

П.В. Коломиец

# ТОПЛИВО

Учебное пособие по дисциплине «Химмотология»  
для подготовки магистров по направлению  
140500.68 «Энергомашиностроение»,  
магистерская программа 140506  
«Поршневые и комбинированные двигатели»

Тольятти  
ТГУ  
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Автомеханический институт  
Кафедра «Тепловые двигатели»

П.В. Коломиец

# **ТОПЛИВО**

Учебное пособие по дисциплине «Химмотология»  
для подготовки магистров по направлению  
140500.68 «Энергомашиностроение», магистерская программа  
140506 «Поршневые и комбинированные двигатели»

Тольятти  
ТГУ  
2011

УДК 662.6.9

ББК 31.35

К61

Рецензенты:

к.т.н., доцент, завкафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство»  
Технологического института – филиала Ульяновской государственной  
сельскохозяйственной академии (г.Димитровград) *А.Л. Хохлов*;  
д.т.н., доцент Тольяттинского государственного университета  
*А.Г. Егоров*.

**К61** Коломиец, П.В. Топливо : учебное пособие по дисциплине «Химмотология» для подготовки магистров по направлению 140500.68 «Энергомашиностроение», магистерская программа 140506 «Поршневые и комбинированные двигатели» / П.В. Коломиец. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 78 с. : обл.

Учебное пособие содержит сведения об основных характеристиках органического топлива, особенностях газообразного, жидкого, твердого топлива, а также начальные сведения о неорганическом топливе и их окислителях. Отражены современное состояние и перспективы потребления моторного топлива. Приведена характеристика и классификация современного топлива, представлена система приоритетов в использовании его для автомобильного транспорта с учётом экономических, энергетических и экологических характеристик.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратуры 140500.68 «Энергомашиностроение», магистерская программа 140506 «Поршневые и комбинированные двигатели» очной формы обучения.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

УДК 662.6.9

ББК 31.35

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2011

## ВВЕДЕНИЕ

*Химмотология* — область знаний о свойствах, качестве и рациональном использовании топлива, смазочных материалов и специальных жидкостей в технике. Данное учебное пособие посвящено исключительно топливу и содержит краткие сведения о различном топливе и процессе его горения.

Тепловая энергия занимает главенствующую позицию в развитии человечества. Ежегодное расходование этой энергии составляет около  $1,2 \cdot 10^{17}$  кДж, и к тому же наблюдается устойчивая тенденция роста потребления теплоты.

Основная доля потребления тепловой энергии приходится на энергетику, далее — на промышленность и транспорт и, наконец, на бытовые нужды.

Источником получения энергии является ископаемое топливо всех видов (95 %), гидроэнергетика (около 4%) и атомная энергетика (около 1%) [1]. Однако природные источники топливной энергии неограничны, поэтому одной из актуальных задач современного развития технического прогресса является экономия топливно-энергетических ресурсов.

Другим важным аспектом использования топлива является охрана окружающей среды от вредного воздействия продуктов, образующихся при сжигании топлива.

Основными потребителями твёрдого топлива являются промышленные котельные агрегаты теплоэнергетики, а также доменные печи и теплотехнические агрегаты. Жидкое топливо в основном используется для сжигания в котлах средней и малой мощности, плавильных и нагревательных печах, а также тепловых двигателях. Газообразное топливо, являясь самым прогрессивным видом топлива ввиду лёгкости транспортировки и регулирования расходования, широко используется в различных энергетических установках. В последнее время газообразное топливо находит всё большее применение в поршневых и комбинированных двигателях.

# 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

## 1.1. Химический состав

Любое ископаемое топливо может характеризоваться большим количеством свойств и параметров. К основным можно отнести химический состав и теплоту сгорания.

Всё топливо, используемое в промышленности и быту, можно классифицировать по двум основным признакам: по происхождению и по агрегатному состоянию.

По происхождению топливо может быть естественным и искусственным, а по агрегатному состоянию — твёрдым, жидким и газообразным.

Единственный естественный вид жидкого топлива — сырая нефть, но она в качестве сжигаемого топлива не применяется, так как из неё получают большое количество других видов жидкого топлива, являющихся уже искусственными: бензин, керосин, соляровое масло, мазут.

Основным естественным газообразным топливом считаются природный и попутный газы, получившие в настоящее время широкое применение. К искусственным видам газообразного топлива относят газовые смеси, получаемые в результате технологических процессов. Так, в процессе коксования углей попутно получают коксовый газ. При производстве чугуна доменные печи вырабатывают большое количество газа, называемого доменным или колошниковым. В процессе добычи природного газа из него выделяют жидкие фракции пропан-бутановой смеси, которая закачивается в специальные ёмкости — хранилища, а затем транспортируется к потребителю в цистернах.

Существуют и другие виды жидкого и газообразного топлива, но они не получили широкого распространения в промышленности и быту и поэтому здесь не рассматриваются.

Любое топливо можно рассматривать как вещество, состоящее из отдельных химических элементов, поэтому, говоря о химическом составе, часто применяют еще один термин — *элементарный состав*. В действительности минеральное топливо состоит из различных химических соединений, от вида которых зависит его агрегатное состояние. Твёрдое и жидкое топливо состоят из одних и тех же химических эле-

ментов, несмотря на то что вид их химических соединений различен. Это и предопределяет: одно топливо твёрдое, другое – жидкое.

Состав газообразного топлива может быть самым различным, так как это механическая смесь газообразных веществ, не реагирующих друг с другом в исходном состоянии.

Химический состав твёрдого и жидкого топлива выражают в массовых процентах, а газообразного – в объёмных процентах.

В общем виде состав твёрдого и жидкого топлива записывают с помощью знаков химических элементов или условными буквенными обозначениями. Так, в выражении

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + A^p + W^p = 100\% \quad (1)$$

символами  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$ ,  $S$  выражают процентное содержание (по массе) соответственно углерода, водорода, кислорода, азота и серы, а символами  $A$  и  $W$  – содержание золы и влаги. Отметим, что зола топлива содержит минеральные оксиды и соли типа  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и т. д.

Углерод – наиболее важная составляющая твёрдого и жидкого топлива. Полное сгорание углерода сопровождается выделением  $\sim 33,9$  МДж/кг теплоты.

В топливе углерод находится в виде соединений с другими элементами, прежде всего с водородом. Эти соединения называют углеводородными.

Водород – вторая по важности горючая составляющая твёрдого и жидкого топлива. По количеству теплоты, выделяемой при горении, водород в 3,5 раза ценнее, углерода, но содержание водорода в топливе значительно меньше, чем углерода. Водород в топливе может находиться в виде соединений с углеродом, серой, кислородом и в свободном состоянии. Сгорание водорода сопровождается выделением  $\sim 120$  МДж/кг теплоты.

Сера, входящая в состав топлива, разделяется на следующие разновидности: сера колчеданная  $S^p_k$ , сера органическая  $S^p_o$  и сера сульфатная  $S^p_a$  (сернокислые соединения кальция, магния и натрия). Колчеданную и органическую серу называют летучей:  $S^p_k + S^p_o = S^p_{л}$ . Эта сера горит и учитывается в элементарном составе топлива. Сульфатная сера в горении не участвует, поэтому в элементарном составе отдельно не учитывается, а включается в воду. Сгорание серы сопровождается вы-

делением  $\sim 10,47$  МДж/кг теплоты. Сера считается вредным элементом топлива, так как продукты ее сгорания  $SO_2$  вызывают коррозию металлических частей оборудования и отравляют воздух.

Азот топлива является балластом, относится к негорючей части топлива, но при горении в условиях высоких температур может вступать во взаимодействие со свободным кислородом, образуя оксиды азота ( $NO_x$ ), переходящие в продукты сгорания и являющиеся веществами, оказывающими вредное воздействие на окружающую среду, особенно на живые организмы.

Кислород – нежелательная составляющая топлива. Находясь в свободном состоянии, кислород повышает способность топлива к самовозгоранию. Соединяясь с углеродом и водородом топлива, кислород образует негорючие составляющие ( $CO_2$  и  $H_2O$ ), снижающие тепловую ценность топлива.

Зола также является нежелательной составляющей топлива, снижающей долю горючей его части. К тому же при горении составляющие золы отшлаковываются и увлекают за собой несгоревшие частицы топлива, уменьшая общее количество выделяющейся теплоты. При большом количестве золы усложняются условия обслуживания топочного устройства.

Влага – весьма нежелательная составляющая топлива, так как она не только понижает содержание горючих компонентов, но и требует значительных затрат теплоты на испарение и перегрев. Влага в твёрдом и жидком топливе может быть внешней, т. е. механически удерживаемой на поверхности топлива, и гигроскопической, остающейся в порах топлива. Кроме этого, влага в топливе может быть в виде соединения водорода с кислородом (пирогенетическая), а также может находиться в молекулах минеральных веществ золы топлива (гидратная).

В зависимости от химического анализа различают составы твёрдого и жидкого топлива: органическая масса (индекс «о» в верхней части химического элемента, например  $C^o$ ), горючая масса (индекс «г») и рабочая масса (индекс «р»).

При сжигании топлива приходится всегда иметь дело с полным, т. е. рабочим составом топлива, поэтому он может быть записан в виде равенства:

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + A^p = 100\%. \quad (2)$$

Если приводится состав сухой массы топлива, то он записывается так:

$$C^c + H^c + S^c + O^c + N^c + A^c = 100\%. \quad (3)$$

Состав горючей массы выглядит следующим образом:

$$C^e + H^e + S^e + O^e + N^e + A^e = 100\%, \quad (4)$$

причём наличие в этой массе кислорода и азота не означает, что они горят, а просто они могут находиться в соединении с горючими составляющими.

Существуют формулы для пересчёта состава топлива с одной массы на другую.

Если условно обозначить любой химический элемент топлива буквой  $x$ , то при пересчёте сухой массы топлива в рабочую следует пользоваться формулой (%):

$$x^p = x^c \frac{100 - W^p}{100} \quad (5)$$

при пересчёте горючей массы топлива в рабочую, формула выглядит следующим образом:

$$x^p = x^e \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}. \quad (6)$$

Химический состав газообразного топлива непостоянен и зависит от места добычи или способа получения, поэтому различные виды газообразного топлива имеют различное количество составляющих. В общем случае состав газообразного топлива может быть записан так:

$$H_2S + CO + H_2 + CH_4 + C_m H_n + CO_2 + O_2 + N_2 + \dots = 100\%. \quad (7)$$

Здесь также различают горючие ( $H_2S$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_n H_m$ ) и негорючие ( $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ) составляющие газообразного топлива.

В отличие от твёрдого и жидкого топлива, у газообразного различают две массы: сухую и рабочую (влажную), которые обозначаются так:

$$CO^{C,\Gamma} + H_2^{C,\Gamma} + CH_4^{C,\Gamma} + CO_2^{C,\Gamma} + \dots N_2^{C,\Gamma} = 100\%; \quad (8)$$

$$CO^{B,\Gamma} + H_2^{B,\Gamma} + CH_4^{B,\Gamma} + CO_2^{B,\Gamma} + \dots + N_2^{B,\Gamma} + H_2O^{B,\Gamma} = 100\%. \quad (9)$$

Влага в рабочем составе газообразного топлива находится в виде водяных паров. Содержание влаги зависит от его температуры. Обычно, химический состав газообразного топлива приводится на сухую массу, а влажный (рабочий) состав рассчитывают так же, как для твёрдого и жидкого топлива. Однако процентное содержание влаги (в объёмных

процентах) может быть получено только путем расчёта, если известна величина массового влагосодержания ( $g, \text{ г/м}^3$ ), выраженная в граммах на один кубический метр сухого газа при нормальных условиях: температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении  $760 \text{ мм. рт. ст.}$  Ниже приведена таблица влагосодержания в газах в зависимости от температуры газа (табл. 1):

Таблица 1

Влагосодержание газа в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	20	30	40	50	60	70
$g, \text{ г/м}^3$	4,9	7,0	9,8	19,0	35,1	63,1	111,3	197,0	356,0

Зная влагосодержание газа ( $g, \text{ г/м}^3$ ), можно найти процентное содержание водяных паров в газообразном топливе по одной из формул:

$$H_2O^{B,\Gamma} = \frac{100}{\frac{803,6}{g} + 1} \% \quad (10)$$

или

$$H_2O^{B,\Gamma} = \frac{0,1244g}{1 + 0,001244g} \% , \quad (11)$$

а затем пересчитать все составляющие топлива на влажную массу:

$$x^{B,\Gamma} = x^{C,\Gamma} \frac{100 - H_2O^{B,\Gamma}}{100} \% . \quad (12)$$

Таким образом, химический состав топлива является исходной характеристикой, от которой зависит дальнейший расчёт процесса горения.

Сам химический состав ещё не определяет тепловую ценность топлива. Об этом можно судить по другой характеристике, называемой теплотой сгорания топлива.

## 1.2. Теплота сгорания топлива

Любая химическая реакция сопровождается выделением или поглощением тепла и, соответственно, называется экзотермической или эндотермической. Химические реакции, протекающие в процессах горения, являются эндотермическими.

Количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы массы топлива, зависит от того, в паровом или жидком состоянии находится влага в продуктах сгорания. Если водяной пар сконденсируется и вода в продуктах сгорания будет находиться в жидком виде, то тепло

парообразования освободится и тогда количество тепла, выделяющегося при сгорании единицы массы топлива, получается больше.

При сжигании топлива, в результате окисления горючих составляющих, выделяется теплота и тем в большем количестве, чем больше сжигается топлива. Для сравнения между собой различных видов топлива по их тепловой ценности, а также для осуществления расчетов процесса горения применяют удельную тепловую характеристику, называемую теплотой сгорания топлива.

Если продукты горения в процессе теплоотдачи охлаждаются до температуры ниже 373 К, то находящиеся в них водяные пары конденсируются и выделяют дополнительное количество теплоты. При этом вся суммарная теплота, выделившаяся от сжигания единицы топлива, будет высшей теплотой сгорания рабочего топлива. Количество тепла, выделяющегося при полном сгорании 1 кг твёрдого или жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газового топлива, при условии, что образующиеся водяные пары в продуктах сгорания конденсируются, называется высшей теплотой сгорания топлива.

В условиях высоких температур на всём протяжении газового тракта водяные пары, содержащиеся в продуктах сгорания, не конденсируются, а отводятся в атмосферу. Следовательно, некоторая часть тепла, выделившегося при сгорании, затрачивается на образование водяного пара и не может быть полезно использована. Поэтому теплота сгорания получается меньше освобождающейся при горении химической энергии топлива.

Количество тепла, которое выделяется при полном сгорании 1 кг твёрдого или жидкого или 1 м<sup>3</sup> газового топлива, за вычетом тепла парообразования водяных паров, образующихся при горении, называется низшей теплотой сгорания.

Теплота сгорания топлива обозначается буквой  $Q$  (также справедливо обозначение буквой  $H$ ) и имеет размерность килоджоуль на килограмм (кДж/кг) или килоджоуль на кубический метр (кДж/м<sup>3</sup>).

Теплота сгорания топлива может быть определена экспериментально, для чего требуется специальная лабораторная аппаратура, а также может быть рассчитана по химическому составу топлива.

Для расчета низшей теплоты сгорания твёрдого и жидкого топлива пользуются формулой Д.И. Менделеева, кДж/кг:

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25(9H^P + W^P). \quad (13)$$

Низшую теплоту сгорания газообразного топлива можно рассчитать, суммируя тепловые эффекты реакций окисления горючих компонентов топлива, кДж/кг:

$$Q_H^P = 127,7CO_2^{B,\Gamma} + 108H_2O^{B,\Gamma} + 358CH_4^{B,\Gamma} + 590C_2H_4^{B,\Gamma} + 555C_2H_2^{B,\Gamma} + 636C_2H_6^{B,\Gamma} + 913C_3H_8^{B,\Gamma} + 1185C_4H_{10}^{B,\Gamma} + 1465C_5H_{12}^{B,\Gamma} + 234H_2S^{B,\Gamma}. \quad (14)$$

где цифры означают уменьшенный в 100 раз тепловой эффект реакций окисления соответствующих горючих составляющих, подставленных в объёмных процентах.

