теплоты теплопроводностью в плоской и цилиндрической стенках при стационарном режиме (граничные условия первого рода) .....	153
<b>Глава 9.</b>	<b>КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН .....</b>	<b>161</b>
9.1.	Основные понятия и определения .....	161
9.2.	Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена .....	167
9.3.	Подобие физических явлений .....	175
9.4.	Гидромеханическое подобие .....	181
9.5.	Тепловое подобие .....	184
9.6.	Уравнения подобия конвективного теплообмена .....	187
9.7.	Экспериментальное изучение конвективного теплообмена .....	188
<b>Глава 10.</b>	<b>ТЕПЛООБМЕН ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ И СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ .....</b>	<b>195</b>
10.1.	Движение жидкости в трубах .....	195
10.2.	Теплоотдача при движении жидкости в трубах .....	199
10.3.	Теплоотдача при поперечном омывании одиночной гладкой трубы и пучка труб .....	204
10.4.	Особенности расчета коэффициента теплоотдачи при поперечном омывании пучка оребренных труб .....	210
10.5.	Теплоотдача при свободном движении .....	215

10.6.	Теплообмен при кипении жидкости .....	218
10.7.	Теплоотдача при кипении жидкости в большом объеме .....	221
10.8.	Теплоотдача при кипении жидкости внутри труб .....	224
10.9.	Теплоотдача при конденсации пара .....	226
<b>Глава 11.</b>	<b>ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b> .....	<b>229</b>
11.1.	Общие сведения .....	229
11.2.	Закон поглощения .....	232
11.3.	Основные законы излучения. Серые тела .....	233
11.4.	Закон Кирхгофа .....	236
11.5.	Излучение газов .....	238
11.6.	Теплообмен излучением между двумя телами .....	243
11.7.	Защита от теплового излучения (экраны) .....	246
<b>Глава 12.</b>	<b>ТЕПЛОПЕРЕДАЧА</b> .....	<b>247</b>
12.1.	Сложный теплообмен. Теплопередача через стенки .....	247
12.2.	Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции .....	254
<b>Глава 13.</b>	<b>ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ</b> .....	<b>257</b>
13.1.	Типы и классификация теплообменных аппаратов .....	257
13.2.	Схемы тока теплоносителей .....	259
13.3.	Тепловой баланс .....	260
13.4.	Температурный напор .....	262
13.5.	Тепловые расчеты .....	267
13.6.	Гидродинамический расчет .....	270
13.7.	Тепловые трубы и термосифоны .....	272

### РАЗДЕЛ 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ

<b>Глава 14.</b>	<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТОПЛИВА И ОСНОВЫ ИХ ГОРЕНИЯ</b> .....	<b>276</b>
14.1.	Классификация топлив. Элементарный состав. Формулы пересчета .....	276
14.2.	Физические и эксплуатационные характеристики товарных топлив. Условное топливо .....	281
14.3.	Основы горения топлив .....	299
14.4.	Определение расхода воздуха на горение топлива .....	309
14.5.	Состав и объемы продуктов сгорания топлив. Диаграмма $I_T-t_T$ ..	313
<b>Глава 15.</b>	<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА</b> .....	<b>318</b>
15.1.	Энергопотребление на объектах водного транспорта .....	318
15.2.	Котельные установки .....	321
15.3.	Промышленные печи .....	343
15.4.	Компрессорные установки .....	354
15.5.	Холодильные и криогенные машины и установки .....	380
15.6.	Системы теплоснабжения промышленных предприятий .....	409
15.7.	Двигатели внутреннего сгорания .....	426
15.8.	Экологические проблемы использования тепловой энергии на водном транспорте .....	466
<b>Глава 16.</b>	<b>ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ</b> .....	<b>474</b>
16.1.	Цели и направления государственного обеспечения повышения эффективности использования энергии. Оценочные показатели энергоэффективности .....	474
16.2.	Энергетический баланс судна .....	479
16.3.	Пути использования вторичных энергетических ресурсов .....	483
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....		<b>485</b>

В правовой части отмечается обеспечение достаточно жесткого контроля за соблюдением тех или иных положений Конвенции МАРПОЛ 73/78 иностранными судами.

