

**СРЕДНЕЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

Г.Ф. Быстрицкий

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Допущено Министерством образования
Российской Федерации в качестве **учебного пособия**
для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования

Рекомендовано Учебно-методическим советом
Института электротехники МЭИ (ТУ)
в качестве **учебного пособия**
для студентов электротехнических специальностей вузов
по направлению обучения «Электротехника,
электромеханика и электротехнологии»

Третье издание, стереотипное



КНОРУС • МОСКВА • 2023

УДК 620.9(075.32)
ББК 31я723
Б95

Рецензенты:

Г. Г. Ольховский, генеральный директор Всероссийского теплотехнического института, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф.,

А. М. Петрова, директор Московского политехнического колледжа, канд. экон. наук,

Т. Ю. Симонова, зам. директора Московского политехнического колледжа

Быстрицкий, Геннадий Фёдорович.

Б95 Общая энергетика : учебное пособие / Г. Ф. Быстрицкий. — 3-е изд., стер. — Москва : КНОРУС, 2023. — 294 с. — (Среднее профессиональное образование).

ISBN 978-5-406-10624-2

Приведены сведения о невозобновляемых и возобновляемых энергетических ресурсах, их характеристики; рассмотрены основы теплотехники: положения технической термодинамики и основы теплообмена. Даны схемы и принципы работы тепловых электрических станций, газотурбинных установок, АЭС; гидравлических и ветровых электрических станций.

Представлено основное тепловое оборудование ТЭС: паровые и водогрейные котлы, паровые турбины и нагнетательные машины.

Соответствует ФГОС СПО последнего поколения.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования, может быть использовано студентами электротехнических специальностей вузов, а также работниками электростанций и промышленности.

УДК 620.9(075.32)
ББК 31я723

Быстрицкий Геннадий Фёдорович

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Изд. № 662138. Формат 60×90/16. Гарнитура «NewtonС».

Усл. печ. л. 18,5. Уч.-изд. л. 12,6. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КноРус».

117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.

Тел.: +7 (495) 741-46-28.

E-mail: welcome@knorus.ru www.knorus.ru

Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии».

109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

Тел.: +7 (495) 221-89-80.

ISBN 978-5-406-10624-2

© Быстрицкий Г.Ф., 2023

© ООО «Издательство «КноРус», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ	7
1. Энергоресурсы и их использование	7
1.1. Общие сведения	7
1.2. Невозобновляемые источники энергии	8
1.3. Возобновляемые источники энергии	23
ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ	30
2. Основные положения технической термодинамики	30
2.1. Основные понятия и определения	30
2.2. Внутренняя энергия, работа расширения, первый закон термодинамики	33
2.3. Теплоемкость, энтальпия и энтропия. Второй закон термодинамики	37
2.4. Основные термодинамические процессы идеальных газов	42
2.5. Реальные газы, вода и водяной пар	47
2.6. Круговой процесс, цикл Карно	53
3. Основы теории теплообмена	60
3.1. Основные понятия и определения	60
3.2. Теплопроводность	62
3.3. Конвективный теплообмен	68
3.4. Лучистый теплообмен	79
3.5. Теплопередача (сложный теплообмен)	89
ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ	95
4. Циклы основных тепловых электрических станций.	95
4.1. Общие сведения и типы электростанций	95
4.2. Паротурбинные электрические станции (КЭС и ТЭС)	98
4.3. Цикл газотурбинной установки	110
4.4. Парогазовые установки	114
4.5. Атомные электрические станции (АЭС)	116
5. Гидроэлектрические станции	122
5.1. Общие положения	122
5.2. Энергия речного водотока	126
5.3. Схемы создания напора и основное оборудование ГЭС	130
5.4. Энергия и мощность ГЭС	138

6. Ветроэнергетика и солнечная энергетика	140
6.1. Общие сведения о ветроэнергетике	140
6.2. Энергия воздушного потока и мощность ВЭУ	143
6.3. Солнечная энергетика	147

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ	152
---	-----

7. Котельные установки ТЭС	152
---	-----

7.1. Общие сведения	152
7.2. Назначение и классификация котлоагрегатов	155
7.3. Основные виды котельных агрегатов	159
7.4. Основные элементы котельного агрегата	166
7.5. Тепловой баланс котельного агрегата	177

8. Паровые турбины ТЭС	184
---	-----

8.1. Основные сведения	184
8.2. Преобразование энергии в соплах и на рабочих лопатках	187
8.3. Классификация и основные конструкции паровых турбин	196
8.4. Потери энергии и КПД турбины	201
8.5. Конденсационные установки паровых турбин	207