### 1.3. Условное топливо

Расход топлива зависит от его теплоты сгорания, которая для различного топлива изменяется в больших пределах. Для сравнения по энергетической ценности и эффективности использования различного топлива введено понятие об условном топливе, теплота сгорания которого равна:  $Q_{усл} = 29,33$  МДж/кг (7000 ккал/кг).

### 1.4. Температура горения топлива

Тепло, выделяющееся при сгорании топлива, воспринимается продуктами сгорания, которые нагреваются до определенной температуры, называемой температурой горения. Различают калориметрическую, теоретическую и действительную температуры сгорания топлива.

В уравнение теплового баланса горения входят составляющие, величина которых зависит как от теплофизических свойств топлива, так и от условий, при которых протекает горение. Например, от степени подогрева топлива и воздуха, потерь теплоты при горении, тепловосприятости в камере сгорания (КС), коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ).

Чтобы выявить потенциальные возможности топлива, вводят понятие горения без подогрева топлива и воздуха при идеальном адиабатическом процессе, т. е. горения с теоретическим количеством воздуха, без потерь теплоты и без теплообмена в КС и с окружающей средой. Полученная в этих условиях температура продуктов сгорания называется теоретической.

Калориметрическая температура отражает влияние подогрева топлива и воздуха на температуру адиабатического горения. Повышение температуры подогрева топлива и воздуха увеличивает приход теплоты в зону горения и повышает температуру горения, а увеличение  $\alpha$  вызывает увеличение объёма продуктов сгорания  $V_p$ , что понижает температуру горения. Поэтому в зависимости от влияния этих факторов калориметрическая температура может быть выше или ниже теоретической.

В реальных условиях не всё тепло, выделяющееся при горении, идет на нагрев продуктов реакции, так как часть тепла передаётся в охлаждающую среду и некоторое количество тепла теряется в атмосферу, кроме того, при высоких температурах происходит диссоциация части продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ), сопровождающаяся поглощением тепла.

Для каждого типа КС, вида и способа сжигания топлива разработана специальная методика расчёта теплообмена в КС и определения действительной температуры газов на выходе из КС.

Отношение действительной температуры горения топлива к теоретической называется пирометрическим коэффициентом.

## 1.5. Теплофизические и термодинамические свойства моторного топлива

Для многокомпонентных смесей (в том числе и моторного топлива) принцип соответственных состояний даёт наилучшее согласование с опытными данными, если вместо истинных значений  $T_{кр}$  и  $p_{кр}$  использовать условные псевдокритические значения  $T'_{кр}$  и  $p'_{кр}$ , которые находят по соотношениям:

$$T'_{кр} = \sum T_{кр,i} \cdot n_i, \quad (15)$$

$$p'_{кр} = \sum p_{кр,i} \cdot n_i, \quad (16)$$

где  $T_{кр}, p_{кр}, i$  – истинные критические температура и давление  $i$ -го компонента;  $n_i$  – молярная доля  $i$ -го компонента.

*Псевдокритические температура и давление.*  $T'_{кр}$ , (в К) и  $p'_{кр}$  (в барах) можно подсчитать по уравнениям:

$$T'_{кр} = 1,05T_{ср} + 146; \quad (17)$$

$$p'_{кр} = 5,5T_{ср} / \mu_T. \quad (18)$$

Теплоёмкость паров топлива (в кДж/(кг·К)) при температуре  $t$  определяют по зависимости:

$$c_p = \frac{4 - d \frac{15}{15}}{1540} \cdot (1,8t + 702) \cdot (0,146K_T - 0,41), \quad (19)$$

где  $d \frac{15}{15}$  – относительная плотность топлива при  $t = 15^\circ\text{C}$ , отнесенная к плотности воды при  $t = 15^\circ\text{C}$ ;  $K_T = 1,216 \sqrt[3]{d \frac{15}{15} \frac{T_{cp}}{15}}$  – характеристический фактор;  $T_{cp}$  – средняя температура разгонки.

В табл. 2 приведены расчётные и опытные значения некоторых термодинамических и теплофизических параметров для бензинового и дизельного топлива.

Таблица 2

Некоторые характеристики моторного топлива [1]

Показатели	Бензин А-76	Бензин АИ-92	Топливо дизельное Л	Топливо дизельное З
Относительная плотность $d_{15/15}$	0,748	0,746	0,852	0,834
Средняя температура разгонки $t_{cp}$ , $^\circ\text{C}$	112	106	278	256
Характеристический фактор $K_m$	11,77	11,74	11,68	11,79
Молярная масса $\mu_m$ , кг/моль	105	103	223	218
Газовая постоянная паров топлива $R$ , Дж/(кг·К)	79,2	80,7	37,3	38,1
Псевдокритическое давление $P_{кр}$ , бар	28,7	28,9	17,9	17,7
Псевдокритическая температура $T_{кр}$ , К	547	541	725	700
Средний коэффициент сжимаемости при $p = 50$ МПа и $t = 20^\circ\text{C}$ , $10^{9*}\text{м}^2/\text{Н}$	1,17		0,65	
Теплоёмкость $c_m$ , кДж/(кг·К): жидкая фаза пары (при $p = \text{const}$ )	$\approx 1,5$ $\approx 1,5$		$\approx 1,9$ $\approx 1,5$	
Вязкость динамическая $\mu$ , Н*с/м <sup>2</sup>	$0,56 \cdot 10^{-3}$		$3,8 \cdot 10^{-3}$	

## 2. ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО

### 2.1. Нефтяной газ

Основными компонентами газов, известных под названием сжиженных нефтяных газов, являются пропан и бутан. Кроме того, в них содержится некоторое количество этана и пропилена. При 20°C бутан сжижается при давлении 0,103 МПа, а пропан – 0,716 МПа. Поэтому для сохранения в жидком состоянии при более высоких температурах (до +45-50°C) пропан-бутановая смесь находится в топливном баллоне под давлением 1,6 МПа.

По отношению к бензину пропан и бутан имеют более высокую теплоту сгорания и характеризуются высокой детонационной стойкостью. Они являются хорошим топливом для двигателей внутреннего сгорания с искровым воспламенением. При переводе автомобиля на пропан-бутановую смесь, его эксплуатационные свойства не только сохраняются, но и по ряду показателей улучшаются в сравнении с базовой (бензиновой) моделью.

Нефтяной газ в соответствии с ГОСТ 20448-75 выпускается для зимней эксплуатации – СПБТЗ ( $\geq 75\%$  пропана и  $\leq 20\%$  бутана) и для летней – СПБТЛ (34% пропана и 60% бутана). Состав нефтяных газов для газобаллонных автомобилей регламентируется по следующим показателям (ТУ 38 001302-78).

Углеводородный состав, % (масс.):

пропан	80 ± 5
сумма пентанов, не более	3
сумма непредельных углеводородов, не более	6
жидкий осадок при + 40 °С	отсутствует

Давление насыщенных паров, МПа, не более:

при + 40 °С	1,6
при - 30 °С	0,07

Содержание, % (масс.), не более:

сероводорода	0,003
общей серы	0,015
воды и щелочи	отсутствует

Пропан-бутановые смеси характеризуются высоким коэффициентом объёмного расширения: при увеличении температуры на 10°C давление в газовом баллоне повышается на 0,6–0,7 МПа. Во избежание разрушения при повышении температуры в топливных баллонах пре-

дусматривается газовая подушка с минимальным объёмом не менее 10% всего объёма. Поскольку компоненты нефтяных газов не имеют запаха, для обнаружения утечек смеси в нее добавляют одоранты – вещества со специфическим сильным запахом. В качестве одоранта обычно используют этилмеркаптан  $C_2H_5SH$  в количестве 0,2–0,3 г на 1000 м<sup>3</sup> газа.

Автомобили, работающие на пропан-бутановых смесях, имеют резервную систему питания бензином на случай отсутствия газа. При этом, ввиду увеличения степени сжатия двигателей газобаллонных модификаций (на 1–2 ед.), их работа на бензине допускается лишь в экстренных случаях, при движении с пониженными скоростями (или уменьшенной загрузкой) на небольшие расстояния. Запас хода, грузоподъёмность, топливная экономичность (в энергетическом эквиваленте) и тягово-скоростные качества газобаллонных автомобилей находятся на уровне бензиновых моделей или отличаются от них незначительно. Вместе с тем, практический опыт эксплуатации газобаллонных автомобилей показал ряд их преимуществ. Благодаря отсутствию жидкой фазы (фракций углеводородов) в топливовоздушной смеси обеспечивается большая равномерность её распределения по цилиндрам двигателя, исключается смывание смазки с их зеркала, а загрязнение масла и нагарообразование значительно снижаются. В результате ресурс работы двигателя, его межремонтный пробег возрастают в 1,5–2, а периодичность смены моторного масла – в 2–2,5 раза. Однако из-за большей сложности газобаллонной системы питания трудоемкость ее технического обслуживания и ремонта возрастает на 3–5%. Кроме того, из-за худших пусковых свойств нефтяных газов надежный пуск холодного двигателя возможен при температуре окружающего воздуха до -5–7 °С. При более низких температурах, в условиях безгаражного хранения, для запуска двигателя требуется его тепловая подготовка. Для этой цели используют подогрев с помощью газовых инфракрасных излучателей, горячего воздуха, прокачки системы охлаждения горячей водой и др. При отсутствии необходимых средств допускается запуск двигателя на резервном бензине с переводом после прогрева на газовое топливо. Однако это является исключительной мерой, так как ведет к дополнительному расходу бензина и снижает экономическую эффективность газобаллонного автомобиля.

## 2.2. Природный газ

Природный газ состоит в основном из метана и небольшой примеси других газообразных компонентов. Состав природного газа для различных месторождений неодинаков и в среднем может характеризоваться содержанием: метана (85–99%, об.), этана (1–8%, об.), пропана и бутана (0,5–3,0%, об.), пентана (до 0,5–2,0%, об.), азота (0,5–0,7%, об.) и диоксида углерода (до 1,8% об.). В зависимости от состава природного газа изменяются его моторные свойства, важнейшим показателем которых является теплота сгорания. Для природных газов отдельных месторождений она может составлять 47 МДж/м<sup>3</sup>, а в среднем – 33–36 МДж/м<sup>3</sup>, т. е. меньшая теплота сгорания по сравнению с жидким топливом является главным недостатком природного газа как моторного топлива.

Показатели удельной энергоёмкости различных методов хранения природного газа в расчёте на единицу массы приведены в табл. 3 в сравнении с бензином. При использовании природного газа в сжатом виде энергоёмкость системы хранения определяется давлением сжатия, конструкцией и материалом газового баллона. Наибольшее применение нашли цилиндрические и тороидные баллоны из углеродистой и легированной стали. В этом случае для хранения 1 м<sup>3</sup> природного газа требуемая масса баллона составляет 3,5–5 кг. При увеличении давления сжатия масса растёт примерно пропорционально плотности сжатого газа, из-за чего добиться значительного снижения массы системы хранения сжатого газа таким способом невозможно. Эффективнее использовать более прочные конструкционные материалы. Например, применение легированной стали вместо углеродистой снижает массу газового баллона на 30–33%. Разработаны армированные стеклопластиковые баллоны с массой в 4–4,5 раза меньше стальных.

Сжижение природного газа по сравнению со сжатием позволяет уменьшить массу системы хранения в 3–4 раза и объём в 1,5–3 раза. Однако из-за низкой температуры кипения метана (основного компонента природного газа) топливо необходимо хранить в криогенных ёмкостях с высокоэффективной тепловой изоляцией. Обычно это ёмкость с двойными стенками, пространство между которыми вакуумируется, а в ряде случаев оно заполняется теплоизоляционным материалом. Эксплуатация автомобиля на сжиженном газе связана с потерями газа на

испарение при заправке и хранении (до нескольких процентов в сутки) и, кроме того, технически достаточно сложна.

Наиболее распространён вариант применения природного газа двигателе с искровым зажиганием и с сохранением степени сжатия на уровне, соответствующем при использовании бензинов. Перевод двигателя на газовое топливо ведёт к снижению индикаторного КПД (рис. 1) и уменьшению максимального давления цикла (рис. 2), т. е. к потерям мощности и снижению экономичности. Более низкое значение КПД газового двигателя связано с повышенными вентиляционными потерями и меньшей мощностью двигателя. В свою очередь, падение мощности объясняется ухудшением наполнения двигателя и меньшей теплотой сгорания стехиометрической газозвушной смеси. Снижение КПД и ухудшение топливной экономичности газового двигателя в некоторой степени компенсируются с помощью оптимальных регулировок на работу с  $\alpha = 1,2-1,3$  в режиме частичных нагрузок.

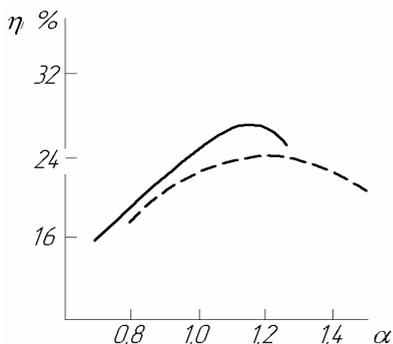


Рис. 1. Изменение индикаторного КПД при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин, (-----) природный газ [2]

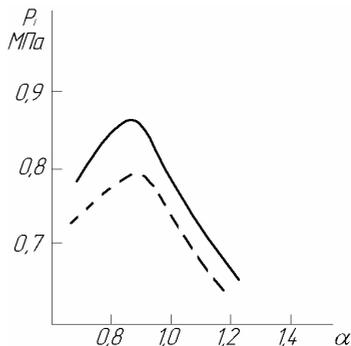


Рис. 2. Изменение индикаторного давления при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (-----) природный газ [2]

Указанные недостатки могут быть устранены двумя путями.

1. Использование высокой детонационной стойкости газового топлива, октановое число которого на 20–30 ед. выше, чем у бензинов. Этот путь связан с повышением степени сжатия двигателя, что исключает возможность его работы на бензине, т. е. исключается универсальность (двухтопливность) питания газового автомобиля.

2. Использование принципиально новой системы подачи газового топлива: впрыск газа непосредственно в цилиндры двигателя или применение турбонадува. Такие системы позволяют создать универсальный бензогозовый двигатель с высокими мощностными характеристиками и топливно-экономическими показателями.

При использовании природного газа в качестве моторного топлива отмечены его низкие пусковые свойства. Предельное значение температуры холодного пуска двигателя (без дополнительных средств подогрева) на природном газе на 3–8°С выше, чем на пропан-бутане. Трудность пуска объясняется высокой температурой воспламенения метана и тем, что в процессе воспламенения (после нескольких вспышек) на свечах осаждается вода, шунтирующая искровой промежуток.