В целях осуществления качественного технического надзора Регистр СССР в 1979 г. разработал специальные правила, в основу которых легли технические требования, содержащиеся в Конвенции МАРПОЛ 73/78.

В соответствии с Правилами экологической безопасности судов внутреннего и смешанного плавания (ПЭБ) Российского Речного Регистра производится освидетельствование судов на соответствие требованиям Конвенции МАРПОЛ 73/78 и выдается Свидетельство специальной формы.

Проблема охраны водных бассейнов — комплексная проблема, включающая технические, технологические, экономические, медицинские и социальные аспекты. Все они регламентируются соответствующими правовыми нормами. Центральное место в регламентировании водных отношений в РФ отводится Основам водного законодательства.

В связи с тем, что неблагоприятные последствия хозяйственной деятельности распространяются обычно на целые водные бассейны, правительство приняло ряд постановлений, предусматривающих комплекс мероприятий по защите от загрязнения речных и морских вод. Такими мероприятиями охвачены бассейны рек Волга, Урал, озера Байкал, Каспийского, Черного, Азовского и Балтийского морей.

Постановлениями по охране морских бассейнов предусматривается обязанность всех министерств и ведомств, имеющих суда и другие плавучие средства, в установленные сроки оборудовать суда сепараторами для очистки нефтесодержащих вод или устройствами для сбора этих вод, других вредных веществ, судовых сточных вод и мусора и сдачи их на плавучие или береговые приемные устройства.

Загрязнение морских и речных вод влечет за собой гражданско-правовую (имущественную), административную, дисциплинарную или даже уголовную ответственность лиц, непосредственно виновных в загрязнении.

## ГЛАВА 16

### ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

#### 16.1. Цели и направления государственного обеспечения повышения эффективности использования энергии. Оценочные показатели энергоэффективности

Энергия наряду с трудом, капиталом и материалами является одним из важнейших факторов производства, поэтому устойчивый экономиче-

ский прогресс государства, региона, отрасли народного хозяйства не может не опираться на прочный базис системы энергообеспечения.

В промышленной политике российских предприятий также очевидна определяющая роль энергетики. В настоящее время энергоемкость единицы внутреннего валового продукта (ВВП) в России в четыре раза выше, чем в странах Западной Европы и США, и почти в шесть раз выше, чем в Японии. Данные результаты являются свидетельством поведения устаревшей за долгие годы промышленной политики, связанной с расхожим представлением о доступности и дешевизне энергоресурсов.

Этой же политикой руководствовались и большинство промышленно развитых стран, но топливно-энергетические кризисы 70-х годов XX столетия заставили их кардинально изменить политику в области энергопотребления, переводя ее на рельсы качественного, эффективного использования энергии.

В странах Запада был сформулирован принцип, в соответствии с которым рост производительности труда и ВВП не должен сопровождаться ростом расхода энергии. Этот принцип осуществляется при серьезном государственном воздействии и регулировании, в том числе — установлении нормативов качества использования энергии, экономическом стимулировании внедрения энергосберегающей техники и технологии.

Под энергосбережением понимают не простую совокупность отдельных мероприятий и кампаний, а сложную большую *систему процессов рационального использования энергии в единстве технологий, организации и поведения.*

Основным инструментом реализации принципов энергосбережения является энергетический менеджмент — методологическая наука с практическим инструментарием для осуществления процесса управления использованием энергии, т.е. для планирования, организации внедрения, мотивации и контроля оптимального использования всех видов и форм энергии при целесообразном удовлетворении потребностей человека (организации) и щадящем влиянии на окружающую среду.

Основной целью энергетического менеджмента является достижение энергетической эффективности производства продукции и услуг.

