

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет

А.Р. КУЛЬЧИЦКИЙ

**ТОПЛИВА ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК.
РАСЧЕТ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Владимир 2009

УДК 662.6 / .8

ББК 31.35

К90

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой теплотехники и тепловых двигателей
Российского университета дружбы народов
С.В. Гусаков

Доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники
Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана
В.А. Марков

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Кульчицкий, А.Р.

К90 Топлива для энергоустановок. Расчет термодинамических показателей : учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 100 с. – ISBN 978-5-89368-986-0.

Приведена информация о различных видах топлив, применяемых в энергоустановках на базе тепловых машин. Рассмотрены примеры расчета термодинамических показателей твердых, жидких и газообразных топлив.

Предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения специальностей 140501 – Двигатели внутреннего сгорания, 140500 – Энергомашиностроение. Может быть полезно научным и техническим специалистам, занимающимся вопросами эксплуатации различных типов энергоустановок.

Табл. 6. Ил. 9. Библиогр.: 22 назв.

УДК 662.6 / .8

ББК 31.35

ISBN 978-5-89368-986-0

© Владимирский государственный университет, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Россия (протяженность с востока на запад – более 11 000 км и с севера на юг – более 6 000 км) богата самыми разнообразными видами твердых, жидких и газообразных топлив: угли, торф, нефть, природные и промышленные газы, древесное топливо и др. Экономическая целесообразность применения того или иного вида топлива определяется многими факторами, в том числе и затратами на его доставку: в одних случаях приоритет остается за природным газом, в других – за нефтяными дистиллятами, мазутом и углем, в третьих – за древесным топливом.

Повышение эффективности использования топлив опирается на оценку их термохимических показателей: теплоты сгорания, количества необходимого для полного сгорания окислителя, температуры горения и т.д. Литературы, посвященной указанной проблеме, достаточно, однако именно это обстоятельство представляет основную сложность для студентов, поскольку информацию требуется получать из многих источников. Поэтому подготовка настоящего пособия обусловлена желанием автора сконцентрировать однородный материал, при этом ограничившись основными показателями. А в случае необходимости изучения какого-либо вопроса более подробно можно воспользоваться библиографическим списком, в котором представлены как классические источники (начиная с 1951 г. издания), так и последние выпуски специализированных справочников и журналов (издания с 2005 по 2007 гг.).

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические установки (ЭУ) – это машины по выработке тепловой, электрической и механической энергии за счет преобразования других видов энергии:

– кинетической энергии движения воздушных масс (ветряные мельницы) и приливно-отливных волн (гидротурбины);

– потенциальной энергии воды (мельницы и гидроаккумулирующие турбины);

– внутренней энергии воды (геотермальные станции, использующие тепло земных недр; причем термальные воды могут быть как естественные, так и получаемые искусственно при закачивании воды на большие глубины в зону раскаленных пород с возвращением воды обратно в виде пара);

– энергии солнечного излучения (солнечные батареи);

– химической энергии топлив, выделяемой в процессе горения в тепловых машинах (котлах, печах, двигателях внутреннего и внешнего сгорания и др.).

Двигатели внутреннего и внешнего сгорания – это частный вид ЭУ, преобразующих тепловую энергию топлив в механическую энергию вращения вала двигателя.

Топливо – вещество, которое при контакте с окислителем может гореть. *Признаками горения являются интенсивное выделение тепла (обязательно) и света (не обязательно)*. Указанные два свойства, а также возможность защиты от животных с древних времен привлекли внимание человека и к процессу горения, и к самому топливу. С момента использования топлива путем сжигания (в костре, печке, самоваре, топке паровоза, цилиндре двигателя и т.д.) человек применял в качестве топлива самые разные вещества: деревья, сухую траву, торф, уголь, нефть, природный и нефтяной газы и т.д. При этом было отмечено, что количество получаемого тепла и света существенно зависит от вида топлива, его состояния (даже одно и то же топливо может выделять разное количество тепла и света в зависимости от уровня его влажности) и организации подвода окислителя.

Топлива можно классифицировать по различным признакам: возобновляемые и невозобновляемые (ископаемые), традиционные и альтернативные, нефтяные и биологические и т.д. Для ЭУ на базе поршневых, газотурбинных и ракетных двигателей *традиционными* являются бензин, дизельное топливо и керосин, для отопительных печей и котлов – уголь, торф, дрова, мазут. В том случае, если для конкретной ЭУ используется иное топливо (не традиционное), то оно будет считаться *альтернативным*. Поскольку в течение десятилетий конструктивные и регулировочные характеристики тепловых машин отработывались для условий применения традиционного топлива, то использование альтернативных топлив не может обеспечить заявляемые показатели ЭУ по развиваемой мощности, топливной экономичности, уровню выбросов вредных веществ и надежности. Поэтому уже на стадии проработки вопроса замещения традиционных топлив на альтернативные необходимо оценить возможные последствия и требуемые мероприятия для сохранения показателей тепловых двигателей и ЭУ в целом.

В основе требуемой оценки лежит расчет термохимических показателей топлива: требуемого для полного сгорания количества окислителя, теплоты сгорания, развиваемой температуры горения, пределов воспламенения и др.

Глава 1. ВИДЫ ТОПЛИВ

Возобновляемые и невозобновляемые источники энергии
◆ *Твердые, жидкие и газообразные топлива* ◆ *Биотоплива*
первичные и вторичные ◆ *Основные составляющие*
и источники получения ◆ *Способы использования*

Топливо – это источник энергии. Виды топлив многообразны, но как источник энергии их можно разделить на два класса – *невозобновляемые*, или *ископаемые* (нефть, газ, уголь), и *возобновляемые* (торф, различные виды растительности, отходы жизнедеятельности животных, промышленные и бытовые отходы). Первые образовались в предшествующие геологические периоды развития Земли и их количество соответственно ограничено, а вторые воспроизводятся постоянно – их ресурсы непрерывно восстанавливаются.

Интерес к возобновляемым источникам энергии связан, с одной стороны, с развитием экономик всех стран, что требует неуклонного увеличения расхода ископаемых топлив (несмотря на повышение эффективности их использования). А с другой стороны, это обусловлено опасениями, что ископаемые виды топлив могут использоваться как средство политического давления со стороны стран-поставщиков на страны-потребители. В краткосрочной перспективе (к 2020 г.) ставится задача получения в мире 10 % энергии из возобновляемых источников, а в долгосрочной (к 2050 г.) – до 20 %.

В настоящее время все топлива также делят на традиционные и альтернативные. Для энергоустановок на базе поршневых, газотурбинных и реактивных двигателей *традиционными* являются бензин, дизельное топливо и керосин, для отопительных печей и котлов – уголь, сланцы, торф, дрова, мазут. В том случае, если для конкретной энергоустановки используется иное топливо (нетрадиционное), то оно считается *альтернативным*. При этом если топливо растительного происхождения или, если оно является продуктом естественной или искусственной переработки отходов растительного и животного происхождения (т.е. получаемое из *био-*

массы – материала биологического происхождения, за исключением материала в геологических породах, ставшего ископаемым), то такое топливо относится к классу биологических, т.е. *биотоплив*. Кроме того, вещества, применяемые в качестве топлива, классифицируются и по агрегатному состоянию: *твердому*, *жидкому* и *газообразному*.

Человечество использует все виды топлив для получения энергии, при этом основными источниками остаются пока нефть и уголь: вместе они обеспечивают 50 % необходимой энергии (рис. 1.1). Однако запасы топлив (или энергоносителей) сосредоточены на нашей планете неравномерно; Россия в этом плане выгодно отличается запасами природного газа и угля (рис. 1.2).



Рис. 1.1. Структура мировых источников энергии на 2000 г. [9]

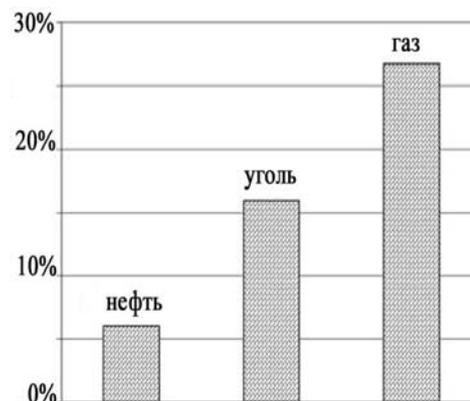


Рис. 1.2. Доля России в мировых запасах топлива на 2003 г.

§ 1.1. Твердые топлива

Основные виды твердых топлив – древесина и ее суррогаты, древесный и каменный угли, антрацит, сланцы и торф. Для них различают следующие составляющие:

- *рабочая масса* (все вещества, входящие в состав);
 - *сухая масса* (отличается от рабочей массы отсутствием влаги);
 - *горючая масса* (отличается от сухой отсутствием золы);
 - *органическая масса* (отличается от горючей отсутствием серы);
- непосредственно органический состав включает в себя четыре элемента – углерод, водород, кислород и азот.

При нагревании из твердых топлив выделяются летучие вещества: водород, оксиды углерода (углекислый и угарный газы), метан и более тяжелые углеводороды. Выход летучих веществ зависит от содержания в топливе кислорода и водорода – чем их больше, тем больше летучих. Для дров – до 85 % от горючей массы, торфа – до 70 %, бурых углей – до 40...60 %, каменных углей – до 10...40 %, сланцев – до 80 %. В случае нагревания без доступа воздуха после выхода всех летучих веществ от топлива остается *кокс* – вещество с содержанием углерода 95...98 %.

Твердые топлива при сгорании оставляют *золу* – несгораемый остаток: песок и частицы грунта, а также минеральные вещества (среди жидких топлив этим отличаются наиболее тяжелые). Содержание минералов – от долей процентов до десятков процентов. Под воздействием высокой температуры минералы расплавляются и перемешиваются с другими частицами, в результате после остывания образуется *шлак* (камни).

Древесина. К древесному топливу относят:

– дрова (отрезки древесины различных пород деревьев, снятых с корня);

– отходы при рубке леса и его дальнейшей переработке (пни, сучья, ветки, вершинные части деревьев, обрезки, щепы, стружки, опилки);

– так называемые “отпады” (хвоя, листва, мелкие ветви, валежник, хвойные шишки);

– суррогаты древесины (солома, кора, лузга, жмыхи, стебли некоторых растений и т.п.).

Древесина – это растительный возобновляемый вид биотоплива; основной компонент – *целлюлоза* $(C_6H_{10}O_5)_n$: в деревьях ее 50...70 %, а в хлопке – почти 100 %. Целлюлоза – один из видов *углеводов*: веществ, образующихся в растениях из неорганических соединений – углекислого газа CO_2 и воды H_2O (откуда и произошло их название – углеводы). Образование углеводов происходит под воздействием солнечного света, т.е. в результате реакции фотосинтеза.

Ежегодно в результате фотосинтеза на Земле образуется около 150 млрд т органического вещества, усваивается порядка 300 млрд т CO₂ и выделяется около 200 млрд т свободного кислорода O₂. Благодаря фотосинтетической деятельности зеленых организмов в первичной атмосфере Земли (состоявшей в основном из метана CH₄) появился кислород, возник озоновый экран, создались условия для биологической эволюции.

Кроме целлюлозы в состав древесины входят лигнин C₁₉H₂₄O₁₀, жиры, воски, смолы, минеральные соли (содержание последних обычно менее 1 %, но в коре может достигать нескольких процентов – в еловой до 6 %, в буковой до 8 %). Большое влияние на характеристики древесины оказывает содержание влаги, концентрация которой зависит как от породы дерева, так и момента рубки; в свежесрубленном дереве влаги до 50...60 %, в ветвях – до 65 %; наибольшая влажность у сосны, наименьшая – у березы и осины. После разделки древесины и хранения в поленнице в течение 1,5...2 лет влажность падает до 15...20 %, такое состояние древесины называется *воздушнотухлой*, так как на воздухе древесина влагу больше не поглощает и не теряет.

Комплексное использование лесных ресурсов предусматривает утилизацию всей органической массы дерева, включая древесные отходы, образующиеся в процессе заготовки древесины и ее переработки: кора, щепа, опилки, ветки, ствол, пеньки, древесная зелень... (так называемые порубочные остатки и кусковые древесные отходы; их относят к *первичному* продукту). А также продукты переработки древесины: обрезки и бывшие в употреблении пиломатериалы, отходы строительной и упаковочной промышленности, стружка, щепа, опилки и др. (это *вторичный* продукт; их также называют *твердыми бытовыми отходами*). В ряде стран большое внимание уделяется *лесному энергетическому топливу* – топливу, производимому из быстрорастущих деревьев и кустарников, выращиваемых специально для энергетических целей (*технология сокращенного оборота рубки*). Эти лесопосадки вырубают каждые 4...5 лет, после чего на освободившейся территории снова высаживают саженцы.

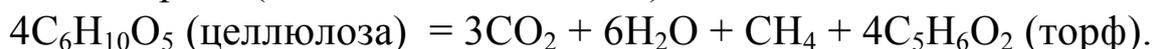
Перечисленные первичный и вторичный продукты относятся к *простому древесному топливу*, которое, в свою очередь, является исходным сырьем для *облагороженного (прессованного) древесного топлива*. К последнему относятся *гранулы* (другое название – *пеллеты*) и *брикеты*. Пеллеты представляют собой цилиндры диаметром 4...10 мм и длиной 20...50 мм. Брикеты крупнее пеллет, они выпускаются двух видов – цилиндрические или прямоугольные (прямоугольные брикеты обычно имеют размеры 150×70×90 мм). Производятся “темные” (или “промышленные”) пеллеты и “светлые”, которые отличаются от первых по цвету из-за меньшего содержания в них коры – не более 5 % по массе, а также по размеру (они меньше). “Темные” пеллеты используются в больших котельных, а “светлые” – для отопления жилых домов. Некоторые характеристики прессованного топлива приведены в табл. П1.

Одним из видов растительного топлива являются так называемые *агрогранулы*, которые изготавливают из различных отходов: травы, шелухи, соломы, лузги семечек и т.п. При этом, так же как и в случае древесины, используется специальная технология ускоренного выращивания травы (*энергетические посадки*), что дает до 7 т с одного гектара в год. При скашивании травы первоначально ее собирают в рулоны, после чего перерабатывают в гранулы.

Ряд стран отличается большой долей лесов, занимающих их территорию: в Финляндии – 76 %, Швеции – 68 %, Японии – 67 %, Индонезии – 66 %, Канаде – 54 %. Но в абсолютном выражении территории этих стран невелики, поэтому самые большие запасы древесины в мире – в России (площадь территории свыше 17,0 млн км²), 46 % территории которой занято лесами; в США и Китае, территории которых только в два раза меньше России, леса занимают 30,0 и 8,0 % соответственно. Тем не менее мировыми лидерами в области использования древесного топлива (в основном для бытовых нужд) являются Дания и Швеция. В этих странах десятки тысяч гектар занято под быстрорастущие деревья, при этом в Швеции ежегодно потребление гранул увеличивается на 30 %. Нена-

много отстают ФРГ и Италия: в ФРГ каждый третий котел работает на пеллетах, а в Италии для бытовых нужд и местных котельных широко используются агрогранулы.

Торф. Этот вид твердого топлива занимает промежуточное положение между возобновляемыми (т.е. био-) и ископаемыми топливами. Образование торфа идет по следующей схеме разложения растительных остатков в среде с избытком воды и недостатком кислорода (в основном в болотах):



В процессе торфообразования в течение года наращивается слой порядка 0,5...3,0 мм, что дает около 0,8...2,0 т с 1 га. Мощность торфяного пласта может достигать 20 м. В сыром состоянии торф относится к обратимым коллоидам, т.е. таким, которые способны поглощать столько же воды, сколько и отдавать. Но при влажности менее 34 % торф превращается в необратимый коллоид, и в этом состоянии он уже может храниться под открытым небом, не вбирая в себя влагу.

В состав торфа входят сахаристые и дубильные вещества, битумы (продукты разложения жиров, восков и смол растительных остатков), гуминовые кислоты (результат распада целлюлозы и лигнина), целлюлоза, лигнин, растительные остатки – все это органические соединения; также в состав входят минеральные примеси. Минеральных примесей в торфе от 2,0 до 15,0 %, а содержание влаги может доходить до 82,0...95,0 %.

Торф используется в виде высушенных брикетов (а также гранул, хотя значительно реже) для систем центрального теплоснабжения (в котельных и отопительных печах); обладает высоким содержанием энергии, но недостатком является большая зольность и высокий процент содержания шлаков по сравнению с другими видами топлив.

Угли. Ископаемый вид топлива. Процесс образования различных видов углей отображается следующей схемой:

отмершие растения → торф → бурый уголь →
→ каменный уголь → антрацит

По происхождению угли делятся на два основных вида:

– сапропелитовые, образовавшиеся из водных микроорганизмов (главным образом из водорослей);

– гумусовые, образовавшиеся из наземных высших растений.

Как и торф, угли состоят из органической и минеральных составляющих, а также влаги. Угли отличаются между собой по степени обуглероживания (по концентрации углерода), и по этому признаку выделяют три группы: бурые и каменные угли, и антрацит (первые с содержанием углерода 60...78 %, антрацит – более 93 %).

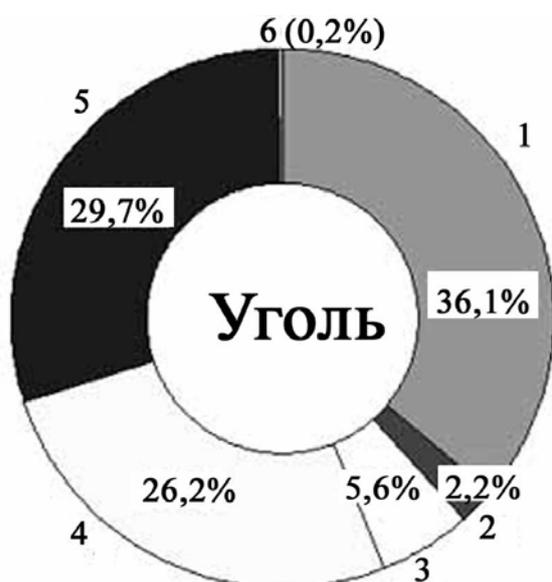


Рис. 1.3. Структура разведанных запасов угля в мире на 2003 г.

Добывают бурые угли в основном открытым способом (в карьерах), каменный и антрацит – в шахтах. Используются в качестве топлива в котельных и отопительных печах; ранее широко использовались как топливо для паровозов (так же как и древесина).

Основные запасы углей на Земле (рис. 1.3) сосредоточены в Евразии (36,1 %, поз. 1, в том числе 15,9 % – в Рос-

сии), Азиатской части Тихого океана (29,7 %, поз. 5) и Северной Америке (26,2 %, поз. 4); в Центральной и Южной Америке (поз. 2), Африке (поз. 3) и на Ближнем Востоке (поз. 6) эти запасы существенно меньше.

Сланцы. Ископаемый вид топлива. По своим характеристикам сланцы наиболее близки к углям-сапропелитам. Соответственно основными компонентами являются гуминовые кислоты, лигнин и битумы, которые с течением времени превращаются в органическую массу горючих сланцев – *кероген*. Недостатком является высокое содержание колчеданной серы и минеральных примесей, что обуславливает при сжигании высокое содержание

зола – от 30...40 до 60...75 %. Поэтому теплотворность рабочей и органической масс существенно различаются: несмотря на высокое содержание водорода (в 1,5 раза больше чем в углях) и углерода, при низком содержании кислорода низшая теплотворность рабочей массы в три с лишним раза ниже аналогичной теплотворности органической массы.

Сланцы добываются как открытым способом, так и шахтным. Используются в котельных установках электростанций и промышленных предприятий. Получаемая при горении зола идет на изготовление цементов, строительного кирпича, искусственных камней (бута) и т.п.

Некоторые характеристики торфа и углей приведены в табл. П2.

Шунгит – очень редкий и своеобразный вид ископаемого топлива, найден в районе Онежского озера и на Кольском полуострове. Горючая масса шунгита содержит около 97 % углерода, 1 % водорода и 2 % кислорода. Различают четыре разновидности по степени зольности: от 2,0...4,0 до более чем 90 %.

§ 1.2. Жидкие топлива

К жидким топливам относятся нефть и продукты ее переработки, спирты, масла (получаемые путем переработки различных растений: подсолнечника, рапса, сои, арахиса, апельсина, эвкалипта, хлопка и т. д.) и эфиры этих масел. Несмотря на разнообразие жидких топлив, основным видом остается нефть.

Нефть – это природное полезное ископаемое, представляющее сложную смесь жидких углеводородов различного молекулярного веса.

На протяжении веков нефть добывалась в тех местах, где она просачивалась на поверхность. В частности, племена, жившие у берегов реки Ухта на севере Тимано-Печорского района Руси, собирали нефть с поверхности реки и использовали ее в медицинских целях и в качестве смазок. Нефть, собранная с реки Ухта, впервые была доставлена в Москву в 1597 г. Но коммерче-

ская добыча нефти впервые началась в мире только во второй половине XIX века.

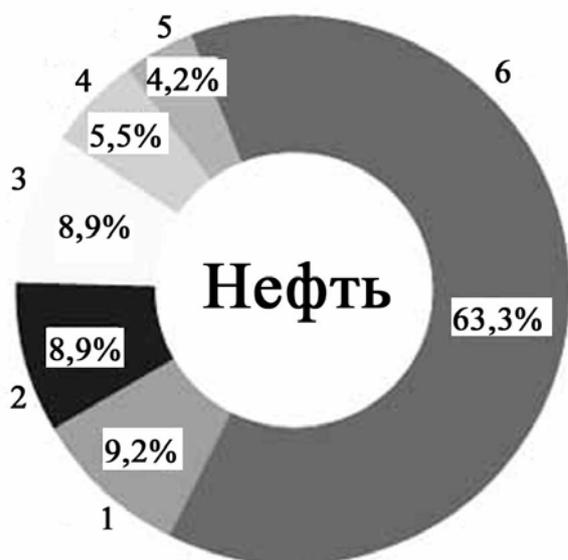


Рис. 1.4. Структура разведанных запасов нефти в мире на 2003 г.

Месторождения нефти, так же как и углей, распространены на планете неравномерно (рис. 1.4): основные ее запасы сосредоточены на Ближнем Востоке (63,3 %, поз. 6), на остальные регионы мира (обозначения – согласно пояснениям к рис. 1.3) остается всего 36,7 %, в том числе на долю России приходится 6 % (см. рис. 1.2).

Нефть служит сырьем для производства автомобильного

бензина и минеральных смазочных масел, авиационного керосина, дизельного топлива и топочного мазута; она также используется в химической промышленности для производства разнообразной продукции.

На нефтяных промыслах добываемая нефть проходит предварительную переработку: сепарацию (т. е. отделение газового конденсата), обезвоживание, обессоливание и стабилизацию (т. е. отбор наиболее летучих фракций), в результате получают товарную нефть. При прямой перегонке нефти жидкие углеводороды последовательно выкипают из нефти в следующих диапазонах температур: петролеумный эфир 30...90 °С, бензины 60...150 °С, керосин 100...200 °С, лигроин 150...360 °С, соляровое масло 210...540 °С. В результате получают *дистилляты*, т.е. дистиллированные – узкофракционные топлива (бензин, керосин, лигроин, газойль – так называемые светлые нефтепродукты) и мазуты (соляровое масло, смазочное масло, гудрон). На вакуумных установках из мазута дополнительно могут быть получены светлые нефтепродукты. Каждая из перечисленных

фракций сама состоит из смеси 100...200 различных по своей химической структуре углеводов.