9. Системы теплоснабжения	215
--	-----

9.1. Классификация систем теплоснабжения	215
9.2. Тепловые системы источников тепла	219
9.3. Энергетическая эффективность теплофикации	225
9.4. Районные и промышленные отопительные котельные	230
9.5. Основное теплофикационное оборудование	233
9.6. Центральные тепловые пункты (ЦТП)	236

10. Нагнетательные машины электрических станций	244
--	-----

10.1. Виды и классификация нагнетателей	244
10.2. Основные рабочие характеристики нагнетательных машин	249
10.3. Работа центробежного насоса в системе	256
10.4. Основные энергетические насосы ТЭС	262
10.5. Центробежные вентиляторы	271
10.6. Поршневые компрессоры	282

Список литературы	292
------------------------------------	-----

ПРЕДИСЛОВИЕ

Потребление энергии является обязательным условием существования человечества. Наличие доступной для потребления энергии всегда было необходимо для удовлетворения потребностей человека, увеличения продолжительности и улучшения условий его жизни.

История цивилизации — история изобретения все новых и новых методов преобразования энергии, освоения ее новых источников и, в конечном итоге, увеличения энергопотребления.

В современном мире энергетика является основой развития базовых отраслей промышленности, определяющих прогресс общественного производства. Во всех промышленно развитых странах темпы развития энергетике опережали темпы развития других отраслей.

В то же время энергетика — один из источников неблагоприятного воздействия на окружающую среду и человека. Она влияет на атмосферу (потребление кислорода, выбросы газов, влаги и твердых частиц), гидросферу (потребление воды, создание искусственных водохранилищ, сбросы загрязненных и нагретых вод, жидких отходов), биосферу (выбросы токсичных веществ) и на литосферу (потребление ископаемых топлив, изменение ландшафта).

Известно, что электрическая энергия считается основой современной цивилизации. Можно без преувеличения сказать, что без электрической энергии невозможна нормальная жизнь современного общества. Электрическая энергия широко используется в промышленности для приведения в действие самых различных механизмов и непосредственно в технологических процессах, на транспорте, в быту. Работа современных средств связи — телеграфа, телефона, радио, телевидения — основана на применении электрической энергии. Без нее невозможно было бы развитие кибернетики, вычислительной техники, космической техники и т. д.

Основные отличительные свойства электрической энергии состоят в том, что она может легко передаваться на большие расстояния и относительно просто с малыми потерями преобразовываться в другие виды энергии.

Электроэнергия вырабатывается на специальных предприятиях — электростанциях, преобразующих в электрическую энергию другие виды энергии: химическую энергию топлива, энергию воды, энергию ветра, атомную энергию и др. Выработанная электростанцией электроэнергия передается по воздушным или кабельным линиям электро-

сетей различным потребителям — промышленным, коммунальным, сельскохозяйственным, бытовым и т. д.

В зависимости от используемого вида энергии различают электростанции тепловые, гидравлические, ветровые, атомные и др.

На тепловых электростанциях используется твердое, жидкое и газообразное топливо. В зависимости от рода первичного двигателя, приводящего во вращение электрический генератор, тепловые электростанции можно подразделить на станции с паровыми турбинами, с двигателями внутреннего сгорания и с газовыми турбинами. Станции с паровыми турбинами, кроме того, подразделяются на конденсационные (КЭС) и теплофикационные (ТЭЦ). Конденсационные электростанции снабжают потребителей только электрической энергией, а теплофикационные электростанции — электрической и тепловой энергией.

В России более 90% существующего потенциала электроэнергетики объединено в Единую энергетическую систему (ЕЭС) России, которая охватывает всю обжитую территорию страны от западных границ до Дальнего Востока и является одним из крупнейших в мире централизованно управляемых энергообъединений.

Данный учебник предназначен для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальностям 1000 «Энергетика», 1001 «Электрооборудование электрических станций и сетей» и 2102 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Он также может быть использован в качестве учебного пособия студентами вузов электротехнических специальностей, обучающихся по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

1. ЭНЕРГОРЕСУРСЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

1.1. Общие сведения

Энергия — количественная оценка различных форм движения материи, которые могут превращаться друг в друга, условно подразделяется по видам: химическая, механическая, электрическая, ядерная и т. д.

Под *энергоресурсами* понимаются материальные объекты, в которых сосредоточена энергия, возможная для использования.

Из большого разнообразия ресурсов, встречающихся в природе, выделяют *основные*, используемые в больших количествах для практических нужд.

К *основным энергоресурсам* относят энергию рек, водопадов; различные органические топлива, такие как уголь, нефть, газ; ядерное топливо — тяжелые элементы урана и тория, а в перспективе и легкие элементы и т. д.

Энергоресурсы разделяют на *возобновляемые* и *невозобновляемые*. К первым относятся те, которые природа непрерывно восстанавливает (вода, ветер и т. д.), а ко вторым — ранее накопленные в природе, но в новых геологических условиях практически не образующиеся (например, каменный уголь, нефть, газ и др.).