В результате анализа приходной и расходной частей топливно-энергетического баланса организации выявляются источники энергосбережения, дается их количественная оценка и определяются энергосберегающие потенциалы.

Потенциал энергосбережения — это возможное снижение энергопотребления при выпуске одного и того же объема продукции при обеспечении неизменных условий (качества) за счет использования технически освоенных образцов энергосберегающей техники и технологии.

Различают следующие виды энергосберегающих потенциалов: технический, экономический, экологический и поведенческий.

*Технический потенциал энергосбережения* учитывает не только возможности повышения качества использования первичного источника энергии при применении более эффективной техники, но и реализацию технологических схем использования потерь энергии при преобразовании их во вторичные энергетические ресурсы.

*Экономический потенциал энергосбережения* определяется рентабельной частью технического потенциала, освоение которого зависит от наличия инвестиций. Величина экономического потенциала ограничивается жесткостью требований, предъявляемых к окупаемости капиталовложений в энергосбережение.

*Экологический потенциал энергосбережения* определяется максимально возможным снижением экологического ущерба, наносимого выбросами вредных веществ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  и др.), излучениями, а также занимаемой ими территории благодаря выполнению энергосберегающих мероприятий.

*Поведенческий потенциал энергосбережения* определяется мерой осознания актуальности проблемы энергосбережения всеми лицами, принимающими и реализующими решения.

В современной России экономические и организационные условия для эффективного использования энергетических ресурсов устанавливает ряд федеральных законов, постановлений правительства РФ, государственных стандартов и рекомендаций по стандартам.

Так, Федеральный закон РФ «Об энергосбережении» № 28-ФЗ от 03.04.96 направлен на «... осуществление государственного надзора за эффективным использованием энергетических ресурсов...» (ст. 3). В целях оценки эффективности использования энергетических ресурсов и снижения затрат на топливо и энергообеспечение устанавливается необходимость энергетических обследований. «Обязательным энергетическим обследованиям подлежат организации независимо от их организационно-правовых форм собственности, если годовое потребление ими энергоресурсов составляет более шести тысяч тонн условного топлива или более одной тысячи тонн моторного топлива. Энергетические обследования организаций, если годовое потребление ими энергетических ресурсов составляет менее шести тысяч тонн условного топлива, проводятся по решению органов исполнительной власти субъектов РФ, ответственных за координацию работ по эффективному использованию энергетических ресурсов» (ст. 10).

Целями регламентированного энергетического обследования (энергоаудита) и энергетической паспортизации являются оценка эффективности использования потребителем энергетических ресурсов, снижение затрат потребителей на энергообеспечение, сохранение невозобновляемых ресурсов и регламентируемых характеристик экологической чистоты окружающей среды. Опыт энергоаудита предприятий показывает, что

в процессе обследования, как правило, выявляются также пути реконструкции производства, его реанимации после длительного спада.

Формализованным результатом энергетического обследования (энергоаудита) должен являться энергетический паспорт предприятия — промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в соответствии с новым ГОСТ Р 51379—99.

Основными задачами энергоаудита и паспортизации являются:

выявление неэкономичных режимов работы энергетического и технологического оборудования;

определение возможного потенциала энергосбережения на предприятии по видам энергоносителей и оценка объема инвестиций на энергосберегающие мероприятия;

разработка комплексной программы по энергосбережению с учетом динамики развития предприятия;

составление энергетического паспорта с отражением всех основных сведений об энергохозяйстве предприятия и оценкой эффективности использования ТЭР по объектам предприятия.

Оценочные показатели энергетической эффективности устанавливаются рядом новых ГОСТ Р «Энергосбережение» (ГОСТ Р 51541—99, ГОСТ Р 51380—99, ГОСТ Р 51749—2001, ГОСТ Р 51388—99), рекомендациями Р 50.1.025—2000, Р 50.1.026—2000).