Важным достоинством газового топлива по сравнению с нефтяным являются лучшие экологические характеристики и, прежде всего, уменьшение выбросов вредных веществ с ОГ двигателя (рис. 3). Как известно, такими веществами являются CO, NO<sub>x</sub>, суммарные C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> и в случае применения этилированных бензинов – соединения свинца. Применение газового топлива с высокой детонационной стойкостью исключает необходимость использования токсичного антидетонатора, что является эффективным фактором снижения загрязнения окружающей среды. Изменение содержания CO при работе двигателя на газе и бензине в зависимости от состава топливовоздушной смеси (рис. 4) примерно одинаково. Однако учитывая возможность работы газового двигателя на более бедных смесях, при его оптимальной регулировке обеспечиваются более низкие выбросы CO. Уровни выбросов СН также примерно одинаковы, но их состав принципиально различен. Вредное воздействие СН, образующихся в продуктах сгорания нефтяного топлива, обусловлено в первую очередь образованием смога. При работе на природном газе углеводородная часть ОГ состоит в основном из метана, обладающего высокой устойчивостью к образованию смога. NO<sub>x</sub> – наиболее токсичные компоненты ОГ. Их максимальное содержание для газового двигателя примерно в два раза меньше, чем у бензинового. Оно может быть еще снижено в 2–3 раза за счёт регулировки состава ТВС.

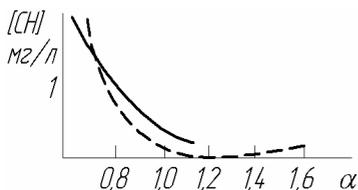


Рис. 3. Изменение содержания СН при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (-----) природный газ [2]

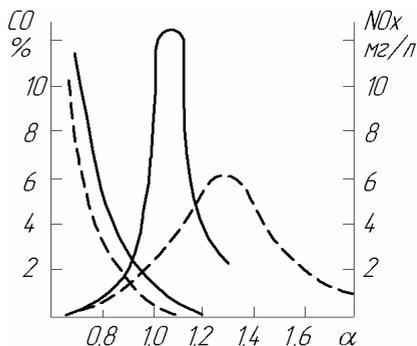


Рис. 4. Изменение содержания СО и NO<sub>x</sub> при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин, (-----) природный газ [2]

Сложность применения газового топлива в дизельных двигателях связана с их плохой воспламеняемостью. Для организации рабочего процесса дизельного двигателя на газовом топливе известны следующие способы:

- 1) добавление в топливо активирующих присадок или дизельного топлива с высоким цетановым числом;
- 2) использование искрового зажигания;
- 3) применение впрыска запальной дозы дизельного топлива.

Первый способ может использоваться только для жидкого пропан-бутана. Переоборудование дизеля в двигатель с искровым зажиганием нашло применение на стационарных установках, так как связано с необходимостью обеспечения повышенного напряжения на электродах свечи (до 25 кВ и более). Поэтому для организации работы дизелей на газовом метановом топливе наибольшее распространение получил газо-жидкостный процесс воспламенения основной газозвоздушной смеси от запальной дозы дизельного топлива. Достоинством способа является простота переоборудования дизеля на газовое топливо без изменения конструкции самого двигателя.

К природному газу, используемому в сжатом виде в качестве моторного топлива, предъявляют специфические требования: отсутствие пыли и жидкого остатка и минимальная влажность. Последнее связано с исключением закупорки каналов топливной системы,

вызываемой замерзанием вследствие дросселирования и снижения температуры газа при заправке. Для обеспечения этих требований природный газ подвергается очистке с помощью фильтрующего, сепарационного и осушительного оборудования, установленного на газонаполнительных станциях.

Для заправки автомобилей предназначен газ двух марок с различным содержанием метана и азота в соответствии с ТУ 51-166-33.

*Основные показатели качества сжатого природного газа для автомобилей*

	Марка А	Марка Б
Температура газа для климатической зоны, °С, не более:		
умеренной и холодной		+40
жаркой		+45
Компонентный состав, % (об.):	95 ± 5	90 ± 5
метан CH <sub>4</sub>		4,0
этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , не более		1,5
пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		1,0
бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		0,3
диоксид углерода CO <sub>2</sub>		1,0
кислород		1,0
азот	0-4	4-7

Опыт их эксплуатации выявил ряд положительных сторон, схожих с достоинствами сжиженных газов. При использовании сжатого газа в качестве моторного топлива моторесурс двигателя увеличивается на 35–40%, срок службы свечей зажигания – на 30–40%, расход моторного масла снижается, благодаря увеличению периодичности его смены в 2–3 раза.

Вместе с тем, перевод автомобилей на сжатый природный газ ухудшает некоторые эксплуатационные показатели:

- 1) уменьшается пробег автомобиля на одной заправке и появляется необходимость наличия большого количества баллонов для хранения КПП, что снижает грузоподъемность автомобиля на 9–14%;
- 2) снижается мощность двигателя на 18–20%;
- 3) максимальная скорость уменьшается на 5–6%;
- 4) время разгона возрастает на 24–30%.

Применение газовых автомобилей на сжатом газе наиболее рационально на внутригородских грузовых перевозках для обслужи-

вания предприятий торговли, быта и др. Использование природного газа перспективно и на городском пассажирском автотранспорте ввиду снижения в этом случае вредных выбросов, загрязняющих атмосферу.

Наряду с рассмотренным газовым топливом определенный интерес представляют аэрационные (канализационные) газы, являющиеся высококалорийным топливом. Это продукты брожения сточных вод городской канализации. Исходные канализационные газы содержат примерно 60–64% (об.)  $\text{CH}_4$ , 30–35% (об.)  $\text{CO}_2$  и до 2% (об.)  $\text{H}_2$ . После удаления  $\text{CO}_2$  газы являются однородным топливом, содержащим свыше 80% метана с теплотой сгорания более 25 МДж/м<sup>3</sup>. Выход канализационных газов со станции переработки, питаемой канализационной сетью, обслуживающей 100 тыс. человек, достигает в сутки 2500 м<sup>3</sup>, что эквивалентно 2000 л бензина. Проведенные испытания автомобилей, переоборудованных для работы на канализационных газах, которые подтвердили целесообразность их использования в качестве моторного топлива.

## 2.3. Водород

### 2.3.1. Общая характеристика водородного топлива

Интерес к водороду как моторному топливу обусловлен его высокими энергетическими показателями, отсутствием вредных веществ в продуктах сгорания и неограниченной сырьевой базой. Водород характеризуется наиболее высокими энергомассовыми показателями среди других топлив. Низшая теплота сгорания молекулярного водорода (с образованием водяного пара) составляет 241,9 МДж/моль, что соответствует 120 МДж/кг. В то же время из-за низкой плотности водород по объёмной теплопроизводительности уступает большинству жидких и газообразных топлив. Теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> стехиометрической водородно-воздушной смеси составляет 2992 кДж/м<sup>3</sup>, что на 15–20% меньше, по сравнению с бензином и спиртами, и является основной причиной снижения мощности двигателя при переводе на водород.

С воздухом водород устойчиво воспламеняется в широком диапазоне концентраций вплоть до  $\alpha = 10$ . Такой низкий предел воспламенения обеспечивает работу водородного двигателя на всех скоростных режимах в широком диапазоне изменения составов ТВС: от  $\alpha = 0,2$  до  $\alpha = 5,0$ . В связи с этим мощность водородного двигателя может изменяться ка-

чественным регулированием, при котором уменьшаются потери двигателя, а его КПД при частичных нагрузках увеличивается на 25–50%.

Водородно-воздушные смеси характеризуются высокой скоростью сгорания в двигателе, причем при стехиометрическом соотношении периоды индукции очень малы и сгорание протекает практически при постоянном объёме, что ведёт к резкому повышению давления. Скорость нарастания давления в цилиндре водородного двигателя при работе на стехиометрических смесях примерно в 3 раза выше по сравнению с бензиновым аналогом. При обеднении смеси скорость снижается и при  $\alpha = 1,9$  достигает значений, соответствующих скорости при работе на стехиометрических бензо-воздушных смесях.

Детонационно-подобные явления, характерные для работы двигателя на водороде, изучены недостаточно. Согласно большинству данных, водород начинает детонировать при степенях сжатия  $\epsilon = 6$  в широком диапазоне  $\alpha$ . В то же время очистка КС (удаление нагара и выступающих кромок, шлифовка поверхности) позволяет осуществить работу на водороде при  $\epsilon$ , близких к 10, и стехиометрических топливных смесях. По имеющимся данным, критическая степень сжатия при стехиометрическом составе водородно-воздушных смесей не превышает 4,7, что соответствует октановому числу по исследовательскому методу – 46, в то время как при  $\alpha = 3,5$  она достигает 9,4 и октановое число – 114. Таким образом, при достаточном обеднении смеси возможна бездетонационная работа водородного двигателя в широком диапазоне степеней сжатия.

Состав ОГ водородного двигателя существенно отличается от состава газов бензинового двигателя внутреннего сгорания в основном за счёт отсутствия углерода в топливе. Тем не менее, в ОГ водородного двигателя присутствует незначительное количество CO и [CH], наличие которых обусловлено выгоранием углеводородных смазок, попадающих в камеру сгорания. Максимальный выброс  $\text{NO}_x$ , вследствие более высоких температур сгорания водорода, примерно вдвое превышает выбросы  $\text{NO}_x$  бензиновым двигателем. С обеднением водородовоздушной смеси выбросы  $\text{NO}_x$  у водородного двигателя быстро снижаются и при  $\alpha = 1,8$  практически отсутствуют. Добавка к водородному топливу воды позволяет резко снизить выбросы  $\text{NO}_x$  без существенных потерь мощности двигателя или ухудшения его КПД.

Так, при массовом отношении  $H_2O/H_2 = 8$  выбросы  $NO_x$  уменьшаются в среднем в 8–10 раз.

Высокая реакционная способность водорода приводит к проскокам пламени во впускной трубопровод, преждевременному воспламенению и жёсткому сгоранию ТВС. Этих недостатков можно избежать, если модифицировать топливоподающую систему двигателя. В настоящее время для подачи водорода в двигатель применяют следующие способы: впрыск во впускной трубопровод; модифицированный карбюратор (как в системах питания пропан-бутановыми и природными газами), индивидуальное дозирование водорода во впускной клапан каждого цилиндра; непосредственный впрыск под высоким давлением в камеру сгорания.

Первые два варианта обеспечивают устойчивую работу двигателя только при частичной рециркуляции ОГ или добавке воды в ТВС. Частичная рециркуляция отработавших газов предотвращает проскок пламени за счёт разбавления заряда инертными компонентами и смягчает сгорание при работе двигателя на богатых водородно-воздушных смесях. В то же время благодаря снижению максимальных цикловых температур выбросы  $NO_x$  уменьшаются. Количество рециркулируемых газов не превышает 10–20% от поступающей в двигатель ТВС, однако любая степень рециркуляции ведет к дополнительному снижению наполнения цилиндра. В отличие от рециркуляции впрыск воды или бензина (обычно во впускной патрубке) не ухудшает наполнения.

Предпочтительнее организовать впрыск водорода непосредственно в камеру сгорания. При этом полностью исключаются проскоки пламени во впускном трубопроводе, а максимальная мощность двигателя, не только не снижается, а может быть повышена на 10–15%. Одновременно, за счёт оптимального протекания рабочего процесса, уровень выбросов  $NO_x$  водородного двигателя снижается, а эффективный КПД повышается. Согласно экспериментальным данным, непосредственный впрыск водорода в одноцилиндровом двигателе при  $\epsilon = 15,4$  и  $\alpha = 2,5$  обеспечил повышение его КПД на 55%.

Использование водорода в дизельных двигателях в значительной степени затрудняется высокими температурами самовоспламенения водородно-воздушных смесей. Поэтому для организации устойчивого воспламенения водорода дизели переоборудуют в двигатели с искро-

вым зажиганием или переводят на работу по газожидкостному процессу: с впрыском запальной дозы жидкого топлива (обычно дизельного). Водород может подаваться как совместно с воздухом, так и непосредственным впрыском в цилиндры. Устойчивая работа дизеля на водороде обеспечивается только в узком диапазоне ТВС, ограничиваемом пропусками воспламенения и детонацией.

Основной проблемой использования водорода в качестве моторного топлива является его хранение. Известны следующие варианты хранения водорода на автомобиле:

- 1) в газообразном состоянии (в сжатом виде);
- 2) в криогенном (сжиженном) состоянии;
- 3) с использованием промежуточного носителя (жидкого или твёрдого).

Наилучшие показатели системы хранения чистого водорода обеспечиваются при его сжижении, т. е. в криогенной схеме. Применение газообразного водорода отличается простотой, однако не получило распространения из-за низкого энергозапаса, вызванного небольшой плотностью топлива и большой массы топливного контейнера. Использование водорода в сжиженном состоянии более эффективно, однако имеет свои сложности, особенно при его хранении и транспортировке. Температура кипения водорода равна  $252,8^{\circ}\text{C}$ , поэтому при транспортировке и хранении жидкого водорода первостепенное значение имеет тепловая изоляция. Жидкий водород обычно транспортируют и хранят в специальных резервуарах с двойными стенками, пространство между которыми заполнено специальной изоляцией. Наиболее распространены высоковакуумная, вакуумно-порошковая и многослойная низкотемпературные тепловые изоляции; используют и комбинированные изоляции, например, многослойно-порошковую. При конструировании оборудования для хранения и транспортировки жидкого водорода необходимо учитывать, что в условиях глубокого холода прочностные характеристики большинства металлов и сплавов улучшаются, а ударная вязкость резко уменьшается.

Для практической реализации более приемлемы схемы, в которых используют промежуточный носитель водорода. Водород в этом варианте сохраняется в химически связанном виде и при необходимости извлекается из соединения с помощью термического, химического либо термохимического воздействия. В настоящее время наибольшее

внимание привлекают твёрдые носители водорода – гидриды металлов и их сплавы. Главным преимуществом гидридов металлов является возможность повышения энергетической плотности водорода, кроме того, они безопасны при хранении и эксплуатации.

В связи с техническими проблемами и высокой стоимостью перевода автомобиля на чистый водород, работы в этой области развиваются в направлении создания двигателя с комбинированным бензо-водородным питанием, а также создания водородо-метанольного двигателя, работающего на водородсодержащих продуктах термокаталитической конверсии метанола. Благодаря активирующей добавке водорода появляется возможность работы двигателя на сверхбедных ТВС в области частичных нагрузок и режиме холостого хода. Зависимость предела обеднения смеси  $\alpha$  от добавки водорода носит следующий характер.

Содержание водорода, % масс	0	10	20	40	100
$\alpha$	1,12	1,67	2,5	3,34	5,0

Проведенные испытания показали, что использование бензино-водородных смесей позволяет вдвое снизить расход бензина при скорости 90–120 км/ч и на 28% – при езде в городе.

### 2.3.3. Свойство водородного топлива

Следует отметить некоторые физические особенности водорода, определяющие дополнительные специфические требования к конструкционным материалам. Водород обладает способностью проникать через толщу материала, в частности металлов, и с повышением давления и температуры диффузия водорода в металлы возрастает. Глубина проникания молекул водорода в кристаллическую решетку металла в большинстве случаев не превышает 4–6 мм. Для алюминия она достигает 15–30 мм. Водородная диффузия в сталях практически полностью устраняется путем легирования с помощью хрома, молибдена, вольфрама и других элементов.

Водородно-воздушные смеси характеризуются широкой областью воспламенения (4–75% (об.) и взрываемости (18,3–74% (об.)), что повышает их пожаро- и взрывоопасность. В то же время водород отличается высокой температурой воспламенения (590°С).

Получение водорода электролизом воды в настоящее время — процесс чрезвычайно дорогой, по затратам энергии он практически равен количеству энергии, получаемой при сгорании водорода в двигателе.

Кроме того, следует учитывать способ получения электроэнергии, необходимой для электролиза воды. Если электроэнергия вырабатывается на электростанциях, использующих в качестве топлива природный газ (минимальная токсичность дымовых газов) или уголь (максимальная токсичность дымовых газов), то экологичность применения водорода в качестве моторного топлива во многом теряет свои преимущества.

