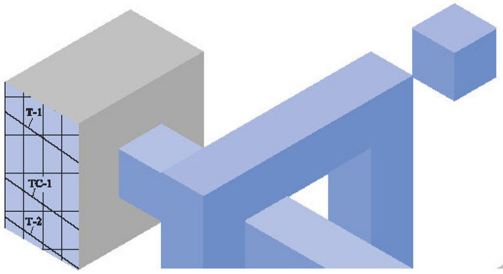
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

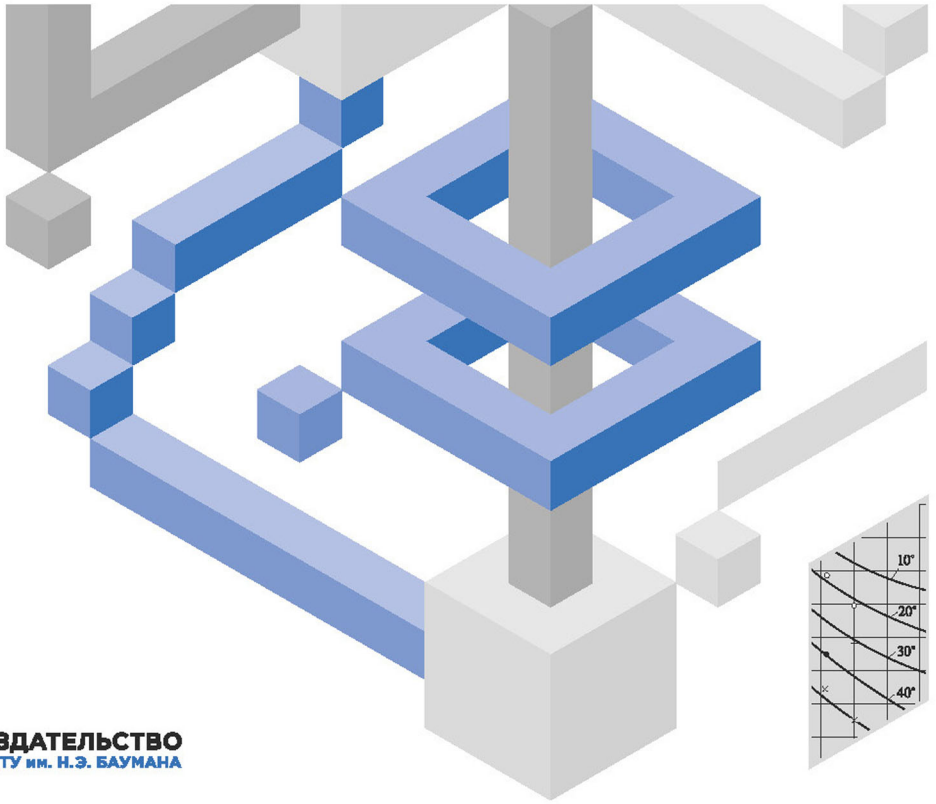
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА





Б.А. Куникеев, А.А. Тармаев

ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

УДК 662:621.438(075.8)
ББК 31.35
К91

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8298/

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Газотурбинные двигатели и комбинированные установки»

Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия

Рецензент
д-р техн. наук *А.Б. Агульник*

Куникеев, Б. А.
К91 Топлива для газотурбинных двигателей : учебное пособие / Б. А. Куникеев, А. А. Тармаев; под ред. чл.-корр. РАН А. Ю. Вараксина. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. — 101, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6397-8

Рассмотрены физико-химические и эксплуатационные свойства и параметры углеводородных и альтернативных топлив, используемых в авиационных и транспортных газотурбинных двигателях, энергетических и приводных газотурбинных установках, а также свойства перспективных топлив. Приведены требования российских стандартов к качеству топлив и их ассортимент. Рассмотрены материальный и тепловой баланс процесса горения жидкого и газообразного топлива.