Энергия, непосредственно извлекаемая в природе (энергия топлива, воды, ветра, тепла Земли, ядерная), называется *первичной*.

Энергия, получаемая человеком после преобразования первичной энергии на специальных установках — станциях, называется *вторичной* (энергия электрическая, пара, горячей воды и т. д.).

Пока человечество широко использует только энергию *химических горючих*, притом органического происхождения, запасы которых составляют всего доли процента всех ресурсов энергии на Земле (табл. 1.1).

Большое отличие в цифрах, приведенных в табл. 1.1, между геологическими и извлекаемыми запасами объясняется тем, что при подсчете последних не учитывались тонкие пласты (до 0,5 м) и глубокие залегания (свыше 1,5 км).

Таблица 1.1

Ориентировочные мировые запасы основных органических горючих

Виды горючего	Геологические		Извлекаемые	
	млрд т у. т.	%	млрд т у. т.	%
В том числе:				
Уголь	11 200	87,4	2 900	76
Нефть	740	5,8	370	9,7
Газ природный	630	4,9	500	13,3
Прочие	230	≈ 1,9	30	≈ 1,0
Всего	12 800	100	3 800	100

Обозначения: у. т. — условное топливо

Дело в том, что «экономическая целесообразность извлечения» определяется пока стоимостью энергоресурса, которая весьма неустойчива. Поскольку нефтяные вышки уходят все дальше в море, себестоимость нефти возрастает.

Надежным критерием целесообразности извлечения топлива может быть лишь отношение энергоемкости извлекаемого источника энергии (ИЭ) к количеству энергии, затраченной на ее получение (включая овестьественную в расходуемых материалах, амортизирующей части оборудования и т. д.), которое должно быть больше единицы.

1.2. Невозобновляемые источники энергии

1.2.1. Органические топлива (горючие)

Основные сведения. *Топливом* может быть названо любое вещество, способное при горении (окислении) выделять значительное количество теплоты. По определению, данному Д. И. Менделеевым, «топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения тепла».

Практическая целесообразность топлива определяется его количественными запасами, удобствами добычи, скоростью горения, теплотворной способностью, возможностью длительного хранения

и безвредностью продуктов сгорания для людей, растительного и животного мира и оборудования. Существуют естественные (природные) виды топлив и искусственные.

Процесс освобождения химической энергии представляет собой реакцию окисления горючего. Поэтому химические топлива состоят из горючего и окислителя.

Горючие топлива бывают органического и неорганического происхождения. Те и другие могут быть твердыми, жидкими и газообразными.

В энергетике для получения электрической энергии на тепловых электрических станциях (ТЭС) в основном используются топлива органического происхождения.

Все виды органического топлива (горючие) представляют собой углеводородные соединения, в которые входят небольшие количества других веществ.

К *твердому топливу* относят: антрацит, каменный и бурый уголь, торф, дрова, сланцы, отходы лесопильных заводов и деревообделочных цехов, а также растительные отходы сельскохозяйственного производства — солому, костру, лузгу, чинголак и др.

Твердые топлива используют в основном на ТЭС для получения электрической энергии, отопления и технологических нужд промышленности и в незначительной степени для судовых и локомотивных двигателей.

К *жидкому топливу* относят нефть, а также различные продукты ее переработки: бензин, керосин, лигроин, разнообразные масла и остаточный продукт нефтепереработки нефти — мазут. Искусственное жидкое топливо и горючие смолы, а также масла получают при переработке твердых топлив.

До 70% и более жидких топлив используется на транспорте — в авиации, для автомобилей, тракторов, судов; на железнодорожном транспорте для тепловозов, около 30% сжигается в виде мазута на тепловых электростанциях. Сырую нефть в качестве топлива в котельных и других установках не используют.

К *газообразному топливу* относят природный газ, добываемый из недр Земли, попутный нефтяной газ, газообразные отходы металлургического производства (коксовый и доменный газ), крекинг-овый газ, а также генераторный газ, получаемый искусственным путем из твердого топлива в особых газогенераторных установках.

Газообразные топлива (горючие) сжигаются на ТЭС для получения электрической и тепловой энергии и в очень небольшом количестве используют на транспорте.

Элементарный состав твердого и жидкого топлив. Топливо в том виде, в каком оно поступает для сжигания в топки или в двигатели внутреннего сгорания и специальные аппараты, называется рабочим.

В общем случае в состав рабочего (твердого или жидкого) топлива входят углерод С, водород Н, кислород О, азот N и летучая сера S, а также негорючие минеральные примеси — зола А и влага W.

Для рабочей массы топлива имеет место очевидное равенство

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

где C^p , H^p , O^p и т. д. — элементы рабочего топлива в процентах от общей массы топлива.