### 3. ЖИДКОЕ ТОПЛИВО

В табл. 3 приведены свойства современного топлива. Большинство современных топлив отличается от традиционного нефтяного топлива, что сказывается на характеристиках тепловых установок и на эксплуатационных качествах автотранспортных средств. На рис. 5, 6 приведены сравнительные показатели теоретического цикла двигателя с искровым зажиганием при использовании современного топлива. Как видно, применение современного топлива ведет к изменению как мощностных (определяемых средним индикаторным давлением  $P_i$ ), так и экологических показателей работы двигателя, связанных с содержанием в отработавших газах (ОГ) токсичных веществ. Показатели топлива с нефтяными добавками находятся на уровне базовых бензинов, поскольку моторные свойства их равнозначны. Использование спиртов сопровождается повышением среднего индикаторного давления, в то время как для газообразного топлива оно снижается главным образом из-за уменьшения энергоплотности заряда.

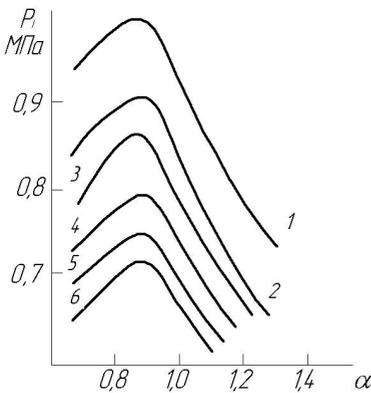


Рис. 5. Изменение индикаторного давления от состава ТВС при работе ДВС на различном топливе:  
1) метанол; 2) этанол; 3) бензин;  
4) природный газ; 5) водород;  
6) аммиак [2]

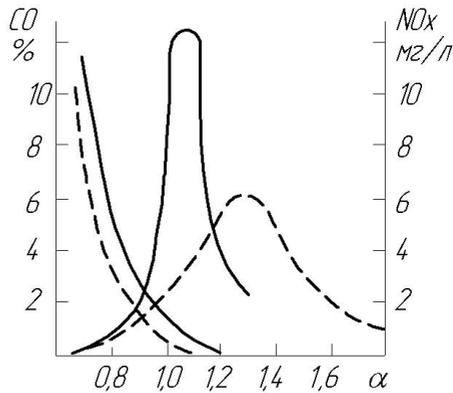


Рис. 6. Содержание CO и  $NO_x$  при работе ДВС на различном топливе:  
1) метанол; 2) этанол; 3) бензин;  
4) природный газ; 5) водород;  
6) аммиак [2]

Таблица 3

## Физико-химические и эксплуатационные свойства жидкого и газообразного топлива [2]

	Нефтяное топливо		Метанол	Этанол	Нефтяной газ	Природный газ		Водород газообразный
	бензины	ДТ				газообразный	жидкий	
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	710 – 760	810 – 870	795	790	542	0,71	420	0,09
Температура, °С:								
кипения	35 – 215	160 – 360	64,7	78	-42	-162	-162	-253
кристаллизации	-60...-80	-10...-60	-97,8	-114,6	-187	-182	-182	-259
самовоспламенения	350 – 400	230 – 300	300–450	300–450	550 – 600	650 – 700	650 – 700	450
Теплота сгорания, МДж/кг	41-44	42-43	19,98	26,9	45-46	48,94-50,15	48,94-50,15	120
Температура горения, К	2336	2289	2185	2235	2149	2065	2065	2449
Стехиометрическое кол-во воздуха, требующееся для полного сгорания, кг/кг	14,96	14,92	6,51	9,06	15,2	16,8-17,4	16,8-17,4	34,8
Октановое число: моторный метод исследовательский метод	66 – 85 80 – 98	- -	88 – 94 102–111	92 108	90 – 94 93 – 113	100 – 105 110 – 115	100 – 105 110 – 115	30 – 40 45 – 90
Цетановое число	8 – 14	45 – 55	3	8	18 – 22	-	-	-
Границы устойчивой работы по $\alpha$	0,7 – 1,2	0,9 – 5	0,7 – 1,4	0,7–1,25	0,7 – 1,2	0,7 – 1,3	0,7 – 1,3	0,2 – 5

Состав продуктов сгорания различного современного топлива весьма разнообразен. Содержание оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) находится в прямой зависимости от температуры горения топлива. В соответствии с этим максимальный выход  $\text{NO}_x$  получается при использовании водорода (температура горения  $\sim 2500$  К), а минимальный – аммиака (1956 К). Выход оксида углерода (СО) определяется главным образом элементарным составом топлива (отношением С:Н), в соответствии с которым альтернативное топливо по отношению к бензину характеризуются снижением содержания СО (природный газ, метанол) либо полным его отсутствием (водород, аммиак).

### 3.1. Спирт

В качестве моторного топлива широкое применение нашли метанол и этанол. Это обусловлено значительными объёмами их производства, высокими детонационными свойствами, возможностью экономии нефти при условии производства этих спиртов из других источников сырья.

Ограниченность их использования в качестве моторного топлива связана рядом недостатков, присущих спиртам:

1) пониженная (почти в 2 раза), по сравнению с углеводородными топливами теплота сгорания, что оказывает отрицательное влияние на мощностные характеристики двигателя;

2) низкая энергоплотность спиртов по сравнению с углеводородным топливом (метанол – 16 МДж/л, этанол – 21 МДж/л, бензин – 32 МДж/л) приводит к увеличению почти в 2 раза удельного расхода спиртового топлива и требует для обеспечения одинакового запаса хода почти вдвое большего объёма топливного бака;

3) низкое давление насыщенных паров и высокая теплота испарения, в 4–5 раз превосходящая эти показатели углеводородного топлива, затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным пуск двигателя при низких температурах; запуск двигателей с искровым зажиганием на спиртовом топливе невозможен при температуре ниже  $+10^\circ\text{C}$ , с целью устранения этого недостатка в спирты добавляют 6–10% изопентана или диметилового эфира, что обеспечивает пуск двигателей при температурах до  $-20$ – $25^\circ\text{C}$ ; возможна также установка специальных подогревателей спиртового топлива, однако это усложняет конструкцию двигателя;

4) неограниченная растворимость воды в метаноле и этаноле, контакт с которой неизбежен при хранении, транспортировке, заправке автомобилей; попадание даже небольшого количества воды резко ухудшает эксплуатационные свойства спиртового топлива и приводит к вымыванию спиртов из бензина и переходу их в нижний водно-спиртовой слой;

5) высокая коррозионная агрессивность спиртов, и особенно продуктов их превращений (низкомолекулярные кислоты, альдегиды и т. п.), которая усиливается в присутствии воды;

6) спирты оказывают негативное влияние на резинотехнические и пластмассовые изделия, вызывая их набухание и растворение, изменение геометрических размеров деталей;

7) в ОГ при использовании спиртового топлива обнаружены альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, содержание которых в 1,5–2 раза выше по сравнению с использованием углеводородного топлива;

8) переход с углеводородного топлива на спиртовое требует существенной модернизации или перерегулировки системы подачи топлива, в частности, соотношения воздух – топливо, которое для спиртового топлива значительно ниже из-за наличия кислорода, а также изменения степени сжатия.

Поэтому значительно большее применение метанол, и особенно этанол нашли в качестве добавок к углеводородному топливу, решая при этом задачи улучшения эксплуатационных свойств и экономии нефтяных ресурсов.

К положительным качествам метанола и этанола относятся высокие антидетонационные свойства, что позволяет повысить степень сжатия в камере сгорания до 12–14 и снизить удельный расход топлива (повысить КПД двигателя) (рис. 7, 8, 9, 10). Эти факторы, а также высокий коэффициент наполнения позволяют существенно повысить мощность спиртового двигателя (рис. 11). Одновременно несколько возрастает среднее эффективное давление, пропорциональное крутящему моменту, что является существенным преимуществом для автомобильных двигателей.

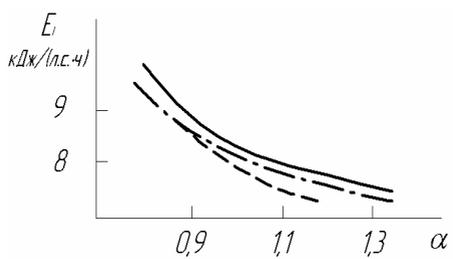


Рис. 7. Изменение индикаторного расхода энергии при работе ДВС на различном топливе: (—) изооктан; (-----) метанол; (- · - · -) этанол [2]

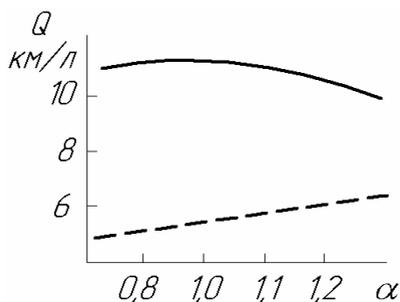


Рис. 8. Изменение топливной экономичности автомобиля при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (-----) метанол [2]

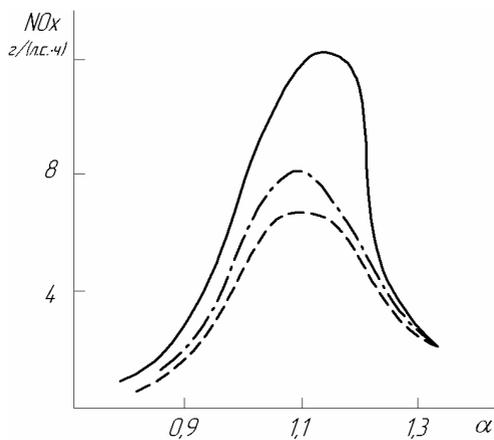


Рис. 9. Изменение удельных выбросов  $NO_x$  при работе ДВС на различном топливе: (—) изооктан; (-----) метанол; (- · - · -) этанол [2]

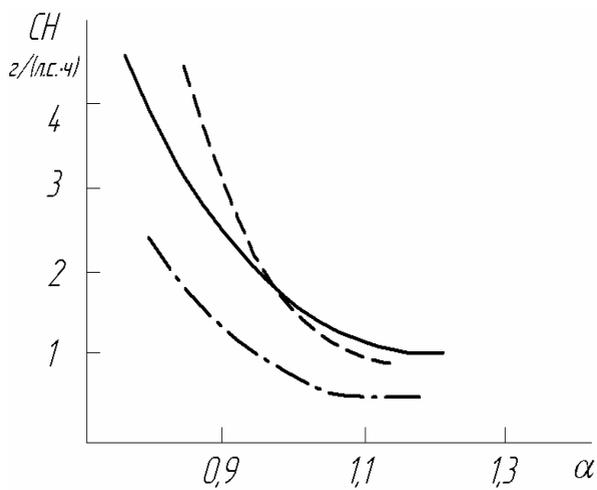


Рис. 10. Изменение углеводородов при работе ДВС на различном топливе: (—) изооктан; (-----) метанол; (- · - · -) этанол [2]

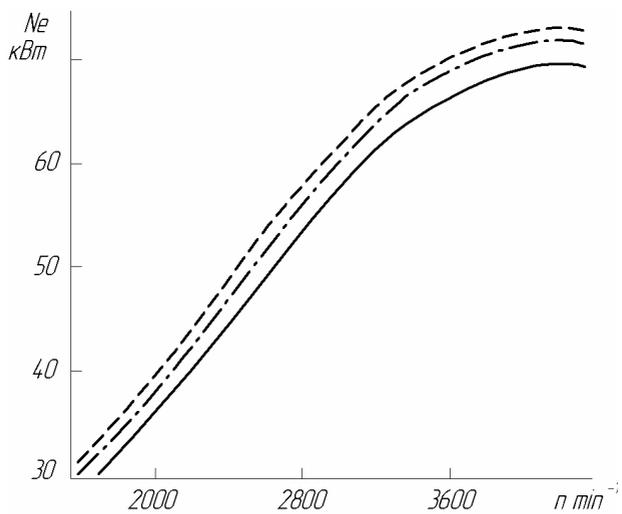


Рис. 11. Изменение мощности двигателя ЗМЗ-24 при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (-----) метанол; (- · - · -) бензометанольная смесь [2]

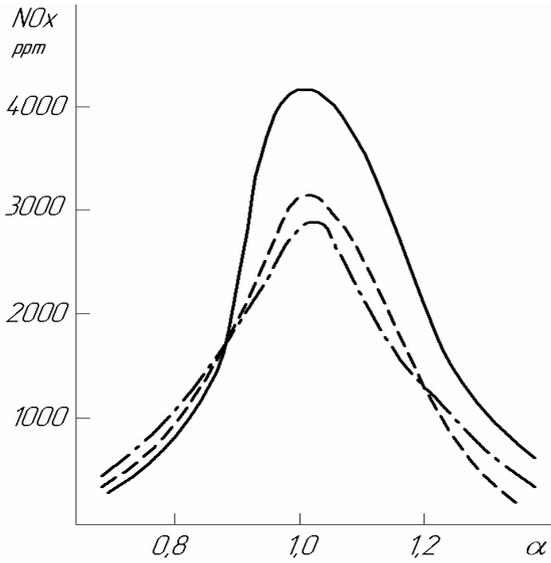


Рис. 12. Содержание  $NO_x$  в ОГ при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (-----) метанол; (- · - · -) бензометанольная смесь [2]

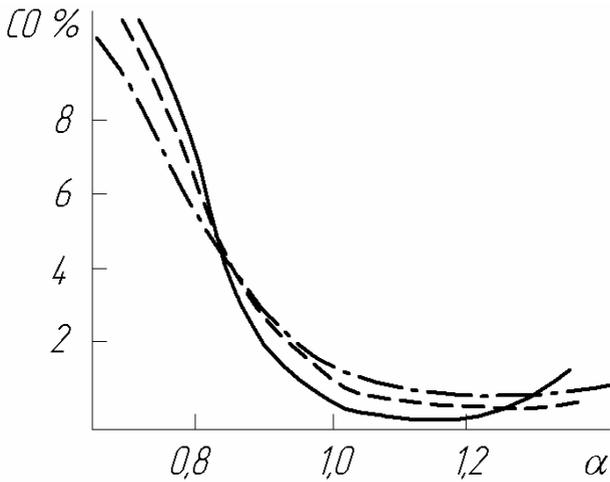


Рис. 13. Содержание CO в ОГ при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (-----) метанол; (- · - · -) бензометанольная смесь [2]

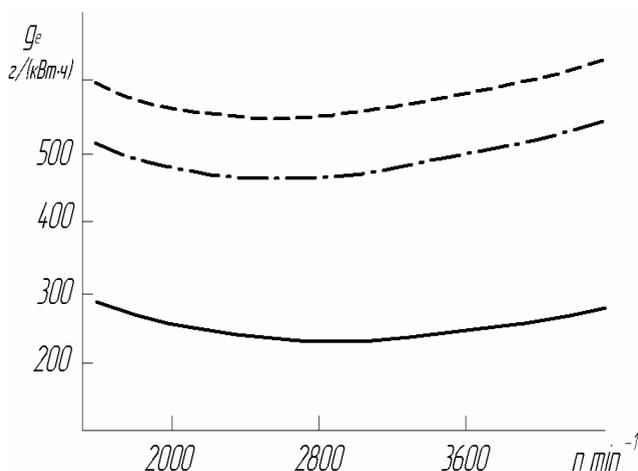


Рис. 14. Изменение эффективного расхода топлива двигателя ЗМЗ-24 при работе ДВС на различном топливе: (—) бензин; (----) метанол; (- · - · -) бензометанольная смесь [2]

При использовании спиртового топлива снижается содержание токсичных веществ в ОГ.

Снижение содержания  $\text{NO}_x$  (рис. 12) обусловлено меньшей (на  $150^\circ\text{C}$ ) температурой горения метанола по сравнению с бензином; более полное сгорание метанола за счет содержания в его молекуле кислорода обеспечивает снижение содержания  $\text{CO}$  (рис. 13) и  $\text{CH}$  в ОГ.