Так, в соответствии с новым ГОСТ Р 51541—99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей», введенным впервые в действие постановлением Госстандарта России от 29.12.1999 г. № 882-ст, устанавливается ряд основных показателей энергетической эффективности и энергосбережения, которые должны использоваться при:

планировании и оценке эффективности работ по энергосбережению;

проведении энергетических обследований (энергетического аудита) потребителей энергоресурсов;

формирований статистической отчетности по эффективности энергоиспользования.

Показатели энергетической эффективности — это абсолютная, удельная или относительная величина потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса.

Различают два основных показателя энергетической эффективности:

1. *Экономичность потребления ТЭР* (для продукции при ее использовании по прямому функциональному назначению) — количественная характеристика эксплуатационных свойств изделия, отражающих его техническое совершенство, определяемое совершенством конструкции и качеством изготовления, уровнем или степенью потребления им энергии и (или) топлива при использовании этого изделия по прямому функциональному назначению.

Показатели экономичности энергопотребления могут быть выражены в абсолютной или удельной форме. Абсолютная форма характеризует расход ТЭР в регламентированных условиях (режимах) работы. Удельная форма характеризует отношение количества энергии или топлива, затрачиваемое машиной, механизмом на производство единицы продукции или работы (например, расход топлива на перевозку 1 т груза на 1 км пути). Последний показатель является более предпочтительным.

2. *Энергоемкость производства продукции* — объем потребления энергии и (или) топлива на основные и вспомогательные технологические процессы изготовления продукции, выполнения работ, оказание услуг на базе заданной технологической системы.

Показатели производственной энергоемкости изготовления продукции в абсолютной и удельной формах предназначены для внесения в стандарты, технологическую, проектную и другую документацию. Понятие «энергоемкость» может иметь различное содержание в зависимости от степени интеграции по различным аспектам рассмотрения. Так, при интеграции по уровням управления на уровне Федерации говорят об энергоемкости валового общественного продукта, энергоемкости национального дохода. На уровне предприятия рассматривается производственная энергоемкость изготовления продукции (изделия).

Абсолютные значения показателей энергоёмкости изготовления продукции характеризуют затраты топлива и энергии на основные и вспомогательные технологические процессы изготовления продукции — на литры, штуки и т.д.

Удельное значение показателей энергоемкости изготовления продукции характеризуется отношением абсолютного значения энергоемкости этой продукции к одному из показателей, отражающих основные эксплуатационные свойства изделия. Например, удельная энергоемкость сухогрузного теплохода может быть охарактеризована отношением энергоемкости его постройки к грузоподъемности, кВт·ч/т. Этот показатель дает представление о прогрессивности конструкции и технологии в сравнении с аналогичными изделиями с точки зрения энергозатрат при производстве 1 т грузоподъемности судов и другого подвижного состава. Эти показатели требуют серьезной разработки, уточнения и отбора.

Технические показатели энергетической эффективности могут быть использованы для оценки технического потенциала энергосбережения. Для последующей оценки экономического потенциала энергосбережения необходимо знать не только фактическое потребление топлива и энергии на предприятиях речного транспорта, но и ряд экономических показателей их функционирования. Новый энергетический паспорт промышленного потребителя ТЭР (ГОСТ Р 51379–99) требует установления показателей экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов, в том числе объема производства про-

дукции (работ, услуг) (тыс.руб.), энергоемкости производства продукции (тыс. т.у.т/тыс.руб.), доли платы за энергоресурсы в стоимости произведенной продукции (руб.ТЭР/руб.дохода).

## 16.2. Энергетический баланс судна

Судовая энергетическая установка современного теплохода представляет собой сложный комплекс разнообразного энергетического оборудования, использующего различные виды энергии, источником которых является жидкое топливо. Общее количество теплоты, потребляемое на судне в ходовом режиме,

$$Q = Q_{\text{гд}} + Q_{\text{в.д}} + Q_{\text{к.у}}, \quad (16.1)$$

где  $Q_{\text{гд}}$ ,  $Q_{\text{в.д}}$ ,  $Q_{\text{к.у}}$  — количество теплоты, расходуемое соответственно на главные двигатели, вспомогательные двигатели и котельную установку.