Характеристика топлива по составу его рабочей массы является весьма неустойчивой, так как для одного и того же сорта топлива в зависимости от способа его добычи, транспортирования и хранения содержание в нем S^p , A^p и W^p может значительно колебаться.

Влага, содержащаяся в топливе совместно с золой, называется балластом топлива. Балласт значительно снижает ценность топлива, уменьшая его теплоту сгорания. Влага в топливе вредна тем, что, во-первых, на ее испарение при горении расходуется тепло и, во-вторых, уменьшается относительное количество горючего вещества в топливе. Наличие золы не только снижает теплоту сгорания, но значительно затрудняет процесс горения в топке и ее эксплуатацию.

В естественных видах ископаемого твердого топлива встречается сера трех разновидностей:

- органическая S^o , связанная с другими элементами топлива С, Н, N и O в виде сложных органических соединений;
- колчеданная S^k в виде пирита, колчедана FeS_2 ;
- сульфатная $S^{сульф}$ в виде солей серной кислоты (гипс, $FeSO_4$ и др.).

Сульфаты представляют собой высокие окислы серы, поэтому находящаяся в них сера гореть не может. Присутствующие в топливе органическая и колчеданная серы сгорают, образуя токсичный сернистый ангидрид SO_2 , и (в небольших количествах) еще более токсичный серный ангидрид SO_3 . Выброс их с продуктами сгорания вызывает загрязнение воздушного бассейна.

Органическая и колчеданная сера образуют вместе летучую горючую серу $S_{л}$. Таким образом, общее содержание серы в топливе

$$S_{общ} = S^o + S^k + S^{сульф} = S_{л} + S^{сульф}.$$

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

Для правильного представления о тепловых свойствах топлива вводится понятие горючей массы, для которой

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S_{\text{л}}^g = 100\%,$$

где индекс «г» показывает, что процентный состав отдельных элементов отнесен к горючей массе.

Название «горючая масса» носит условный характер, так как действительно горючими ее элементами являются только углерод, водород и сера. Углерод — преобладающий компонент твердых и жидких топлив, в топливах его обычно содержится 50...95%, тогда как содержание водорода H^g колеблется в пределах 1...11%, а серы S^g — 0...8%. Горючую массу можно характеризовать как топливо, не содержащее золы и в абсолютно сухом состоянии. Содержание азота в горючей массе твердых топлив обычно составляет 1...2% по массе. Несмотря на столь малое количество азот является весьма вредным компонентом, поскольку при сгорании азотсодержащих соединений в высокотемпературных топках образуются сильнотоксичные оксиды NO и NO_2 (они образуются также и из атмосферного азота, но в меньшей степени).

Для топлива, содержащего большое количество влаги (бурый уголь, торф, дрова, некоторые растительные отходы), в некоторых случаях удобно использовать понятие сухой массы, т. е. характеризовать состав абсолютно сухого топлива суммой элементов C^c , H^c , O^c , N^c , S^c и A^c . При этом

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100\%,$$

где индекс «с» показывает, что процентный состав отдельных элементов отнесен к сухой массе.

Для взаимного пересчета массы топлива в соответствии с понятием о массах топлива служат специальные формулы (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Формулы для пересчета состава топлива с одной массы на другую

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива, %		
	рабочая	сухая	горючая
1	2	3	4
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - (W^p + A^p)}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$

Продолжение

1	2	3	4
Горючая	$\frac{100 - (W^p + A^p)}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Зольность топлива. Золой называют твердый негорючий остаток, остающийся после сжигания топлива в атмосфере воздуха. Зола может быть в виде сыпучей массы с плотностью в среднем 600 кг/м^3 и в виде сплавленных пластин и кусков, называемых шлаками, с плотностью до 800 кг/м^3 .

В состав золы большинства видов твердого топлива входят: глинозем Al_2O_3 , кремниевая кислота SiO_2 , известь CaO , магнезия MgO , едкий натр Na_2O , окислы железа FeO и Fe_2O_3 .

Зола способствует разрушению обмуровки топочных устройств и поверхностей камер сгорания, оседает в газоходах теплообменных аппаратов и ускоряет износ поверхностей, обтекаемых забалластрированным газовым потоком, а также засоряет окружающую местность.

Влажность топлива определяется по ГОСТ 11014—70 высушиванием навески при $105\text{...}110 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная влажность массы W^p доходит до 50% и более и определяет экономическую целесообразность использования данного горючего материала и возможность его сжигания. Влага снижает температуру в топке и увеличивает объем дымовых газов. Для превращения 1 кг воды в пар комнатной температурой нужно затратить 2,5 МДж теплоты. Увеличенный объем дымовых газов требует дополнительной энергии на их удаление.