Для студентов старших курсов, выполняющих курсовой и дипломный проекты по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей». Пособие может быть полезно для преподавателей и специалистов, занимающихся проектированием газотурбинных двигателей и газотурбинных установок.

УДК 662:621.438(075.8)
ББК 31.35

Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024

ISBN 978-5-7038-6397-8

Оглавление

Предисловие 3
Сокращения и условные обозначения 4
Введение 6
1. Общие сведения о топливе 7
Контрольные вопросы к главе 1 8
2. Состав и основные физико-химические и эксплуатационные свойства топлив 9
2.1. Элементный и фракционный состав 9
2.1.1. Элементный состав 9
2.1.2. Элементы органического топлива 12
2.1.3. Фракционный состав 15
2.2. Основные физико-химические и эксплуатационные свойства топлива 16
Контрольные вопросы к главе 2 33
3. Горение топлива 34
3.1. Общие сведения 34
3.2. Коэффициент избытка воздуха и расход воздуха на горение 34
3.3. Состав и объем продуктов сгорания 38
3.4. Тепловой баланс и температура горения 42
Контрольные вопросы к главе 3 50
4. Характеристики основных видов топлива 51
4.1. Сырье для производства жидких топлив 51
4.2. Реактивные топлива (топлива для авиационных двигателей) 53
4.3. Топлива для стационарных и транспортных ГТУ 63
4.4. Газообразные топлива 68
4.4.1. Природные горючие газы 68
4.4.2. Искусственные горючие газы 71
4.4.3. Криогенные газовые топлива 72
4.5. Нетрадиционные виды топлива 78
Контрольные вопросы к главе 4 81
Литература 82
Приложение 83

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОПЛИВЕ

Понятие «топливо» объединяет вещества, выделяющие в результате определенных процессов тепловую энергию, которая преобразуется двигателем в механическую работу.

Топливо принято классифицировать по:

- принципу освобождения энергии на *химическое (органическое)*, выделяющее тепловую энергию при окислении (горении) его компонентов, и *ядерное*, выделяющее тепловую энергию в результате физических процессов преобразования вещества на ядерном уровне;
- агрегатному состоянию на *твердое*, *жидкое и газообразное* и по происхождению на *естественное* (природное) и *искусственное*, полученное в результате переработки природного топлива;
- сфере применения на *энергетическое* (для производства энергии), *топочное* (для производства тепла), а также при конкретизации сферы применения на *реактивное*, применяемое в авиации на турбореактивных и турбовинтовых двигателях, *судовое*, *газотурбинное* и т. д.

К топливам для ГТД предъявляются следующие требования:

- плотность и теплота сгорания не менее установленной нормы и обеспечение возможности использования значительной доли теплоты, выделяющейся при горении;
- физическая однородность;
- стабильность физико-химических свойств и характеристик при транспортировке, хранении и при значительном изменении параметров внешней среды и рабочих условий;
- достаточные смазочные свойства с целью предотвращения недопустимого износа топливной аппаратуры;
- надежное воспламенение при пуске ГТД;
- сохранение текучести, хорошее распыливание и легкое испарение в различных режимах работы двигателя, полное сгорание при разных значениях коэффициента избытка воздуха;
- отсутствие способности вызывать нагарообразование на деталях ГТД и их коррозию, а также оказывать опасное воздействие на контактирующие с топливом неметаллические материалы;
- пожаробезопасность при использовании;
- минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду;
- отсутствие токсичности самого топлива и продуктов сгорания.

Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют вещества органического происхождения, имеющие в своей основе углерод и водород,

поэтому основным источником энергии в современных энергетических установках и двигателях является органическое топливо.

Специфическими требованиями к свойствам реактивных топлив, влияющими на летно-технические характеристики летательного аппарата, его живучесть и надежность, в дополнение к перечисленным, являются:

- температура начала кипения должна быть не ниже установленной температуры или давление насыщенного пара должно быть не более установленной нормы (требование связано с взрывоопасностью топливных баков после выработки из них топлива);
- образование и излучение дисперсного углерода должно быть ограничено (поскольку его наличие повышает визуальную и тепловую контрастность летательного аппарата);
- температура начала кристаллизации углеводородов не должна превышать установленную норму.