Лигроин (нефтяной спирт) – фракция нефти или нефтегазового конденсата. Ранее применялся в качестве топлива для тракторов и прочей сельскохозяйственной техники. В настоящее время применяется только как наполнитель в различных средствах измерения (манометрах), а также как растворитель.

Иногда используется термин газойль (gas oil). Это название появилось в начале XX века и произошло от немецкого Gasol – “газовое масло”, так как применялся для добавки к водяному газу (смеси водяного пара H_2O и угарного газа CO) для его обогащения. Наряду с керосином газойль использовался в качестве топлива для дизелей, т. е. оба относились к группе дизельного топлива. По своим физико-химическим показателям газойль соответствует современному понятию дизельного топлива.

Дизельное топливо, бензин, керосин – наиболее распространенные виды жидкого топлива; их основной потребитель – транспорт, а среди транспорта – автомобильный, основной потребитель керосина – авиация.

Но применение дизельного топлива (ДТ) и бензина в той или иной стране зависит не столько от запасов нефти в этих странах, как от технической политики государств. Например, в отношении легких грузовиков (полной массой не более 3,5 т) дизелизация в большей мере коснулась Европы, а в Северной Америке эта доля на порядок меньше (рис. 1.5). То же касается и легковых автомобилей: в 2000 г. в США доля продаж автомобилей с дизелями (от общей продажи всех легковых автомобилей) составила 0,26 %, а в Европе – почти 33 %.

Тенденция роста продаж дизельных легковых автомобилей в Старом Свете поддерживается: если в 1990 г. было продано 14 %, то уже в 1995 г. – 22 %, а в 1998 г. – 28 %; к 2010 г. ожидается до 50 %. При этом по разным странам данная цифра оказывается еще весомее: в 1999 г. в Австрии было продано 61 %, в Бельгии – 54 %, во Франции –

50 %; более того, в Европе среди легковых автомобилей класса “люкс” дизельные составили 44 %, в том числе в Италии – 70 %, Австрии – 77 %, Франции – 82 %, Бельгии – 87 %.

В России согласно ГОСТ Р 51105-97 с 1 января 1999 г. выпускается четыре сорта неэтили-

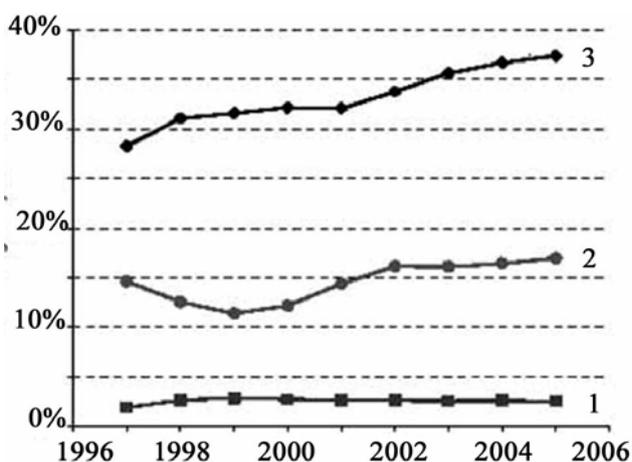


Рис. 1.5. Доля дизельного транспорта среди легких грузовиков в Северной Америке (1), Азии (2) и Европе (3)

ется четыре сорта неэтилированных (не содержащих повышенные концентрации присадок свинца для увеличения октанового числа) бензинов: Нормаль-80, Регуляр-91, Премиум-95 и Супер-98 (цифры в названии – октановое число (ОЧ) по исследовательскому методу, т. е. соответствуют обозначению для бензинов типа АИ). Содержание свинца в них не

более 0,01 г/л. Этилированным и неэтилированным выпускается только бензин Нормаль-80 (он же А-76, если октановое число определено по моторному, а не по исследовательскому методу). Для повышения ОЧ без применения высокотоксичных соединений свинца (этилированной жидкости) применяют присадки на основе метилтретбутилового эфира (МТБЭ) $C_{14}H_{30}O$ (табл. ПЗ).

В отношении ДТ большое внимание уделяется снижению содержания серы. Во многих городах Европы разрешается использовать только так называемое “городское топливо” – дизельное топливо с содержанием серы не более 0,05 %, т. е. 500 ppm (в обычном ДТ серы может быть в десять раз больше – до 0,5 %).

В декабре 2001 г. в Брюсселе Совет Европы по защите окружающей среды (ЕЕС) принял решение о переходе к 2009 г. к бессернистому топливу. Согласно этому решению бессернистым называется любое топливо, в котором содержание серы не превышает 0,001 % (т. е. 10 ppm или 10 мг/кг).

Планировалось к 2005 г. обеспечить содержание серы в дизельном топливе не более 0,035 % (350 ppm), в бензине – не более 0,015 % (150 ppm), а к 2009 г. достичь уровня 0,005 % (50 ppm). Кроме того, первоначально было отмечено о неприменимости подобных требований к внедорожному транспорту (тракторам, строительно-дорожным и коммунальным машинам и др.), поскольку это приведет к повышению стоимости сельскохозяйственной продукции. Связано это с необходимостью вложения в нефтеперерабатывающую промышленность больших средств для обеспечения необходимого качества топлива. Однако позднее было решено, что после 2009 г. на бессернистом топливе должны будут работать и двигатели внедорожных машин.

Но применение малосернистого топлива имеет еще одну сторону – *сера улучшает смазочные свойства топлива*. Благодаря этому сернистое топливо обеспечивает смазку прецизионных пар в топливных насосах высокого давления. Снижение содержания серы в дизельном топливе потребует добавки в топливо противоизносных присадок.

Для увеличения выхода топлив из нефти применяют топлива, созданные путем введения в дизельное топливо других фракций как более легких (получая топлива *широкого фракционного состава* – ШФС), так и более тяжелых (топлива *утяжеленного фракционного состава* – УФС), а также обоих видов фракций (топлива *расширенного фракционного состава* – РФС). Кроме того, в тихоходных дизелях применяют более тяжелые топлива, такие как товарная нефть и мазуты.

Мазуты – это нефтяные остатки, получаемые в процессе переработки нефти. По сравнению с исходной нефтью мазуты отличаются высоким содержанием серы и углерода, но меньшим – водорода. Все мазуты отличаются от других жидких топлив высокой вязкостью. Основные виды: *мазут флотский* (для судовых котлов, турбин и двигателей), *мазут топочный* (другое название – котельное топливо, применяют для отопления судовых котлов, котельных и в промышленных печах).

Кроме “чистых” топлив давно применяются *смесевые* – смесь дизельного топлива, бензина и мазута с другими энергоносителя-

ми или водой. Наличие воды в топливах нежелательно, поэтому естественно стремление добиться максимально возможного обезвоживания топлив. Однако есть случаи, когда избежать наличия воды в смеси с топливом не удастся. Во-первых, вода – это естественный спутник нефти. Во-вторых, вода попадает в нефть при ее транспортировке, особенно это характерно для мазутов: при получении с нефтеперерабатывающих заводов в них уже содержится до 1,5 % воды, а при транспортировке морским (речным) путем содержание воды повышается до 3,0...5,0 %. Поскольку мазут – высоковязкое вещество, то его разогревают паром, в результате содержание воды доходит до 10 %, а после хранения в мазутохранилищах в течение отопительного сезона – до 30,0...40,0 %. Таким образом, из мазута получается *водомазутная эмульсия* (ВМЭ – *дисперсные системы, состоящие из двух нерастворяющихся друг в друге жидкостей*), стабильность которой обусловлена наличием в мазуте асфальтенов и нефтяных смол (следует отметить, что расслаивание воды и мазута происходит с большим трудом). В-третьих, на морском и речном флотах с судов регулярно сдаются на очистные сооружения балластные воды с содержанием нефтепродуктов не более 20,0...25,0 %. В результате их утилизации (сжигания) повышается эффективность использования топлива (а заодно и предотвращается загрязнение окружающей среды вследствие слива подобных смесей в открытые водоемы). Таким образом, есть случаи, когда невозможно, да и нежелательно избегать использования топлива с высокой концентрацией воды.

Что касается поршневых ДВС, то для них добавка воды в топливо играет роль катализатора (до определенного уровня – обычно не более 15 %), способствующего повышению эффективности высвобождения энергии топлива, а также снижению теплонапряженности рабочего процесса. Подача воды в цилиндр дизеля двигателя может производиться двумя способами: 1) за счет распыливания в воздушном заряде и 2) в виде смеси с дизельным топливом – водотопливной эмульсии (ВТЭ). В первом случае пары воды к концу процесса сжатия образуют в камере сгорания гомогенную смесь с воздушным зарядом, что приводит к снижению температур конца сжатия и горения, уменьшая теплонапряженность процесса горе-

ния. Во втором случае подача ВТЭ в цилиндр с высокой температурой воздушного заряда (до 600 °С) приводит к мгновенному вскипанию и взрыву капель воды, обеспечивая дополнительное распыливание топлива и соответственно гомогенизацию топливовоздушной смеси в объеме камеры сгорания. Это приводит как к снижению температур горения, так и повышению эффективности использования основного топлива.

В двигателях с искровым зажиганием применяют смесь бензина с водой, так называемый *аквазин* (что означает: вода, т.е. “аква”, плюс “бензин”). Однако применение воды в двигателях транспортного назначения широкого распространения никогда не имело, поскольку существенны отрицательные стороны: коррозия металла (в первую очередь за счет соединения с продуктами сгорания серы, что приводит к образованию серной кислоты), проблемы с пуском двигателя (особенно в холодное время года), необходимость наличия дополнительной емкости с водой на борту (которая к тому же может быть разорвана при отрицательных окружающих температурах вследствие замерзания воды) и т.д.

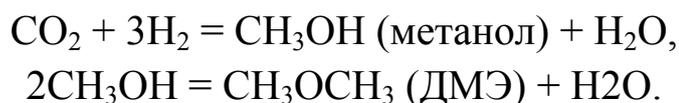
Спирты. Достаточно давно известны смесевые топлива, в которых в качестве добавки применяют *этанол* (этиловый спирт) C_2H_5OH и *метанол* (метиловый спирт) CH_3OH .

Использование спиртов объясняется в первую очередь их высокой детонационной стойкостью: ОЧ по моторному методу у метанола 104...115, у этанола – 106 единиц. Но для того чтобы это влияние было заметно в случае применения в смеси с бензином, октановое число которого не более 98, добавка должна быть не менее 25...50 %. Широкого применения, однако, эти смесевые топлива не нашли в связи с высоким значением скрытой теплоты парообразования спиртов (в 2,5 раза больше, чем у бензина), приводящей к большим затратам тепла на их испарение, что создает трудности с пуском ДВС в холодное время года. Это же обстоятельство обуславливает невозможность использования спиртов в дизелях без применения запальной дозы дизельного топлива. Теплотворная способность спиртов невысока в связи с наличием в их

молекуле большой доли кислорода (до 50 %). Кроме того, спирты гигроскопичны, т. е. интенсивно поглощают воду, что дополнительно приводит к снижению их теплотворной способности (хотя и повышает октановое число). Что касается *метанола*, то его применение дополнительно осложнено тем, что *это сильнодействующий нервно-сосудистый яд*. К тому же при добавке любых спиртов в топливо необходимо учитывать их коррозионное воздействие на детали двигателя (табл. П4).

Диметиловый эфир CH_3OCH_3 (ДМЭ). По своей природе ДМЭ является простейшим эфиром, не токсичен и не загрязняет окружающую среду (быстро разлагается в атмосфере), по физико-химическим свойствам он похож на сжиженный газ. При нормальных атмосферных условиях ДМЭ находится в газообразном состоянии, но легко сжижается: при $20\text{ }^\circ\text{C}$ при давлении 0,5 МПа, а при $38\text{ }^\circ\text{C}$ – при 0,8 МПа. Наличие большой доли кислорода в его молекуле (около 35 %) обуславливает низкое значение теплоты сгорания (почти в два раза меньше, чем у дизельного топлива), что приводит к пониженным температурам горения.

Образование ДМЭ возможно за счет разложения метанола, который, в свою очередь, может быть получен при взаимодействии диоксида углерода и водорода (например при газификации твердого топлива) или искусственного обеспечения протекания этой реакции:



Применение ДМЭ осложнено, во-первых, низкой вязкостью (почти на порядок ниже, чем у дизельного топлива), что может негативно отразиться на состоянии плунжерных пар топливных насосов высокого давления (привести к задиру). А во-вторых, ухудшением пусковых качеств двигателя из-за пониженной теплотворности вследствие высокой концентрации кислорода в молекуле ДМЭ. К тому же ДМЭ *обладает слабым наркотическим воздействием*, что особенно опасно, учитывая переход его в газообразное состояние при атмосферном давлении.

Сравнительные характеристики нефтяных топлив и спиртов приведены в табл. П5.

Биотопливо. К числу жидких биотоплив относятся различные масла (например, апельсиновое, арахисовое, подсолнечное, рапсовое, соевое, хлопковое, эвкалиптовое и т. п.), а также их эфиры. Масла получают посредством отжима из первичного продукта, а эфиры – путем этерификации (взаимодействия со спиртами) масел в присутствии катализатора. Часто используемый термин “биодизель” означает, что это биотопливо пригодно к применению в дизелях, причем либо в чистом виде, либо в смеси с ДТ. Термин “биоэтанол” указывает на то, что этанол получен из злаковых растений; биоэтанол применяется как добавка к бензину.

Биотопливо получают путем обработки семян (подсолнечника, рапса, сои и т.п.): в маслоотделяющем прессе из масличного сырья получают масло и жмых; нерафинированное (неочищенное) масло подают в фильтр-пресс, где оно проходит частичную очистку от примесей; на последней стадии масло в смесителе перемешивают с дизельным топливом в нужном соотношении.

В качестве топлива также применяют эфиры соответствующих масел, причем в отличие от масла эфиры могут применяться как в смеси с дизельным топливом, так и в чистом виде. Эфиры получают из растительных масел и животных жиров в результате химической реакции со спиртами (этиловым или метиловым). Молекулы жира состоят из триглицеридов – соединений трехвалентного спирта глицерина с тремя жирными кислотами. Для получения метилового эфира к растительному маслу добавляется метанол (соотношение 9 : 1 по массе), а также небольшое количество щелочного катализатора (едкого натра – гидроксида натрия). Все это смешивается в реакторных колоннах при температуре 60 °С и нормальном давлении. В результате химической реакции образуются метиловый эфир и глицерин (последний широко используется в фармацевтической и лакокрасочной промышленности). Полученный эфир отличается хорошей воспламеняемостью, обеспечиваемой высоким цетановым числом (ЦЧ); если для минераль-

ного дизтоплива ЦЧ = 48...52, то ЦЧ метилового эфира более 58 (достигая в некоторых случаях 70 единиц). Это позволяет использовать его в дизельных двигателях без прочих стимулирующих воспламенение веществ.

Применение в дизелях растительных масел в качестве топлива (или добавки к минеральному дизельному топливу) осложнено их более высокой вязкостью. В результате с течением времени забиваются сопловые отверстия распылителей (ухудшая процесс распыливания топлива), появляются отложения на поршне (снижая теплоотвод от днища поршня). При этом вязкость растительных масел с понижением температуры окружающей среды увеличивается гораздо интенсивнее, чем вязкость ДТ (рис. 1.6). И даже смеси дизельного топлива и (в данном примере) хлопкового масла (ХМ) состава 30/70 и 50/50 (в процентном соотношении по массе) имея пологую характеристику, тем не менее по абсолютной величине

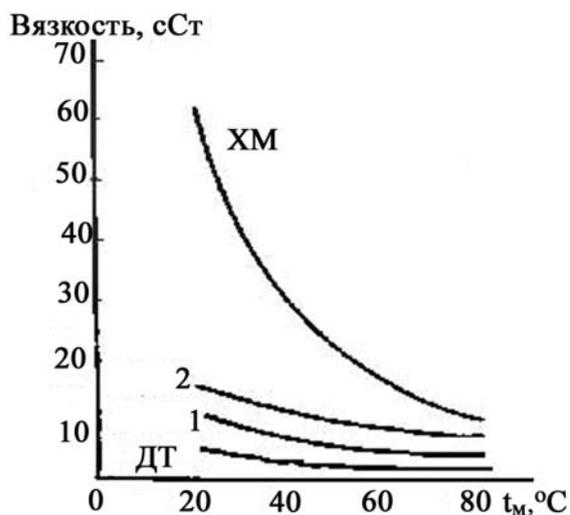


Рис. 1.6. Температурно-вязкостная характеристика дизельного топлива (ДТ), хлопкового масла (ХМ) и их смесей

отличаются от вязкости ДТ в сторону увеличения. Подобное изменение вязкости в зависимости от температуры окружающей среды нежелательно, поскольку приведет к затруднению пуска двигателя в холодное время года. Что касается применения метилэфиров на базе масел, то в этом случае вследствие их более низкой теплотворности падает мощность двигателя.

Но самое главное — это отрицательное воздействие на резиновые детали и металл: вследствие наличия метанола первые разбухают, а вторые — корродируют.

Поэтому применение био-топлив требует специальной подготовки двигателя с целью сохранения мощностно-экономических показателей и надежности.

Сравнительные характеристики некоторых биотоплив, а также требования европейского стандарта к биотопливам приведены в табл. П6 и П7.

§ 1.3. Газообразные топлива

К этому виду топлив относятся:

- природный и нефтяной газы,
- промышленные газы (получаемые в результате функционирования заводов по переработке нефти: газы прямой перегонки, термического и каталитического крекингов, коксования мазута и гудрона, пиролиза бензина, каталитического риформинга),
- канализационные газы (получаемые при обработке сточных и канализационных вод),
- биогазы (получаемые при переработке продуктов растительного и животного происхождения),
- генераторные газы (получаемые при термогазогенерации древесных отходов, угля и торфа),
- водород, аммиак и некоторые другие.

Наиболее широкое применение из газообразных топлив нашли **природный и нефтяной газы**. *Сухой природный газ* (добываемый из неглубоких горизонтов – до 1300 м) состоит на 90 – 99 % из метана. *Газовый конденсат* (добываемый из более глубоких горизонтов) содержит 80 – 90 % метана. В отличие от сухого газа в газовом конденсате содержится большее количество высокомолекулярных углеводородов, которые при большом давлении, характерном для глубоких горизонтов, находятся в сжиженном состоянии, в связи с чем они обладают повышенной относительно сухих газов объемной теплотой сгорания. В *попутных* (нефтяных) *газах*, добываемых из нефтяных месторождений, наличие метана в 2...4 раза ниже, чем в сухих газах, и концентрация высокомолекулярных углеводородов в некоторых случаях уже соразмерна с концентрацией метана; в состав также входят диоксид углерода CO_2 и азот N_2 (концентрация последнего может достигать 30...45 %).

Для стационарных энергетических установок (котлы, печи, бытовые газовые плиты) применяется подача газа по магистралям низкого (до 500 мм вод. ст.) и среднего (до 0,3 кг/см²) давления (для дальней транспортировки используются магистрали высокого давления – до 70 кг/см²). На транспорте применяют *сжатый (компримированный) природный газ* (СПГ, PNG) и *сжиженный нефтяной (углеводородный) газ* (СНГ, СУГ, LPG). СПГ на транспортных средствах содержится в газообразном состоянии в баллонах под давлением до 20,0 МПа, а СУГ – в жидком виде в баллонах под давлением до 1,2 МПа (в этом плане СУГ похож на ДМЭ, однако, первый традиционно относят к газообразным топливам, а второй – к жидким, хотя в двигатель оба подаются в газообразном состоянии). Иногда находит свое применение и сжиженный природный газ, транспортировка которого обеспечивается в специальных криогенных емкостях.

Несмотря на разнообразие газообразных топлив, основная доля приходится на природный газ. И так же как запасы нефти и угля, запасы газа в мире сосредоточены неравномерно (рис. 1.7): на Ближнем Востоке (поз. 6) – 40,8 %, в Евразии – 35,4 % (поз. 1, в том числе 26,7 % – это доля России). В остальных регионах – в Центральной и Южной Америке (поз. 2), Африке (поз. 3), Северной Америке (поз. 4) и Тихоокеанской части Азии (поз. 5) – этих запасов существенно меньше.

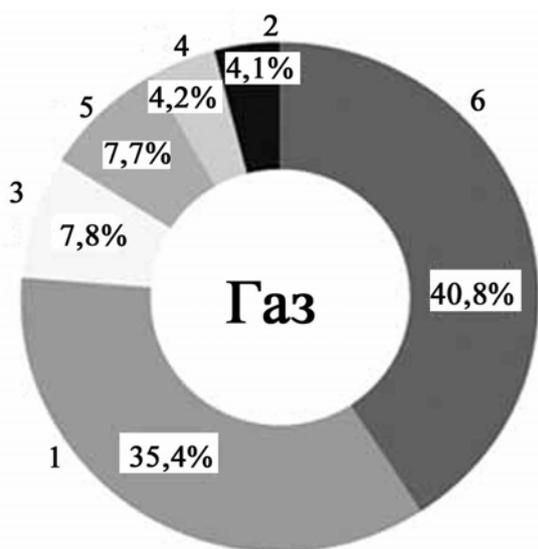


Рис. 1.7. Структура разведанных запасов природного газа в мире на 2003 г.

Одним из продуктов переработки биомассы являются **биогазы** – продукт анаэробного (без доступа воздуха) брожения. Переработка биомассы в топливо идет по двум направлениям: 1) *биологическая конверсия* за счет сбраживающего воздействия микроорганизмов и 2) *термохимическая конверсия* за счет воздействия высокой температуры.

Одним из продуктов переработки биомассы являются **биогазы** – продукт анаэробного (без доступа воздуха) брожения. Переработка биомассы в топливо идет по двум направлениям: 1) *биологическая конверсия* за счет сбраживающего воздействия микроорганизмов и 2) *термохимическая конверсия* за счет воздействия высокой температуры.

Состав биогазов: 50... 80 % метана, 20...50 % диоксида углерода, остаток – сернистые соединения и азот. Брожение 1 т органического вещества (по сухому весу) дает до 350...600 м³ биогаза.

КПД превращения энергии органических веществ в биогаз достигает 80...90 %. Низкое содержание метана и высокое – диоксида углерода обуславливает пониженную теплотворность биогазов, что определяет сложности применения в ДВС с точки зрения сохранения мощностно-экономических показателей и пусковых качеств.

Генераторные газы получают путем термохимической конверсии твердых топлив за счет воздействия повышенной температуры и при недостатке окислителя. В качестве исходного сырья могут использоваться древесные отходы, уголь, торф, солома. Основные составляющие получаемого газа – это горючие вещества: оксид углерода, водород и метан, которые могут служить топливом для двигателей внутреннего сгорания. Кроме того, в состав генераторного газа входят кислород, диоксид углерода, азот, соединения серы, пары воды; присутствуют также зола и смолы. В случае использования древесных отходов выход генераторного газа составляет около 15...20 % от веса исходного сырья.

Газификация твердых топлив происходит в специальных установках – газогенераторах, которые могут либо устанавливаться непосредственно на транспортном средстве, либо быть стационарными (рис. 1.8). В зоне I – зоне горения – происходит сгорание топлива за счет подаваемого воздуха с образованием углекислого газа CO₂ и паров воды H₂O.

Зона II – зона газификации, здесь полученные в зоне I продукты полного сгорания контактируют с топливом, раскаленным за счет тепла, выделившегося в зоне I (температура – около 1000 °C). В результате полученные CO₂ и H₂O восстанавливаются до H₂ и CO. В III зоне – зоне сухой перегонки – из твердого топлива выделяются летучие компоненты без их горения, поскольку в этой зоне температура уже недостаточно высокая. В IV зоне – зоне подсушки – температуры от нижних слоев хватает только для испарения

влаги и высушивания топлива, поступающего в эту зону из верхнего бункера; получающийся газогенераторный газ из зоны IV поступает потребителю. По мере сгорания топлива в зоне I содержимое вышележащих слоев будет перемещаться вниз, а в зону IV будет подаваться свежее топливо из бункера.