Очевидно, что *влага* является балластной примесью, так как уменьшает тепловую ценность исходного топлива. Кроме того, часть теплоты, выделяемой топливом при его сгорании, расходуется на испарение влаги.

Летучие вещества. При нагревании твердого топлива без доступа воздуха его органическая масса разлагается, в результате чего образуются газы, водяные и смоляные пары и углеродосодержащий остаток. Суммарное количество выделяющихся *летучих веществ* увеличивается с увеличением температуры и времени выдержки. Этот процесс в основном заканчивается при $700\text{...}800 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому по ГОСТ 6382—75 выход летучих веществ V^t , (%) на горючую массу, определяется путем прокаливания 1 г топлива в закрытом тигле при $(850 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 7 мин. Выход летучих веществ является важнейшей характеристикой горючей массы топлива и уменьшается по мере увеличения его возраста. Чем больше выход летучих веществ, т. е. чем больше топлива превращается при нагревании в горючий газ, тем проще зажечь это то-

пливо и легче поддерживать устойчивое горение. Органическая часть древесины и горючих сланцев при нагревании без доступа воздуха почти целиком переходит в летучие вещества ($V^r = 85...90\%$), в то время как у антрацитов $V^r = 3...4\%$. Именно большой процент выхода летучих веществ определяет хорошую горючесть древесины.

Примерный состав некоторых видов твердого топлива представлен в табл. 1.3. Как видно из таблицы, основной горючей составляющей твердых топлив являются углерод и водород.

Таблица 1.3

**Примерный состав и теплотехнические характеристики
горючей массы твердого топлива**

Топливо	Состав горючей массы, %					Выход летучих веществ V^r , %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Жаропродуци-тельность t_{max} , °С	RO _{2max} продуктов сгорания, %
	C ^r	S ^r	H ^r	O ^r	N ^r				
Дрова	51	—	6,1	42,2	0,6	85	19	1 980	20,5
Торф	58	0,3	6	33,6	2,5	70	8,12	2 050	19,5
Горючий сланец	60...75	4...13	7...10	12...17	0,3...1,2	80...90	7,66	2 120	16,7
Бурый уголь	64...78	0,3...6	3,8...6,3	15,26	0,6...1,6	40...60	27	—	19,5
Каменный уголь	75...90	0,5...6	4...6	2...13	1...2,7	9...50	33	2 130	18,72
Полуантацид	90...94	0,5...3	3...4	2...5	1	6...9	34	2 130	19,32
Антацид	93...94	2...3	2	1...2		3...4	33	2 130	20,2

Жидкое топливо. Практически все жидкие топлива (бензин, керосин, дизельное топливо и мазут) пока получают путем переработки нефти. Мазут, как и моторные топлива, представляет собой сложную смесь жидких углеводородов, в состав которых входят в основном углерод ($C^p = 84...86\%$) и водород ($H^p = 10...12\%$); $O^p + N^p = 1...2\%$; содержание воды и зольность не превышают 0,2...1,5%.

Мазуты, полученные из нефти ряда месторождений, могут содержать много серы (до 4,5...5%), что резко усложняет защиту окружающей среды при их сжигании.

Характеристики жидких топлив — продуктов переработки нефти — приведены в табл. 1.4.

Наиболее легкие сорта бензинов применяют в авиации и называются авиационными, более тяжелые — автомобильными. Лигроин и керосин могут применяться для тракторных, турбореактивных и других двигателей.

Из жидких топлив в котельных и промышленных печах сжигаются только топочные мазуты, которые классифицируются по степени их вязкости: М20, М40, М60, М80, М100 и М120; цифры указывают условную вязкость в градусах Энглера.

Таблица 1.4

Характеристики жидких топлив, получаемых из нефти

Топливо	Состав горючей массы, %				Зольность сухого топлива Аг, %	Влага рабочего топлива W ^p , %	Низшая теплота сгорания рабочего топлива, МДж/кг
	Сг	Нг	Сг	Ог + Ng			
Бензин	85	14,9	0,05	0,05	0	0	43,8
Керосин	86	13,7	0,2	0,1			43,0
Дизельное	86,3	13,3	0,3	0,1	Следы	Следы	42,4
Солярное	86,5	12,8	0,3	0,4			0,02
Моторное		12,6	0,4	0,5	0,05	1,5	41,5
Мазут:							
малосернистый		12,5	0,5	0,5	0,1	1,0	41,3
сернистый	85	11,8	2,5	0,7	0,15		40,2
многосернистый	84	11,5	3,5	0,5	0,1		40,0

Основные свойства жидких топлив — плотность, испаряемость, вязкость, стабильность при хранении, температуры застывания, вспышки, воспламенения и самовоспламенения, антидетонационная стойкость и др.