Разделив каждый член (16.1) на общее количество теплоты, расходуемой на все потребители судна, получим уравнение энергетического баланса судна

$$X + Y + Z = 1, \quad (16.2)$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — доли теплоты (энергии), расходуемые соответственно на главные и вспомогательные двигатели и котельную установку.

Значения составляющих энергетического баланса зависят от назначения судна и типа энергетической установки. В табл. 16.1 приведено ориентировочное распределение используемой теплоты по соответствующим статьям энергетического баланса для речных и морских судов различных типов при работе главных двигателей на номинальном режиме.

При проектировании СЭУ энергетический баланс судна и тепловой баланс главных двигателей необходимо рассматривать совместно. Использование потерь теплоты с отработавшими газами и охлаждающей жидкостью в различных утилизационных устройствах позволит повысить процент полезного использования теплоты первичного источника в балансе силовой установки.

С учетом тепловых балансов отдельных потребителей (16.2) в относительных величинах примет вид:

$$(q_e + q_{\Gamma} + q_{\text{охл}} + q_{\text{м}} + q_{\text{ост}})X + (\eta_e^{\text{в.д}} + q_{\Gamma}^{\text{в.д}} + q_{\text{охл}}^{\text{в.д}} + q_{\text{п}}^{\text{в.д}})Y + (q_e^{\text{к.у}} + q_{\text{п}}^{\text{к.у}})Z = 1, \quad (16.3)$$

где  $q_e$ ,  $q_e^{\text{в.д}}$ ,  $q_e^{\text{к.у}}$  — теплота, преобразованная в эффективную работу соответственно в главных и вспомогательных двигателях и полезно использованная в котельной установке;  $q_{\text{п}}^{\text{в.д}}$ ,  $q_{\text{п}}^{\text{к.у}}$  — потери теплоты во вспомогательных двигателях и в котельной установке.

Составляющие энергетического баланса дизельных судов

Тип судна	Доли энергии, %		
	механической, X	электрической, Y	тепловой, Z
Морские суда:			
сухогрузные теплоходы	83-92	4-10	4-8
нефтеналивные	69-82	3-8	10-32
рефрижераторные	57-76	36-20	4-8
Речные суда:			
грузовые и буксирные	94-96	2-4	1-2
нефтеналивные	82-87	2-4	10-15
грузопассажирские транзитные	75-80	7-10	10-15

Группируя все потери теплоты, которые не могут быть использованы в утилизационных установках или которые нецелесообразно в них использовать, получаем

$$q_e X + q_{\Gamma} X + q_{\text{охл}} X + q_e^{\text{в.д}} Y + q_e^{\text{к.у}} Z + \sum q_n = 1, \quad (16.4)$$

где  $\sum q_n$  — общее количество потерь теплоты, не используемое в утилизационных устройствах;  $\sum q_n = (q_M + q_{\text{ост}})X + (q_{\Gamma}^{\text{в.д}} + q_{\text{охл}}^{\text{в.д}} + q_{\Pi}^{\text{в.д}})Y + q_{\Pi}^{\text{к.у}}Z$ .

В ряде случаев может оказаться целесообразным утилизировать потери теплоты вспомогательных двигателей с отработавшими газами и охлаждающей водой  $(q_{\Gamma}^{\text{в.д}} + q_{\text{охл}}^{\text{в.д}})Y$ .

Потери теплоты, превращенные во вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), в утилизационных устройствах могут быть использованы лишь частично.