Реальные топлива, как правило, не отвечают всему комплексу требований, поэтому на практике к отдельным, менее существенным, свойствам обычно предъявляют лишь минимальные требования.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Что такое «топливо» и какими характеристиками оно обладает? Какие имеются виды топлив?
2. Как классифицируют топлива?
3. Какие топлива относят к естественным, а какие к искусственным?
4. Перечислите общие требования, предъявляемые к топливам.
5. Какие дополнительные требования предъявляются к свойствам реактивных топлив?

2. СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВ

2.1. Элементный и фракционный состав

2.1.1. Элементный состав

Органическое топливо в общем случае состоит из сложных химических соединений горючих элементов и может включать в себя влагу и негорючие минеральные смеси, из которых в процессе сжигания топлива образуется зольный остаток. Минеральные смеси попадают в топливо из окружающей среды при его добыче, транспортировке и хранении или входят в его химический состав.

Количество и качество горючих компонентов в топливе определяют его тепловую ценность. Негорючие компоненты «засоряют» топливо, образуя *балласт*, который ухудшает качество и технологические показатели топлива, снижает его тепловую ценность, ухудшает экономические и экологические показатели топливосжигающих установок.

К горючим элементам топлива относятся углерод C, водород H и соединения органической серы S. Сера состоит из двух частей: горючей (летучей) и негорючей. Горючая сера подразделяется на органическую S_{op} и колчеданную $S_к$ (серный колчедан FeS_2).

Содержащиеся в топливе кислород O и азот N считают *внутренним балластом* топлива, поскольку их наличие уменьшает содержание горючих элементов, но условно их относят к горючей массе, так как эти элементы могут участвовать в процессе горения. К балласту относят также золу A и влагу W.

Все промышленные топлива содержат указанные вещества в виде различных соединений: углерода с водородом, кислородом, серой, азотом и др. Содержание химических элементов и других составляющих топлива исчисляется в процентах от единицы массы (для твердого и жидкого топлива) или объема (для газообразного топлива) и называется *элементным составом*. Состав топлива в совокупности с другими показателями определяет его качество. Знание состава топлива необходимо для расчета тепловых и материального балансов процесса горения.

Для жидкого (и твердого) топлива в зависимости от его состава и вида различают рабочую (р), аналитическую (а), сухую (с), горючую (г) и органическую (о) массы. Соответствующее обозначение приводится в верхнем

индексе обозначения массы топлива. В иностранной литературе соответственно используются индексы *r* (от англ. *raw* — сырьевое, исходное), *d* (*dry* — *сухое*), *daf* (от *dry*, *ash*, *free* — *сухое беззольное*), *o* и *a*.

Показатели качества топлива обозначают символами, которые могут иметь два индекса: верхний, отражающий состояние топлива, и нижний, уточняющий. Например, содержание влаги в топливе обозначают так: W_t^r, где символ W — обозначение воды (от англ. *water*), верхний символ *r* отражает рабочее состояние топлива, а нижний символ *t* (от англ. *total*) уточняет, что в данном случае приводится общее количество влаги, которое включает внешнюю и внутреннюю влагу воздушно-сухого топлива.

Жидкое топливо в том виде, в котором оно поступает на горение, называется *рабочим*, а составляющее его вещество называют рабочей массой. Его элементный состав записывают в следующем виде:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p_{op+к} + A^p + W^p = 100\ \%,$$

где $S^p_{op+к}$ — сера органическая и колчеданная, а слагаемые выражаются в %.

Влага присутствует в топливе в виде внешней (физической) и гидратной, в которой молекулы воды связаны с молекулами минерального компонента химическими связями. Внешняя влага легко удаляется в жидком топливе отстаиванием, при этом затраты теплоты определяются только испарением. В жидком и газообразном топливе содержится только внешняя влага в капельно-жидком состоянии или в виде пара.