Температура воспламенения горючего — температура окружающей среды, при которой начинается самоподдерживающееся длительное горение с поверхности горючего. Не следует путать эту температуру с *температурой вспышки*, которая характеризует способность паров жидкого горючего воспламеняться от пламени над поверхностью горючего.

Эти две температуры определяют условия хранения и обращения с топливом (пожарная опасность).

Температура самовоспламенения определяет способность топлива самовоспламеняться от постороннего источника (например, в дизелях это нагретый от сжатия воздух, в карбюраторных двигателях — искра от электрической свечи).

Показателем воспламеняемости дизельных топлив является *цетановое число*, характеризующее склонность дизельного горючего к термическому распаду, окислению и самовоспламенению. Чем больше цетановое число, тем легче самовоспламеняется горючее.

Цетановое число определяется на специальной установке путем сравнения воспламеняемости испытуемого дизельного горючего с воспламеняемостью эталонных горючих. Последние представляют собой смеси различного состава из цетана $C_{16}H_{34}$, самовоспламеняемость которого принята за 100 (цетановое число 100), и альфа-метилнафталина $C_{10}H_7CH_3$, самовоспламеняемость которого принята за 0 (цетановое число 0).

Октановое число характеризует склонность жидкого топлива, обычно бензина, к *детонационному*, т. е. *взрывному*, сгоранию. Чем октановое число выше, тем склонность к детонации меньше. Если скорость нормального горения — скорость распространения фронта пламени — бензовоздушной смеси составляет 0,5...50 м/с, то скорость детонационного горения достигает 1500...3500 м/с — горение охватывает весь объем смеси сразу, т. е. носит характер взрыва.

Детонация наблюдается в карбюраторных двигателях и ведет к повышению износа двигателя, уменьшению его мощности, увеличению расхода горючего. Чем выше давление смеси, тем больше при прочих равных условиях возможность и сила детонации.

Октановое число жидкого топлива (бензина) определяется подобно цетановому. Только здесь за идеальное в антидетонационном отношении горючее принимается изооктан C_8H_{18} (октановое число 100), а за идеально детонирующее — нормальный гептан C_7H_{16} (октановое число 0).

Жидкие топлива имеют цетановое число 40...50, а октановые числа бензинов равны 60...98, для авиационных, более легких, бензинов — близки к 100.

Газообразные топлива. Газообразное топливо по сравнению с другими видами топлив имеет ряд существенных преимуществ: оно сгорает при небольшом избытке воздуха, образуя продукты полного горения без дыма и копоти, не дает твердых остатков; удобно для транспорти-

ровки по газопроводам на большие расстояния; позволяет простейшими средствами осуществлять сжигание в установках самых различных конструкций и мощностей. Газообразное топливо делится на естественное и искусственное. Естественное, в свою очередь, делится на природное и нефтепромысловое.

Природный газ получают из чисто газовых месторождений, где он выбрасывается из недр земли под давлением, достигающим иногда до 100 ат и более. Основным его компонентом является метан CH_4 , кроме того, в газе разных месторождений содержатся небольшие количества водорода H_2 , азота N_2 , высших углеводородов C_nH_m , оксида CO и диоксида CO_2 углерода. В процессе добычи природного газа его обычно очищают от сернистых соединений, но часть их (в основном сероводород) может оставаться. Кроме того, в бытовой газ для обнаружения утечек добавляют так называемые одоризаторы, придающие газу специфический запах; они тоже содержат соединения серы. Принято считать, что концентрация водяного пара в природном газе соответствует состоянию насыщения при определенной температуре газа в трубопроводе.

Нефтепромысловые газы выделяются в большом количестве в районах месторождений нефти и особенно в районах эксплуатации нефтяных скважин.

При добыче нефти выделяется так называемый *попутный газ*, содержащий меньше метана, чем природный, но больше высших углеводородов и поэтому выделяющий при сгорании больше теплоты. Проблема полного его использования сейчас весьма актуальна.

В промышленности и особенно в быту находит широкое распространение сжиженный газ, получаемый при первичной переработке нефти и попутных нефтяных газов. По ГОСТ 20448—75 выпускают технический пропан (не менее 93% $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_3\text{H}_6$), технический бутан (не менее 93% $\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_4\text{H}_8$) и их смеси. Температура конденсации пропана при атмосферном давлении равна $-44,5^\circ\text{C}$, а бутана $+5^\circ\text{C}$; соответственно при 20°C давление паров пропана составляет около 0,8 МПа, а бутана — около 0,2 МПа. Поэтому эти газы транспортируют в жидком виде в баллонах под небольшим давлением (менее 2 МПа). В зависимости от назначения и условий использования смеси содержание в ней пропановой и бутановой фракций должно быть разным. Например, зимой цистерны без подогрева, размещаемые на улице, должны заполняться пропаном, ибо бутан при отрицательных температурах испаряться не будет. Наоборот, небольшие баллоны, устанавливаемые в помещении, заполняют смесью, состоящей примерно

поровну из пропана и бутана, в результате чего давление в баллоне обычно не превышает 0,6 МПа.