В зависимости от значений  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  могут быть предложены различные схемы утилизации, в том числе:

полное или частичное замещение вспомогательных котлов утилизационными —  $q_{\Gamma} X \psi_{\Gamma} \leq q_e^{\text{к.у}} Z$ ;

полное или частичное замещение вспомогательных двигателей турбогенератором, работающим на паре утилизационных котлов —  $q_{\Gamma} X \psi_{\Gamma} \eta_{\text{ту}} \leq q_e^{\text{в.д}} Y$ ;

полное замещение вспомогательных двигателей турбогенератором и вспомогательного котла утилизационным —

$$q_{\Gamma} X \psi_{\Gamma} \eta_{\text{ту}} \leq q_e^{\text{в.д}} Y + q_e^{\text{к.у}} Z,$$

где  $\psi_{\Gamma}$  — коэффициент использования теплоты отработавших газов;  $\eta_{\text{ту}}$  — КПД турбинной установки, работающей на паре утилизационных котлов.

В различных схемах замещения возможно использование ВЭР<sub>охл</sub> — потерь теплоты с охлаждающей жидкостью.

Выбор оптимального варианта схемы утилизации с наиболее полным использованием ВЭР производится путем технико-экономического сопоставления выбранных вариантов.

Для оценки и сравнения экономичности дизельных энергетических установок применяют различные методы. Так, для определения эффективности работы СЭУ в целом используют уравнение, применяемое на практике для оценки работы комбинированных ТЭЦ:

$$\eta_{уст} = \frac{B_1 \eta_e^{\Gamma.д} \eta_{\Pi} + B_2 \eta_e^{В.д} \eta_{\Gamma} + B_3 \eta_{к.у}}{B}, \quad (16.5)$$

где  $B_1, B_2, B_3$  — расходы топлива (при одинаковой теплоте сгорания) соответственно на главные двигатели, вспомогательные дизель-генераторы и котельную установку, кг/ч;  $B$  — суммарный расход топлива на СЭУ, кг/ч;  $\eta_e^{\Gamma.д}, \eta_e^{В.д}, \eta_{к.у}$  — КПД соответственно главного, вспомогательных двигателей и котельной установки;  $\eta_{\Pi}$  — КПД передачи от главных двигателей к движителям;  $\eta_{\Gamma}$  — КПД электрогенератора.

Используя ранее введенные относительные величины  $X, Y, Z$ , получаем (16.5) в следующем виде:

$$\eta_{уст} = \eta_e^{\Gamma.д} \eta_{\Pi} X + \eta_e^{В.д} \eta_{\Gamma} Y + \eta_{к.у} Z. \quad (16.6)$$

В тех случаях, когда вторичные энергетические ресурсы главных двигателей используют для выработки механической энергии и теплоты, при полном замещении вспомогательных двигателей турбогенератором и вспомогательного котла утилизационным

$$\eta_{уст} = \eta_e^{\Gamma.д} + \eta_e^{\Pi} (q_{\Gamma} \psi_{\Gamma} \beta + q_{охл} \psi_{охл} \gamma) \eta_{\Gamma} + (1 - \beta) q_{\Gamma} \psi_{\Gamma} + (1 - \gamma) q_{охл} \psi_{охл}, \quad (16.7)$$

где  $\eta_e^{\Pi}$  — эффективный КПД паровой части комбинированного газопарового цикла;  $\beta, \gamma$  — доли теплоты соответственно выпускных газов и охлаждающей жидкости, используемые в паровой части комбинированного цикла.

КПД паровой части  $\eta_e^{\Pi}$  комбинированного двигателя ниже КПД газовой части  $\eta_e^{\Gamma.д}$ , поэтому чаще используют ВЭР, в первую очередь для получения тепловой энергии.