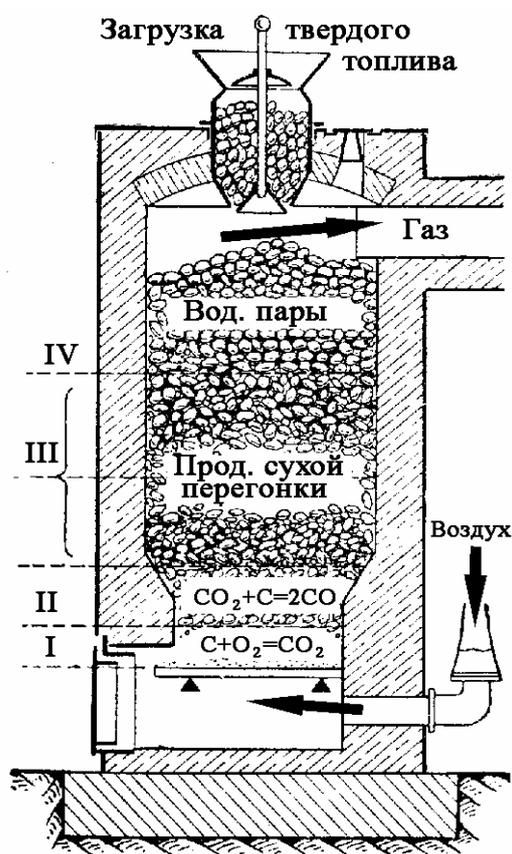


Рис. 1.8. Схема газогенератора.
Обозначения: I...IV – основные зоны сжигания топлива и образования газа

лива и содержания в нем влаги.

Характеристики некоторых генераторных газов приведены в табл. П8.

При пропускании смеси воздуха с водяным паром через слой раскаленного топлива (в газогенераторе) (с целью понижения температуры в зоне горения и повышения теплотворности газа за счет разложения паров воды) получают **смешанный газ**. При воздействии паров воды на раскаленные кокс и антрацит получают **водяной газ** (его идеальный состав – по 50 % водорода и оксида углерода). Если этот газ обогатить углеводородами (что обеспечивает

Таким образом, генераторный газ – это смесь получаемых во всех четырех зонах газов, а также плюс азот воздуха (кислород воздуха полностью расходуется в процессе горения). При этом если в качестве исходного топлива используются дрова, торф или ископаемый уголь, то в составе газа кроме упомянутых веществ будут присутствовать смолистые вещества и пары воды, если же газифицируются антрацит, кокс или древесный уголь, то их практически не будет. В результате состав и количество генераторного газа зависят от вида и состава топ-

ся при использовании в качестве исходного топлива бурого угля и торфа), то получится **карбюрированный водяной газ** (отсюда и название – карбюратор – устройство по обогащению газа, в том числе и воздуха, углеводородным топливом).

Доменный (колошниковый) газ выделяется из доменных печей при выплавке чугуна; представляет собой тот же генераторный газ, так как домы – это фактически те же газогенераторы.

Канализационный газ – получается путем переработки сточных вод – фильтрации, отстаивания и брожения отстоявшейся плотной массы в колодцах.

Термохимической конверсии могут подвергаться и традиционные топлива, например дизельное. В этом случае реализуется процесс частичного разложения исходных высокомолекулярных углеводородов на низкомолекулярные и водород.

Водород H_2 . Применение H_2 в качестве топлива перспективно в связи с практически безграничными ресурсами, поскольку его источником может быть вода. Кроме того, водород также получается в результате термической конверсии углеводородных топлив, как жидких, так и твердых, и газообразных. Продукт сгорания водорода – вода – абсолютно нетоксичное вещество. Однако вода может обусловить и проблемы применения H_2 : высокая концентрация транспорта в городах приведет к тому, что в периоды с отрицательной температурой воздуха резко повысится влажность, и как результат – обледенение машин и близстоящих строений. Эта проблема может быть более реальной, чем гипотетическая проблема интенсификации глобального потепления вследствие выброса диоксида углерода – продукта сгорания углерода топлива. Еще ряд проблем связан с отсутствием инфраструктуры его производства в количествах, необходимых для массового использования, с нерешенностью проблем экономически оправданных и безопасных средств хранения на борту транспорта.

Аммиак NH_3 . При нормальных атмосферных условиях (н.у.) аммиак находится в газообразном состоянии, но сжижается уже при давлении 0,6...0,7 МПа; теплотворность по сравнению с бензином в 2,5 раза ниже, но октановое число существенно выше (130 по

исследовательскому методу). Его сырьевая база безгранична, поскольку аммиак производится из азота (которого в атмосфере 77 % по массе) и водорода. Как и водород, NH_3 не содержит в своем составе углерода, т.е. в продуктах сгорания отсутствуют продукты неполного сгорания (сажа, оксид углерода, углеводороды). Недостаток – *резкий запах и высокая степень ядовитости* (хотя в четыре раза ниже, чем у метанола); поскольку обладает сильными щелочными свойствами, то большинство цветных металлов (медь, бронза, латунь и т.п.) подвергаются коррозии, но сталь, чугун, алюминий, никель, титан и им подобные – стойки. Недостатком является также высокая температура воспламенения аммиачно-воздушных смесей и их вялое горение.

Характеристики некоторых газов, используемых в качестве топлив, приведены в табл. П9.

Глава 2. СОСТАВ И СВОЙСТВА ТОПЛИВ

*Элементный и химический состав ♦ Горючая масса
и балласт ♦ Тип атомарных связей ♦ Основные свойства
топлив ♦ Высшая и низшая теплота сгорания
♦ Температура и теплота*

§ 2.1. Топливо

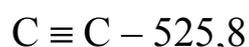
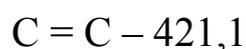
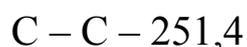
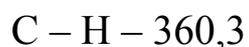
Основным различием всех топлив как источника химической энергии (независимо от вида происхождения и агрегатного состояния) является их элементный и химический составы, определяющие количество выделяемой энергии в виде тепла при сгорании единицы количества топлива.

Под *элементным* составом понимается содержание в топливе химических элементов. В зависимости от типа топлива элементов может быть от двух до пяти; углерод С, водород Н, сера S, кислород О и азот N. Под *химическим* составом понимается содержание в топливе различных химических компонентов. Последние под-

разделяются на два типа: *горючую массу* и *балласт*. К горючей массе относятся углеводороды различного состава C_nH_m и сера S, т. е. то, что при горении выделяет тепло. Балласт – это все остальное: азот, кислород, вода, минеральные составляющие, т. е. все то, что при горении топлива отбирает тепло на свое сгорание (кислород) или же вообще не горит (азот и минеральные вещества), но занимает долю в массе топлива. Наличие балласта приводит к снижению тепловыделения при горении топлива, поскольку фактическое количество последнего определяется только количеством углерода, водорода и серы (табл. П10).

При нормальных атмосферных условиях (соответствуют состоянию окружающей среды 760 мм рт.ст. и 0 °С) углеводороды различных групп, входящие в топливо, находятся в разных агрегатных состояниях. Группы с углеродным числом $C_1...C_4$ (метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и их производные: метилен CH_3 , этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 , бутилен C_4H_8 и др.) – в газообразном состоянии, $C_5...C_{15}$ (начиная с гептана C_5H_{12}) – в жидком (при этом $C_5...C_6$ – легкоподвижные, а $C_{15}...C_{17}$ – маслянистые жидкости), с углеродным числом от C_{18} и выше – в твердом. Бензины состоят из углеводородов групп $C_5...C_{11}$, температура кипения которых лежит в диапазоне 40...200 °С; лигроины – из групп $C_8...C_{14}$ (150...250 °С); керосины – из групп $C_{12}...C_{18}$ (180...300 °С); газойль (на основе которого делают дизельное топливо) из групп $C_7...C_{35}$ (200...370 °С).

При переходе от более лёгкой к более тяжёлой фракции увеличиваются размеры и разветвлённость молекул углеводородов, а также соответственно увеличиваются их температуры вспышки и самовоспламенения. Количество выделяемого тепла при горении топлива зависит в первую очередь от *типа атомарных связей* между углеродом и водородом в молекуле топлива (т. е. вида углеводородов). Теплота разрыва связей между атомами в молекуле следующая (МДж/моль):



В жидких углеводородных топливах присутствуют следующие типы углеводородов:

1. Алканы (парафиновые углеводороды, предельные углеводороды). Общая формула C_nH_{2n+2} . Характерный представитель – метан CH_4 . Тип связей: C–C и C–H.

2. Цикланы. Общая формула C_nH_{2n} . Характерный представитель – циклогексан C_6H_{12} . Тип связей: C–C и C–H.

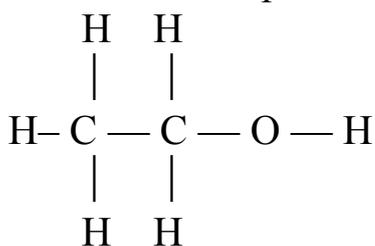
3. Алкены. Общая формула C_nH_{2n} . Характерный представитель – гексан C_6H_{12} . Тип связей: C–H, C–C и C=C.

4. Алкины. Общая формула C_nH_{2n-2} . Характерный представитель – ацетилен C_2H_2 . Тип связей: C–H, C–C и $C\equiv C$.

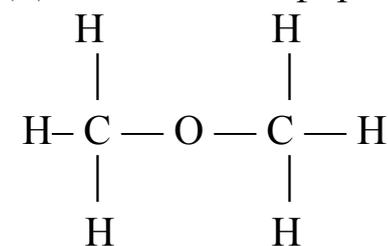
5. Ароматические углеводороды (или сокращенно ароматики). Общая формула C_nH_{2n-6} . Характерный представитель – бензол C_6H_6 . Тип связей: C–H, C–C и C=C.

Тип химических связей оказывает существенное влияние на физико-химические показатели веществ. Так, разрыв трех одинарных связей между атомами углерода C–C потребует около 755,0 МДж/моль тепла, а одна тройная связь $C\equiv C$ – почти на 30 % меньше – 525,8 МДж/моль. Для разрыва двух одинарных связей C–C требуется 502,8 МДж/моль теплоты по сравнению с 421,1 МДж/моль теплоты на разрыв одной двойной связи C=C. Из приведенных данных видно, что тип и количество связей влияет на теплоту сгорания углеводородных топлив, да и все другие показатели веществ также зависят от этого. Например, *химические формулы* этанола и диметилового эфира одинаковы: C_2H_6O . Однако их *молекулярные формулы*, характеризующие внутримолекулярные связи, разные: C_2H_5OH и CH_3OCH_3 соответственно, т.е. эти два вещества являются изомерами: состав атомов у них одинаков, но свойства различны. Последнее обстоятельство особенно хорошо заметно на примере нижеприведенных *структурных формул* обоих веществ.

Этиловый спирт



Диметиловый эфир



В частности, в диметиловом эфире нет связи типа С–С и нет гидроксильной группы ОН, а в этиловом спирте есть. В результате показатели этих двух веществ различны, что обуславливает их возможность и эффективность применения в тепловых двигателях (см. табл. П5).

Одним из важнейших показателей топлив, обуславливающих эффективность их использования, является **теплота сгорания** (теплотворная способность, теплотворность) – количество тепла, выделяемого при сгорании единицы количества топлива, т.е. при сгорании 1 моля, 1 кг или 1 м³. Единицы измерения теплоты сгорания – ккал/моль, кДж/моль, ккал/кг, кДж/кг, ккал/м³, кДж/м³; объемная теплота сгорания применяется при расчетах, связанных с применением газообразного топлива.

Необходимо различать понятия “температура” и “теплота”: если температура – это мера средней энергии движения молекул в теле, то теплота определяет общее количество внутренней энергии тела, которая может быть передана другому телу.

Из пяти химических элементов топлива основными являются углерод и водород. При сгорании 1 кг *углерода* С в виде графита выделяется около 34,0 МДж тепла при н.у. При этом максимальная температура, развиваемая при отсутствии потерь тепла (*адиабатическая температура*), равна 2175 °С при сгорании в сухом воздухе и 2145 °С при сгорании в воздухе, содержащем 1 % влаги. В различных видах топлив углерод имеет разные типы химических связей с другими элементами, поэтому количество тепла, выделяемого при горении углерода, непостоянно вследствие неодинаковых затрат энергии на разрыв связей между атомами и молекулами в этих соединениях.

При сгорании 1 кг *газообразного водорода* Н₂ выделяется около 142,0 МДж тепла при н.у., т.е. в четыре с лишним раза больше, чем при сгорании углерода. Поэтому теплота сгорания топлива возрастает с увеличением содержания в нем водорода, и та-

кой показатель, как отношение: углерод / водород, является важным для анализа энергоемкости топлив. Для разных топлив количество выделяющегося тепла при сгорании водорода неодинаково в связи с разным характером химических связей водорода. Поэтому при сгорании *жидких* топлив теплота сгорания водорода составляет уже приблизительно 125,0 МДж на 1 кг водорода. Адиабатическая температура горения водорода равна 2235 °С при сгорании в сухом воздухе и 2200 °С при сгорании в воздухе, содержащем 1 % влаги.

Если продукты сгорания выбрасываются в атмосферу при температуре, большей 100 °С, то вода, образующаяся при сгорании водорода, находится в продуктах сгорания (ПС) в виде водяных паров. Экспериментально (калориметрическим методом) определено, что затраты тепла на подогрев 1 кг воды от 20 до 100 °С и ее испарение затрачивается тепла $Q_W \sim 600$ ккал или в пересчете на единицы измерения в соответствии с международной системой измерения $Q_W = 4,19 \cdot 600 = 2514$ кДж/кг $\sim 2,5$ МДж/кг. Так как при сгорании 1 кг водорода образуется 9 кг воды, то на испарение этого количества воды затрачивается тепла

$$9 \cdot 2,5 = 22,5 \text{ МДж.}$$

Таким образом, если образовавшаяся вода находится в виде пара, то при сгорании 1 кг газообразного водорода выделяется не 125 МДж тепла (как было указано выше), а

$$125,0 - 22,5 = 102,5 \text{ МДж.}$$

Если же вследствие понижения температуры пары воды конденсируются, и вода перейдет в жидкое состояние, то затраченное на ее испарение тепло выделится. Принято, что количество тепла, выделяющегося при сгорании 1 кг водорода с образованием воды, является *высшей теплотой сгорания* Q_V водорода, а количество тепла, выделяющегося при сгорании 1 кг водорода с образованием водяного пара – *низшей теплотой сгорания* Q_H водорода. Эти же понятия применяют и к топливам, в состав которых входит водород (для бензинов $Q_H = 44,0$ МДж/кг, для дизельного топлива $Q_H = 42,7$ МДж/кг).

Необходимо обратить внимание на тот факт, что при расчетах, связанных с применением *газообразного топлива*, часто ис-

пользуется значение *объемной* теплоты сгорания (т.е. относимой к 1 м^3 газа). В этом случае теплота сгорания может быть отнесена либо к *нормальным* физическим условиям окружающей среды ($Q_{\text{норм}}$ – при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $1 \text{ кг/см}^2 = 735 \text{ мм рт.ст.}$), либо к *стандартным* условиям ($Q_{\text{ст}}$ – при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и 760 мм рт.ст.); при нормальных условиях обозначение единицы измерения объема – нормальные кубометры (нм^3). Соотношение между значениями теплот сгорания при нормальных и стандартных условиях: $Q_{\text{норм}} = (273/293) Q_{\text{ст}}$.

На показатель теплоты сгорания топлива большое влияние оказывают наличие и доля кислорода в молекуле топлива: в бензине кислорода практически нет, в дизельном топливе – около $0,4 \%$ (по массе), а в спиртах – до 50% . Соответственно и уровень теплоты сгорания этих энергоносителей отличается; характерно, что теплотворность спиртов по сравнению с теплотворностью соответствующих углеводородов имеет линейную обратно пропорциональную зависимость от содержания в спиртах кислорода, хотя адиабатические температуры горения практически одинаковы (рис. 2.1; табл. П11).

Различное соотношение содержания в молекуле топлива химических элементов, а также наличие воды в рабочей массе топлива обуславливают различный уровень температур горения. У ископаемых видов топлива температура горения может достигать $2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Горение влажного биотоплива (древесины, древесной щепы, опилок с $50...60 \%$ влажности, что характерно для первичного продукта) происходит при температуре ниже $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Что касается пеллет и брикетов, то благодаря меньшей влажности (не более 10%) и большей плотности их теплотворность выше, чем у простого древесного топлива:

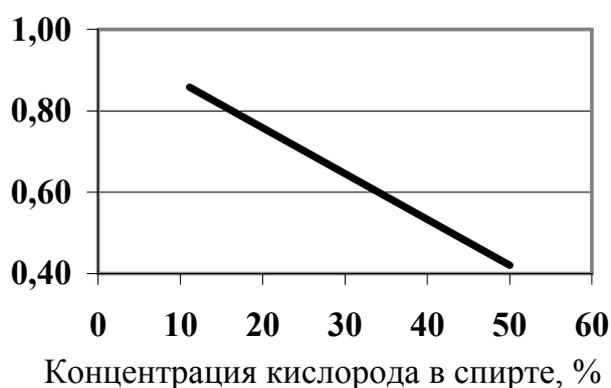


Рис. 2.1. Изменение сравнительной теплотворности спирта и соответствующего углеводорода от содержания в спирте кислорода

при сжигании 1000 кг древесных гранул выделяется столько же энергии, как при сжигании 1600 кг древесины, или 480 куб. м газа, или 500 л дизельного топлива, или 700 л мазута.

§ 2.2. Топливоздушная смесь

Понятие “*теплота сгорания топлива*” носит сугубо теоретическое значение. Само по себе топливо не горит даже при наличии в нем кислорода, поскольку кислород, входящий в молекулу топлива, связан, т.е. химически не активен (иначе молекула топлива не могла бы существовать). Поскольку топливо горит только при наличии свободного кислорода (или других окислителей – фтора, йода, закиси азота...), то практическое значение имеет только *теплота сгорания топливоздушной смеси*. И характерной величиной в этом случае является теплота сгорания стехиометрической смеси топлива и окислителя (смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1$).

Влажность окислителя. Наличие свободной воды в топливе оговаривается всегда специально. А в отношении окислителя считается, что в нем влаги нет. Однако если в качестве окислителя используется воздух, то вода в нем всегда присутствует, поскольку не бывает воздуха с нулевой влажностью. Реально наиболее вероятный диапазон уровня *относительной влажности* воздуха – от 30 до 70 %. Соответственно уровень влажности воздуха всегда будет оказывать влияние на процесс горения, т.е. на теплотворность и температуру горения смеси.

Если вода и воздух находятся в *закрытом пространстве*, то содержание паров воды в воздухе зависит только от температуры. Это определяется тем, что кинетическая энергия молекул воды (как и в любом другом веществе) неодинакова, и соответственно есть молекулы, у которых кинетическая энергия движения превышает потенциальную энергию межмолекулярных связей. В результате такие молекулы вылетают с поверхности воды в воздух (происходит процесс *испарения*). Поскольку жидкость теряет молекулы с наибольшей энергией, то средний уровень кинетической энер-

гии оставшихся молекул снижается, что приводит к понижению общей температуры жидкости. В результате испарения концентрация паров воды в воздухе (*парциальное давление* или *удельная влажность воздуха*) повышается. Однако понижение температуры жидкости вследствие испарения приводит к тому, что часть молекул из воздуха возвращается обратно в жидкость (пары воды *конденсируются*). И чем выше концентрация молекул воды в воздухе, тем большее их количество возвращается в жидкость. Через некоторое время устанавливается динамическое равновесие между количествами молекул воды, покидающими жидкость и возвращающимися в нее, – концентрация паров воды в воздухе *для данной температуры* является предельной, и водяной пар соответствующей концентрации называется *насыщенным*. Если температуру в емкости понизить, то усилится процесс конденсации, и содержание паров воды в воздухе уменьшится, соответственно для новой температуры водяной пар также будет насыщенным. При повышении температуры усилится процесс испарения, в воздухе увеличится содержание молекул воды, но опять-таки с течением времени установится динамическое равновесие, и пар снова будет насыщенным.

В открытой атмосфере в отличие от замкнутого пространства уровень содержания паров воды зависит не только от температуры, но и от рассеивания в воздухе (уноса паров воздушными течениями). Поэтому состояние атмосферы, при котором содержание паров воды достигает насыщения, наблюдается гораздо реже, чем состояние с меньшим содержанием паров воды. В том случае, если парциальное давление паров воды в атмосфере соответствует предельному для данной температуры, то *относительная влажность* атмосферного воздуха – 100 % (рис. П1). Если же парциальное давление водяных паров в воздухе меньше предельного значения, то относительная влажность меньше 100 % (и водяной пар называется *ненасыщенным*), а *отношение указанных давлений* равно текущему значению относительной влажности.

Значение текущей относительной влажности воздуха можно определить по *психрометрическому графику* (рис. П2). Исходными данными являются значения температуры воздуха, определяемого сухим (t_c) и влажным (t_B) термометрами, входящими в состав пси-

хрометра. На указанном графике значение t_c ($^{\circ}\text{C}$) откладывается на верхней горизонтальной шкале и проводится стрелка вертикально вниз; значение t_b ($^{\circ}\text{C}$) откладывается на этой же шкале, но стрелка проводится под углом к шкале. Из точки пересечения этих стрелок проводится горизонтальная стрелка до пересечения с вертикальной шкалой, по которой отсчитывается значение относительной влажности воздуха ϕ (%).

При понижении температуры атмосферного воздуха текущее значение относительной влажности приближается к предельному для данной температуры. И то значение температуры, при которой парциальное давление водяного пара становится равным парциальному давлению насыщенного водяного пара, называется *точкой росы*.

§ 2.3. Пределы воспламенения

Топливо горит только в газообразном состоянии. Поэтому твердое и жидкое топливо, прежде чем воспламенится, должно изменить свое агрегатное состояние за счет *возгонки* и *испарения* под воздействием высокой температуры. Но наличие топлива в виде газа или паров в смеси с окислителем еще не означает автоматического воспламенения смеси даже при наличии источника высокой температуры.

Если в топливовоздушной смеси топлива мало, а воздуха (окислителя) много, то такая смесь называется “бедной” (и ей соответствует максимальное значение коэффициента избытка воздуха), а если наоборот – много топлива и мало окислителя, то такая смесь называется “богатой” (и ей соответствует минимальное значение коэффициента избытка воздуха).

Слишком бедная или слишком богатая смеси не воспламеняются из-за несоответствия количества выделяющегося тепла и количества тепла, идущего на подогрев окислителя (балласта), т.е. из-за превышения теплотерь над тепловыделением: для переобеднен-

ной смеси характерны большие теплотери, а для переобогащенной – малое тепловыделение.

Газообразное топливо в смеси с окислителем характеризуется *нижним и верхним пределами воспламеняемости* (они же являются и пределами взрываемости) – наименьшей и наибольшей концентрациями топлива в смеси. Соответственно диапазон концентраций топлива в смеси с окислителем (что определяется экспериментально), в котором смесь может воспламениться, достаточно широкий. Но для разных газов и паров этот диапазон различен; в случае использования в качестве чистого воздуха, содержащего 20,9 % по объему кислорода, указанные пределы приведены в табл. П12.