К искусственным газам относят также доменный газ, являющийся продуктом при выплавке чугуна на металлургических заводах; коксовый, образующийся при получении кокса в коксовых батареях; светильный, получаемый при сухой перегонке угля; генераторный, получаемый в газогенераторах, который для сжигания в топках котлов не применяют.

Коксовый и доменный газ используют главным образом на месте в доменном и других цехах металлургического завода.

К *основным свойствам газообразных горючих* относятся плотность, токсичность, взрываемость, влажность, запыленность и др. Плотность газообразных горючих составляет 0,7...0,8 кг/м³, сжиженных газов — до 2,3 кг/м³ и производных — 0,7...1,4 кг/м³. Опасность отравления газами зависит от содержания в горючем газе окиси углерода СО, сероводорода H₂S и других токсичных газов. Пребывание в атмосфере, содержащей 1% этих газов, в течение 1—3 мин может привести к смерти. Взрывоопасность определяется содержанием H₂ и СО, которые образуют взрывчатые смеси с воздухом. Эти смеси взрывоопасны при содержании H₂ — 4...74% и СО — 12,5...74%.

Газы обладают многими достоинствами как горючее для ДВС — высокими антидетонационными свойствами, широкими пределами воспламенения (по избытку воздуха), хорошими условиями смесеобразования, приводят к меньшему, чем в ДВС на жидком горючем, износу, снижают требования к качеству смазочных материалов и т. п. Однако все горючие газы имеют высокую температуру самовоспламенения, поэтому нуждаются в постороннем источнике зажигания.

В таблице 1.5 представлены состав и теплота сгорания некоторых горючих газов.

Теплота сгорания топлива. Основной характеристикой топлива является так называемая теплота сгорания. Теплотой сгорания твердого и жидкого топлива называется количество теплоты (кДж), выделяемое 1 кг топлива при его полном сгорании. Теплоту сгорания обозначают буквой *Q* и измеряют в кДж/кг (в системе МКГСС — в ккал/кг).

Теплоту сгорания газообразного топлива относят обычно к 1 м³, взятому при нормальных условиях (0 °С, 760 мм рт. ст.), и измеряют в кДж/м³.

Теплота сгорания зависит от химического состава топлива и условий его сжигания.

Таблица 1.5

Состав и теплота сгорания горючих газов

Наименование газа	Состав сухого газа, % по объему								Низшая теплота сгорания сухого газа Q_n^c , МДж/м ³
	CH ₄	H ₂	CO	C _n H _m	O ₂	CO ₂	H ₂ C	N ₂	
Природный	94,9	—	—	3,8	—	0,4	—	0,9	36,7
Коксовый (очищенный)	22,5	57,5	6,8	1,9	0,8	2,3	0,4	7,8	16,6
Доменный	0,3	2,7	28	—	—	10,2	0,3	58,5	4,0
Сжиженный (ориентировочно)	4	Пропан 79, этан 6, Н- и изобутан 11							88,5

В соответствии с понятием органической, горючей и других масс топлива она может быть отнесена к той или другой из этих масс. Наибольший практический интерес представляет теплота сгорания рабочей массы топлива Q_n^p .

В продуктах сгорания топлива, содержащего водород и влагу, будет содержаться водяной пар H₂O, обладающий определенной энтальпией, равной примерно 2510 кДж/кг. Наличие в продуктах сгорания топлива водяного пара заставляет ввести понятия высшей теплоты сгорания Q_B^p .

Высшей теплотой сгорания рабочего топлива называют теплоту, выделяемую при полном сгорании 1 кг топлива, считая, что образующиеся при сгорании водяные пары конденсируются.

Низшей теплотой сгорания Q_n^p рабочего топлива называют теплоту, выделяемую при полном сгорании 1 кг топлива, за вычетом теплоты, затраченной на испарение как влаги, содержащейся в топливе, так и влаги, образующейся от сгорания водорода.

Чаще всего теплоту сгорания топлива определяют по формулам, учитывающим, что углерод С, водород Н и сера S, участвующие в горении, выделяют определенное количество теплоты.

Наиболее распространена формула Д.И. Менделеева, которая дает достаточно точные результаты для самых разнообразных топлив, кДж/кг:

- для высшей теплоты сгорания твердых и жидких топлив

$$Q_B^p = 338C^p + 1249H^p - 108,5(O^p - S_n^p);$$

- для низшей теплоты сгорания твердого и жидкого топлива

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 338C^{\text{п}} + 1025H^{\text{п}} - 108,5(O^{\text{п}} - S_{\text{л}}^{\text{п}}) - 25W^{\text{п}},$$

где коэффициенты выражают теплоту сгорания отдельных горючих элементов, деленную на 100.