Высокие антидетонационные свойства спиртов определяют их преимущественное использование в двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

Использование спиртов в дизельных двигателях затрудняется из-за низких цетановых чисел, высокой температуры самовоспламенения (в 1,5–2 раза выше этого показателя для дизельного топлива) и низких смазывающих свойств, ведущих к повышенному износу ТНВД.

Работа дизельных двигателей на спиртовом топливе может осуществляться при следующих условиях:

- 1) введение в топливо присадок, улучшающих их воспламеняемость (повышающих цетановое число); так, введение 20% циклогексилнитрата в случае этанола повышает его цетановое число с 8 до 60 единиц, а в случае метанола с 3 до 53 единиц;

- 2) переоборудование дизельного двигателя в двигатель с искровым зажиганием, что требует установки дополнительного электрооборудования;
- 3) добавка спиртов в дизельное топливо с высоким цетановым числом;
- 4) для улучшения смазывающих свойств спиртов необходимо введение противоизносных присадок.

Указанные мероприятия приводят к существенному удорожанию спиртового топлива, к усложнению конструкции двигателя и в итоге к ухудшению экономических показателей.

При использовании спиртов в обоих типах двигателей – бензиновом и дизельном отмечены повышенные износы деталей цилиндропоршневой группы. Причинами этого являются:

- 1) попадание в камеру сгорания значительного количества неиспарившегося спирта, обусловленное высокой температурой испарения, и смыв им смазки, что приводит к износу уплотнительных колец и зеркала цилиндра;
- 2) попадание спирта в картер двигателя и образование в нем масло-спиртовой эмульсии, обладающей худшими смазывающими свойствами, что приводит к износу пар трения;
- 3) взаимодействие спиртов в картере с присадками, введенными в состав масла, и снижение противоизносных свойств масла.

Перечисленные недостатки спиртового топлива перекрывают их достоинства.

Это привело к тому, что спирты не применяются в дизельных двигателях и нашли ограниченное применение в двигателях с искровым зажиганием, в основном в спортивных автомобилях.

В настоящее время широкое применение находит смесевое топливо, т. е. углеводородное топливо, содержащее низкомолекулярные спирты, чаще этанол, в количествах от нескольких процентов (5–10%) до десятков процентов (85–95%).

### **3.1.1. Бензометанольное топливо**

Метанол (метиловый спирт) или древесный спирт представляет собой бесцветную воспламеняющуюся жидкость со слабым спиртовым и чуть острым запахом. Хорошо смешивается с водой.

Использование метанола требует переоборудования двигателя и перерегулировки топливной системы двигателей с искровым зажиганием, увеличения объёма топливных баков, новых смазочных материалов, замены резинотехнических изделий, специальных противокоррозионных топливных баков или применения специальных присадок.

При температурах ниже  $+10^{\circ}\text{C}$  давление насыщенных паров метанола низкое и запустить холодный двигатель на нем достаточно трудно.

Для стехиометрического горения метанола требуется в два раза меньше воздуха, чем для бензина, поэтому объём подачи метанола должен быть увеличен в два раза по сравнению с бензином. Современные двигатели могут хорошо работать на метаноле, при этом технические характеристики двигателя улучшаются: снижается удельный расход топлива (рис. 14), повышается КПД, благодаря внутреннему охлаждению и повышению степени сжатия.

Применение метанола в качестве топлива обеспечивает снижение до 50 % концентрации токсичных веществ в ОГ, однако наблюдается увеличение в них концентрации альдегидов.

Основной проблемой при эксплуатации двигателя на метаноле является токсичность топлива.

### **3.1.2. Бензоэтанольное топливо**

Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с метиловым спиртом, этанол используется в качестве моторного топлива в значительно больших объёмах. Это обусловлено следующими преимуществами этанола:

- 1) более высокая теплотворная способность – на 35% выше чем у метанола;
- 2) лучшая растворимость в бензине;
- 3) меньшая коррозионная агрессивность к резинотехническим изделиям и металлам;
- 4) меньшая токсичность;
- 5) бензоэтанольное топливо характеризуется лучшими антидетонационными свойствами.

## 3.2. Водотопливная эмульсия (ВТЭ)

### 3.2.1. Общая характеристика ВТЭ

Первые попытки применения воды в рабочих процессах двигателей внутреннего сгорания были предприняты почти одновременно с их появлением. Еще на заре эры автомобилизации для улучшения работы двигателя Р. Ленуара использовалась подача воды в горючую смесь. В 1884 г. Р. Банки (Венгрия) и позже, в 1906 г., Н. Оствальд (Германия) создали двигатели с впрыском воды. В 30-е годы ряд зарубежных фирм начали повсеместно использовать впрыск воды для повышения мощности двигателей. Так, в 1937 г. был испытан автомобиль «Орел» с увеличенной на 10% мощностью двигателя за счет повышения степени сжатия с 5,4 до 7,7. Для обеспечения бездетонационной работы в двигатель подавали 20–35% воды (от расхода топлива).

В современных условиях переориентации на нефтесберегающие технологии применение добавок воды рассматривается, главным образом, как способ снижения детонационных требований двигателя и, тем самым, экономии высокооктановых компонентов бензинов за счет снижения их октанового числа.

Прямая подача воды в двигатель может осуществляться следующими способами:

- 1) непрерывная подача постоянного количества воды независимо от режима работы двигателя;
- 2) регулируемая подача воды, которая обеспечивает ее определенную долю в топливной смеси;
- 3) регулируемая подача воды с переменным расходом в соответствии с режимом работы двигателя.

Наибольший интерес представляет последний способ, так как вода может подаваться в жидком и парообразном виде во впускной трубопровод или непосредственно в цилиндр двигателя.

При прямой подаче воды в двигатель происходит снижение температуры сгорания в результате расхода тепла на подогрев и испарение воды, уменьшение скорости сгорания топливной смеси, уменьшение работы в такте сжатия, уменьшение тепловых потерь. При анализе индикаторных диаграмм рабочего процесса двигателей с искровым зажиганием с дополнительной подачей воды установлено, что при со-

держании воды до 20–40% уменьшается работа сжатия, однако снижается максимальное индикаторное давление, в результате индикаторная мощность двигателя практически не изменяется.

Антидетонационный эффект воды определяется тремя факторами: охлаждением рабочей смеси, снижением температуры сгорания и внутренним охлаждением камеры сгорания. В целом каждые 10% (масс.) воды повышают октановое число бензина на 2–3 единицы.

В действительности антидетонационный эффект воды может быть реализован одним из трех способов:

- 1) установкой оптимального угла опережения зажигания при работе на бензине;
- 2) переходом на более низкооктановый бензин при сохранении штатных регулировок угла опережения зажигания (УОЗ);
- 3) повышением степени сжатия двигателя.

Наибольший интерес для эксплуатации представляют первые два способа. Бездетонационная работа двигателей на бензинах обеспечивается штатной регулировкой на более поздний УОЗ, допустимое отклонение которого от оптимального ограничивается снижением мощности или экономичности двигателя на 5%. Поэтому, с учетом эксплуатационных режимов работы автомобиля суммарная экономия топлива при оптимальном УОЗ для новых двигателей не превышает 2–3%. Однако во время эксплуатации наблюдается рост детонационных требований к двигателям в среднем на 4–6, а в отдельных случаях и на 10–15 единиц, что обычно компенсируется дополнительной корректировкой УОЗ и ведет к ещё большему ухудшению экономических показателей. В этом случае использование впрыска воды в сочетании с оптимизацией УОЗ может повысить экономичность работы двигателя на 4–7%.

Антидетонационный эффект воды можно усилить с помощью водорастворимых антидетонаторов, например фенольных соединений и соединений калия.

Добавка воды изменяет состав ОГ двигателей с искровым зажиганием. В наименьшей степени это сказывается на концентрации CO и более существенно – NO<sub>x</sub>: при любом способе подачи воды содержание NO<sub>x</sub> снижается на 8–10% на каждые 10% добавляемой воды. Уменьшение концентрации NO<sub>x</sub> объясняется снижением температуры в КС и в какой-то мере уменьшением скорости сгорания топливной

смеси. В то же время добавка воды способствует повышению концентрации суммарных СН. Степень увеличения выбросов СН зависит от конструктивных особенностей двигателя, режима его работы, а также способа подачи воды.

### **3.2.2. Состав ВТЭ**

ВТЭ представляет собой смесь из двух взаимно нерастворимых жидкостей, одна из которых (дисперсная фаза) в виде мельчайших капель равномерно распределена в другой (дисперсионной среде).

Концентрированные эмульсии являются неустойчивыми системами. Термодинамическая стабильность эмульсий может быть достигнута только при снижении поверхностного натяжения на границе раздела фаз и выполнении ряда других требований. В этом случае происходит самопроизвольное эмульгирование, в результате которого получается эмульсия с каплями дисперсной фазы определенного размера, зависящего только от внутренних параметров системы. Устойчивость, или стабильность, эмульсий обеспечивается присутствием эмульгатора. В качестве эмульгаторов-стабилизаторов применяют различные синтетические ПАВ, которые добавляют в количестве не более 0,2%, что практически не отражается на эксплуатации двигателя.

### **3.2.3. Свойство ВТЭ**

При концентрациях воды до 10% её влияние на показатели качества топлива незначительно. Однако при концентрации воды свыше 20% существенно повышается теплота испарения, изменяется фракционный состав, в частности повышаются температуры начала кипения и 50%-го отгона, снижается давление насыщенных паров и скорость испарения с поверхности. Всё это ведет к ухудшению пусковых свойств и показателей работы двигателя, особенно в период прогрева и при работе на переходных режимах.

Антидетонационный эффект ВТЭ выше, чем при остальных способах подачи воды. Цетановое число дизельного топлива при этом снижается вследствие уменьшения температуры факела распыливания топлива, вызванного испарением воды; это снижение пропорционально концентрации водной фазы.

Вода в эмульсии типа «вода-масло» оказывает дополнительное влияние на рабочий процесс двигателя. Это обусловлено дроблением

капель эмульсии в горячей среде, получившим название «микровзрывов», или внутрикапельного распыления. Именно вторичное распыление, способствующее гомогенизации заряда, интенсификации смешения воздуха и топлива и повышению полноты сгорания топливной смеси, определяет возможность улучшения экономичности двигателей по сравнению с прямой подачей воды.

Современные исследования показали, что характер работы двигателей с искровым зажиганием на ВТЭ аналогичен работе его с прямой подачей воды во впускной коллектор. Этот факт свидетельствует о том, что качественное внешнее смесеобразование в современных двигателях с искровым зажиганием и подогрев топливной смеси сводит влияние эффекта вторичного распыления эмульсии к минимуму. Улучшение в некоторых случаях топливной экономичности обусловлено антитонационным эффектом водной фазы либо переходом от мощностного к экономичному составу топливоздушнoй смеси благодаря ее фактическому обеднению при использовании ВТЭ.

В отличие от двигателей с искровым зажиганием, при изучении работы дизелей на ВТЭ отмечается повышение индикаторного КПД в основном за счёт лучшего смесеобразования и сгорания. При этом значительно изменяется характер индикаторных диаграмм. Результаты испытаний дизелей показали, что при использовании эмульсий с концентрацией воды 10–20% удельные расходы топлива снижаются на 2–4%.

Для применения ВТЭ на автомобильном транспорте можно использовать заранее приготовленные эмульсии или приготавливать их непосредственно на борту автомобиля. Каждый из вариантов имеет преимущества и недостатки. Так, в первом случае необходимость модификации системы питания двигателя сведена к минимуму, в то время как организация эмульгирования на автомобиле требует усложнения топливоподающей аппаратуры. Однако использование заранее приготовленных эмульсий менее предпочтительно из-за их плохой устойчивости и высоких температур застывания.

### **3.3. Биотопливо**

Биотопливом (биологическим топливом) называют моторное топливо, которое получают из возобновляемых растительных источников сырья.

В настоящее время в промышленных масштабах вырабатывают биодизельное топливо.

Для производства биодизельного топлива могут использоваться различные масличные культуры (соя, рапс и т. д.), а также отходы производства говяжьего и других животных жиров. Биодизельное топливо из растительного сырья получают раздавливанием семян масличных культур, в результате которого получают растительное масло. Особенностью растительных масел по сравнению с дизельным топливом являются более высокая вязкость и плотность, высокое содержание (8–9%) кислорода и обусловленное этим некоторое снижение теплоты сгорания топлива-

Таблица 4

Физико-химические свойства растительных масел

Масло	Подсолнечное	Рапсовое	Льняное
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	925	922	932
Вязкость (37,8°С), мм <sup>2</sup> /с	35	37	29
Теплота сгорания, МДж/л	36,4	36,9	37,0

При работе дизельных двигателей на растительных маслах КПД несколько выше, чем при работе на дизельном топливе, однако мощность снижается на 5–20% в зависимости от вида масла. Из-за пониженной теплоты сгорания топливная экономичность двигателя несколько ухудшается и, кроме того, наблюдается повышенное количество углеродистых отложений при длительной работе. Эксплуатационные свойства растительных масел могут быть улучшены путем их очистки или введения специальных присадок.

На основании экспериментов установлено, что предкамерные дизели при работе на растительных маслах имеют лучшие характеристики и менее склонны к выходу из строя, чем дизели с неразделенной камерой сгорания. Так, в исследованиях работы дизеля на смеси рапсового масла и дизельного топлива в равном соотношении после 287 ч эксплуатации наблюдалось залегание колец, засмоление выпускного канала и значительные отложения на выпускных клапанах, при этом распылители форсунок и элементы ТНВД оставались без изменения. При испытаниях смеси подсолнечного масла с дизельным топливом в соотношении 2:8 на предкамерных дизелях после 400 ч эксплуатации обнаружено

закоксовывание сопловых каналов распылителей форсунок. В то же время те же предкамерные дизели удовлетворительно работали на очищенном подсолнечном масле на протяжении около 2000 тыс. часов в условиях нормальной эксплуатации.

Применительно к двигателям с искровым зажиганием изучена возможность использования эвкалиптового масла и его смесей с бензинами и спиртами. Из-за высокой вязкости применение этого масла требовало перерегулировки топливной аппаратуры, и всё равно при работе автомобиля на чистом масле затруднялся запуск двигателя, ухудшались топливная экономичность и динамические качества. Установлено, что оптимальным является содержание 10–20% масла как в спиртах, так и в бензинах.

Целесообразность использования растительных масел в качестве моторного топлива признается преимущественно в Австралии и ряде стран Тихоокеанского бассейна, сельское хозяйство которых специализировалось на производстве арахисового и кокосового масел. Такая возможность подтверждена приведенными в Австралии полевыми испытаниями тракторов и грузовых автомобилей с дизельными двигателями на арахисовом масле. Техничко-экономический анализ основных направлений использования биомассы показал, что для этой страны наибольший интерес представляет рапсовое масло. Для условий Бразилии рекомендуются смеси растительных масел (из соевых бобов, подсолнечника или земляных орехов) с дизельным топливом в соотношении 1: 9.

Для производства биодизельного топлива используют рапсовое масло, которое вырабатывается из семян рапса и представляет собой сложные эфиры глицерина и высших карбоновых кислот.

Рапсовое масло имеет высокую температуру плавления и поэтому рапсовое масло подвергают гидролизу с получением глицерина и смеси жирных кислот. Эту смесь этерифицируют метанолом с получением метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла — биодизельное топливо, которое может использоваться как самостоятельно, так и в виде различных композиций с углеводородным топливом.

Введение до 10% биодизельного топлива не влияет на физико-химические и эксплуатационные свойства дизельного топлива.