Необходимо отметить, что данные о пределах воспламеняемости газов и паров топлива – величины не постоянные. Эти пределы изменяются в зависимости от начальной температуры смеси, давления смеси, мощности источника высокой температуры, времени контакта с этим источником, площади контакта, наличия и вида инертного газа, теплопроводности, теплоемкости и теплопроводности смеси и т.п. Во всех случаях существуют оптимальные величины, отклонение от которых ухудшает условия воспламенения (кроме площади контакта: чем больше площадь, тем легче воспламенение). Например, при увеличении давления смеси метана с воздухом с 0,1 до 12,5 МПа нижний предел увеличится от 5,4 до 5,9 %, а верхний – от 14,3 до 45,7 %. В том случае если давление смеси падает ниже атмосферного, то верхний предел снижается, а нижний – увеличивается, и в итоге происходит “схлопывание” (или “вырождение”) диапазона воспламенения, т.е. при некотором разрежении смесь не воспламеняется при любых концентрациях. Соответственно справочные данные об условиях воспламенения различных смесей не всегда совпадают. В том случае если в качестве окислителя используется не чистый воздух (в котором кислорода по объему 20,9 %, а инертного азота – 79,1 %), а смесь воздуха с инертными газами (или смесь инертных газов с кислородом), то это также влияет на изменение верхнего предела воспламенения (чем больше концентрация кислорода, тем больше значение верхнего предела при практически постоянном значении нижнего предела).

При изменении внешних условий существенно изменяется только верхний концентрационный предел воспламенения топлива с воздухом, нижний же предел остается практически постоянным, поскольку концентрация кислорода в такой смеси всегда избыточна, и это нивелирует все остальные изменения.

В данном учебном пособии проблемы, связанные с воздействием на концентрационные пределы воспламенения топливных смесей, не излагаются (чтобы не усложнять рассмотрение вопроса).

Глава 3. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОПЛИВ

*Полное и неполное сгорание ♦ Стехиометрическое соотношение ♦ Состав продуктов сгорания ♦ Теплота сгорания топлива ♦ Теплота сгорания топливовоздушной смеси
♦ Эмпирическая формула топлива ♦ Адиабатическая температура горения*

Сгорание топлива может быть полным или неполным. В последнем случае в продуктах сгорания кроме продуктов полного сгорания (воды H_2O и диоксида углерода CO_2), а также азота N_2 воздуха присутствуют продукты неполного сгорания: углерод (сажа) C , оксид углерода CO и углеводороды (самого различного состава) C_nH_m . Причем чисто теоретическим условием неполного сгорания является значение коэффициента избытка воздуха менее единицы ($\alpha < 1,0$). Однако на практике продукты неполного сгорания присутствуют в продуктах сгорания как при стехиометрическом соотношении между топливом и окислителем (т.е. при $\alpha = 1,0$), так и при избытке окислителя (т.е. при $\alpha > 1,0$).

Тем не менее термохимические показатели топлив в основном рассчитывают для условий теоретически полного сгорания. Исключением являются случаи специальной организации горения при больших недостатках окислителя, например, для получения

промышленной сажи за счет сгорания метана CH_4 , а также получение генераторного газа или древесного угля из твердого топлива при $\alpha < 0,5$. Исходя из изложенного, мы будем определять термохимические показатели топлив для условия полного сгорания.

Расчет термохимических показателей включает в себя определение значений следующих параметров:

- количества требуемого окислителя (кислорода или воздуха) на единицу количества топлива (в объемных или массовых величинах ($\text{м}^3/\text{м}^3$, $\text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{кг}/\text{кг}$)), т.е. расчет стехиометрического коэффициента;

- количества образующихся продуктов сгорания;

- условного состава топлива (эмпирическую формулу топлива);

- теплоты сгорания топлива;

- теплоты сгорания стехиометрической топливовоздушной смеси;

- адиабатической температуры горения стехиометрической топливовоздушной смеси;

- общего тепловыделения заданного количества топлива;

- нижнего и верхнего пределов воспламенения топливовоздушной смеси (минимальной и максимальной концентрации топлива в смеси с воздухом, при которой смесь может воспламениться).

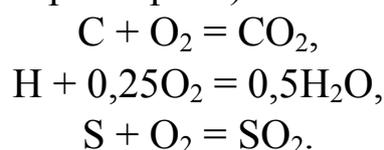
В том случае если химический состав топлива неизвестен, то прежде чем рассчитывать вышеперечисленные показатели, необходимо первоначально определить так называемую *эмпирическую формулу* топлива. Этот тип формулы показывает соотношение химических элементов, входящих в молекулу топлива, но может отличаться от *химической формулы*, показывающей истинный состав молекулы. Например, химическая формула целлюлозы – $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, а эмпирическая – CH_2O (значение индексов при элементах получены делением каждого индекса при элементах на наименьшее значение индекса, в данном случае минимальное значение индекса равно 6).

§ 3.1. Окисление химических элементов

Будем считать, что азот в состав топлива не входит. Такое допущение не является грубым, поскольку, во-первых, в подавляю-

щем числе топлив его содержание не превышает 0,5 % (по массе), а во многих его вообще нет; исключение – тяжелые фракции нефти, где его содержание может достигать 5 %. Во-вторых, азот не горит, а потребление кислорода при окислении азота связано только с атмосферным азотом. Таким образом, принятое допущение не влияет ни на определение эмпирической формулы топлива, ни на значение стехиометрического коэффициента, ни на температуру горения и теплотворность топлива.

В общем случае в состав топлива входят углерод С, водород Н, сера S и кислород О (обобщенная формула топлива $C_nH_mO_rS_k$). В результате полного сгорания элементов С, Н и S образуются соответственно диоксид углерода CO_2 , вода H_2O и сернистый ангидрид SO_2 (нестабильностью последнего при понижении температуры, которое приводит к окислению SO_2 до серного ангидрида SO_3 , в данном случае можно пренебречь):



Исходя из молекулярной массы элементов, можно записать:



Приведя выражение к 1 кг С (т.е. разделив численные коэффициенты при элементах на 12), получим, что для сгорания 1 кг углерода требуется $32/12 = 8/3$ кг кислорода и при этом образуется $44/12 = 11/3$ кг углекислого газа;



Приведя выражение к 1 кг H_2 (т.е. разделив численные коэффициенты при элементах на 2), получим, что для сгорания 1 кг водорода требуется $16/2 = 8$ кг кислорода и при этом образуется $18/2 = 9$ кг воды;



Приведя выражение к 1 кг S (т.е. разделив численные коэффициенты при элементах на 32), получим, что для сгорания 1 кг серы требуется $32/32 = 1$ кг кислорода и при этом образуется $64/32 = 2$ кг диоксида серы.

Таким образом, для сгорания 1 кг топлива, которое состоит из химических элементов С, Н и S, требуется:

$$l_0 = 8/3 C + 8H + S, \text{ кг кислорода.}$$

Если же в состав топлива входит еще и кислород, то на 1 кг такого топлива требуется:

$$l_0 = 8/3 C + 8H + S - O, \text{ кг кислорода.}$$

Здесь единицы измерения элементов – в килограммах или массовых долях. Так как расчет идет на 1 кг, то, например, если массовая доля C, H, O и S 0,7, 0,15, 0,1 и 0,05 соответственно, то и масса элементов 0,7, 0,15, 0,1 и 0,05 кг соответственно.

В том случае, если индексы при элементах углерода, водорода и серы даны в общем виде (т.е. n , m , k), то имеем следующие выражения:

$$C_n + nO_2 = nCO_2, \quad (3.1)$$

$$H_m + 0,25mO_2 = 0,5mH_2O, \quad (3.2)$$

$$S_k + kO_2 = kSO_2. \quad (3.3)$$

Соответственно для топлива произвольного состава (включающего в себя и кислород O) можно записать

$$C_n H_m O_r S_k + (n + 0,25m + k - 0,5r)O_2 = nCO_2 + 0,5mH_2O + kSO_2. \quad (3.4)$$

Последнее выражение означает, что для сгорания 1 кмоль топлива произвольного состава $C_n H_m O_r S_k$ требуется кислорода $(n + 0,25m + k - 0,5r)$ кмоль, при этом образуется n кмоль углекислого газа, $0,5m$ кмоль воды и k кмоль диоксида серы. Причем слагаемое $-0,5r$ (в выражении 3.4) учитывает, что в единице количества топлива часть приходится на кислород, соответственно доля сгораемых элементов – углерода, водорода и серы – меньше (это учитывает знак “минус”), поэтому и требуется меньшее количество кислорода по сравнению с тем же соотношением C : H : S при отсутствии кислорода в молекуле топлива. Численный коэффициент 0,5 учитывает, что в воздухе находится молекулярный кислород (формула которого O_2 , а индекс равен 2), а не атомарный (формула которого O, а индекс соответственно равен 1).

§ 3.2. Расчет расхода окислителя и количества образующихся продуктов сгорания

В общем случае топливо может быть задано либо в виде ин-

дивидуального вещества $C_nH_mO_rS_k$, либо в виде долей отдельных элементов С, Н, S, О.

3.2.1. Состав топлива задан по элементам

Элементы: С, Н, S, О. Агрегатное состояние топлива – **жидкость и твердое вещество**.

А) Расчет теоретически необходимого количества окислителя.

Согласно уравнениям 3.1 – 3.3 для обеспечения полного сгорания элементов топлива требуется:

1) кислорода на единицу расхода топлива:

$$l_o = 8/3 C + 8 H + S - O, \text{ кг } O_2 / \text{ кг}_{\text{топл}};$$

2) количество окислителя на единицу расхода топлива:

$l_{ок} = l_o / k_{ок}$, кг_{окисл} / кг_{топл} – *массовый* расход окислителя, где $k_{ок}$ – доля кислорода в окислителе. Для воздуха $k_{ок} = 0,232$ (содержание кислорода в воздухе 23,2 % по массе).

$l'_{ок} = l_{ок} / \rho_{ок}$, м³_{окисл} / кг_{топл} – *объемный* расход окислителя:

$$\rho_{ок} = 0,465 B_o / T_o, \text{ кг} / \text{ м}^3$$

(единицы измерения: B_o , мм рт.ст., T_o , К).

Обозначения: l_o , $l_{ок}$, и $l'_{ок}$ – расход кислорода и окислителя по массе (кг) и расход окислителя по объему (м³) в расчете на единицу количества топлива. При расчетах на все задаваемое количество топлива обозначения указанных величин: L_o , $L_{ок}$ и $L'_{ок}$, M_T и V_T – общее количество топлива по массе (кг) и по объему (л или м³).

Пример 1

Дано:

70 л дизельного топлива плотностью $\rho_T = 0,835 \text{ г/см}^3$; элементный состав топлива:
С = 86 %, Н = 13,6 %, О = 0,4 %.

Найти:

Количество кислорода (по массе) и воздуха (по массе и объему), необходимых для сжигания:

1) 1 кг топлива и 2) всего количества топлива при показателях состояния окружающей среды: $B_o = 750 \text{ мм рт.ст.}$ и $t_o = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

1) количество кислорода, необходимого для сжигания 1 кг топлива:

$$l_o = 8/3 C + 8H + S - O = 8/3 \cdot 0,86 + 8 \cdot 0,136 + 0 - 0,004 = 3,377 \text{ кг } O_2;$$

2) количество воздуха, необходимого для сжигания 1 кг топлива (*стехиометрический коэффициент*):

$l_{ок} = l_o / k_{ок} = 3,377 / 0,232 = 14,56 \text{ кг}_{окисл}$ – массовый расход воздуха;

$\rho_{ок} = 0,465 B_o / T_o = 0,465 \cdot 750 / (25 + 273) = 1,17 \text{ кг/ м}^3$ – плотность воздуха при заданных условиях окружающей среды;

$l'_{ок} = l_{ок} / \rho_{ок} = 14,56 / 1,17 = 12,44 \text{ м}^3_{окисл}$ – объемный расход воздуха;

3) масса топлива:

$$M_T = V_T \rho_T = 70 \cdot 0,835 = 58,45 \text{ кг};$$

4) количество кислорода, необходимого для сжигания 58,45 кг топлива:

$$L_o = l_o M_T = 3,377 \cdot 58,45 = 197,38 \text{ кг } O_2;$$

5) количество воздуха, необходимого для сжигания 58,45 кг топлива при заданных условиях окружающей среды:

$L_{ок} = l_{ок} M_T = 14,56 \cdot 58,45 = 851,03 \text{ кг}_{окисл}$ – массовый расход воздуха;

$L'_{ок} = l_{ок} / \rho_{ок} = 851,03 / 1,17 = 727,38 \text{ м}^3_{окисл}$ – объемный расход воздуха.

Ответ: для сжигания 1 кг топлива заданного состава необходимо 3,377 кг кислорода или 14,56 кг (12,44 м³) воздуха, а для сжигания всего заданного количества топлива – 197,38 кг кислорода или 851,03 кг (727,38 м³) воздуха.

Б) Расчет количества образующихся продуктов полного сгорания

Согласно уравнениям 3.1 – 3.3 при условии полного сгорания элементов топлива образуется:

- 11/3 кг CO₂ в результате сгорания 1 кг углерода С;
- 9 кг H₂O в результате сгорания 1 кг водорода H;
- 2 кг SO₂ в результате сгорания 1 кг серы S.

Пример 2

Дано:

70 л дизельного топлива плотностью $\rho_T = 0,835 \text{ г/см}^3$; элементный состав топлива: С = 86 %, Н = 13,6 %, О = 0,4 %.

Найти:

Количество CO_2 и H_2O при сгорании:

1) заданного количества топлива; 2) количества топлива, необходимого для работы на режиме эксплуатационной мощности двигателя, согласно курсовому проекту студента в течение года (условия работы двигателя: 5 ч в день при 22 рабочих днях в месяц в течение 11 месяцев в году).

Решение:

Расчет для заданного количества топлива (70 л):

1) масса топлива

$$M_T = V_T \rho_T = 70 \cdot 0,835 = 58,45 \text{ кг};$$

2) количество углерода в топливе

$$M_C = 0,86 M_T = 0,86 \cdot 58,45 = 50,27 \text{ кг};$$

3) количество образующегося CO_2

$$M_{\text{CO}_2} = 11/3 C = 11/3 \cdot 50,27 = 184,3 \text{ кг};$$

4) количество водорода в топливе

$$M_{\text{H}_2} = 0,136 M_T = 0,136 \cdot 58,45 = 7,95 \text{ кг};$$

5) количество образующихся паров воды

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 9 H = 9 \cdot 7,95 = 71,5 \text{ кг}.$$

Расчет по заданию курсового проекта:

$$G_T = 15 \text{ кг/ч (примем)}$$

6) потребление топлива в течение года

$$M_T = 15 \cdot 5 \cdot 22 \cdot 11 = 18150,0 \text{ кг};$$

7) количество образующегося CO_2

$$M_{\text{CO}_2} = 0,86 M_T \cdot 11/3 C = 0,86 \cdot 18150 \cdot 11/3 = 57233,0 \text{ кг или}$$

приблизительно 57,2 т;

8) количество образующихся паров воды

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,136 M_T \cdot 9 H = 0,136 \cdot 18150,0 \cdot 9 = 22215,6 \text{ кг или}$$

приблизительно 22,2 т.

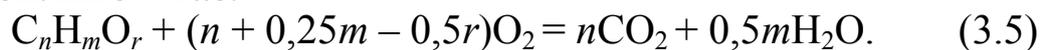
Ответ: при сжигании заданного количества топлива, а также количества топлива согласно курсовому проекту студента образу-

ется диоксида углерода CO_2 184,3 кг и 57,2 т соответственно, а также паров воды H_2O – 71,5 кг и 22,2 т соответственно.

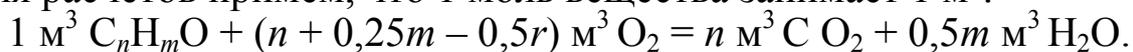
3.2.2. Состав топлива задан как индивидуальное вещество

Вещество вида $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_r$. Агрегатное состояние топлива – газ, жидкость, твердое вещество.

1. Топливо – газ.



1 моль газообразного вещества занимает 22,4 л. Для упрощения расчетов примем, что 1 моль вещества занимает 1 м^3 :



А) Расчет теоретически необходимого количества окислителя

Согласно уравнению 3.5 для обеспечения полного сгорания топлива требуется:

1) кислорода на единицу расхода топлива

$$l'_{\text{оо}} = (n + 0,25m - 0,5r), \text{ м}^3 \text{O}_2 / \text{м}^3_{\text{топл}};$$

2) окислителя на единицу расхода топлива

$l'_{\text{око}} = l'_{\text{о}} / k_{\text{ок}}$, $\text{м}^3_{\text{окисл}} / \text{м}^3_{\text{топл}}$ – объемный расход окислителя, для воздуха $k_{\text{ок}} = 0,209$ (содержание кислорода в воздухе 20,9 % по объему);

3) окислителя при параметрах состояния окружающей среды, отличающихся от нормальных физических условий (н.у.: $B_{\text{оо}} = 760$ мм рт.ст. и $T_{\text{оо}} = 273$ К):

$l'_{\text{ок}} = l'_{\text{око}} \phi$, $\text{м}^3_{\text{окисл}} / \text{м}^3_{\text{топл}}$, где ϕ – коэффициент состояния окружающей среды:

$$\phi = (B_{\text{оо}} / B_{\text{о}}) (T_{\text{о}} / T_{\text{оо}}).$$

Пример 3

Дано:

5 баллонов высокого давления (200 кг/см^2 при н.у.) по 40 л с природным газом CH_4 .

Найти:

Количество кислорода (по объему) и воздуха (по объему и массе), необходимых для сжигания: 1) 1 м^3 топлива и 2) всего количества топлива при следующих по-

казателях состояния окружающей среды: $B_0 = 735$ мм рт.ст. и $t_0 = -15$ °С.

Решение:

1) количество кислорода, необходимого для сжигания 1 м^3 топлива:

$$l'_{\text{оо}} = (n + m/4 - r/2) = 1 + 4/4 - 0 = 2 \text{ м}^3 \text{ O}_2;$$

2) количество окислителя, необходимого для сжигания 1 м^3 топлива:

$l'_{\text{око}} = l'_{\text{оо}} / k_{\text{ок}} = 2 / 0,209 = 9,57 \text{ м}^3$ – объемный расход окислителя;

$l_{\text{око}} = l'_{\text{око}} \rho_{\text{ок}} = 9,57 \cdot 0,465 \cdot 735 / (-15 + 273) = 12,67 \text{ кг}$ – массовый расход;

3) объем газа в 5 баллонах, заправленных при давлении 200 кг/см^2 при н.у.:

$$V_{\text{то}} = 5 \cdot 40 \cdot 200 = 40000 \text{ л} = 40 \text{ м}^3;$$

4) объем, занимаемый топливом при выходе в окружающую среду с заданными параметрами состояния:

$$V_{\text{т}} = V_{\text{то}} \phi = V_{\text{т}} (B_{\text{оо}} / B_0) (T_0 / T_{\text{оо}}) = 40 (760 / 735) ((-15 + 273) / 273) = 39,09 \text{ м}^3;$$

5) количество кислорода, необходимого для сжигания $39,09 \text{ м}^3$ топлива:

$$L'_{\text{оо}} = l'_{\text{оо}} V_{\text{т}} = 2 \cdot 39,09 = 78,18 \text{ м}^3 \text{ O}_2;$$

6) количество окислителя, необходимого для сжигания $39,09 \text{ м}^3$ топлива:

$L'_{\text{ок}} = V_{\text{т}} l'_{\text{око}} = 39,09 \cdot 9,57 = 374,09 \text{ м}^3$ – объемный расход;

$L_{\text{ок}} = L'_{\text{ок}} \rho_{\text{ок}} = 374,09 \cdot 0,465 \cdot 735 / (-15 + 273) = 374,09 \times 1,325 = 495,56 \text{ кг}$ – массовый расход.

Ответ: для сжигания 1 м^3 , а также всего количества топлива заданного состава необходимо: 1) кислорода – $2,0$ и $78,18 \text{ м}^3$ соответственно или 2) воздуха – $9,57 \text{ м}^3$ ($12,67 \text{ кг}$) и $374,09 \text{ м}^3$ ($495,56 \text{ кг}$) соответственно при заданных условиях окружающей среды.

Б) Расчет количества образующихся продуктов полного сгорания

Пример 4

Дано:

40 м³ природного газа СН₄.

Найти:

Массу диоксида углерода и паров воды при сгорании: 1) 1 м³ газа; 2) всего количества газа.

Решение:

1) плотность СО₂ при н.у.: 1 моль любого газа занимает объем 22,4 л (или 1 кмоль – 22,4 м³); молекулярный вес 1 кмоль СО₂ 44 кг, т.е. $\rho_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг}/22,4 \text{ м}^3 = 1,964 \text{ кг}/\text{м}^3$;

2) плотность паров воды Н₂О:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ кг}/22,4 \text{ м}^3 = 0,804 \text{ кг}/\text{м}^3 ;$$

3) объем СО₂ при сгорании 1 м³ метана

$$V_{\text{CO}_2} = n = 1 \text{ м}^3 ;$$

4) масса СО₂ при сгорании 1 м³ метана

$$M_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} = 1 \cdot 1,964 = 1,964 \text{ кг};$$

5) масса СО₂ при сгорании 40 м³ метана

$$M_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} = 40 \cdot 1,964 = 78,56 \text{ кг};$$

6) объем Н₂О при сгорании 1 м³ метана

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = m/2 = 4/2 = 2 \text{ м}^3;$$

7) масса Н₂О при сгорании 1 м³ метана

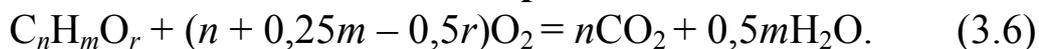
$$M_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 0,804 = 1,608 \text{ кг};$$

8) масса Н₂О при сгорании 40 м³ метана

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 40 \cdot 1,608 = 64,32 \text{ кг}.$$

Ответ: при сжигании 1 м³ топлива заданного состава, а также при сжигании всего количества топлива образуется: 1) диоксида углерода 1,964 и 78,56 кг соответственно и 2) паров воды – 1,608 и 64,32 кг соответственно.

2. Топливо – жидкость или твердое вещество.



$$(12n + m + 16r) \text{ кг } \text{C}_n\text{H}_m\text{O}_r + 32(n + 0,25m - 0,5r) \text{ кг } \text{O}_2 = \\ = 44n \text{ кг } \text{CO}_2 + 9m \text{ кг } \text{H}_2\text{O}.$$

Отнесем все к 1 кг $C_nH_mO_r$, разделив коэффициенты слагаемых на выражение $12n + m + 16r = \varphi$,

$$\begin{aligned} & 1 \text{ кг } C_nH_mO_r + 32 ((n + 0,25m - 0,5r) / \varphi) \text{ кг } O_2 = \\ & = (44n / \varphi) \text{ кг } CO_2 + (9m / \varphi) \text{ кг } H_2O. \end{aligned} \quad (3.7)$$

А) Расчет теоретически необходимого количества окислителя

1) количество кислорода на единицу расхода топлива:

$$l_o = 32(n + 0,25m - 0,5r) / \varphi = 32(n + 0,25m - 0,5r) / (12n + m + 16r),$$

кг O_2 / кг_{топл};

2) количество окислителя на единицу расхода топлива:

$$l_{ок} = l_o / k_{ок}, \text{ кг}_{окисл} / \text{ кг}_{топл} - \text{массовый расход окислителя};$$

$$l'_{ок} = l_{ок} / \rho_{ок}, \text{ м}^3_{окисл} / \text{ кг}_{топл} - \text{объемный расход окислителя};$$

$$\rho_{ок} = 0,465 B_o / T_o, \text{ кг} / \text{ м}^3 \text{ (единицы измерения: } B_o, \text{ мм рт.ст., } T_o, \text{ К)}.$$

Пример 5

Дано:

70 л углеводородного топлива химического состава $C_{19}H_{35}O$ и плотностью $0,835 \text{ г/см}^3$.