На практике широко используется оценка КПД СЭУ только по суммарной эффективной мощности на гребном валу, отнесенной к общему расходу теплоты,

$$\eta_{уст} = \frac{3600 N_e}{B_{\Sigma} Q_H^p}, \quad (16.8)$$

или к расходу теплоты только на гребную установку со всеми обслуживающими ее вспомогательными механизмами,

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{3600 N_e}{Q_H^p B_{\Gamma,y}}. \quad (16.9)$$

Иногда к полезной теплоте относят и теплоту, идущую на транспортные нужды, т.е. на перевозку, подготовку и сохранение груза и обслуживание пассажиров, а расходы энергии на привод вспомогательных механизмов, отопление и освещение, подогрев масла, воды относят к потерям теплоты. В этом случае КПД установки находят из соотношения:

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{Q_{\Gamma,д} + Q_{\Gamma,р} + Q_{\Pi}}{B_{\text{ч}} Q_H^p}, \quad (16.10)$$

где  $Q_{\Gamma,д}$  — теплота, эквивалентная работе, подводимой к гребным винтам, кДж/ч;  $Q_{\Gamma,р}$  — теплота, расходуемая на подогрев груза (танкеры) или на его охлаждение (рефрижераторные суда), кДж/ч;  $Q_{\Pi}$  — теплота, затрачиваемая на бытовые нужды пассажиров, кДж/ч.

Уравнение (16.10), как и (16.5), обладает тем недостатком, что в нем суммируются неравноценные по качеству механическая энергия главных и вспомогательных двигателей и тепловая энергия вспомогательного котла. Этот недостаток не позволяет сравнивать СЭУ различных типов.

Приведение различных энергий к одинаковому качеству и сравнение СЭУ позволяет определить эксергетический КПД  $\eta_{ex}$ .

Принимая одинаковой  $Q_H^p$  для всех потребителей судна, получаем

$$\eta_{ex} = \frac{3600 N_e^{\Gamma,д} + 3600 N_e^{B,д} + Ex_{\Pi} \eta_{\Pi}}{B Q_H^p}, \quad (16.11)$$

где  $Ex_{\Pi}$  — эксергия генерируемого пара;  $\eta_{\Pi}$  — коэффициент, учитывающий потери эксергии пара в тепловых потребителях.

Эксергия теплоты пара, генерируемого в котле,

$$Ex_{\Pi} = D(i - i_{\Pi,в}) \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{ср}}} \right), \quad (16.12)$$

где  $D$  — паропроизводительность котла, кг/ч;  $i, i_{\Pi,в}$  — энтальпии соответственно пара и питательной воды, кДж/кг;  $T_0$  — абсолютная температура окружающей среды, К;  $\bar{T}_{\text{ср}}$  — среднетермодинамическая температура подвода теплоты к пару.

Таким образом, оценка наличия ВЭР и сопоставление их с потребностями в энергии на суде позволяют выбрать различные схемы замещения первичных источников энергии вторичными, а также оценить повышение качества использования топлива.

### 16.3. Пути использования вторичных энергетических ресурсов

Одним из важнейших направлений повышения топливоиспользования в энергетических установках является использование вторичных энергетических ресурсов в различных теплоутилизационных контурах. В зависимости от потребностей в тех или иных видах энергии на судне могут быть осуществлены следующие направления использования ВЭР:

1. Технологические схемы теплоснабжения;
2. Получение механической (в том числе электрической) энергии в пароводяном цикле;
3. Получение пресной воды;
4. Получение холода;
5. Применение комбинированных газопаровых установок с низкокипящими веществами и т.д.

В качестве примера рассмотрим только одну технологическую схему использования ВЭР.

Наиболее часто рассматривается паровой теплоутилизационный контур (рис.16.1). Этот контур состоит из котла-утилизатора, расположенного на выпускном тракте ДВС или ГТУ, паровой турбины, конденсатора и насоса питательной системы.

В ряде случаев этот комплекс может быть дополнен теплообменниками для использования теплоты охлаждающей ДВС жидкости.

Штриховая линия на рис. 16.1, б показывает, что максимальная температура рабочего тела в утилизационном контуре не может превышать температуры отработавших газов, выходящих из двигателя.

Получаемая на силовой паровой турбине мощность может передаваться на винт через общий с главными двигателями редуктор или вращать электрогенератор.