В США предложены два вида топлива для дизельных двигателей: В100 – «чистое» биодизельное топливо и В20 – дизельное топливо, содержащее 20 % биодизельного топлива. При использовании биодизельного топлива и его смесей не требуется изменения инфраструктуры (хранение, транспортные коммуникации, заправочное оборудование, автомобильные баки и т. п.). Характеристики дизельного двигателя, работающего на биодизельном и традиционном углеводородном (мощность, расход топлива) топливе, аналогичны.

Двигатели, работающие на биодизельном топливе, меньше выделяют сажи, СО и менее токсичны по сравнению с двигателями, использующими углеводородное топливо, эмиссия  $\text{NO}_x$  примерно одинакова.

*Другим биотопливом, которое также может применяться в качестве добавки к традиционному или как самостоятельное топливо является биобутанол.*

*Под термином «биобутанол» понимается бутиловый спирт (бутанол), полученный из растительного сырья (кукурузы, сахарной свеклы, сорго, маниоки, сахарного тростника, кукурузных стеблей).*

В связи с получением новых высокоэкономичных технологий производства, биобутанол, как моторное топливо, привлекает большое внимание специалистов.

*Биобутанол представляет собой спирт (бесцветная жидкость с характерным запахом сивушного масла) с четырьмя атомами углерода ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ). Бутиловый спирт (бутанол) как и этиловый спирт (этанол) может быть получен переработкой сахара или крахмала с/х растительных культур (биобутанол I поколения) или переработкой целлюлозы растений (биобутанол II поколения).*

Биобутанол может заменить бензин в большей степени, чем этанол, благодаря своим физико-химическим свойствам, лучшим экономическим показателям. Использование биобутанола не требует переделок конструкции двигателя.

По сравнению с этанолом, биобутанол может быть смешан в более высоких пропорциях с бензином и использоваться в двигателях без существенной модернизации системы питания.

Достоинства биобутанола по сравнению с этанолом:

1) биобутанол содержит на 25% больше энергии, чем этанол: 110 000

Британских тепловых единиц (ВТУ) на галлон бутанола против 84

000 BTU на галлон этанола. Бензин же содержит около 115 000 BTU на галлон;

- 2) биобутанол безопаснее в использовании, так как его испаряемость в шесть раз меньше, чем у этанола и, он в 13,5 раз менее летуч, чем бензин. Упругость паров бутанола по Рейду составляет 0,33 фунта/дюйм<sup>2</sup>, у бензина это 4,5 фунта/дюйм<sup>2</sup>, у этанола — 2,0 фунта/дюйм<sup>2</sup>. Это делает бутанол более безопасным при использовании в качестве оксигената и не требует особых изменений пропорций смеси при использовании зимой и летом;
- 3) биобутанол — менее агрессивное вещество, чем этанол, поэтому может транспортироваться по существующим топливным трубопроводам, тогда как этанол должен транспортироваться железнодорожным или водным транспортом;
- 4) биобутанол хорошо смешивается с бензином;
- 5) биобутанол может полностью заменить бензин, тогда как этанол может использоваться только как добавка к бензину с содержанием в смеси не более 85 % и только после существенных переделок конструкции двигателя;
- 6) отсутствие в ОГ NO<sub>x</sub>.

### 3.4. Мазут

В процессе первичной переработки сырую нефть очищают от пластовой воды, примесей неорганических веществ и др. Затем очищенную нефть подвергают прямой перегонке на современных установках. На первом этапе перегонка осуществляется в условиях атмосферного давления. При нагревании нефти до 250°С выкипают углеводороды, относящиеся к бензиновой и лигроиновой фракциям. В пределах температур 250–315°С выделяются керосино-газойлевые фракции, а при 300–350°С — масляная (соляровая) фракция. Остаток называется мазутом.

Различают неглубокую переработку нефти (разгонку) и глубокую (крекинг). При разгонке нефть разделяется на узкие фракции по температурам их выкипания без разрушения молекулярной структуры, а при крекинге достигается разрушение молекул исходных углеводородов с образованием новых соединений. Наряду с легкими продуктами

при крекинге нефтяных фракций образуются сложные и тяжелые углеводороды – гудрон и полугудрон, а также твёрдые вещества.

Мазут, получаемый при неглубокой переработке нефти, называют прямогонным, при глубокой переработке нефти – крекинг-мазutom.

В соответствии с ГОСТ установлены следующие марки мазутов: флотский Ф 5 и Ф 12; топочный М 40 и М 100. Марка мазута характеризует максимальное значение условной вязкости при температуре 50 °С. Флотские мазуты относятся к категории лёгких топлив, топочный мазут марки М 40 – к категории средних топлив, топочный мазут марки 100 – к категории тяжёлых топлив. Основные характеристики мазута представлены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели качества мазута по ГОСТ 10585-99

Показатель	Нормы для марок					
	Ф5	Ф12	40В со знаком качества	40	100В со знаком качества	100
Вязкость при 50°С, мм <sup>2</sup> /с, не более	36,2	89,0				
Вязкость при 80°С, мм <sup>2</sup> /с, не более			43,8	59,0	73,9	118,0
Зольность, %, не более	0,05	0,10	0,04	0,12	0,05	0,14
Содержание механических примесей %, не более	0,10	0,12	0,07	0,80	0,20	1,5
Содержание воды, %, не более	0,3	0,3	0,3	1,5	0,3	1,5
Теплота сгорания мазута (низшая) в пересчёте на сухое топливо, Дж/кг, не менее: малосернистый и сернистый высокосернистый	41454·10 <sup>3</sup>	-	40740·10 <sup>3</sup> 39900·10 <sup>3</sup>		40530·10 <sup>3</sup> 39900·10 <sup>3</sup>	

В пределах марок топочные мазуты подразделяются на три сорта в зависимости от содержания серы: малосернистые ( $S^p \leq 0,5\%$ ), сернистые ( $S^p = 0,5-2,0\%$ ) и высокосернистые ( $S^p = 2,5-3,5\%$ ). Для мазута, получаемого при переработке высокосернистой нефти, допускается содержание серы не более 4,3 %. Соединения, образующие мазут, состоят из пяти основных элементов: углерода, водорода, серы, кислорода и азота. Элементный состав горючей массы зависит от состава исходной нефти и глубины ее переработки. Минеральные примеси в мазутах представляют собой в основном соли щелочных металлов, а также продукты коррозии резервуаров. Зольность топочных мазутов

весьма незначительна и обычно не превышает 0,1%. Содержание воды в мазутах колеблется в пределах от 0,5–1 до 3–5%.

Значительное обводнение мазута происходит при разогреве острым паром в период слива. При сжигании обводненных мазутов возрастает аэродинамическое сопротивление и расход энергии на собственные нужды электростанции, а также уменьшается: теоретическая температура горения и теплоотдача в топке, вследствие чего снижается КПД парогенератора. Кроме того, влага усложняет эксплуатацию мазутного хозяйства и может привести к нарушению нормального режима горения мазута из-за возможного образования водяных пробок, прерывающих равномерную подачу топлива к форсункам.

Одной из важнейших характеристик мазута является его вязкость, поэтому она положена в основу маркировки мазута. Вязкостью определяются способы и длительность сливных и наливных операций, условия транспортировки топлива и эффективность работы форсунок. Под условной вязкостью понимают отношение времени непрерывного истечения 200 мл продукта при определенной температуре (50 °С) ко времени истечения дистиллированной воды при 20 °С.

Вязкость мазутов зависит от температуры, давления и предварительной термообработки. Вязкость мазута с увеличением температуры сильно уменьшается. Причем для обеспечения необходимой вязкости температура подогрева высоковязких и маловязких сернистых мазутов отличается несущественно. Например, для мазутов М 40 и М 100 в случае, если необходимо получить одинаковую вязкость перед механической форсункой (3,5 °ВУ), разница в подогреве должна составлять всего 20 °С (104 и 124 °С).

С ростом давления вязкость мазута повышается, при этом чем сложнее молекулярное строение компонентов мазута, тем большее влияние оказывает давление на вязкость. Предварительная термообработка мазутов меняет их вязкостные свойства. Связано это с присутствием в мазутах углеводородов, образующих при относительно низких температурах более или менее жесткие структуры.

Мазут перед сжиганием необходимо подготовить, т. е. удалить механические примеси, повысить давление мазута и подогреть, для снижения потерь давления при транспортировке по трубопроводам и обеспечения тонкого распыливания. Температура в баках поддержива-

ется на уровне 60–80 °С за счет циркуляционного подогрева. Типовой является двухступенчатая схема подачи топлива, предусматривающая двухступенчатое повышение давления.

Очистка мазута от твердых фракций происходит вначале в фильтрах грубой очистки с размером ячеек 1,5×1,5 мм<sup>2</sup>, а затем в фильтрах тонкой очистки с ячейками 0,3–0,5 мм, установленных перед насосами второй ступени.

Теплота сгорания обезвоженного мазута колеблется в пределах от 39 до 41,5 МДж/кг в зависимости от его состава. Теплота сгорания горючей массы мазута зависит от соотношения главных горючих элементов С, Н, а также от содержания S, О и N. Присутствие в составе мазута нефтяных смол и асфальтов снижает теплоту сгорания мазута.

За температуру вспышки мазута принимают температуру, при которой пары мазута в смеси с воздухом вспыхивают при контакте с открытым пламенем. Прямогонные мазуты имеют температуру вспышки в пределах 135–37 °С. Температура вспышки парафинистых мазутов близка к 60 °С. Во избежание пожара, температура подогрева мазута в открытых системах должна быть ниже температуры вспышки.

Мазут, как многокомпонентная смесь, не имеет строго фиксированной температуры перехода из жидкого состояния в твердое. При уменьшении температуры происходит постоянное загустевание мазута. Согласно ГОСТ 8513-57 за температуру застывания принимают температуру, при которой он загустевает настолько, что в пробирке при ее наклоне под углом 45° остается неподвижным в течение одной минуты. Высокой температурой застывания характеризуются мазуты с большим содержанием парафинов.

## **3.5. Керосин**

### **3.5.1. Свойства и состав керосина**

Плотность: 0,78–0,85 г/см (при 20°С), вязкость: 1,2–4,5 мм<sup>2</sup>/с (при 20°С), температура вспышки: 28–72°С, теплота сгорания  $Q_{\text{н}}$  = 43 МДж/кг.

В зависимости от химического состава и способа переработки нефти, из которой получен керосин, в его состав входят: предельные алифатические углеводороды (20–60%), нафтеновые (20–50%), бицик-

лические ароматические (5–25%), непредельные (до 2%), примеси сернистых, азотистых или кислородных соединений.

### **3.5.2. Применение керосина**

Керосин применяют как реактивное топливо, горючий компонент жидкого ракетного топлива, для бытовых нагревательных и осветительных приборов, в аппаратах для резки металлов.

Авиационный керосин служит в двигателях не только топливом, но также хладагентом и применяется для смазывания деталей топливных систем. Поэтому он должен обладать хорошими противоизносными (характеризуют уменьшение изнашивания трущихся поверхностей в присутствии топлива) и низкотемпературными свойствами, высокой термоокислительной стабильностью и большой удельной теплотой сгорания.

Керосин применяется в ракетной технике в качестве углеводородного горючего и одновременно рабочего тела гидромашин. Использовать керосин в ракетных двигателях предложил К.Э. Циолковский в 1914 году. В паре с жидким кислородом используется на нижних ступенях многих ракетносителей: отечественных – «Союз», «Молния», «Зенит», «Энергия»; американских – серий «Дельта» и «Атлас». В перспективе предполагается замена керосина на более эффективные углеводородные горючие – метан, этан, пропан и т. п.

Технический керосин используют как сырьё для получения этилена, пропилена и ароматических углеводородов.

Деароматизированный путём глубокого гидрирования керосин (содержит не более 7% ароматических углеводородов) – растворитель в производстве ПВХ полимеризацией в растворе. В керосин, используемый в моечных машинах, для предупреждения накопления зарядов статического электричества добавляют присадки, содержащие соли магния и хрома. В РФ нормы на технический керосин задаются ГОСТ 18499-73 «Керосин для технических целей».

Осветительный керосин применяют в основном в керосиновых и калильных лампах и, кроме того, в качестве топлива в аппаратах для резки металлов и в бытовых нагревательных приборах, при пропитке кож и промывке деталей в электроремонтных и механических мастерских. В случае использования по главному назначению, качество этого керосина определяется преимущественно высотой некопящего пламени

(ВНП), а также температурами вспышки и помутнения (температура выпадения кристаллов твёрдых углеводов из керосина; характеризует его работоспособность при сравнительно низкой температуре окружающего воздуха), минимальным содержанием серы (керосин должен сгорать без выделения вредных для человека продуктов) и цветом.

ВНП определяет способность керосина гореть в стандартной фитильной лампе (диаметр фитиля – 6 мм) ровным белым пламенем без нагара и копоти; численные значения этого показателя входят (в мм) в обозначения марок керосина. Существенное влияние на ВНП оказывают фракционный и химический состав керосина. Для предотвращения обугливания фитиля и засорения его пор смолами, нафтеновыми кислотами и др. (вследствие чего уменьшаются подача керосина по фитилю и сила света) в высококачественном керосине должно быть максимальное количество легких фракций. Поэтому в составе осветительного керосина предпочтительны повышенное содержание предельных алифатических углеводов и пониженное – ароматических, что приводит к уменьшению нагара и копоти и увеличению ВНП. Повышению последней и улучшению иных эксплуатационных свойств керосина способствует также его гидроочистка.

Нормы характеристик осветительных керосинов в России задаются стандартами ГОСТ 11128-65 «Керосин осветительный из сернистых нефтей» и ГОСТ 4753-68 «Керосин осветительный».

### **3.6. Композиционное топливо**

Композиционным топливом являются водомазутные эмульсии, мазутоугольные и водомазутоугольные суспензии, водоугольные суспензии.

*Горение водомазутных эмульсий.* Водомазутная эмульсия, содержащая до 10–15% (иногда до 30–50%) воды, вводится в топочный объём аналогично мазуту в распыленном подогретом состоянии. При одном и том же расходе мазута (для обеспечения заданной теплопроизводительности) применение водомазутной эмульсии с содержанием некоторого количества воды приводит к увеличению удельного количества, образующихся при распыливании топлива капель в единице объёма топочного пространства и, как следствие, – к увеличению удельной поверхности реагирования (т. е. к увеличению суммарной скорости выгорания топлива). Введение в объём капель мазута мелких капель воды

(размером менее 0,007 мм), вследствие большей разности температур испарения воды и мазута, приводит при нагреве капли топлива к перегреву воды, находящейся внутри капли, повышению в капельках воды давления, прорыву испаряющейся воды сквозь слой мазута во вне объёма капли топлива, увлечению за собой части топлива и искривлению в связи с этим внешней поверхности капли эмульсии. Этот процесс называется явлением микровзрыва. Искривление поверхности капли столь сильно, что существенно увеличивает удельную поверхность реагирования топлива и, как следствие, увеличивает суммарную скорость его выгорания. Присутствие в капле топлива воды, на нагрев и перегрев которой затрачивается определенное количество теплоты, способствует возникновению поля температур внутри капли топлива от центра к её периферии, что тормозит прогрев внутренних областей капли и способствует сдерживанию процессов пиролиза и коксования мазута (т. е. уменьшению образования твердых углеродных соединений – сажи и кокса, сопровождающих эти процессы).

Вода, испаряющаяся из капли топлива, диффундирует сначала в паровую зону продуктов разложения мазута, располагающуюся вокруг поверхности капли, и далее через зону горения – в окружающую каплю среду. Повышенная концентрация в связи с этим водяных паров в зоне горения способствует более полному догоранию СО и углеводородных газов, уменьшает температуру на поверхности зоны горения и в факеле в целом, что приводит к уменьшению образования вредных выбросов. Таким образом, введение воды в мазут с образованием водомазутной эмульсии повышает скорость горения этого топлива, уменьшает сажеобразование при горении, уменьшает образование  $\text{NO}_x$  и их выброс с продуктами сгорания, улучшает условия эксплуатации оборудования.