Найти:

Количество кислорода (по массе) и воздуха (по массе и объему), необходимых для сжигания: 1) 1 кг топлива и 2) всего количества топлива при следующих показателях состояния окружающей среды: $B_o = 750 \text{ мм рт.ст.}$ и $t_o = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

1) количество кислорода, необходимого для сжигания 1 кг топлива:

$$l_o = 32(n + 0,25m - 0,5r) / \varphi = 32(n + 0,25m - 0,5r) / (12n + m + 16r) =$$

$$= 32(19 + 35/4 - 0,5) / (12 \cdot 19 + 35 + 16 \cdot 1) = 872 / 279 = 3,12 \text{ кг } O_2;$$

2) количество окислителя, необходимого для сжигания 1 кг топлива:

$$l_{ок} = l_o / k_{ок} = 3,12 / 0,232 = 13,45 \text{ кг};$$

3) масса топлива

$$M_T = V_T \rho_T = 70 \cdot 0,835 = 58,45 \text{ кг};$$

4) количество кислорода, необходимого для сжигания 58,45 кг топлива:

$$L_o = l_o M_T = 3,12 \cdot 58,45 = 182,36 \text{ кг } O_2;$$

5) количество воздуха, необходимого для сжигания 58,45 кг топлива при заданных условиях окружающей среды:

$L_{ок} = l_{ок} M_T = 13,45 \cdot 58,45 = 786,15 \text{ кг}$ – массовый расход воздуха;

$\rho_{ок} = 0,465 B_o/T_o = 0,465 \cdot 750/(25+273) = 1,17 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха;

$L'_{ок} = l_{ок}/\rho_{ок} = 786,15/1,17 = 671,92 \text{ м}^3$ – объемный расход воздуха.

Ответ: для сжигания 1 кг топлива заданного состава, а также всего количества топлива необходимо: 1) кислорода – 3,12 и 182,36 кг соответственно; 2) воздуха – 13,45 и 786,15 кг (671,92 м³) соответственно при заданных условиях окружающей среды.

Б) Расчет количества образующихся продуктов полного сгорания

Согласно уравнению 3.7 при сгорании 1 кг вещества образуется:

– диоксида углерода $44n/\varphi = 44n/(12n + m + 16r)$ кг CO₂;

– воды $9m/\varphi = 9m/(12n + m + 16r)$ кг H₂O.

Пример 6

Дано:

10 л метанола CH₃OH плотностью 0,792 г/см³.

Найти:

Массу диоксида углерода и паров воды при сгорании: 1) 1 кг вещества; 2) всего количества вещества.

Решение:

1) масса 10 л CH₃OH:

$$M_{CH_3OH} = V_{CH_3OH} \rho_{CH_3OH} = 10 \cdot 0,792 = 7,92 \text{ кг};$$

2) масса CO₂ при сгорании 1 кг метанола:

$$M_{CO_2} = 44 n / (12n + m + 16r) = 44 \cdot 1 / (12 \cdot 1 + 4 + 16 \cdot 1) = 44 / 32 = 1,375 \text{ кг};$$

3) масса CO_2 при сгорании 7,92 кг метанола:

$$G_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CH}_3\text{OH}} = 1,375 \cdot 7,92 = 10,89 \text{ кг};$$

4) масса H_2O при сгорании 1 кг метанола:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 9m/(12n + m + 16r) = 9 \cdot 4/(12 \cdot 1 + 4 + 16 \cdot 1) = 36/32 = 1,125 \text{ кг};$$

5) масса H_2O при сгорании 7,92 кг метанола:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{CH}_3\text{OH}} = 1,125 \cdot 7,92 = 8,91 \text{ кг}.$$

Ответ: при сжигании 1 кг топлива заданного состава, а также при сжигании всего количества топлива образуется: 1) диоксида углерода – 1,375 и 10,89 кг соответственно и 2) паров воды – 1,125 и 8,91 кг соответственно.

Контрольные задачи к разделу 3.2. Требуется найти:
А) количество кислорода (по массе) и воздуха (по массе и объему), необходимых для сжигания: 1) 1 кг топлива и 2) всего количества топлива при заданных показателях состояния окружающей среды;
Б) массу диоксида углерода и паров воды при сгорании: 1) 1 кг вещества; 2) всего количества вещества.

Задача 1

Дано:

60 л бензина плотностью $\rho_T = 0,79 \text{ г/см}^3$; элементный состав топлива:

C = 85 %, H = 15 %.

$$B_0 = 765 \text{ мм рт.ст и } t_0 = -25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача 2

Дано:

3 баллона сжиженного нефтяного газа состава C_3H_8 (90 %) и C_4H_{10} (10 %) (12 кг/см² при н.у.) по 80 л каждый.

$$B_0 = 740 \text{ мм рт.ст и } t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача 3

Дано:

150 л жидкого углеводородного топлива химического состава $C_{18}H_{34}O$ плотностью $0,82 \text{ г/см}^3$.

$B_0 = 680 \text{ мм рт.ст}$ и $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

§ 3.3. Расчет теплоты сгорания

Теплота сгорания для топлив различного агрегатного состояния рассчитывается по нижеприведенным формулам.

Для жидких топлив (коэффициенты приведены округленно):

– высшая теплота сгорания (формула Д.И. Менделеева), кДж/кг:

$$Q_{\text{в}} = 340C + 1257H + 109S - 109O; \quad (3.8)$$

– низшая теплота сгорания, кДж/кг:

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{в}} - 25(W + 9H), \quad (3.9)$$

где второе слагаемое (численно равно теплоте, выделяющейся при конденсации паров воды, кДж/кг) – это затраты тепла на испарение влаги, содержащейся в топливе W и образующейся при сгорании водорода $9H$ (см. формулу 3.2):

$$Q_{\text{вл}} = 25(W + 9H). \quad (3.10)$$

Для газообразных топлив (коэффициенты приведены округленно):

– высшая теплота сгорания (для сухого газа), кДж/м³:

$$Q_{\text{в}} = 126CO + 128H_2 + 398CH_4 + 695C_2H_6 + 993C_3H_8 + 1286C_4H_{10} + 1580C_5H_{12} + 628C_2H_4 + 922C_3H_6 + 1215C_4H_8 + 1508C_5H_{10} + 1466C_6H_6 + 256H_2S; \quad (3.11)$$

– низшая теплота сгорания (для сухого газа), кДж/м³:

$$Q_{\text{н}} = 126CO + 108H_2 + 358CH_4 + 637C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1186C_4H_{10} + 1462C_5H_{12} + 591C_2H_4 + 859C_3H_6 + 1135C_4H_8 + 1412C_5H_{10} + 1403C_6H_6 + 235H_2S; \quad (3.12)$$

– низшая теплота сгорания (для сухого газа; для топлив с преобладающим содержанием метана – природных и попутных газов), кДж/м³:

$$Q_{\text{н}} = 359CH_4 + 628C_2H_6 + 922C_3H_8 + 1173C_4H_{10} + 1466C_5H_{12} + 251H_2S.$$

В этих формулах:

– С, Н, О и S – концентрация элементов топлива, выраженная в процентах по массе (% масс.);

– CO, H₂, C_nH_m и H₂S – концентрация индивидуальных газов, выраженная в процентах по объему (% об.);

– численные коэффициенты – тепловые эффекты при сгорании соответствующего компонента топлива. Знак “плюс” означает тепловыделение, а “минус” – теплопоглощение;

– выражение ($W + 9H$) – сумма концентраций воды, содержащейся в топливе W , а также образующейся при сгорании водорода в количестве $9H$ (1 кг водорода при сгорании образует 9 кг воды), в процентах по массе (% масс.);

Формулы 3.11 и 3.12 даны, как указано, для *сухих газов*, т.е. не содержащих свободной воды. Однако газообразные топлива в своем составе всегда имеют влагу, поэтому *истинная теплотворность* находится с учетом содержания этой влаги:

$$Q_i = Q_{i_b} [0,804 / (0,804 + M_v)], \text{ кДж/м}^3, \quad (3.13)$$

где M_v , кг_{влаги}/м³ – содержание воды в единице объема газа;

0,804, кг_{влаги}/м³ – плотность водяного пара при н.у.

В формулах расчета теплотворности топлив каждое слагаемое представляет собой произведение значения теплотворности какого-либо элемента (для жидких, твердых и газообразных топлив) или индивидуального газа (только для газообразных топлив) на содержание соответствующего элемента (в процентах по массе) или газа (в процентах по объему).

Теплота сгорания всех элементов и газов определена экспериментально *калориметрическим методом* (измерение количества тепла, передающегося в воду при сжигании навески топлива и при охлаждении продуктов сгорания до начальной температуры – температуры топлива до сгорания; обычно эта температура равна 15 °С). Что касается кислорода, то речь идет не о его теплоте сгорания, а о снижении теплоты сгорания топлива из-за наличия в нем кислорода, т.е. вследствие того кислород занимает место горючих элемен-

тов и газов. При этом сам кислород в процессе дальнейшего окисления топлива не участвует, так как он химически уже связан с углеродом и водородом. Наличие прочего балласта учитывается таким же образом – за счет снижения доли горючих элементов и газов в общем количестве топлива.

На основании приведенных формул можно оценить, на сколько изменится теплотворность топлива, если содержание какого-либо элемента или газа изменить на сколько-то процентов (по массе или объему). В частности, уменьшение содержания в топливе углерода на 1 % снижает теплоту сгорания топлива на 340 кДж/кг, серы – на 109 кДж/кг, водорода – на 1257 кДж/кг при оценке высшей теплотворности. При оценке низшей теплотворности уменьшение содержания водорода на 1 % снижает теплотворность на 1257 кДж/кг, но затраты тепла на испарение образующейся при сгорании водорода воды также будут меньше на $25 \cdot 9 = 225$ кДж/кг. Увеличение же содержания кислорода в топливе на 1 % приводит к снижению низшей теплотворной способности топлива на 109 кДж/кг. Таким образом, гораздо большее влияние на теплотворность топлива оказывает содержание в нем углерода и водорода, чем кислорода.

Влияние содержания воды в топливе в первую очередь зависит от теплотворности горючей массы: каждый процент воды, снижая концентрацию горючей массы в топливе также на 1 %, приводит к снижению теплотворности топлива, соответствующей 1 % теплотворности горючей массы.

Например, если топливо состоит только из горючей массы, теплота сгорания которой 40000 кДж/кг, то введение в топливо 1 % воды снизить содержание горючей массы также на 1 %, а каждый процент теплоты сгорания топлива – это $40000/100 = 400$ кДж/кг. Кроме этого поскольку на испарение 1 кг воды тратится 2500 кДж тепла, то на каждый массовый процент испарения воды тратится $2500/100 = 25$ кДж. В результате для приведенного примера каждый процент воды, замещающий 1 % горючей массы в топливе, приведет к снижению теплоты сгорания топлива на $400 + 25 = 425$ кДж/кг.

Пример 7

Дано:

1 кг жидкого топлива следующего состава (по массе): С = 86 %, Н = 13,6 %, О = 0,4 %.

Найти:

1. Высшую и низшую теплотворные способности;
2. Теплоту конденсации паров воды.

Решение:

1) расчет высшей теплотворной способности топлива (формула 3.9):

$$Q_{\text{в}} = 340C + 1257H - 109(O - S) = 340 \cdot 86 + 1257 \cdot 13,6 - 109(0,4 - 0,0) = 46378,8 \text{ кДж/кг (или 46,4 МДж/кг);}$$

2) расчет низшей теплотворной способности топлива (по формуле 3.10):

$$Q_{\text{в}} = 340C + 1257H - 109(O - S) - 25(W + 9H) = 340 \cdot 86 + 1257 \times 13,6 - 109(0,4 - 0,0) - 25(0,0 + 9 \cdot 13,6) = 43318,8 \text{ кДж/кг (или 43,3 МДж/кг);}$$

3) расчет теплоты конденсации паров воды:

$$Q_{\text{вл}} = 25(W + 9H) = 25(0,0 + 9 \cdot 13,6) = 3060 \text{ кДж/кг (или примерно 3,1 МДж/кг);}$$

4) расчет низшей теплотворности топлива через определение количества образующейся воды и затрат тепла на ее испарение (выделение тепла при конденсации):

– количество водорода в топливе

$$M_{\text{H}_2} = 0,136 M_{\text{T}} = 0,136 \cdot 1 = 0,136 \text{ кг;}$$

– количество образующихся при сгорании водорода паров воды

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 9H = 9 \cdot 0,136 = 1,224 \text{ кг;}$$

– теплота конденсации паров воды

$$Q_{\text{вл}} = 2,5 M_{\text{H}_2\text{O}} = 2,5 \cdot 1,224 = 3,06 \text{ МДж,}$$

но поскольку это количество тепла затрачено при сгорании водорода, который, в свою очередь, образовался за счет сгорания 1 кг топлива, то полученная величина (3,06 МДж) соответствует теплоте конденсации (теплотворности), т.е. 3,06 МДж/кг ~ 3,1 МДж/кг. Если бы было задано не 1 кг топлива, а например 20 кг, то в 20 раз было бы больше образующихся водорода и паров воды, соответственно и общие затраты тепла на конденсацию воды были бы в 20 раз

больше, т.е. 61,2 МДж. Поэтому в случае необходимости расчета низшей теплотворности по данным высшей необходимо из последней вычесть теплоту конденсации паров воды, пересчитанную на 1 кг ($61,2/20 = 3,06$ МДж/кг);

– низшая теплотворность топлива

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{в}} - Q_{\text{вл}} = 46,4 - 3,1 = 43,3 \text{ МДж/кг};$$

4) относительная разница между значениями низшей теплотворности, рассчитанными двумя способами:

$$\Delta = 100 [43,3 \text{ (по п. 2)} - 43,3 \text{ (по п. 3)}] / 43,3 \text{ (по п. 2)} = 0,0 \text{ \%}.$$

Ответ: 1) высшая и низшая теплоты сгорания топлива заданного состава составляют 46,4 и 43,3 МДж/кг соответственно; 2) теплота конденсации паров воды составляет 3,1 МДж/кг.

Пример 8

Дано:

1 м³ топлива состава:
пропан C₃H₈ = 90 % и
бутан C₄H₁₀ = 10 % по
объему.

Найти:

1) высшую и низшую теплоты сгорания;
2) теплоту конденсации паров воды;
3) количество воды, образовавшейся при сгорании топлива.

Решение:

1) расчет высшей теплоты сгорания (формула 3.11):

$$Q_{\text{в}} = 993C_3H_8 + 1286C_4H_{10} = 993 \cdot 90 + 1286 \cdot 10 = \\ = 102236 \text{ кДж/м}^3 \text{ (или } 102,2 \text{ МДж/м}^3\text{)};$$

2) расчет низшей теплоты сгорания топлива (формула 3.12), округленно:

$$Q_{\text{н}} = 913C_3H_8 + 1186C_4H_{10} = 913 \cdot 90 + 1186 \cdot 10 = \\ = 94065,5 \text{ кДж/м}^3 \text{ (или } 94,1 \text{ МДж/м}^3\text{)};$$

3) расчет теплоты конденсации паров воды:

$$Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}} = 102,2 - 94,1 = 8,1 \text{ МДж/м}^3;$$

4) расчет количества воды, образовавшейся при сгорании топлива:

– количество индивидуальных газов в топливе:

$$– \text{ количество пропана } C_3H_8 = 1 \cdot 0,9 = 0,9 \text{ м}^3,$$

- количество бутана $C_4H_{10} = 1 \cdot 0,1 = 0,1 \text{ м}^3$;
- количество паров воды, образующихся при сгорании $0,9 \text{ м}^3$ пропана (индекс $m = 8$, формула 3.2):
 $V_{H_2O} = 0,9 (m/2) = 0,9 (8/2) = 3,6 \text{ м}^3$ или $3,6 \cdot 0,804 = 2,89 \text{ кг}$;
- количество паров воды, образующихся при сгорании $0,1 \text{ м}^3$ бутана (индекс $m = 10$, формула 3.2):
 $V_{H_2O} = 0,1 (m/2) = 0,1 (10/2) = 0,5 \text{ м}^3$ или $0,5 \cdot 0,804 = 0,402 \text{ кг}$;
- общее количество воды $2,89 + 0,402 = 3,292 \text{ кг}$.

Ответ: 1) высшая и низшая теплоты сгорания топлива заданного состава составляют 102,2 и 94,1 МДж/кг соответственно; 2) теплота конденсации паров воды составляет 8,1 МДж/кг; 3) количество воды, образовавшейся при сгорании топлива, – 3,292 кг.

Пример 9

Дано:

1 м³ топлива следующего состава: пропан $C_3H_8 = 90\%$ и бутан $C_4H_{10} = 10\%$ по объему; содержание влаги $W = 0,5 \text{ кг}$.

Найти:

Высшую и низшую теплоты сгорания, а также теплоту конденсации паров воды с учетом присутствующей в газе влаги и без нее.

Решение:

- 1) расчет высшей теплотворной способности:
 $Q_v = 993C_3H_8 + 1286C_4H_{10} = 993 \cdot 90 + 1286 \cdot 10 = 102236 \text{ кДж/м}^3$;
- 2) расчет количества образующихся паров воды – 3,292 кг. (согласно примеру 8);
- 3) расчет теплоты конденсации паров воды:
 – без учета присутствующей в газе влаги $W = 0,0$:
 $Q_{вл} = 25 (W + H) = 25 (0,0 + 3,292) = 82,3 \text{ кДж/кг}$ или $82,3 \cdot 0,804 = 66,17 \text{ кДж/м}^3$;
- с учетом присутствующей в газе влаги $W = 0,5 \text{ кг}$:
 $Q_{вл} = 25 (W + H) = 25 (0,5 + 3,292) = 94,8 \text{ кДж/кг}$ или $21,3 \cdot 0,804 = 76,2 \text{ кДж/м}^3$;
- 4) расчет низшей теплотворности топлива:

– без учета присутствующей в газе влаги $W = 0,0$:

$$Q_H = Q_B - Q_{\text{вл}} = 102236 - 66,17 = 102169 \text{ кДж/м}^3;$$

– с учетом присутствующей в газе влаги $W = 0,5$ кг:

$$Q_H = Q_B - Q_{\text{вл}} = 102236 - 76,2 = 102159 \text{ кДж/м}^3.$$

Ответ: 1) высшая теплота сгорания топлива заданного состава равна 102236 кДж/м^3 ; 2) низшая теплота сгорания топлива без учета влаги и с учетом равна 102169 и 102159 кДж/м^3 соответственно; 3) теплота конденсации паров воды без наличия свободной влаги и с наличием равна $66,17$ и $76,2 \text{ кДж/кг}$ соответственно.

Пример 10

Дано:

Дизель потребляет топлива $8,9 \text{ кг/ч}$ и воздуха – $332 \text{ м}^3/\text{ч}$. Показания психрометра: температура сухого и влажного воздуха – 22 и $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

Найти:

1) абсолютное и относительное количество теплоты, затраченное на испарение воды, содержащейся в воздухе;
2) соотношение масс воды (в воздухе) и топлива.

Решение:

1) по рис. П1 находим плотность насыщенных паров воды для температуры $22 \text{ }^\circ\text{C}$: $\rho = 0,0195 \text{ кг/м}^3$;

2) по рис. П2 находим значение относительной влажности воздуха согласно показаниям психрометра: $\varphi = 44 \text{ } \%$;

3) концентрация паров воды в воздухе относительной влажности $44 \text{ } \%$:

$$\rho(44) = 0,0195 \cdot 0,44 = 0,00858 \text{ кг/м}^3;$$

4) количество воды (влаги) в воздушном заряде двигателя:

$$G_{\text{вл}} = 332 \cdot 0,00858 = 2,848 \text{ кг/ч};$$

5) расчет тепловыделения при полном сгорании топлива:

– по табл. П5 теплотворность дизельного топлива – 42200 кДж/кг , соответственно полное тепловыделение $8,9 \text{ кг/ч}$ топлива составит $Q_T = 42200 \cdot 8,9 = 375580 \text{ кДж/ч}$;

б) затраты тепла на испарение воды, содержащейся в воздушном заряде:

– абсолютное $Q = 2,54 \text{ кДж/кг} \cdot 2,848 \text{ кг/ч} = 7,23 \text{ кДж/ч}$;

– относительное (по отношению к тепловыделению всего количества топлива)

$$\delta = Q_v / Q_T = 7,23 / 375580 = 0,005 = 0,002 \text{ \%};$$

7) соотношение масс воды (содержащейся в воздушном заряде) и топлива:

$$\beta = 2,848 / 8,9 = 0,32.$$

Ответ: 1) абсолютные и относительные затраты тепла на испарение воды, содержащейся в воздушном заряде, 7,23 кДж/ч и 0,002 % соответственно; 2) соотношение масс воды (содержащейся в воздушном заряде) и топлива – 0,32.

Контрольные задачи к разделу 3.3. Требуется найти: 1) высшую и низшую теплоты сгорания топлива; 2) теплоту конденсации паров воды.

Задача 9

Дано:

40 л жидкого топлива плотностью $\rho_T = 0,79 \text{ г/см}^3$ следующего состава (по массе): С = 87 %, Н = 13 %.

Задача 10

Дано:

70 л жидкого топлива плотностью $\rho_T = 0,82 \text{ г/см}^3$ следующего состава (по массе): С = 86 %, Н = 13 %, О = 0,4 %, W = 0,6 %.

Задача 11

Дано:

1 м³ топлива состава: пропан С₃Н₈ = 75 % и бутан С₄Н₁₀ = 25 % по объему; содержание влаги W = 0,4 кг.

Задача 12

Дано:

10 м³ топлива следующего состава: метан СН₄ = 2 %, пропан С₃Н₈ = 80 % и бутан С₄Н₁₀ = 19 % по объему; содержание влаги $W = 1$ кг.

§ 3.4. Расчет адиабатической температуры горения

Несмотря на большое различие в теплотах сгорания углерода и водорода, их адиабатические температуры горения близки. Это объясняется тем, что на сгорание 1 кг углерода идет 8/3 кг = 2,67 кг кислорода (см. п. 3.1), а на сгорание 1 кг водорода в 3 раза больше – 8 кг кислорода, т. е. балласта, на нагревание которого требуется тепла в 3 раза больше.

Расчет адиабатической температуры горения производится на основании выражения 3.14:

$$T_{ад} = T_{сж} + Q_{см} / (\mu c_p), \quad (3.14)$$

где $T_{ад}$, К – адиабатическая температура горения; c_p , кДж/(кмоль К) – теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении; μ , кг/кмоль – молекулярный вес смеси; $Q_{см}$, кДж/кг – низшая теплотворность смеси; $T_{сж}$, К – температура сжатия в цилиндре двигателя, обусловленная повышением давления вследствие перемещения поршня и сгоранием смеси к расчетному моменту;

$$Q_{см} = Q_H / (1 + \alpha l_o), \quad (3.15)$$

где Q_H – низшая теплотворность топлива; l_o – стехиометрический коэффициент (для дизельного топлива и бензина равный 14,3 кг_в / кг_т); α – коэффициент избытка воздуха;

$$T_{сж} = T_a (P_i / P_a)^{(k-1)/k}, \quad (3.16)$$

где T_a , К – температура воздушного заряда (или смеси) при впуске в цилиндр (в точке “а” по индикаторной диаграмме); P_i и P_a , МПа – текущее (соответствующее расчетному моменту) и начальное давление в цилиндре, k – показатель адиабаты окислителя (для воздуха $k = 1,4$).