Низшую теплоту сгорания сухого газообразного топлива определяют как сумму произведений теплот сгорания горючих газов на их объемное содержание в смеси, кДж/кг:

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 127CO_2 + 108H_2 + 358CH_4 + 591C_2H_6 + 911C_3H_8 + 234H_2S.$$

Точность формулы Д. И. Менделеева очень высока; по ней рекомендуется сверять результаты лабораторных определений теплоты сгорания.

Условное топливо. Большая разница в величине теплоты сгорания различных видов топлива затрудняет в некоторых случаях проведение сравнительных расчетов, например при выявлении запасов топлива, при оценке целесообразности применения разных сортов топлива и пр. Поэтому принято понятие условного топлива. Условным называется такое топливо, теплота сгорания 1 кг или 1 м³ которого равна 29 330 кДж (Q_{yc}).

Для перевода действительного топлива в условное пользуются соотношением (безразмерным коэффициентом)

$$\Theta_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{29\,330} \left(\text{в системе МКГСС } \Theta_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{7000} \right), \quad (1.2)$$

где $\Theta_{\text{к}}$ — калорийный эквивалент, указывающий, какая часть теплоты сгорания условного топлива соответствует низшей теплоте сгорания рассматриваемого топлива.

Расход условного топлива

$$B_{\text{yc}} = \frac{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}}{Q_{\text{yc}}}, \quad (1.3)$$

где B — расход рассматриваемого натурального топлива; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ — низшая теплота сгорания натурального топлива.

1.2.2. Ядерная энергия и механизм тепловыделения

Общие сведения. Ядерная энергия освобождается в виде тепловой в процессе торможения продуктов ядерного деления или синтеза

атомных ядер, движущихся с большими скоростями, и поглощения их кинетической энергии веществом теплоносителя.

Известно, что *полная энергия связи* — энергия, необходимая для деления ядра на отдельные протоны и нейтроны, или, что то же самое, энергия, выделяющаяся при синтезе ядра из отдельных протонов и нейтронов. Если известна масса m ядра, состоящего из Z протонов и $A - Z$ нейтронов, то его полная энергия связи будет равна

$$E_{\text{св}} = [m_p Z + m_n (A - Z) - m] c^2, \quad (1.4)$$

где m_n — масса нейтрона; m_p — масса протона; A — массовое число, равное числу протонов и нейтронов в ядре; c — скорость света. Так, для урана-238 $E_{\text{св}} = 1780$ МэВ, кислорода-16 $E_{\text{св}} = 127,2$ МэВ, дейтрона, состоящего из одного протона и одного нейтрона, $E_{\text{св}} = 2,2$ МэВ.

Удельная энергия связи ядра — энергия, приходящаяся на один нуклон (общее название частицы из протона и нейтрона), для большинства ядер ($c A = 50 \dots 90$) примерно постоянна и составляет 8,5 МэВ.

В области тяжелых ядер она уменьшается, достигая значения 7,6 МэВ для урана. Таким образом, наиболее стабильными оказываются элементы с массовыми числами приблизительно 20...200, поэтому *энергетически выгодно производить деление тяжелых ядер и синтез легких*. Чтобы освобождение ядерной энергии началось, надо подвести некоторую начальную энергию — энергию активации E_a .

Деление ядер нейтронами. Попытки освобождения энергии связи ядра путем бомбардировки его протонами и другими заряженными частицами оказались неудачными из-за противодействия кулоновских сил. Освобождение ядерной энергии стало возможным после открытия в 1932 г. нейтрона Чадвиком (Англия) на основе экспериментов Бете и Беккера (Германия, 1930 г.) и Ирэн и Фредерика Жолио-Кюри (Франция, 1932 г.). Не обладая зарядом, нейтрон оказался идеальным снарядом для деления ядер, открытого Ганом и Штрассманом (Германия, 1939 г.).

По скоростям движения различают медленные (тепловые) нейтроны, энергия которых $E_n = 0,03 \dots 0,5$ эВ (скорость несколько тысяч метров в секунду, температура комнатная и несколько выше), промежуточные — $E_n = 1 \dots 10^3$ эВ и быстрые — $E_n = 10^5$ эВ и выше.

Энергия активации зависит от вида ядер и применяемых «снарядов». Так, ^{235}U , ^{233}U и ^{239}Pu делятся под действием тепловых нейтронов, а ^{232}Th и ^{238}U — при бомбардировке быстрыми нейтронами.

Не все нейтроны, направляемые на мишень, сталкиваются с ее ядрами, а из столкнувшихся не все вызывают соответствующую реакцию.