Однако введение воды в топливо требует дополнительных затрат на её испарение в количестве 24,62 кДж энергии на 1% влажности топлива. При 15% влажности это составляет 369 кДж на 35 200 кДж/кг данного топлива, что соответствует дополнительному увеличению на 1,05% расхода этого топлива, что ниже потерь топлива с механической и химической неполнотой сгорания, обычно имеющих место при сжигании мазута, особенно если он обводнён за счёт разогрева его паром. При использовании водомазутной эмульсии с  $W = 15\%$  в паровых котлах КПД котлов увеличивается по сравнению со сжиганием в них мазута.

*Горение водоугольных суспензий.* Водоугольные суспензии содержат от 28 до 50% воды и представляют собой смесь очень мелких частиц угля и воды. Для понижения вязкости этих суспензий в них вводят поверхностно-активные вещества, например полифенольный лесохимический реагент ПФЛХ-1, гексаметафосфат натрия (ГМФ Na) и др. Сжигание водоугольных суспензий в топочном объёме производится аналогично мазуту путем распыливания их в потоке воздуха. Размер капель суспензии, образующихся при этом, составляет от 0,05 до 0,2–0,3 мм. В каждой капле суспензии сохраняется первоначальный её состав. Число частиц угля в капле составляет несколько тысяч размером от 0 до 0,2 мм. Количество частиц угля в массе суспензии от 0,1 до 0,2 мм не превышает 1–2%.

Распыленные капли водоугольной суспензии в потоке воздуха, попадая в высокотемпературную окислительную среду, сначала подсыхают с поверхности (стадия поверхностного испарения влаги), затем зона испарения влаги проходит внутрь капли, образуя на поверхности высокопористый прочный конгломерат частиц угля с высоким термическим сопротивлением. Это приводит к тому, что уже в начальный период испарения влаги в массе капли суспензии в зоне испарения происходят процессы на поверхности угольных частиц, снижающие энергию активации их реакции с кислородом. Задолго до завершения испарения влаги температура образовавшегося на поверхности капли агломерата угольных частиц достигает температуры воспламенения, что приводит к воспламенению угольных частиц в агломерате. Влага суспензии из центральной зоны капли, диффундируя к поверхности, переносит частицы угля к ее периферии так, что к концу процесса испарения вместо капель образуется ксеносфера (полая сфера), процесс горения которой завершается образованием аналогичной ксеносферы, но состоящей только из частиц золы угля суспензии. Влага топлива, проходя сквозь зону горения, активно участвует в реакции с углеродом:  $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ , а образующиеся продукты реакции в присутствии водяного пара полностью догорают вокруг поверхности образовавшегося агломерата капли (рис. 15).

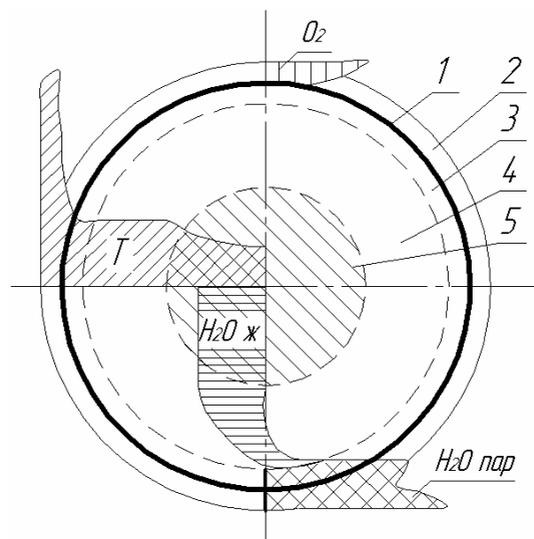


Рис. 15. Схема горения капли водоугольной суспензии [3]:

1 — зона поверхностного горения угольных частиц; 2 — зона объемного догорания газообразных продуктов реакции углерода с кислородом воздуха и водяным паром; 3 — зона перегрева водяных паров, термического разложения угля и начала интенсивной реакции углерода с водяным паром; 4 — зона испарения влаги топлива; 5 — зона исходного топлива (суспензии);

$O_2$  — поле концентрации кислорода,  $T$  — поле температур,  $H_2O_{ж}$  — поле распределения влаги,  $H_2O_{пар}$  — поле концентраций перегретого пара по радиусу агломерата капли

Эти важные особенности закономерностей процесса горения водоугольных суспензий приводят: к высокой теплоте выгорания топлива (99 – 99,5% при полном отсутствии химической неполноты сгорания); возможности снижения коэффициента избытка воздуха с 25% (для угля) до 5–7% (для суспензии); резкому уменьшению образования летучей золы и устранению необходимости периодической чистки поверхностей нагрева котла от загрязнений; уменьшению образования вредных выбросов (пыли, окислов серы и азота) в связи с отсутствием летучей золы и угольной пыли, снижением температуры горения ( $NO_x$ ) и возможности введения в массу суспензии необходимых присадок, которые позволяют связать до 70% окислов серы.

Применение водоугольных суспензий в качестве топлива позволяет не только существенно улучшить условия эксплуатации котла или

печей, но и заменить железнодорожный и другие виды транспорта твёрдого топлива трубопроводным транспортом, существенно снизить потери топлива при его транспортировании, хранении и топливоподготовке, а также снизить стоимость выработки тепловой и электрической энергии при использовании твёрдого топлива за счет ликвидации системы топливоприготовления, включая сушку и размол топлива на тепловых станциях. Водоугольные суспензии из угля с малым содержанием золы позволяют использовать их в топочных устройствах теплогенераторов, предназначенных для работы на мазуте, практически без реконструкции, что нашло распространение уже сейчас в ряде стран в связи с ростом цен на мазут. В то же время применение твёрдого топлива в виде высококонцентрированных водоугольных суспензий требует некоторого дополнительного расхода топлива, связанного с необходимостью испарения влаги топлива, в количестве 4–6% при влажности суспензии 30–35%.

*Горение мазутоугольных и водомазутоугольных суспензий.* Мазутоугольные и водомазутоугольные суспензии с содержанием угля до 50% и воды (как стабилизатора суспензии) до 15–20% применяют в качестве альтернативного топлива в топочных устройствах, предназначенных для работы на жидком топливе. Эти суспензии имеют размер частиц угля существенно меньший, чем в водоугольных суспензиях (до 0,03–0,05 мм). Их процесс горения также происходит с образованием пористых полых сферических агломератов (ксеносфер), однако присутствие мазута в суспензии снижает активность воды в процессе их горения. Капли такой суспензии вначале прогреваются до температуры испарения углеводородных компонентов топлива, затем они испаряются при скоростях меньших, чем в каплях из чистого мазута, что снижает их склонность к сажеобразованию. После испарения и выгорания основной массы мазута, начинается гетерогенное реагирование спекшихся в пористый агломерат частиц угля с определенной долей внутреннего реагирования. Закономерности горения такого агломерата аналогичны горению частицы натурального угля.

### 3.7. Особенности сжигания жидкого топлива

Каждое жидкое горючее, так же как любое жидкое вещество, при данной температуре обладает определенной упругостью пара над своей поверхностью, которая увеличивается с ростом температуры.

При зажигании жидкого горючего, имеющего свободную поверхность, воспламеняется его пар, содержащийся в пространстве над поверхностью, образуя горящий факел. За счёт тепла, излучаемого факелом, испарение резко увеличивается. При установившемся режиме теплообмена между факелом и зеркалом жидкости количество испаряющегося, а следовательно, и сгорающего горючего достигает максимального значения и далее остается постоянным во времени.

При сжигании жидкого топлива со свободной поверхностью горение протекает в паровой фазе; факел устанавливается на некотором удалении от поверхности жидкости и ясно видна темная полоска, отделяющая факел от обреза тигля с жидким горючим. Интенсивность излучения зоны горения на зеркало испарения не зависит от его формы и величины, а зависит только от физико-химических свойств горючего и является характерной константой для каждого жидкого горючего.

Температура жидкого горючего, при которой пары над его поверхностью образуют с воздухом смесь, способную воспламениться при поднесении источника зажигания, называется температурой вспышки.

Поскольку жидкое горючее сгорает в паровой фазе, то при установившемся режиме скорость горения определяется скоростью испарения жидкости с её зеркала.

Процесс горения жидкого горючего со свободной поверхностью происходит следующим образом. При установившемся режиме горения за счёт тепла, излучаемого факелом, жидкое горючее испаряется. В восходящий поток горючего, находящегося в паровой фазе, посредством диффузии проникает воздух из окружающего пространства. Полученная таким образом смесь образует горящий факел в виде конуса, отстоящего от зеркала испарения на 0,5–1 мм. Устойчивое горение протекает на поверхности, где смесь достигает пропорции, соответствующей стехиометрическому соотношению горючего и воздуха. Это предположение следует из тех же соображений, что и в случае диффузионного горения газа. Химическая реакция протекает

в очень тонком слое фронта факела, толщина которого не превышает нескольких долей миллиметра. Объём, занимаемый факелом, зоной горения делится на две части: внутри факела находятся пары горючей жидкости и продукты сгорания, а вне зоны горения — смесь продуктов горения с воздухом.

Горение восходящих внутри факела паров жидких топлив можно представить состоящим из двух стадий: диффузионного подвода кислорода к зоне горения и самой химической реакции, протекающей во фронте пламени. Скорости этих двух стадий не одинаковы; химическая реакция при имеющихся место высоких температурах протекает очень быстро, тогда как диффузионный подвод кислорода является медленным процессом, ограничивающим общую скорость горения. Следовательно, в данном случае горение протекает в диффузионной области, а скорость горения определяется скоростью диффузии кислорода в зону горения.

Так как условия подвода кислорода в зону горения при сжигании различных жидких горючих со свободной поверхности примерно одинаковы, следует ожидать, что скорость их горения, отнесенная к фронту пламени, т. е. к боковой поверхности факела, также должна быть одинаковой. Длина факела будет тем больше, чем больше скорость испарения.

Специфической особенностью горения жидкого горючего со свободной поверхности является большой химический недожог. Каждое горючее, представляющее собой углеродистое соединение при сжигании со свободной поверхности, имеет свойственную ему величину химического недожога, которая составляет: для спирта — 5,3%, для керосина — 17,7%, для бензина — 12,7%, для бензола — 18,5%.

Картину возникновения химического недожога можно представить следующим образом.

Парообразные углеводороды при движении внутри конусообразного факела до фронта пламени, при нахождении в области высоких температур и отсутствии кислорода, подвергаются термическому разложению вплоть до образования свободного углерода и водорода.

Свечение пламени обуславливается нахождением в нём частиц свободного углерода. Последние, раскалившись за счёт выделяемого при горении тепла, излучают более или менее яркий свет.

Часть свободного углерода не успевает сгорать и в виде сажи уносится продуктами сгорания, образуя коптящий факел.

Кроме того, наличие углерода вызывает образование СО.

Высокая температура и пониженное парциальное давление СО и СО<sub>2</sub> в продуктах сгорания благоприятствуют образованию СО.

Присутствующие в продуктах сгорания количества углерода и СО обуславливают величину химического недожога. Чем больше содержание углерода в жидком топливе и чем меньше он насыщен водородом, тем больше образование чистого углерода, ярче факел, больше химический недожог.

Таким образом, исследования горения жидкого горючего со свободной поверхности показали, что:

- 1) горение жидкого топлива происходит после их испарения в паровой фазе. Скорость горения жидкого топлива со свободной поверхности определяется скоростью их испарения за счёт тепла, излучаемого зоной горения, при установившемся режиме теплообмена между факелом и зеркалом испарения;
- 2) скорость горения жидкого горючего со свободной поверхности растёт с увеличением температуры его подогрева, с переходом к горючему с большей интенсивностью излучения зоны горения, меньшей теплотой парообразования и теплоёмкостью и не зависит от величины и формы зеркала испарения;
- 3) интенсивность излучения зоны горения на зеркало испарения, горящего со свободной поверхности жидкого горючего, зависит только от его физико-химических свойств и является характерной константой для каждого жидкого горючего;
- 4) теплонапряжение фронта диффузионного факела над поверхностью испарения жидкого горючего практически не зависит от диаметра тигля и рода топлива;
- 5) горению жидкого горючего со свободной поверхности присущ повышенный химический недожог, величина которого характерна для каждого горючего.

Имея в виду, что горение жидкого топлива происходит в паровой фазе, процесс горения капли жидкого горючего можно представить следующим образом.

Капля жидкого топлива окружена атмосферой, насыщенной парами этого горючего. Вблизи от капли по сферической поверхности устанавливается зона горения. Химическое реагирование смеси паров

жидкого топлива с окислителем происходит весьма быстро, поэтому зона горения весьма тонка. Скорость горения определяется наиболее медленной стадией — скоростью испарения горючего.

В пространстве между каплей и зоной горения находятся пары жидкого топлива и продукты горения. В пространстве вне зоны горения — воздух и продукты сгорания.

В зону горения изнутри диффундируют пары топлива, а снаружи — кислород. Здесь эти компоненты смеси вступают в химическую реакцию, которая сопровождается выделением тепла. Из зоны горения тепло переносится наружу и к капле, а продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство и в пространство между зоной горения и каплей. Однако механизм передачи тепла еще не представляется ясным.

Ряд исследователей считает, что испарение горячей капли происходит за счет молекулярного переноса тепла через застойную пограничную пленку у поверхности капли.

По мере выгорания капли из-за уменьшения поверхности общее испарение уменьшается, зона горения сужается и исчезает при полном выгорании капли.

Так протекает процесс горения капли полностью испаряющегося жидкого топлива, находящейся в покое в окружающей среде или движущейся вместе с ней с одинаковой скоростью.

Количество кислорода, диффундирующее к шаровой поверхности при прочих равных условиях, пропорционально квадрату её диаметра, поэтому установление зоны горения на некотором удалении от капли обуславливает большую скорость ее горения по сравнению с такой же частицей твердого топлива, при горении которой химическая реакция практически протекает на самой поверхности.

Так как скорость горения капли жидкого топлива определяется скоростью испарения, то время её выгорания можно рассчитать на основе уравнения теплового баланса её испарения за счёт тепла, получаемого из зоны горения.

Так как горение жидкого топлива происходит после его испарения в паровой фазе, его интенсификация связана с интенсификацией испарения и смесеобразования. Это достигается за счёт увеличения поверхности испарения путем распыления жидкого топлива на мельчайшие капельки и хорошего смешения образовавшихся паров с воздухом при

равномерном распределении мелкодисперсного топлива в нем. Эти две задачи выполняют, применяя горелки с форсунками, которыми распыляют жидкое топливо в потоках воздуха, подаваемых в КС через воздугонаправляющие аппараты горелок.

Воздух, необходимый для горения, подаётся в устье форсунки, захватывает тонко распыленное жидкое топливо и образует в КС неизотермическую затопленную струю. Струя, распространяясь, нагревается за счёт увлечения продуктов сгорания высокой температуры. Мельчайшие капельки жидкого топлива, нагреваясь благодаря конвективному теплообмену в струе, испаряются. Нагрев распыленного топлива происходит также за счёт поглощения ими тепла, излучаемого топочными газами.

На начальном участке, и особенно, в пограничном слое струи, интенсивный нагрев факела вызывает быстрое испарение капель. Пары горючего, смешиваясь с воздухом, создают газоздушную горючую смесь, которая, воспламеняясь, образует факел.