Пример 10

Дано:

Температура воздушного заряда $T_a = 293$ К, давление $P_a = 0,9$ бар, давление $P_i = 80,0$ бар, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,0$, топливо – бензин.

Найти:

адиабатическую температуру горения топливовоздушной смеси.

Решение:

1) температура сжатия в цилиндре двигателя

$$T_o = T_a (P_i / P_a)^{(k-1)/k} = 293 (8,0 / 0,09)^{(1,4-1)/1,4} = 1056 \text{ К};$$

2) низшая теплота сгорания бензовоздушной смеси

$$H_{см} = Q_H / (1 + \alpha l_o) = 44000 / (1 + 1 - 14,3) = 2875 \text{ кДж/кг};$$

3) теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении

($\mu_{пс} = \mu_v = 29$ кг/кмоль);

$c_v = 26,41$ кДж/(кмоль К) = $26,41/29 = 0,91069$ (кДж/кг К) при 1056 К;

$$c_p = c_v + R/\mu_{пс} = c_v + 8,312/\mu_{пс} = 0,91069 + 8,312/29 = 1,19731 \text{ (кДж/кг К) при } 1056 \text{ К};$$

4) адиабатическая температура горения

$$T_{ад} = T_o + H_{см} / c_p = 1056 + 2875 / 1,19731 = 3457 \text{ К}.$$

Ответ: адиабатическая температура горения стехиометрической топливовоздушной смеси равна 3457 К.

Контрольные задачи к разделу 3.4. Требуется найти адиабатическую температуру горения топливовоздушной смеси.

Задача 13

Дано:

Температура воздушного заряда $T_a = 293$ К, давление $P_a = 0,9$ бар, давление $P_i = 120,0$ бар, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,7$, топливо – бензин.

Задача 14

Дано:

$T_a = 343$ К, $P_a = 0,9$ бар, $P_i = 80,0$ бар, $\alpha = 1,0$, топливо – бензин.

Задача 15

Дано:

$T_a = 293$ К, давление $P_a = 1,9$ бар, $P_i = 80,0$ бар, $\alpha = 1,0$, топливо – бензин.

§ 3.5. Расчет термохимических показателей топлива произвольного состава

1. Постановка задачи.

1.1. Дано:

- топливо произвольного состава $C_nH_mO_rS_k$;
- относительное содержание элементов W_i топлива, % массы:
 - углерод С – 75,0; кислород О – 5,0;
 - водород Н – 15,0; сера S – 5,0.
- общее количество топлива $G_T = 20$ кг;
- внешние условия:
 - температура среды $t_o = 20$ °С;
 - давление среды $B_o = 760$ мм рт.ст.

1.2. Найти:

- эмпирическую формулу топлива (индексы n , m , r и k при элементах С, Н, О и S соответственно);
- массовое соотношение углерод / водород С/Н;
- низшую теплоту сгорания топлива Q_u , кДж/кг;
- стехиометрический коэффициент по кислороду l_o , кг/кг;
- стехиометрический коэффициент по воздуху $l_{ок}$, кг/кг;
- низшую теплоту сгорания стехиометрической смеси топлива с воздухом $Q_{исм}$, кДж/кг;
- общее тепловыделение всего количества стехиометрической смеси топлива с воздухом $H_{см}$, кДж;
- адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси $T_{ад}$, К.

2. Расчет эмпирической формулы топлива.

2.1. Значения индексов n , m , o , k находят путем деления долевого содержания W_i соответствующего элемента в топливе на мо-

лекулярный вес μ_i элемента (значения μ_i берут по Периодической таблице элементов). Полученные значения W_i/μ делят на наименьшее из этих отношений (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Определение эмпирической формулы топлива

Элемент	Молекулярный вес μ_i , кг/кмоль	Массовая доля W_i	W_i / μ_i	Условное значение индекса
C	12	0,75	0,06250	40,0
H	1	0,15	0,15000	96,0
O	16	0,5	0,00312	2,0
S	32	0,5	0,00156	1,0

Примечание. Рекомендуется условное значение индексов определять с точностью до десятых долей.

Таким образом:

- значения индексов: $n = 40$, $m = 96$, $r = 2$, $k = 1$;
- эмпирическая формула топлива $C_{40}H_{96}O_2S$.

Необходимо подчеркнуть, что мы получаем *условное значение индексов*, поскольку истинные значения индексов зависят от химического состава топлива, т.е. определяемая эмпирическая формула топлива может не совпадать с химической формулой (см. п. 2).

2.2. Соотношение углерод/водород (C/H) является одной из характеристик топлива, определяющей склонность к сажеобразованию: чем больше это соотношение, тем выше склонность. Для топлива химической формулы $C_{40}H_{96}O_2S$ указанное соотношение C/H составляет $n/m = 40/96 = 0,417$ моль/моль (в мольных долях) или $n\mu_C/m\mu_H = (40 \cdot 12)/(96 \cdot 1) = 5,0$ кг/кг (в массовых единицах).

3. Расчет низшей теплоты сгорания топлива Q_H .

Теплота сгорания топлива произвольного состава определяется по формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_H = 340W_C + 1031W_H + 109W_S - 226W_N - 109W_O), \text{ кДж/кг},$$

где значения W_i в формуле даны в процентах по массе; численные коэффициенты – это тепловые эффекты, кДж/кг, при сгорании соответствующего элемента топлива; знак “плюс” означает тепловыде-

ление, а знак “минус” – поглощение тепла. В частности, водород при горении выделяет тепло, что учитывается слагаемым $1031W_H$, однако при его горении образуется вода, на испарение которой расходуется тепло, что учитывается слагаемым $-226W_H$. Последняя цифра определяется на основании того, что расход тепла на испарение 1 кг воды $2,5 \text{ МДж} = 2500 \text{ кДж}$ (см. п. 3.3), или $2500/100 = 25 \text{ кДж}$ на 1 % влаги. Поскольку при сгорании 1 кг водорода образуется 9 кг воды, то на испарение воды, образующейся при сгорании одного процента содержания водорода в топливе, тратится $25 \cdot 9 = 225 \text{ кДж}$ тепла (точнее, учитывая некоторую погрешность в связи с округлением цифр, 226 кДж).

Что касается кислорода O_2 , то он не горит, но, входя в состав топлива, уменьшает долю топлива, приходящуюся на сгораемые элементы – H, C и S, т.е. в 1 кг топлива на сгораемые элементы приходится в данном случае 95 %, или 0,95 кг. Соответственно и кислорода, входящего в состав окислителя, необходимо фактически не на 1 кг горючей массы, а на 0,95 кг. Тем не менее общее тепловыделение от сгорания 0,95 кг сгораемых элементов относится на 1 кг топлива, что обуславливает понижение теплотворности топлива при увеличении содержания кислорода в его молекуле.

Таким образом, итоговый тепловой эффект по каждому элементу находится как произведение суммы удельных теплот сгорания и теплопоглощения на процентное содержание соответствующего элемента в топливе (т.е. каждый процент содержания соответствующего элемента изменяет тепловой эффект на определенную величину):

$$Q_i = W_i (Q_{\text{сг}} + Q_{\text{тп}}).$$

Итоговый тепловой эффект (теплотворность топлива) – это сумма тепловых эффектов по каждому элементу.

Результаты расчета приведены в табл. 3.2.

Согласно полученным результатам теплотворность топлива $C_{40}H_{96}O_2S$ составляет $Q_H = 37521,45 \text{ кДж/кг} \sim 37,52 \text{ МДж/кг}$. Эта величина является *низшей теплотой сгорания* (или *низшей теплотворностью*) топлива, поскольку учитывает теплопотери за счет испарения воды, образующейся при сгорании водорода; *в случае, ес-*

ли принимается в расчет процесс конденсации паров воды, т.е. поглощенное тепло высвобождается, такая теплотворность топлива называется высшей.

Таблица 3.2

Расчет теплоты сгорания топлива

Элемент, индекс	Молекулярный вес μ_i , кг/кмоль	Условное значение индекса	W_i , % масс.	Удельная теплота сгорания, кДж/кг	Удельное теплопоглощение, кДж/кг	Итоговый тепловой эффект, кДж/кг
C, n	12	40,0	75,00	339,39	–	25454,25
H, m	1	96,0	15,00	1030,74	– 226,26	12067,20
O, r	16	2,0	5,00	–	– 108,94	– 544,70
S, k	32	1,0	5,00	108,94	–	544,70
Сумма			100,00	1479,07	– 335,2	37521,45

Примечание. Тепловой эффект со знаком “+” (по умолчанию) означает, что тепловыделение превалирует над теплопотерями, а со знаком “–” – наоборот: теплопотери превышают тепловыделение.

4. Стехиометрические коэффициенты.

Исходя из уравнения 3.4 (п. 3.1), находим соответствующие коэффициенты при O_2 , CO_2 , H_2O и SO_2 :

- эмпирическая формула топлива $C_{40}H_{96}O_2S$;
- индексы соответственно равны: $n = 40$, $m = 96$, $r = 2$, $k = 1$;
- коэффициент при O_2 : $n + 0,25m + k - 0,5r = 40 + 0,25 \cdot 96 + 1 - 0,5 \cdot 2 = 64$;
- коэффициент при CO_2 : $n = 40$;
- коэффициент при H_2O : $0,5m = 0,5 \cdot 96 = 48$;
- коэффициент при SO_2 : $k = 1$.

Таким образом, для полного сгорания 1 кмоль топлива условного состава $C_{40}H_{96}O_2S$ необходимо 64 кмоль O_2 ; при этом образуется 40 кмоль CO_2 , 48 кмоль H_2O и 1 кмоль SO_2 . Или, переходя к единице измерения килограмм и учитывая молекулярные веса элементов (см. табл. 3.1 и 3.2), получим, что для полного сгорания

$12 \cdot 40 + 1 \cdot 96 + 16 \cdot 2 + 32 \cdot 1 = 640$ кг топлива условного состава $C_{40}H_{96}O_2S$ необходимо $64 \cdot 16 \cdot 2 = 2048$ кг O_2 ; при этом образуется $40(12 + 16 \cdot 2) = 1760$ кг CO_2 , $48(1 \cdot 2 + 16) = 864$ кг H_2O и 32 кг SO_2 .

Исходя из полученных данных, находим стехиометрический коэффициент по кислороду из условия: если для сгорания 640 кг (или 1 кмоль) топлива состава $C_{40}H_{96}O_2S$ необходимо 2048 кг (или 6 кмоль) O_2 , то для сгорания 1 кг топлива необходимо $2048/640 = 3,2$ кг O_2 . Учитывая, что массовое содержание кислорода в воздухе 23,2 %, то для сгорания 1 кг топлива $C_{40}H_{96}O_2S$ необходимо $3,2/0,232 = 13,79$ кг воздуха.

Таким образом, стехиометрические коэффициенты для топлива $C_{40}H_{96}O_2S$ равны:

$$- l_o = 3,2 \text{ кг}_{O_2} / \text{кг}_{\text{топл}} \text{ (по кислороду);}$$

$$- l_{ок} = 13,79 \text{ кг}_{\text{возд}} / \text{кг}_{\text{топл}} \text{ (по воздуху).}$$

Для топлива указанного состава стехиометрический коэффициент по кислороду – величина постоянная, но значение l_o зависит от содержания кислорода в воздухе (или, в общем случае, в окислителе).

5. Сгорание стехиометрической смеси.

5.1. Теплота сгорания смеси топлива с воздухом $Q_{см}$ (в общем случае – с окислителем) находится по формуле

$$Q_{см} = Q_H / (1 + \alpha l_o),$$

где α – коэффициент избытка воздуха (отношение количества воздуха, поступившего в двигатель, к теоретически необходимому для полного сгорания поступившего в двигатель топлива).

Теплота сгорания стехиометрической смеси (т.е. $\alpha = 1$) равна

$$Q_{см} = 37521,45 / (1 + 1 \cdot 13,79) = 2536,94 \text{ кДж/кг.}$$

Поскольку общее количество топлива составляет $G_T = 20$ кг, то общее тепловыделение стехиометрической смеси топлива с воздухом составит

$$H_{см} = 2536,94 \cdot 20 = 50738,8 \text{ кДж} = 50,7 \text{ МДж.}$$

5.2. Адиабатическая температура горения $T_{ад}$ – это теоретическая температура, значение которой не учитывает потери тепла за счет излучения и диссоциации (влияние диссоциации проявляется при температурах горения свыше 2000 °С, что обуславливает не-

возможность достижения величины 3000 °С при горении почти всех видов топлива).

Расчет $T_{ад}$ производится по формуле 3.14 (п. 3.4):

$$T_{ад} = T_0 + Q_{см}/c_p,$$

где c_p , кДж/(кг К) – теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении (так как задано постоянное давление внешней среды V_0).

Значение c_p зависит от температуры продуктов сгорания в зоне горения, т.е. можно принять, что значение c_p обусловлено значением $T_{ад}$. В свою очередь, значение $T_{ад}$ зависит от значения c_p , поскольку от теплоемкости зависит величина изменения температуры. В связи с этим значения c_p и $T_{ад}$ находятся методом постепенных приближений (методом итераций) с принимаемым уровнем погрешности определения $T_{ад}$.

Поскольку принято, что продуктами сгорания являются только CO_2 и H_2O , то вычисляется среднее значение теплоемкостей этих двух веществ с учетом массового соотношения между собой. Количества образовавшихся продуктов полного сгорания равны (по п. 3.1):

– CO_2 : n кмоль = 40 кмоль или $40 \cdot 44 = 1760$ кг;

– H_2O : $0,5m$ кмоль = $0,5 \cdot 96$ кмоль = 48 моль или $48 \cdot 18 = 864$ кг;

– SO_2 : k кмоль = 1 кмоль или $1 \cdot 64 = 64$ кг;

– общее количество продуктов сгорания: $1760 + 864 + 64 = 2688$ кг.

При этом доля CO_2 составляет $1760/2688 = 0,654$;

– доля H_2O – $864/2688 = 0,321$;

– доля SO_2 – $64/2688 = 0,024$.

Значение $c_{p \text{ проп}}$ пропорционально количеству продуктов сгорания:

$$c_{p \text{ проп}} = c_p (CO_2) 0,654 + c_p (H_2O) 0,321 + c_p (SO_2) 0,024. \quad (3.17)$$

Наиболее вероятный диапазон значений $T_{ад}$ – это от 1500 до 2500 К. Согласно [8] для указанных продуктов сгорания в диапазоне $T_{ад}$ от 1500 до 3000 °С значения теплоемкостей соответствующих веществ равны:

$$- \text{ для } \text{CO}_2 \text{ и } \text{SO}_2 \quad \mu c_p = 48,202 + 0,003184 t, \quad (3.18)$$

$$- \text{ для } \text{H}_2\text{O} \quad \mu c_p = 35,549 + 0,003909 t. \quad (3.19)$$

Наличие величины μ указывает на то, что теплоемкость дана в расчете на мольную концентрацию вещества (моль или кмоль). Поскольку вычисления ведутся в расчете на массовую концентрацию вещества (кг), то при вычислении необходимо результат делить на молекулярный вес соответствующего вещества: на 44 для CO_2 , на 18 для H_2O и на 64 для SO_2 .

Зададимся допустимой погрешностью расчета $\Delta T_{\text{ад}} = \pm 5$ градусов. Для $\Delta T_{\text{ад}}$ единицы измерения значения не имеют ($^{\circ}\text{C}$ или K), однако единица измерения абсолютного значения $T_{\text{ад}}$ получается в градусах Кельвина (K), в связи с чем значение T_0 в формуле 3.14 также дается в градусах Кельвина. В противном случае к одной и той же величине $Q_{\text{см}}/c_p$ могут быть прибавлены числа, различающиеся более чем на 200 единиц. Например, если $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$, то $T_0 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$. Соответственно итоговое значение $T_{\text{ад}}$ может быть определено с фактической погрешностью в 273 градуса. Данные расчета $T_{\text{ад}}$ приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Расчет адиабатической температуры горения $T_{\text{ад}}$

Шаг расчета	I	II	III	IV
$T_{\text{ад}}$ (задание), K	1500	1932	1880	1886
$c_p \text{ CO}_2$, $\text{кДж}/(\text{кг K})$	1,2040	1,2353	1,2315	1,2320
$c_p \text{ H}_2\text{O}$, $\text{кДж}/(\text{кг K})$	2,3007	2,3945	2,3832	2,3845
$c_p \text{ SO}_2$, $\text{кДж}/(\text{кг K})$	0,8278	0,8493	0,8467	0,8470
$c_p \text{ проп.}$, $\text{кДж}/(\text{кг K})$	1,5476	1,5987	1,5926	1,5933
$T_{\text{ад}}$ (расчет), K	1932	1880	1886	1885
$\Delta T_{\text{ад}}$ (расчет), K	-432	52	-6	1

Таким образом, значение адиабатической температуры горения топлива эмпирической формулы $\text{C}_{40}\text{H}_{96}\text{O}_2\text{S}$ составляет $T_{\text{ад}} = 1885 \text{ K}$ с погрешностью $\Delta T_{\text{ад}} = 1 \text{ K}$. Значение $T_{\text{ад}}$ получено на четвертом шаге итерации.

Примечания:

1. Поскольку для большинства топлив содержание как серы, так и азота не превышает 1 %, то при расчете химической формулы и теплотворности топлива, и топливовоздушной смеси их можно не учитывать, что позволит упростить расчеты.

2. При содержании кислорода в молекуле топлива менее 1 % его можно не учитывать при расчетах эмпирической формулы топлива и стехиометрических коэффициентов, что также позволит упростить расчеты.

3. Каждый процент азота, содержащийся в топливе, снижает его теплоту сгорания приблизительно на 1 %, серы – также на 1 %, кислорода – на 1,32 % [18].

§ 3.6. Расчет термохимических показателей топлива, содержащего свободную воду

1. Постановка задачи.

1.1. Дано:

– дизельное топливо состава C_nH_m ;

– относительное содержание элементов W_i топлива, % масс.

(единица измерения – кг/кг):

углерод С – 87,0,

водород Н – 13,0,

кислород О – 0,0,

сера S – 0,0;

– количество свободной воды – 10 % по массе от общего количества;

– общее количество топлива $G_T = 8$ кг;

– внешние условия:

– температура среды $t_0 = 20$ °С;

– давление среды $B_0 = 760$ мм рт.ст.

1.2. Найти:

– эмпирическую формулу топлива (индексы n и m при элементах С и Н соответственно);

– массовое соотношение углерод / водород (С/Н);

- низшую теплоту сгорания топлива Q_u , кДж/кг;
- стехиометрический коэффициент по кислороду l_o , кг/кг;
- стехиометрический коэффициент по воздуху $l_{ок}$, кг/кг;
- низшую теплоту сгорания стехиометрической смеси топлива с воздухом $Q_{u см}$, кДж/кг;
- общее тепловыделение всего количества стехиометрической смеси топлива с воздухом $H_{см}$, кДж;
- адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси $T_{ад}$, К.

2. Расчет условного состава топлива.

2.1. Эмпирическая формула топлива находится согласно § 3.5. Результаты расчета приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Определение химической формулы топлива

Элемент	Молекулярный вес μ_i , кг/кмоль	Массовая доля W_i	W_i / μ_i	Условное значение индекса
С	12	0,87	0,0725	1,0
Н	1	0,13	0,13	1,79

Таким образом:

- значения индексов: $n = 1$, $m = 1,79$;
- эмпирическая формула топлива $C_1H_{1,79}$.

Согласно § 3.5 соотношение С/Н составляет: $n/m = 1/1,79 = 0,56$ моль/моль (в мольных долях) или $n\mu_C/m\mu_H = (1 \cdot 12)/(1,79 \cdot 1) = 6,7$ кг/кг (в массовых единицах).

3. Расчет низшей теплоты сгорания топлива Q_n .

Низшая теплота сгорания топлива находится в соответствии с пояснениями § 3.5, но при этом необходимо учесть, в топливе находится свободная вода, которая на свое испарение потребует определенное количество тепла. Результаты расчета приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

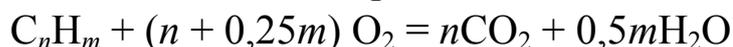
Расчет теплоты сгорания топлива

Элемент, индекс	Молекулярный вес μ_i , кг/кмоль	Условное значение индекса	W_i , % масс.	Удельная теплота сгорания, кДж/кг	Удельное теплопоглощение, кДж/кг	Итоговый тепловой эффект, кДж/кг
C, n	12	1,00	78,30	339,39	–	26574,24
H, m	1	1,79	11,70	1030,74	– 226,26	9412,42
H ₂ O (свободная вода)	18	–	10,00	–	– 335,2	– 3352
Сумма	–	–	100,00	1479,07	– 670,4	35986,65

Таким образом, итоговое тепловыделение, учитывающее тепловыделение и теплопоглощение при сгорании по каждому элементу топлива, а также теплотери на испарение свободной воды, в расчете на единицу массы топлива составляет $Q_H = 35986,65$ кДж/кг $\sim 35,99$ МДж/кг.

4. Стехиометрические коэффициенты.

В соответствии с выражением



находим коэффициенты при O₂, CO₂ и H₂O:

- эмпирическая формула топлива C₁H_{1,79};
- индексы соответственно равны: $n = 1$, $m = 1,79$;
- коэффициент при O₂: $n + 0,25m = 1 + 0,25 \cdot 1,79 = 1,448$;
- коэффициент при CO₂: $n = 1$;
- коэффициент при H₂O: $0,5m = 0,5 \cdot 1,85 = 0,897$.

Таким образом, для полного сгорания 1 кмоль топлива условного состава C₁H_{1,79} необходимо 1,448 кмоль O₂; при этом образуется 1 кмоль CO₂ и 0,897 кмоль H₂O (последнее – без учета свободной воды). Или, переходя к единице измерения – килограмм и учитывая молекулярные веса элементов, получим, что для полного сгорания $12 \cdot 1 + 1 \cdot 1,79 = 13,79$ кг топлива условного состава C₁H_{1,79} необходимо $1,448 \cdot 16 \cdot 2 = 46,34$ кг O₂; при этом образуется $1(12 + 16 \cdot 2) =$

= 44 кг CO₂ и 0,897 (1 · 2 + 16) = 16,14 кг H₂O (последнее – без учета свободной воды).

Исходя из полученных данных, находим стехиометрический коэффициент по кислороду из условия: если для сгорания 13,79 кг (или 1 кмоль) топлива C₁H_{1,79} необходимо 46,34 кг (или 6 кмоль) O₂, то для сгорания 1 кг топлива C₁H_{1,79} необходимо 46,34/13,79 = 3,36 кг O₂. Учитывая, что массовое содержание кислорода в воздухе 23,2 %, то для сгорания 1 кг топлива C₁H_{1,79} необходимо 3,36/0,232 = 14,48 кг воздуха. Но поскольку нам задана фактически водотопливная смесь из 10 % воды (которая не горит и соответственно не потребляет кислород) и 90 % топлива, то в пересчете на 1 кг смеси топлива и свободной воды стехиометрический коэффициент по кислороду составит 3,36 · 0,9 = 3,02, а по воздуху – 14,48 · 0,9 = 13,03.

5. Сгорание стехиометрической смеси.