Мощность утилизационной паровой турбины

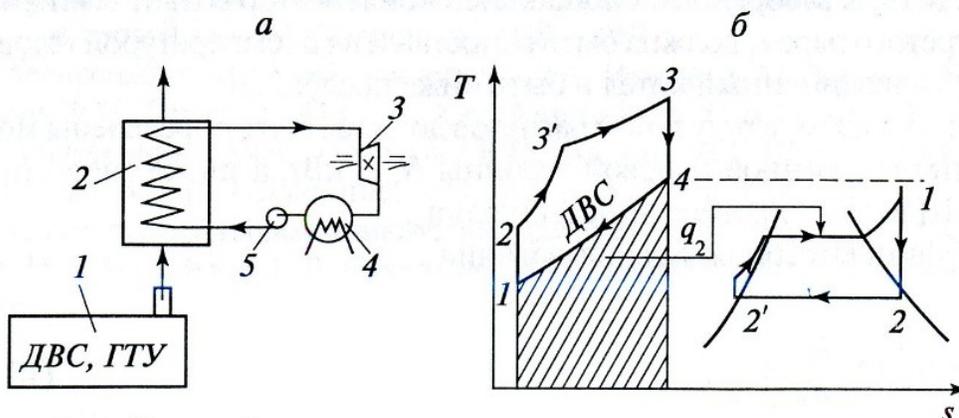


Рис. 16.1. Паровой теплоутилизационный контур:

а – принципиальная схема: 1 – первичный двигатель; 2 – котел-утилизатор; 3 – паровая турбина; 4 – конденсатор, 5 – насос;  
б – совмещенные циклы ДВС (ГТУ) и цикл Ренкина

$$N_{п.т} = \frac{B_{ч} Q_{н}^p}{3600} q_{г} \psi \eta_{к} \eta_{тp} \eta_{oi} \eta_{м}, \quad (16.13)$$

где  $\psi$  — коэффициент использования теплоты;  $\eta_{к}$ ,  $\eta_{тp}$ ,  $\eta_{oi}$ ,  $\eta_{м}$  — КПД соответственно утилизационного котла, цикла Ренкина, внутренний относительный и механический.

Коэффициент использования теплоты отработавших газов  $\psi$  должен быть несколько ниже максимального ( $\psi < \psi_{\max}$ ), определяемого из соображений недопущения снижения температуры газов ниже минимальной температуры  $t_{\min}$ , определяемой в зависимости от температуры точки росы  $t_p$  и перепада температур  $\Delta t$  для обеспечения интенсивности теплообмена между газом и паром:  $t_{yx}^{\min} = t_p + \Delta t$ .

Температура точки росы  $t_p$  зависит от состава топлива ( $t_p = 120 \div 140$  °С),  $\Delta t \geq 25$  °С.

$$\text{Тогда } \psi < \psi_{\min} = \frac{t_{г} - t_{yx}^{\min}}{t_{г}}.$$

Коэффициенты полезного действия современных котлов  $\eta_{к} = 0,85 \div 0,9$ , внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,8 \div 0,9$ , а механический КПД  $\eta_{м} = 0,95 \div 0,98$ .

Коэффициент полезного действия идеального цикла Ренкина

$$\eta_{тp} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'}.$$

Расчеты выполняют с использованием таблиц и диаграмм воды и водяного пара, давление в утилизационном котле выбирают в пределах  $p_s = 0,5 \div 8$  МПа, давление в конденсаторе  $p_{к} = 3 \div 20$  кПа (в зависимости от температуры заборной охлаждающей конденсатор воды); температура перегретого пара  $t_1$  должна быть сопоставлена с температурой газов на входе в утилизационный котел и быть ниже последней.

Таким образом, в результате расчетов должны быть определены мощность утилизационной паровой турбины  $N_{п.т}$ , кВт, а также энергетический КПД комбинированной установки  $\eta_e$ .

Коэффициент топливоиспользования

$$\eta_{e\Sigma} = \eta_e \left( 1 + \frac{N_{п.т}}{N_e} \right). \quad (16.14)$$

Иные технологические схемы использования ВЭР освещены в специальной литературе.