Масса топлива после удаления внешней влаги называется *аналитической*. Ее элементный состав представляется в виде

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S^a_{op+к} + A^a + W^a = 100\ \%.$$

При полном отсутствии влаги масса топлива называется *сухой*, и его массовый состав выражается уравнением

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c_{op+к} + A^c = 100\ \%.$$

Содержание минеральных примесей и влаги в жидком топливе одного и того же вида в зависимости от состава исходного сырья и особенностей технологии получения топлива может быть разным. Оно может также изменяться при транспортировке и хранении. Более постоянным является состав *горючей*, т. е. безводной и беззольной, массы топлива:

$$C^г + H^г + O^г + N^г + S^г_{op+к} = 100\ \%.$$

Масса серы, входящей в это равенство, может обозначаться как $S^г_л$ — *летучая* горючая сера.

Органическая масса топлива в отличие от горючей не содержит колчеданную серу. Элементный состав этой массы может быть выражен равенством

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S^o_{op} = 100\%.$$

Элементный состав разных масс твердого и жидкого топлива приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Элементный состав различных масс твердого и жидкого топлива

Индекс массы	C	H	O+N	$S_{ор}$	$S_к$	Балласт		
						Зола A	Влага:	
							аналитическая W^a	внешняя $W_{вн}$
O	Органическая масса							
Г	Горючая масса							
C	Сухая масса							
A	Аналитическая масса							
P	Рабочая масса							

Состав топлива можно пересчитать с одной массы на другую с помощью коэффициентов пересчета (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Коэффициенты пересчета состава топлива

Исходная масса	Коэффициенты пересчета в массу:		
	рабочую	сухую	горючую
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горючая	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Например, количество углерода в горючей массе при известном его количестве в рабочей массе, %,

$$C^г = C^p \frac{100}{100 - W^p - A^p}.$$

В зависимости от состояния топлива процентное содержание компонентов, входящих в его состав, будет меняться. Так, наивысшее процентное содержание углерода и других органических компонентов будет в органической массе топлива, а их наименьшее процентное содержание — в его рабочей массе. Характерный средний массовый состав жидких топлив приведен в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Характерный средний состав топлива, полученного переработкой нефти, %

Топливо	$C^Г$	$H^Г$	$O^Г + N^Г$	$S^Г$	$A^р$	$W^р$	$Q^р_н$, МДж/кг*
Бензин	85,0	14,9	0,05	0,05	–	–	43,8
Керосин	86,0	13,7	0,2	0,1	–	–	43,0
Дизельное топливо	86,3	13,3	0,30	0,1	–	–	42,6
Соляровое масло	86,5	12,8	0,3	0,4	–	–	42,4
Мазут малосернистый	87,8	10,7	0,8	0,7	0–0,2	0–9	42,3–42,6
Мазут высокосернистый	84,0	11,5	0,5	4,0	0,3	–	39,3

*Низшая теплота сгорания топлива.

Элементный состав *газообразного топлива* значительно отличается от состава твердого и жидкого топлива. Газообразное топливо представляет собой механическую смесь горючих составляющих: окиси углерода CO, водорода H_2, метана CH_4, этана C_2H_6, пропана C_3H_8, бутана C_4H_{10}, этилена C_2H_4, бензола C_6H_6 и других соединений и негорючих газов CO_2, O_2, N_2, а также H_2O. Содержание водяного пара определяется его температурой при данном парциальном давлении.

Состав газообразного топлива (природного и искусственного) исчисляется только на сухой объем при нормальных атмосферных условиях: на 1 нм^3 при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. В наиболее общем виде состав принято записывать как сумму в процентах объемного содержания отдельных газов:

$$CO + H_2 + CO_2 + H_2S + O_2 + N_2 + \sum C_m H_n = 100\%,$$

где $C_m H_n$ — непредельные углеводороды метанового ряда.