5.1. Теплота сгорания смеси топлива и свободной воды с воздухом $Q_{см}$ (в общем случае – с окислителем) находится согласно пояснениям § 3.5.

$$Q_{см} = 35,97 / (1 + 1 \cdot 13,03) = 2,56 \text{ МДж/кг.}$$

Поскольку общее количество топлива и свободной воды составляет $M_T = 8$ кг, то общее тепловыделение в данном случае

$$H_{см} = 2,56 \cdot 8 = 20,48 \text{ МДж.}$$

5.2. Адиабатическая температура горения $T_{ад}$ находится согласно уравнению 3.14:

$$T_{ад} = T_o + H_{см}/c_p.$$

Расчет теплоемкости паров воды производится с учетом их образования как вследствие сгорания водорода топлива, так и испарения свободной воды.

Результаты расчета $T_{ад}$ приведены в табл. 3.6.

Таким образом, значение адиабатической температуры горения смеси топлива состава C₁H_{1,79} (90 % по массе) и свободной воды (10 %) составляет $T_{ад} = 1417$ К с погрешностью $\Delta T_{ад} = 4$ К. Значение $T_{ад}$ получено на третьем шаге итерации.

Таблица 3.6

Расчет адиабатической температуры горения $T_{ад}$

Шаг расчета	I	II	III
$T_{ад}$ (задание), К	1800	1379	1421
c_p CO ₂ , кДж/(кг К)	1,2258	1,1953	1,2315
c_p H ₂ O, кДж/(кг К)	2,3658	2,2744	2,3832
c_p проп., кДж/(кг К)	2,1394	2,0601	1,5926
$T_{ад}$ (расчет), К	1379	1421	1417
$\Delta T_{ад}$ (расчет), К	421	- 42	4

§ 3.7. Концентрационные пределы воспламенения газа

Концентрационные пределы воспламенения сложных газовых смесей (нижний $V_{см.н}$ и верхний $V_{см.в}$) зависят от содержания в смеси каждого из индивидуальных газов:

$$V_{см} = 100 / (x/b_x + y/b_y + z/b_z + \dots + n/b_n), \quad (3.20)$$

где x, y, z, \dots, n – содержание индивидуальных газов в топливовоздушной смеси (в процентах объемных), а $b_x, b_y, b_z, \dots, b_n$ – верхний и нижние пределы воспламенения индивидуальных газов (в процентах объемных согласно табл. П12).

По данным о нижнем $V_{см.н}$ и верхнем $V_{см.в}$ концентрационном пределах возможно определение соответствующих им значений максимального α_{max} и минимального α_{min} коэффициентов избытка воздуха на основании определения концентрации топлива для стехиометрических условий горения (т.е. для $\alpha = 1$). И, наоборот, если известны значения α_{max} и α_{min} , то можно рассчитать соответствующие значения $V_{см.н}$ и $V_{см.в}$.

Пример 14

Дано:

Природный газ следующего состава:
метан – 93,9 % об., этан – 2,3 % об.,
пропан – 0,7 % об., бутан – 0,5 % об.,
пентан – 0,5 % об. Окислитель – чистый воздух.

Найти:

Определить нижний и верхний концентрационные пределы воспламеняемости газа.

Решение:

1) нижний предел воспламеняемости природного газа (из табл. П12 берем данные по нижнему пределу воспламеняемости каждого из индивидуальных газов: метана, этана, пропана, бутана и пентана):

$$V_{\text{см.н}} = 100/(9,39/5 + 2,3/3 + 0,7/2 + 0,5/1,7 + 0,5/1,35) = 4,8 \%;$$

2) верхний предел воспламеняемости природного газа (из табл. П12 берем данные по верхнему пределу воспламеняемости каждого из индивидуальных газов):

$$V_{\text{см.в}} = 100/(9,39/15 + 2,3/12,5 + 0,7/9,5 + 0,5/8,5 + 0,5/8) = 15,0 \%.$$

Ответ: воспламенение природного газа заданного состава в смеси с воздухом (в котором кислорода 20,9 % по объему) возможно при концентрации газа в топливовоздушной смеси не менее 4,8 % и не более 15,0 % по объему.

Пример 15

Дано:

Оксид углерода
СО.

Найти:

Коэффициенты избытка воздуха, соответствующие нижнему и верхнему концентрационным пределам воспламеняемости газа в воздухе.

Решение:

1) условие горения оксида углерода СО:



Это означает, что для сгорания 2 м³ СО необходим 1 м³ О₂. Поскольку кислорода в воздухе 20,9 %, т.е. необходимый объем воздуха должен быть в $100/20,9 = 4,78$ раз больше необходимого объема кислорода. Таким образом, стехиометрическая смесь СО и воздуха занимает объем $2 + 1 \cdot 4,78 = 6,78$ м³;

2) объемная доля СО в стехиометрической смеси с воздухом

$$2/6,78 = 0,295 \text{ или } 29,5 \% \text{ об.}$$

Из табл. П12: для СО $V_{\text{см.н}} = 12,5 \%$, а $V_{\text{см.в}} = 74,0 \%$.

Отсюда $\alpha_{\text{max}} = 29,5/12,5 = 2,36$ и $\alpha_{\text{min}} = 29,5/74,0 = 0,4$.

Ответ: нижний и верхний концентрационные пределы воспламеняемости оксида углерода в воздухе равны 2,36 и 0,4 % соответственно.

Контрольные задачи к разделу 3.7. Требуется найти: нижний и верхний концентрационные пределы воспламеняемости газа или паров топлива в воздухе и соответствующие им значения максимальных и минимальных коэффициентов избытка воздуха.

Задача 16

Дано:

Газ следующего состава:

метан – 80 % об., этан – 10 % об., пропан – 5 % об., бутан – 2,5 % об.,
пентан – 2,5 % об.

Задача 17

Дано:

Пары ацетона (15,0 %) и этилового спирта (85,0 %).

Задача 18

Дано:

Газ следующего состава:

Водород – 50 %, оксид углерода – 50 %.

Задача 19

Дано:

Бензин – 80 %, метиловый спирт – 10 %, сероводород – 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вещества, которые могут быть использованы в качестве топлив, разнообразны по своим физическим и химическим характеристикам, по происхождению, способам использования и др. Но несмотря на их разнообразие, общим является то, что они – источники тепловой энергии, которая, в свою очередь, может быть преобразована в механическую и электрическую энергии.

Эффективность энергетических установок на базе тепловых машин зависит от многих факторов: теплотворности топливовоздушной смеси, затрат на добычу и доставку топлива к потребителю, зависимости от источников распределения топлива (т.е. уровня автономности), запасов топлива. Поэтому, хотя термохимические характеристики топлива и являются отправной точкой при расчетах изменения эффективности тепловых машин, следует учитывать и остальные факторы.

Также не следует забывать о других способах получения энергии: тепловых и водяных мельницах, геотермальных источниках, солнечных батареях – это неисчерпаемые и экологически чистые источники. Так, например, Дания при помощи ветра получает свыше 20 % электроэнергии, Испания – 10 %, Германия – 8 %. В 2007 г. наибольшее число ветряных установок внедрила США – они увеличили свой парк ветряных электростанций на 45 %, или на 5,2 ГВт, второе место заняла Испания (3,5 ГВт), третье – Китай (3,4 ГВт); европейские страны, генерирующие 61 % мировой ветряной энергии, увеличили показатель на 17 % (8,5 ГВт). Швеция за последние 35 лет увеличив потребление энергии на 35 %, сократила потребление нефтепродуктов на 47 % за счет увеличения производства энергии из биомассы на 60 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВ

Таблица П1

Физические свойства прессованного биотоплива [10]

Продукция	Диаметр, мм	Теплотворная способность, кВт/кг	Влажность, %	Содержание золы, %	Плотность насыпом, кг/м ³
Гранулы промышленные	Максимальный 25	4,5... 4,7	Менее 12	1,5	Более 500
Гранулы 1-й класс	6...12	4,9...5,1	» 10	Менее 0,7	» 600
Брикеты топливные	Более 70	4,5...4,8	» 12	0,2	» 600

Таблица П2

**Средний состав и теплотворность рабочей массы торфа, углей, антрацита и сланцев
некоторых месторождений [18]**

Топливо или бассейн	W^p	C^p	H^p	S^p	O^p	N^p	A^p	$Q_{нт}$, кДж/кг
Торф								
Торф (влажность и зола 0 %)	0	57,8	6,0	0,3	33,4	2,5	0,0	21950
Торф (влажность 0 %)	0	51,5	5,4	0,2	29,7	2,2	11,0	19520
Торф (влажность 10 %)	10	46,3	4,8	0,2	26,8	2,0	9,9	17300
Торф (влажность 20 %)	20	41,1	4,3	0,2	23,8	1,8	8,7	15120
Торф (влажность 30 %)	30	36,0	3,8	0,2	20,8	1,5	7,7	12900
Торф (влажность 40 %)	40	30,9	3,2	0,2	17,8	1,3	6,6	10720
Торф (влажность 50 %)	50	25,7	2,7	0,1	14,9	1,1	5,5	8500
Бурые угли марки Б2 (содержание влаги 30...40 %)								
Подмосковный	33,0	29,5	2,3	2,5	9,1	0,6	23,0	10720
Читинская область	34,0	43,5	2,9	0,4	10,5	0,7	8,0	15900
Хабаровский край	39,0	37,5	2,2	0,3	12,5	0,5	8,0	12550
Приморский край	37,0	26,9	2,3	0,3	10,8	0,7	22,0	9000
Узбекистан	36,0	41,1	2,4	0,7	9,1	0,2	10,0	14150
Бурые угли марки Б3 (содержание влаги менее 30 %)								
Челябинский	17,0	39,1	2,8	1,5	10,6	1,0	28,0	14660
Свердловская область	23,0	33,0	2,5	0,2	13,9	0,4	27,0	11730
Иркутская область	22,0	50,0	3,6	0,4	13,0	1,0	10,0	18850
Бурятский	23,0	48,0	3,2	0,6	11,5	0,7	13,0	18000

Окончание табл. П2

Топливо или бассейн	W ^p	C ^p	H ^p	S ^p	O ^p	N ^p	A ^p	Q _{нз} , кДж/кг
Бурые угли марки БЗ (содержание влаги менее 30 %)								
Сахалинский	20,0	49,0	3,8	0,3	14,0	0,9	14,0	18640
Каменные угли								
Донецкий	13,0	54,0	3,9	3,5	9,0	1,1	15,5	21700
Печорский (Итинское месторождение)	11,0	47,4	3,2	2,3	9,8	1,3	25,0	18430
Печорский (Воркутинское месторождение)	5,0	65,8	4,1	0,8	4,5	1,8	18,0	25550
Кузнецкий	11,0	63,6	4,5	0,4	10,7	1,8	8,0	25140
Красноярский край	14,0	59,5	4,1	0,5	9,7	1,2	11,0	23040
Антрацит (Донецкий бассейн)								
Марки АП и АК	4,0	85,0	1,6	1,7	1,1	0,9	5,7	30350
Марки АМ и АС	5,0	76,4	1,5	1,7	1,3	0,8	13,3	27230
Марка АРШ	6,0	71,8	1,4	1,7	1,4	0,8	16,9	25550
Марка АШ	7,0	70,5	1,4	1,7	1,9	0,8	16,7	25100
Горючие сланцы								
Ленинградский	12,0	20,7	2,7	1,4	3,1	0,1	46	9400
Куйбышевская область	17,0	13,4	1,7	3,2	3,5	0,2	51	5750
Саратовская область	21,0	14,6	1,9	2,5	4,6	0,4	50	6150
Эстонский	13,0	25,2	3,2	1,7	3,8	0,1	39	11500

Примечание. Обозначения: С, Н, S, O, N и А – содержание углерода, водорода, серы, кислорода и азота, а также золы; индекс “р” означает отнесение содержания составляющих к рабочей массе; марки антрацита: АП – плитный, АК – крупный, АМ – мелкий, АС – семечко, АРШ – рядовой штыб, АШ – штыб.

Таблица ПЗ

Физико-химические свойства безсвинцовистой высокооктановой присадки к бензинам

Параметр	Высший сорт	Марка А	Марка Б	Марка В – сырец
Внешний вид		Бесцветная прозрачная жидкость		
Массовая доля МТБЭ, % не менее	95	85	70	50
Массовая доля метанола, % не менее	5	5	5	10
Массовая доля углеводородов C ₄ , % не менее	5	5	5	10
Массовая доля воды, % не менее	0,5	0,5	0,5	1,0
Механические примеси	–	–	–	–
Октановое число смешения по исследовательскому методу, не менее	110	110	110	110

Таблица П4

Присадки спиртов к бензинам с учетом коррозионного воздействия на двигатель [12]

Присадка	Максимальное количество присадки
Метиловый спирт	3,0
Этиловый спирт	5,0
Изопропанол	5,0...10,0
Трехрядный бутанол	7,0
Изобутанол	7,0...10,0
Эфиры	10,0...15,0
Другие моноспирты	7,0...10,0

Таблица П5

Физико-химические показатели жидких топлив [3, 12, 17, 18]

Параметры и единицы измерения	Товарная нефть	Дизельное	Бензин	Метанол	Этанол	Диметил-эфир	Сжиженный газ
Эмпирическая формула	$C_{48}H_{65}S_{1,1}O_{3,2}$	$C_{13}H_{24}$	$C_{13}H_{23,5}$	CH_3OH	C_2H_5OH	C_2H_5OH	$C_3H_8 + C_4H_{10}$
Молекулярная масса	450...920	200...300	120...180	32	46	46	47
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,76...1,35	0,82...0,86	0,74...0,76	0,791	0,81	668	0,52
Вязкость при 20 °С, °ВУ	1,0...5,0	2,0...8,0	1,05...1,50	0,55	1,76	0,13	0,20
Средний элементный состав, %:							
– углерод	86...89	87	85,0	37,5	52,2	52,2	82,3
– водород	11...14	12,6	15,0	12,5	13,0	13	17,7
– кислород	0,1...1,9	0,0035	–	50,0	34,8	34,8	–
– азот	0,02...1,7	–	–	–	–	–	–
– сера	0,01...5,5	0,0005	0,00003	–	–	–	–
Теплотворность топлива, МДж/кг	42,6...42,8	40,2...42,9	43,3...44,0	19,7	25,9	28,8	45,2
Теплотворность стехиометрической смеси с воздухом, МДж/м ³	–	3,5...3,8	3,4...3,9	3,2...3,9	3,85	3,53	3,56
Теплота парообразования, кДж/кг	–	250...270	330	1104	850	410	–
Стехиометрический коэффициент, кг/кг	–	14,5	14,9	6,52	9	9	10,2
Октановое число (исследовательский метод)	–	3...5	80...100	106...135	108	–	90...100
Цетановое число	–	45...58	3...14	3...5	8	70	20

Таблица П6

Показатели масел и эфиров масел [12, 14]

Показатели	Подсолнечное масло	Арахисовое масло	Рапсовое масло	Соевое масло	Метилэфир рапсового масла	Метилэфир соевого масла
Эмпирическая формула	–	–	$C_{57}H_{101}O_6$	–	$C_{19}H_{35}O_2$	–
Молекулярная масса	–	–	883	–	296	–
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,923	0,917	0,620	0,923	0,86...0,89	0,884
Вязкость кинематическая, мм ² /с:						
- при 20 °С	65,2	81,5	–	–	6,0...8,0	–
- при 40 °С	30,7	36,5	34,4	31,2	2,47	4,08
- при 100 °С	7,44	8,32	–	–	–	–
Цетановое число	33,4	36,6	40	27	54	46
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	36,98	37,02	36,70	37,00	37,02	–
Содержание серы, % масс.	0,05	–	0,007	0,005...0,01	0,005	0,005...0,01
Температура, °С:						
– застывания	–23	–	–20	–12	–21	–1
– помутнения	–6,7	3,3	–	–	–	–
– вспышки	–	–	202	220	71	141
Стехиометрический коэффициент, кг/кг	–	–	12,43	12,7	13,02	–
Продуктивность, литров масла с 1 га в 1 год*	1020	(пальмовое) 6350	1270	480	–	–

* – продуктивность зерновых культур – 180, микроводорослей – 50000...150000 л/(га·год).

Таблица П7

Характеристика биотоплива

Параметр	Коммерческое биотопливо на основе рапсового метилэфира	Стандарт на биотопливо (UNI 10946)
Метилэфир, % масс.	98,24	Более 96,5
Плотность при 15 °С, кг/м ³	883	860...900
Вязкость при 40 °С, мм ² /с	4,5	3,5...5,0
Температура воспламенения, °С	Более 120	Не менее 120
Сера, мг/кг	Менее 10	Не более 10
Углеродный остаток по Конрадсону, % масс.	0,15	» 0,3
Цетановое число	53	Не менее 51
Золы, % масс.	0,01	Не более 0,02
Воды, мг/кг	312	» 500
Кислотность, мг КОН/г	0,49	» 0,5
Йодное число, г I ₂ /100 г	115	Более 120
Метилэфир линоленовой кислоты, % масс.	9,2	» 12,0
Метанол, мг/кг	1100	Не более 2000
Предельный глицерин, % масс.:		
– моноглицерид	0,49	» 0,8
– диглицерид	0,17	» 0,2
– триглицерин	0,09	» 0,2
– свободный глицерин, мг/кг	100	» 200
Давление насыщенных паров, дин/см	23,75	–

Таблица П8

Средний состав газов, получаемых из разных топлив (процент объемный) [1]

Топливо	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C _n H _m	H ₂ S	Теплотворность Q _н , ккал/м ³
Генераторный газ									
Дерево	–	54	17	28	1	–	–	–	800
Торф	–	63	14	22	1	–	–	–	850
Бурый уголь	–	60	5	25	7	3	–	–	900
Каменный уголь	–	63	5	24	7	1	–	–	950
Кокс	–	69	4	26	1	–	–	–	1000
Древесный уголь	–	65	1	34	–	–	–	–	1000
Сухой смешанный газ									
Дерево	0,2	46,9	6,5	29,0	14,0	3,0	0,4	–	1560
Торф	0,2	45,3	8,0	28,0	15,0	3,0	0,4	0,06	1560
Бурый уголь	0,2	50,4	5,0	30,0	13,0	2,0	0,2	0,2	1460
Антрацит	0,2	52,6	5,5	27,5	13,5	0,5	–	0,17	1230
Водяной газ									
Бурый уголь	0,2	3,8	14,5	23,8	50,0	6,9	0,6	0,2	2640
Каменный уголь	0,2	4,8	7,5	32,0	49,6	4,7	0,9	0,3	2810
Антрацит	0,2	6,4	6,0	38,5	48,0	0,5	–	0,4	2,480
Кокс	0,2	5,5	6,5	37,0	50,0	0,5	–	0,3	2500
Промышленные газы									
Крекинг-газ	–	–	–	0,5	–	30,5	63,0	6,0	15500
Канализационный газ	0,5	0,5	31,0	–	–	68,0	–	–	5800

Таблица П9

Характеристики некоторых углеводородов, водорода и аммиака [2, 3, 14]

Наименование	Химическая формула	Молекулярная масса, г/моль	Плотность жидкой фазы, кг/м ³	Относительная плотность по воздуху	Октановое число (моторный метод)	Метановое число	Температура кипения, °С	Температура критическая, °С	Теплота сгорания низшая, кДж/м ³	Теплота сгорания низшая стехиометрической смеси, кДж/м ³	Стехиометрический коэффициент, м ³ /кг	Стехиометрический коэффициент, м ³ /м ³	Теплота испарения при температуре кипения, кДж/кг	Теплоемкость, кДж/(кг °С)
Метан	CH ₄	16	416	0,554	110	100	-161	-82	35797	3220	14,2	9,53	511	2,165
Этан	C ₂ H ₆	30	546	1,048	102	44	-88	-32	63748	3400	14,6	16,66	486	1,647
Пропан	C ₃ H ₈	44	585	1,562	100	35	-42	97	91251	3545	15,7	23,80	427	1,550
Бутан	C ₄ H ₁₀	58	600	2,091	90	11	-0,5	152	118645	3580	15,6	30,94	389	1,592
Пентан	C ₅ H ₁₂	72	617	2,448	62	-	36	197	146119	3530	15,35	30,08	357	1,925
Этилен	C ₂ H ₄	28	566	0,975	76	-	-104	9,5	59063	3630	14,4	14,28	481	1,460
Водород	H ₂	2	71	0,0695	70	0	-253	-240	9372	3025	34,5	2,4	-	-
Аммиак	NH ₃	17	-	0,596	-	-	-33	132	13200	-	6,14	3,66	-	-
Ацетилен	C ₂ H ₂	26	-	0,906	-	-	-84	36	54570	-	14,2	12,9	-	-

Таблица П10

Содержание элементов в основных видах топлив (процент по массе) [1, 8]

Топливо	С	Н	О	N	S	Тепловой эквивалент*	
						угольный	нефтяной
Дерево	51,0	6,1	42,3	0,6	0	0,43	0,30
Торф	51,0...58,0	5,5...6,0	29,5...33,5	2,2...2,5	0,2...0,3	0,23...0,73	0,16...0,51
Сланцы	60,0...75,0	7,0...10,0	12,0...17,0	0,3...1,2	4,0...13,0	0,20...0,40	0,14...0,28
Бурый уголь	64,0...78,0	3,8...6,3	15,0...26,0	0,6...1,6	0,3...6,0	0,39...0,49	0,27...0,34
Каменный уголь	75,0...90,0	4,0...6,0	2,0...13,0	1,0...2,7	0,5...6,0	0,82...1,04	0,57...0,73
Антрацит	93,0...94,0	2,0	1,0...2,0	1,0	2,0...3,0	0,86...1,03	0,60...0,72
Дизельное	86,5...87,0	12,6	0,4	0	Не более 0,5	1,53	1,00
Бензин	85,0	15,0	0	0	» 0,15	1,57	1,05
Керосин	85,0...86,0	14,0	0	0	» 1,0	1,43	1,03
Масла растительные	~77,6	~11,5	~10,9	–	–	1,26...1,32	0,88...0,92
Мазут	85,0...88,0	11,0...12,0	До 0,2	Не более 0,3	0,5...2,0	1,4	0,94...0,98
Природный газ	75,0	25,0	0	» 0,3	0	1,71	1,20
Нефтяной газ	82,0	18,0	0	» 0,5	Не более 0,015	1,29	0,90
Ацетилен	92,3	7,7	–	–	–	1,94	1,36

Примечание. Тепловой эквивалент* – отношение низших теплотворностей данного и условного топлива. Теплотворность последнего $7000 \text{ ккал/кг} = 29330 \text{ кДж/кг}$ для угольного эквивалента и $10000 \text{ ккал/кг} = 41900 \text{ кДж/кг}$ – для нефтяного. Для газообразных топлив теплотворность условного топлива – $7000 \text{ ккал/м}^3 = 29330 \text{ кДж/м}^3$.

Таблица П11

Сопоставление термохимических характеристик углеводородов и спиртов [18]

Углеводород	Химическая формула	Н _и углев., ккал/кг	Т _{max} , °С	Спирт соответствующего углеводорода	Химическая формула	Н _и спирт, ккал/кг	Т _{max} , °С	О ₂ , % масс.	Н _и спирт
									Н _и углев.
Метан	СН ₄	11900	2043	Метилловый	СН ₃ ОН	5100	2046	50,0	0,43
Этан	С ₂ Н ₆	11300	2097	Этиловый	С ₂ Н ₅ ОН	6600	2080	34,8	0,58
Пропан	С ₃ Н ₈	11000	2110	Пропиловый	С ₃ Н ₇ ОН	7500	2085	26,7	0,68
Бутан	С ₄ Н ₁₀	10900	2118	Бутиловый	С ₄ Н ₉ ОН	8000	2095	21,3	0,73
Пентан	С ₅ Н ₁₂	10800	2119	Амиловый	С ₅ Н ₁₁ ОН	8500	2100	18,2	0,78
Гексан	С ₆ Н ₁₄	10700	2124	Гексиловый	С ₆ Н ₁₃ ОН	8700	2107	15,7	0,81
Гептан	С ₇ Н ₁₆	10700	2126	Гептиловый	С ₇ Н ₁₅ ОН	8900	2112	13,8	0,83
Октан	С ₈ Н ₁₈	10700	2128	Октиловый	С ₈ Н ₁₇ ОН	9100	2113	12,3	0,85
Нонан	С ₉ Н ₂₀	10700	2128	Нониловый	С ₉ Н ₁₉ ОН	9200	2116	11,1	0,86

Таблица П12

**Пределы воспламенения газов и паров топлива в смеси с воздухом
(при температуре воздуха 20 °С и давлении 0,1 МПа) [8, 17, 18]**

Газ	Предел воспламенения (содержание газа в смеси с воздухом), %		Газ	Предел воспламенения (содержание газа в смеси с воздухом), %	
	нижний	верхний		нижний	верхний
Водород Н ₂	4,0 (10,1)*	75,0 (0,14)	Ацетилен С ₂ Н ₂	2,3 (3,3)	82,0 (0,02)
Окись углерода СО	12,5 (2,4)	74,0 (0,4)	Сероводород Н ₂ С	4,3 (2,21)	45,0 (0,21)
Метан СН ₄	5,0 (1,99)	15,0 (0,59)	Нефтепромысловый газ	4,0	14,0
Этан С ₂ Н ₆	3,0 (1,93)	14,0 (0,42)	Природный газ	5,0	15,0
Пропан С ₃ Н ₈	2,0 (1,86)	9,5 (0,4)	Коксовый газ	5,0	31,0
Бутан С ₄ Н ₁₀	1,7 (1,66)	8,5 (0,35)	Водяной карбюрированный газ	6,0	38,0
Этилен С ₂ Н ₄	3,0 (2,17)	33,3 (0,15)	Водяной газ	6,0	70,0
Пропилен С ₃ Н ₆	2,2 (1,89)	9,7 (0,38)	Генераторный газ	35,0	75,0
Бутилен С ₄ Н ₈	1,7 (1,71)	9,0 (0,33)	Доменный газ	40,0	65,0
Бензол С ₆ Н ₆	1,4 (1,96)	7,1 (0,37)	Метилловый спирт СН ₃ ОН	6,7 (1,95)	36,0 (0,25)
Толуол С ₇ Н ₈	1,3 (1,77)	6,7 (0,32)	Этиловый спирт С ₂ Н ₅ ОН	3,3 (2,03)	19,0 (0,3)
Бензин	1,5 (1,18)*	6,0 (0,29)*	Бутиловый спирт С ₄ Н ₉ ОН	1,4 (2,46)	11,2 (0,28)

Примечание. * – в скобках указаны значения коэффициента избытка воздуха: максимальное (соответствующее нижнему пределу воспламенения) и минимальное (соответствующее верхнему пределу воспламенения); для сложных газов эти коэффициенты зависят от их конкретного состава.

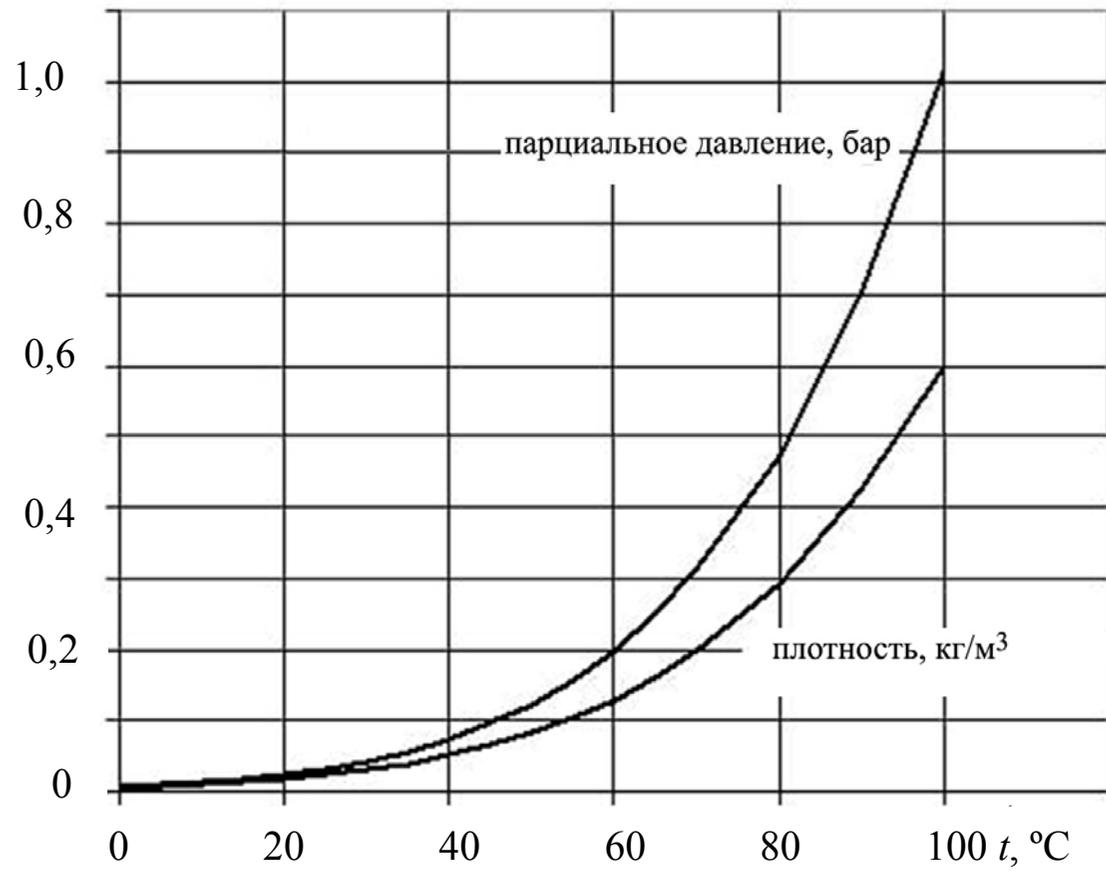


Рис. П1. Зависимость парциального давления и плотности насыщенного водяного пара от температуры воздуха t [15]

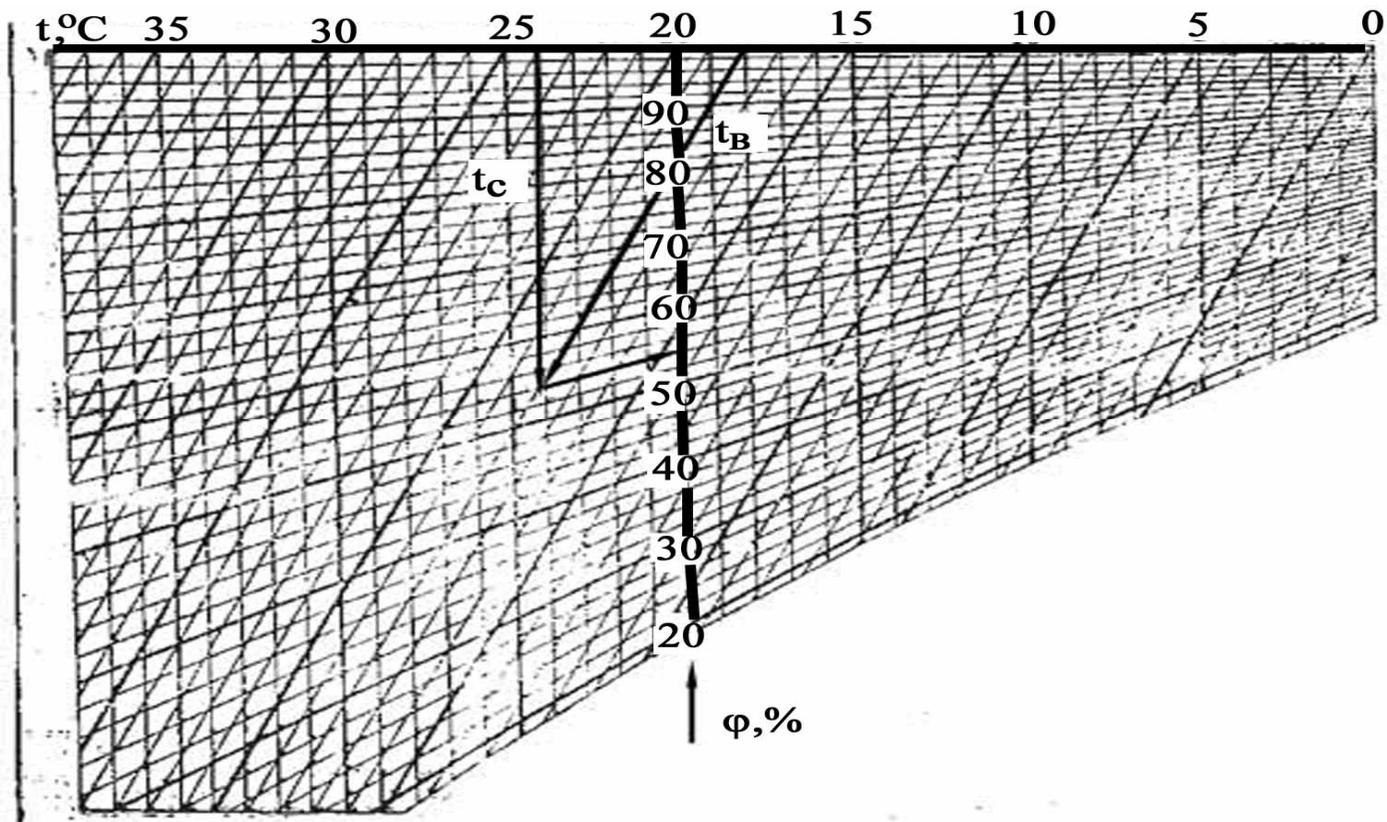


Рис. П2. Психрометрический график.

Обозначения: горизонтальная шкала – шкала температур воздуха t , $^\circ\text{C}$; вертикальная шкала – шкала относительной влажности воздуха φ , %; вертикальная стрелка – температура сухого воздуха, наклонная стрелка – температура влажного воздуха, горизонтальная стрелка – относительная влажность воздуха

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Вильямс, В.Р.** Топливо, смазочные материалы и вода / В.Р. Вильямс. – М. : Изд-во с.-х. лит., 1951. – 496 с.
2. **Воликов, А.Н.** Сжигание газового и жидкого топлива в котлах малой мощности / А.Н. Воликов. – Л. : Недра, 1989. – 160 с.
3. **Генкин, К.И.** Газовые двигатели / К.И. Генкин. – М. : Машиностроение, 1977. – 196 с.
4. **Гладков, О.А.** Создание малотоксичных дизелей речных судов / О.А. Гладков, Е.Ю. Лерман. – Л. : Судостроение, 1990. – 112 с. – ISBN 5-7355-0186-0.
5. **Гусаков, С.В.** Физико-химические основы процессов смесеобразования и сгорания в ДВС. Основы теории горения / С.В. Гусаков. – М. : Изд-во РУДН, 2001. – 134 с. – ISBN 5-209-01353-7.
6. **Гусаков, С.В.** Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания / С. В.Гусаков, Н.Н. Патрахальцев. – М. : Изд-во РУДН, 2004. – 167 с. – ISBN 5-209-01670-6.
7. **Гурвич, А.М.** Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения / А.М. Гурвич, Ю.Х. Шаулов. – М. : Изд-во МГУ, 1955. – 168 с.
8. **Дубовкин, Н.Ф.** Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания / Н.Ф. Дубовкин. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
9. **Квасничкова, Д.** Схемы по экологии и методическая разработка к ним / Д. Квасничкова, В. Калина. – М. : Изд-во “Устойчивый мир”, 2001. – 78 с. – ISBN 5-93177-011-9.
10. Котельные на биотопливе : справочник. – СПб., 2006. – 152 с. – ISBN 5-902978-03-3.
11. **Кульчицкий, А.Р.** Токсичность автомобильных и тракторных двигателей / А.Р. Кульчицкий. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Академический проект, 2004. – 400 с. – ISBN 5-8291-0387-7.
12. **Льотко, В.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Льотко, С.А. Хачиян, В.Н. Луканин. – М. :

Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 312 с. – ISBN 5-7962-0011-9.

13. **Мани, Л.** Транспорт, энергетика и будущее / Л. Мани ; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 160 с.

14. **Марков, В.А.** Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 376 с. – ISBN 5-7038-1993-8.

15. **Нащокин, В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М. : Высш. шк., 1975. – 496 с.

16. Неудержимый порыв биоэнергетики : Отраслевой обзор // Новое сельское хозяйство: специал. вып. “Биоэнергетика”. – 2007. – 34 с. – ISBN 1993-8756.

17. **Трушин, В.М.** Газовое оборудование и арматура для газобаллонных автомобилей / В.М. Трушин. – Л. : Недра, 1990. – 151 с.

18. **Равич, М.Б.** Эффективность использования топлива / М.Б. Равич. – М. : Наука, 1977. – 344 с.

19. **Розен, Б.Я.** Соперники нефти и бензина / Б.Я. Розен. – М. : Недра, 1985. – 112 с.

20. **Смаль, В.Ф.** Перспективные топлива для автомобилей / В.Ф. Смаль, Е.Е. Арсенов. – М. : Транспорт, 1979. – 152 с.

21. Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

22. **Фомин, В.М.** Водородная энергетика автомобильного транспорта / В.М. Фомин. – М. : Изд-во РУДН, 2006. – 334 с. – ISBN 5-209-00761-8.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Общие понятия

Вредные вещества	— вещества, содержание которых в атмосфере и/или в рабочей зоне регламентируется санитарно-гигиеническими нормативами
Возгонка	— переход из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое
Испарение	— переход из жидкого состояния в газообразное
Конденсация	— переход из газообразного состояния в жидкое
Метановое число (МЧ)	— Характеризует антидетонационные свойства газообразных топлив по сравнению с метаном (для которого МЧ = 100)
Нормальные условия (н.у.)	— понятие относится к состоянию окружающей среды; н.у. соответствуют атмосферному давлению $1 \text{ кг/см}^2 = 735 \text{ мм рт.ст.}$ и температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$
Октановое число (ОЧ)	— характеризует антидетонационные свойства бензина по сравнению с октаном (для которого ОЧ = 100)
Отработавшие газы (ОГ)	— смесь продуктов сгорания топлива с остаточными компонентами окислителя, а также продукты окисления азота (если он входит в состав топлива и/или окислителя) (термин применяется для тепловых двигателей)
Отходящие газы (ОТ)	— то же, что и ОГ (термин применяется для стационарных энергетических установок: котлов, печей)
Продукты сгорания (ПС)	— вещества, образовавшиеся в результате сгорания топлива и окислителя, их смешения с остаточным кислородом и азотом воздуха

Стандартные условия	— показатели состояния окружающей среды, оговоренные каким-либо стандартом: атмосферное давление, температура воздуха, относительная влажность воздуха. Их значения в разных стандартах колеблются в диапазонах: 100,0... 101,3 кПа, 20...25 °С и 36...50 % соответственно
Сублимация	— переход из газообразного состояния в твердое, минуя жидкое
Тепловой двигатель	— машина, преобразующая тепловую энергию топлива в механическую работу
Цетановое число (ЦЧ)	— характеризует склонность дизельного топлива к воспламеняемости по сравнению с цетаном (для которого ЦЧ = 100)
Энергетическая установка	— машина по выработке тепловой, электрической и/или механической энергии за счет преобразования какого-либо вида энергии
A/F	— Air / Fuel Ratio – отношение массовых расходов воздуха и топлива
CIF	— CIF = Cost + Insurance + Freight = стоимость [продукции] + страховка + стоимость перевозки
Grey Market	— вторичный рынок продукции (поставка продукции в другие страны после эксплуатации в первой стране)
LHV	— Lower Heating Value [of Fuel] – низшая теплотворная способность [топлива]
Proved Reserves	— достоверные запасы [топлива]

Единицы измерения

Атмосфера физическая, атм	— 1 атм = 1,0332 ат = 1,0132 бар = 760,0 мм рт.ст.
Атмосфера техническая, ат	— 1 ат = 0,9678 атм = 0,9807 бар = 735,5 мм рт.ст.

Бар	— 1 бар (bar) = $10^5 \text{ Н/м}^2 = 0,1 \text{ МПа} =$ = 0,9869 атм = 1,0197 ат = 750,1 мм рт.ст.
Галлон	— 1 галлон (imperial gallon) = 4,546 л, 1 галлон США (american gallon) = 3,785 л
Градус:	
– Кельвина	— $K = ^\circ\text{C} + 273;$
– Реомюра	— $R = (5/4) ^\circ\text{C};$
– Фаренгейта	— $^\circ\text{F} = 9/5 ^\circ\text{C} + 32$
Калория	— 1 кал = 4,187 Дж = 0,00397 ВТУ
Дюйм	— 1 дюйм = 25,4 мм
Лошадиная сила	— 1 л.с. = 0,7355 кВт = 75 кгм/с; в системе SAE 1 л.с. = 0,7457 кВт
Миля	— 1 сухопутная миля = 1654 м; 1 морская миля = 1852 м; 1 географическая миля = 1° экватора = 1853 м
мм вод.ст. (мм H ₂ O)	— 1 мм H ₂ O = $9,81 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ Па} =$ = 0,0735 мм рт.ст.
мм рт.ст. (мм Hg)	— 1 мм Hg = $133,322 \text{ Н/м}^2 = 13,6 \text{ мм вод.ст.}$
МПа	— 1 МПа = $10,19 \text{ кг/см}^2$
м ³	— кубический метр при нормальных физиче- ских условиях (при н.у.)
Фунт	— 0,454 кг
ВТУ	— British thermo units – британская единица теп- ла; 1 ВТУ = 1,055 кДж
Barrel	— бочка: 1 баррель = 158, 984 л, 1 баррель США = 138,97 л
ppm	— одна миллионная часть числа: $1 \text{ ppm} = 10^{-4} \% = 10^{-6}$

Топливо

Аквазин	— углеводородное топливо (на основе бензина) эмульсионного типа с различным содержа- нием воды
Альтернативное топливо	— топливо, не являющееся традиционным для использования в соответствующей энергоус-

(Alternative Fuel)	тановке; для поршневых двигателей – это любые топлива, кроме дизельного и бензина
Биомасса	— материал биологического происхождения за исключением материала в геологических породах, ставшего ископаемым
Биотопливо	— продукт, получаемый в результате естественной или искусственной переработки биомассы
Биодизель (Biodiesel)	— смесь дизельного и биотоплива
Водяной газ	— смесь водорода и оксида углерода, а также небольшого количества других газов; образуется при пропускании водяного пара над горячими коксом или углем; при воздушном дутье получают воздушный газ, при подаче смеси воздуха и водяного пара – смешанный (полуводяной) газ, при парокислородном дутье – парокислородный газ
Водомазутные эмульсии	— частный случай водотопливных эмульсий
Водотопливные эмульсии (ВТЭ)	— дисперсные системы, состоящие из двух не растворяющихся друг в друге жидкостей
ДТ	— дизельное топливо (продукт переработки нефти)
Дистиллят (Distillate fuel)	— продукт перегонки (дистилляции): нефтяные дистилляты – неочищенные бензин, керосин, соляровое масло
Коксовый газ	— горючий газ, получаемый из ископаемых топлив при их нагревании до 900...1000 °С без доступа воздуха. Основной состав: водород (50...60 %) и метан (24...28 %), а также оксид и диоксид углерода и азот
КПГ (LNG)	— Компримированный (сжиженный) природный газ (Liquefied Petroleum Gas)
Пеллеты	— древесные гранулы цилиндрической формы (форма твердого биотоплива наряду с брикетами)

РФС	— топливо расширенного фракционного состава (получают за счет введения в дизельное топливо более тяжелых и более легких фракций)
Светильный газ	— смесь горючих газов (водорода, болотного газа – метана, оксида углерода, этилена, некоторого количества бензола и других углеводородов), получаемых при сухой перегонке каменного угля, нефтяных остатков, дерева и т.п.
СНГ, СУГ (LPG)	— сжиженный нефтяной (углеводородный) газ (Liquefied Petroleum Gas) – смесь пропана и бутана
Топливо	— вещество, которое при контакте с окислителем может интенсивно гореть с выделением тепла
СПГ (PNG)	— сжатый природный газ (Pure Natural Gas) – состоит более чем на 90 % из метана.
Условное топливо	— топливо с условной низшей теплотворностью 29,4 МДж/кг = 7000 ккал/кг при определении угольного эквивалента и 41,9 МДж/кг = 10000 ккал/кг – нефтяного эквивалента какого-либо топлива
УФС	— топливо утяжеленного фракционного состава (получают за счет введения в дизельное топливо более тяжелых фракций)
ШФС	— топливо широкого фракционного состава (получают за счет введения в дизельное топливо более легких фракций)
Blend	— смесь альтернативного и традиционного топлив
FAME	— Fatty acid methyl ester – метилэфир жирных кислот
Fossil Fuel	— топливо природного происхождения: нефть, уголь, природный газ, биогаз и т.д.

Gasohole	— смесь из 90 % бензина и 10 % этанола
Gasoline	— бензин
Gas oil	— газойль – продукт прямой перегонки нефти, на базе его изготавливают дизельное топливо
RFG	— Reformulated Gasoline – реформулированный бензин, т.е. бензин с измененным химическим составом, в котором увеличено содержание кислорода, уменьшено содержание олефинов, ароматических и высокомолекулярных углеводородов с целью снижения выбросов вредных веществ для выполнения требований стандартов на содержание вредных веществ в отработавших газах
SAE	— Society of American Engineers – общество американских инженеров (США)
Sunfuel	— Топливо (дословно – солнечное топливо), полученное из любых возобновляемых источников, кроме природного газа – метана, пригодное для применения в дизелях
Synfuel	— Топливо (дословно – синтетическое топливо), полученное из природного газа – метана, пригодное для применения в дизелях
ULSD	— Ultra Low Sulfur Diesel Fuel – дизельное топливо с крайне низким содержанием серы (менее 15 ppm)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Виды топлив	6
§ 1.1. Твердые топлива.....	7
§ 1.2. Жидкие топлива.....	13
§ 1.3. Газообразные топлива.....	23
Глава 2. Состав и свойства топлив	28
§ 2.1. Топливо.....	28
§ 2.2. Топливоздушная смесь.....	34
§ 2.3. Пределы воспламенения.....	36
Глава 3. Термохимические показатели топлив	38
§ 3.1. Окисление химических элементов.....	39
§ 3.2. Расчет расхода окислителя и количества образующихся продуктов сгорания.....	41
3.2.1. Состав топлива задан по элементам.....	42
3.2.2. Состав топлива задан как индивидуальное вещество.....	45
§ 3.3. Расчет теплоты сгорания.....	51
§ 3.4. Расчет адиабатической температуры горения.....	59
§ 3.5. Расчет термохимических показателей топлива произвольного состава.....	61
§ 3.6. Расчет термохимических показателей топлива, содержащего свободную воду.....	68
§ 3.7. Концентрационные пределы воспламенения газа.....	72
Заключение	75
Приложение	76
Библиографический список	91
Условные обозначения и сокращения.	
Основные понятия	93

Учебное издание

КУЛЬЧИЦКИЙ Алексей Рэмович

ТОПЛИВА ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК.
РАСЧЕТ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Подписано в печать 04.09.09.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 5,81. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.