Содержание примесей (водяных паров, смолы, пыли) выражается в граммах на 1 м^3 (г/м^3) сухого газа. Все расчеты, связанные с газами, относят к 1 м^3 сухого газа при нормальных условиях. Всего состав сухого газа (без учета содержания влаги) равен 100 %. Содержание влаги W (при нормальных условиях) указывается отдельно в г/м^3.

2.1.2. Элементы органического топлива

Углерод — основная горючая составляющая топлива, горение которой обеспечивает выделение большей части тепла. Содержание углерода в горючей массе разных видов топлива находится в диапазоне от 50 до 99 %. С увеличением этого значения тепловая ценность топлива повышается.

Содержащийся в топливе углерод входит в состав сложных органических соединений, образующих горючую массу топлива. Д.И. Менделеев установил,

что различие в количестве тепла, выделяемого при сгорании углерода, входящего в состав разных видов твердого и жидкого топлива, сравнительно невелико, и количество тепла, выделяемого при сгорании 1 кг углерода, может быть принято в среднем равным 8100 ккал (33 910 кДж).

Если принять удельную теплоту сгорания углерода, входящего в состав разных видов твердого и жидкого топлива, равной 8100 ккал/кг, то максимальная температура горения, развиваемая при отсутствии потерь тепла, составит 2240 °С (2513 К).

Водород является важнейшим элементом горючей массы топлива в силу его высокой теплотворной способности. Его содержание в горючей массе традиционных твердых и жидких топлив составляет от 2 до 10 %. Много водорода содержится в природном газе, мазуте и горючих сланцах, меньше всего — в антраците. Удельная теплота его сгорания (низшая) при нормальных условиях равна примерно 120 000 кДж/кг, или 10 800 кДж/м^3 (2580 ккал/м^3). При сгорании 1 кг газообразного водорода выделяется в 4,2 раза больше тепла, чем при сгорании 1 кг углерода, поэтому теплота сгорания топлива значительно увеличивается с повышением содержания в нем водорода. Кроме того, содержание водорода в горючей массе повышает реакционную способность и скорость горения топлива.

Кислород и азот в топливе являются органическим балластом (*внутренним балластом топлива*). Кислород, находясь в соединении с водородом или углеродом топлива, блокирует некоторую часть горючих компонентов в окислившемся состоянии и уменьшает теплоту сгорания топлива. Азот является инертной частью топлива, при сжигании топлива в атмосфере воздуха он не окисляется и не участвует в горении, переходя в дымовые газы в виде молекулярного азота N_2, а при высокой температуре частично окисляется с образованием весьма вредных для здоровья человека оксидов азота.

Азот является основным видом балласта в газообразном топливе, его содержание составляет от долей процента в некоторых природных и нефтепромысловых газах до 60 % в доменных и 75 % в ваграночных газах. Газы с высоким содержанием азота характеризуются низкой теплотой сгорания.

Сера является нежелательной примесью в топливе несмотря на то, что часть ее сгорает. Это обусловлено тем, что при горении топлива органическая и колчеданная сера окисляются с выделением тепла и переходят в газообразные соединения — в сернистый газ (сернистый ангидрид SO_2) и в небольшом количестве в сопутствующий ему серный газ (SO_3) с последующим образованием серной кислоты $(SO_3 + H_2O = H_2SO_4)$, оказывающей сильное корродирующее воздействие на металл, особенно при температуре, близкой к точке росы паров серной кислоты. Для предотвращения коррозии с целью не допустить окисления SO_2 в SO_3 сернистое топливо сжигают с минимальным избытком воздуха (примерно 2...3 %). Образование указанных газообразных сернистых соединений существенно загрязняет окружающий воздух.

Вследствие низкой удельной теплоты сгорания (9300 кДж/кг, т. е. 2220 ккал/кг) присутствие серы уменьшает теплоту сгорания топлива, т. е. сера резко понижает ценность топлива, особенно технологического.