Таким образом, процесс горения жидкого топлива можно разбить на следующие фазы: распыление жидкого топлива, испарение и образование газоздушной смеси, воспламенение горючей смеси и её горение.

Температура и концентрация газоздушной смеси изменяются по сечению струи. По мере приближения к внешней границе струи температура повышается, а концентрация компонентов горючей смеси падает. Скорость распространения пламени в паровоздушной смеси зависит от состава, концентрации и температуры и достигает максимальной величины в наружных слоях струи, где температура близка к температуре окружающих топочных газов, несмотря на то что здесь горючая смесь сильно разбавлена продуктами сгорания. Поэтому воспламенение в мазутном факеле начинается у корня с периферии и затем распространяется вглубь струи на все сечение, достигая её оси на значительном расстоянии от форсунки, равном перемещению центральных струй за время распространения пламени от периферии до оси. Зона воспламенения принимает форму вытянутого конуса, основание которого находится на малом расстоянии от выходного сечения амбразуры горелки.

Положение зоны воспламенения зависит от скорости смеси; зона занимает такое положение, при котором во всех её точках устанавливается равновесие между скоростью распространения пламени

и скоростью движения. Центральные струи, имеющие наибольшую скорость, затухают по мере продвижения в топочном пространстве, определяя длину зоны воспламенения местом, где скорость падает до абсолютной величины скорости распространения пламени.

Горение основной части парообразных углеводородов происходит в зоне воспламенения, занимающей наружный слой факела небольшой толщины. Горение высокомолекулярных углеводородов, сажи, свободного углерода и неиспарившихся капель жидкого топлива продолжается за зоной воспламенения и требует определенного пространства, обуславливая общую длину факела.

Зона воспламенения делит пространство, занимаемое факелом, на две области: внутреннюю и наружную. Во внутренней области протекает процесс испарения и образования горючей смеси.

Во внутренней области парообразные углеводороды подвергаются нагреву, который сопровождается окислением и расщеплением их. Процесс окисления начинается при сравнительно низких температурах – порядка 200–300°C. При температурах 350–400°C и выше наступает процесс термического расщепления.

Процесс окисления углеводородов благоприятствует последующему процессу горения, так как при этом выделяется некоторое количество тепла и повышается температура, а наличие кислорода в составе углеводородов способствует дальнейшему их окислению. И напротив, процесс термического расщепления является нежелательным, так как образующиеся при этом высокомолекулярные углеводороды сгорают трудно.

Из нефтяного топлива в энергетике применяется также мазут. Мазут представляет собой остаток от перегонки нефти при температуре порядка 300°C, но ввиду того, что процесс перегонки происходит не полностью, мазут при температурах ниже 300°C ещё выделяет некоторое количество паров более лёгких погоннов. Поэтому при входе распыленной струи мазута в КС и постепенном нагревании часть его превращается в пары, а часть еще может находиться в жидком состоянии даже при температуре порядка 400°C.

Поэтому при сжигании мазута необходимо способствовать протеканию окислительных реакций и препятствовать термическому разложению при высоких температурах. Для этого весь воздух, необходимый для горения, следует подавать в корень факела. В этом случае наличие

большого количества кислорода во внутренней области будет, с одной стороны, благоприятствовать окислительным процессам, а с другой – понижать температуру, что обусловит более симметричное расщепление молекул углеводородов без образования значительного количества трудно сжигаемых высокомолекулярных углеводородов.

Смесь, получающаяся при сжигании мазута, содержит паро- и газообразные углеводороды, жидкие более тяжелые погоны, а также твердые соединения, образующиеся в результате расщепления углеводородов (т. е. все три фазы – газообразную, жидкую и твердую). Паро- и газообразные углеводороды, смешиваясь с воздухом, образуют горючую смесь, горение которой может протекать по всем возможным способам горения газов. Аналогично сгорают и СО, образовавшийся при горении жидких капель и кокса.

В факеле зажигание капель осуществляется за счёт конвективного нагрева; вокруг каждой капли устанавливается зона горения. Горение капли сопровождается химическим недожогом в виде сажи и СО. Капли высокомолекулярных углеводородов при горении дают твердый остаток – кокс.

Образующиеся в факеле твёрдые соединения – сажа и кокс сгорают так же, как происходит гетерогенное горение частиц твёрдого топлива. Наличие накалившихся частиц сажи обуславливает свечение факела.

Свободный углеводород и сажа в среде с высокой температурой при наличии достаточного количества воздуха могут сгореть. В случае же местного недостатка воздуха или недостаточно высокой температуры они сгорают не полностью с определенной химической неполнотой горения, окрашивая продукты сгорания в черный цвет – коптящий факел.

Зона догорания газообразных продуктов неполного сгорания и твёрдых частиц, следующая за зоной горения, увеличивает общую длину факела.

Химический недожог, характерный для горения жидкого топлива со свободной поверхности при сжигании его в факеле, соответствующими режимными мероприятиями должен быть сведён к нулю.

Таким образом, для интенсификации сжигания мазута необходимо хорошее распыление. Предварительный подогрев воздуха и мазута способствует газификации мазута, поэтому будет благоприятствовать зажиганию и горению. Весь воздух, необходимый для горения, следу-

ет подавать в корень факела. При этом рациональной конструкцией воздухонаправляющего устройства горелки, правильной установкой форсунки и соответствующей конфигурацией амбразуры горелки необходимо обеспечить хорошее перемешивание распыленного топлива с воздухом, а также перемешивание в горящем факеле, и в особенности, в конечной его части. Температура в факеле должна поддерживаться на достаточно высоком уровне и для обеспечения интенсивного завершения процесса горения в конце факела должна быть не ниже 1000–1050°С.

Факелу должно быть обеспечено достаточное пространство для развития процесса горения, так как в случае соприкосновения продуктов сгорания (до завершения процесса горения) с холодными поверхностями нагрева парогенератора температура может настолько понизиться, что содержащиеся в газах недогоревшие частицы сажи и свободного углерода, а также высокомолекулярные углеводороды не смогут гореть.

Процесс горения нефтяного факела в закрученной струе протекает аналогично рассмотренному случаю при прямоточной струе. При закрученном движении на оси струи создается зона разрежения, вызывающая приток горячих продуктов сгорания к корню факела. Это обеспечивает устойчивое зажигание.

Использование центробежного эффекта в механических и вращающихся форсунках приводит к разрыву сплошного потока. Жидкость внутри выходного канала форсунки принимает форму полого цилиндра, заполненного парами и газами. Из сопла вытекает эмульсия, образуя жидкую пленку в виде раскрывающегося гиперboloида. В направлении движения сечение гиперboloида увеличивается, а пленка жидкости утоньшается, начинает пульсировать и, наконец, распадается на быстро движущиеся капельки, которые в потоке подвергаются дальнейшему измельчению.

## 4. ТВЁРДОЕ ТОПЛИВО

### 4.1. Общая характеристика твёрдого топлива

К естественному твёрдому топливу относятся: антрацит, каменный и бурый уголь, торф, сланцы, дрова, древесные и растительные отходы. Искусственным твердым горючим являются: кокс, древесный уголь, брикеты, отходы обогащения углей.

### 4.2. Состав твёрдого топлива

Большинство твердых топлив состоит из следующих основных элементов: углерода С, водорода Н, серы S, кислорода О, азота N, золы (минеральные примеси) А и влаги W [4].

Многие элементы находятся в топливе в виде сложных органических соединений, что затрудняет точное определение их структуры. Для удобства выполнения практических расчётов определения теплотворной способности топлива и условий его горения принимают, что топливо состоит из перечисленных элементов, находящихся в свободном состоянии в виде механической смеси. Условность такого представления о химическом составе топлива обозначают химическими знаками.

Характеристика рабочего топлива по элементарному составу может быть выражена следующим образом:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%, \quad (20)$$

где индексом «р» отмечается рабочее топливо; горючими элементами рабочего топлива являются: углерод, водород и летучая сера.

Важной характеристикой твердого топлива является выход летучих веществ, представляющих собой смесь горючих и негорючих газов, выделяющихся при прогреве горючих:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $C_nH_m$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ . Выход летучих веществ значительно уменьшается с увеличением геологического возраста горючего. Так, например, в последовательности: дрова, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит – выход летучих падает с 95 до 4%. С уменьшением выхода летучих веществ ухудшается способность горючего к воспламенению. Например, если древесина легко загорается при температурах около  $250^\circ C$ , то антрацит с трудом – при  $700\text{--}800^\circ C$ . Выход летучих является важной характеристикой топлива, позволяющей определять способность его к воспламенению.

Важен и вид получающегося после отгонки летучих веществ (в процессе высокотемпературного прогрева без доступа воздуха) остатка – кокса. Кокс бывает порошкообразный, рыхлый, слившийся, спекшийся, сплавленный. Вид кокса влияет на поведение горючего при сжигании его и определяет возможности использования горючего: в качестве горючего для доменных печей или для химической переработки.

### 4.3. Свойство твёрдого топлива

Древесина для промышленных нужд применяется в виде отходов лесного и других производств (щепа, опилки, стружки, коренья и т. п.). В составе древесины сера отсутствует, а зольность сухой массы составляет  $A^p = 1\%$ . Рабочая масса имеет большую влажность, доходя для свежесрубленных дров до 50% и выше, а для воздушно-сухих – до 25%.

Уголь – топливо с плотностью  $\rho = 1150\text{--}1500 \text{ кг/м}^3$ ,  $Q_{\text{н}} = 16,0\text{--}29,0$  МДж/кг (каменные угли) и  $Q_{\text{н}} = 9,0\text{--}16,0$  МДж/кг (бурые угли), отношение C:H = 11,0–23,5 (каменные угли) и 9,6–19,0 (бурые угли). Содержание серы может достигать до 7%.

Бурые угли находятся в различных местах РФ (подмосковье, Ленинградская область, Северный край, Урал, Сибирь, Дальний Восток и др.). Большинство бурых углей непригодно для длительного хранения из-за высокого содержания кислорода, предрасполагающего их к самовозгоранию.

Торф – ископаемое топливо с большим выходом летучих веществ  $V^v = 70\%$ , высокой влажностью  $H_2O = 40\text{--}50\%$ , низкой теплотой сгорания  $Q_{\text{н}} = 8,38\text{--}10,48$  МДж/кг и зольностью  $A^p = 5,5\text{--}6,5\%$ .

Торф является продуктом разложения болотных растений водой без доступа воздуха, характеризуется большой влажностью (до 90%). Сжиганию такого торфа предшествует сушка его на воздухе.

По способу добычи различают машинно-формовочный торф, гидроторф и фрезерный торф (фрезторф). Наилучшим сортом торфа считается машинно-формовочный, добываемый в наименьшем количестве. Состав его однородный. Специальными машинами торфяная масса, предварительно подсушенная системой каналов, прессуется в кирпичи, которые подвергаются окончательной воздушной сушке до  $W^p = 25\text{--}35\%$ .

Гидроторф характеризуется повышенным содержанием золы – до 18–20%. Влажность рабочей массы гидроторфа колеблется в пределах  $W^p = 30–40\%$ .

Торфяная залежь фрезеруется при помощи специальных машин с размерами кусков 3–25 мм.

Сланцы – топливо с большой зольностью  $A^p = 50…60\%$ , повышенной влажностью  $H_2O = 15–20\%$ , низкой теплотой сгорания  $H_u = 5,87–10$  МДж/кг. Сланцы относятся к легковоспламеняемому топливу вследствие высокого содержания водорода  $H_2 = 7,5–9,5\%$  и летучих веществ  $V^r = 80–90\%$ .

Вообще твердое топливо содержит наибольшее количество минеральных примесей, состоящих по преимуществу из солей щелочных и щелочно-земельных металлов, окислов кремния, железа, алюминия, а также сульфатной серы ( $CaSO_4$  и  $MgSO_4$ ).

#### **4.4. Стадии горения твёрдого топлива**

Горение твёрдого топлива имеет ряд стадий: подогрев, подсушка топлива, возгонка летучих и образование кокса, горение летучих веществ и кокса. Из всех этих стадий определяющей является стадия горения коксового остатка, т. е. стадия горения углерода, интенсивность которой и определяет интенсивность топливосжигания и газификации в целом. Определяющая роль горения углерода объясняется следующим.

Во-первых, твердый углерод, содержащийся в топливе, является главной горючей составляющей всего натурального твёрдого топлива. Так, например, теплота сгорания коксового остатка – антрацита составляет 95% теплоты сгорания горючей массы. С увеличением выхода летучих веществ доля теплоты сгорания коксового остатка падает и в случае торфа составляет 40,5% теплоты сгорания горючей массы.

Во-вторых, стадия горения коксового остатка оказывается наиболее длительной из всех стадий и может занимать до 90% всего времени, необходимого для горения.

И, в-третьих, процесс горения кокса имеет решающее значение в создании тепловых условий протекания других стадий. Следовательно, основой правильного построения метода сжигания твёрдого топлива является создание оптимальных условий для процесса горения углерода.

В некоторых случаях определяющими процесс горения могут оказаться второстепенные подготовительные стадии. Так, например, при сжигании высоковлажного топлива определяющей может быть стадия подсушки. В этом случае рациональным является усиление предварительной подготовки топлива к сжиганию, например, за счёт использования технологического способа сжигания с подсушкой топлива газами, отбираемыми из топки.

В мощных энергетических установках расходуются большие количества топлива и воздуха. Например, для парогенератора 300 МВт расход топлива — антрацитового штыба составляет 32 кг/с, а воздуха — 246 м<sup>3</sup>/с, а в парогенераторе блока 800 МВт каждую секунду расходуется 128 кг березового угля и 555 м<sup>3</sup> воздуха. В ряде случаев в пылеугольных парогенераторах как резервное используется жидкое или газовое топливо.

Процесс горения пылевидного топлива совершается в объёме топочной КС в потоках больших масс топлива и воздуха, к которым подмешиваются продукты сгорания.

Основой горения пылевидного топлива является химическое реагирование горючих составляющих топлива с кислородом воздуха. Однако химические реакции горения в топочной КС протекают в мощных пылегазовоздушных потоках за короткое время (1–2 с) пребывания топлива и окислителя в топочной КС. Эти реакции совершаются в условиях сильного взаимного влияния с одновременно протекающими физическими процессами. Такими процессами являются:

- процесс движения подаваемых в топочную КС составляющих горючую смесь газовых и твердых диспергированных веществ в системе струй, переходящих в поток и распространяющихся в ограниченном пространстве топочной КС с развитием вихревых течений, в совокупности составляющих сложную структуру аэродинамики топки;
- турбулентная и молекулярная диффузия и конвективный перенос исходных веществ и продуктов реакции в газовом потоке, а также перенос газовых реагентов к диспергированным частицам;
- теплообмен в газовых потоках продуктов сгорания и исходной смеси и между газовыми потоками и содержащимися в них частицами топлива, а также передача тепла, выделяющегося при химическом превращении в реагирующей среде;

- радиационный теплообмен частиц с газовой средой и пылегазовоздушной смеси с экранными поверхностями в топочной КС;
- нагрев частиц, возгонка летучих веществ, перенос и горение их в газовом объёме и др.

Таким образом, горение угольной пыли является сложным физико-химическим процессом, состоящим из химических реакций и физических процессов, протекающих в условиях взаимной связи и взаимного влияния.

## 5. НЕОРГАНИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО

Неорганическое горючее пока применяется только в ракетной технике. Те из них, которые способны реагировать с водой – гидрореагирующие горючие (ГРГ), имеют некоторые перспективы применения на морских судах и аппаратах.

Однако по мере исчерпания запасов органического горючего интерес к неорганическим повышается, особенно к такому распространенному из них – кремнию, составляющему 25% земной коры (в связанном виде).

В качестве возможного горючего исследованы все элементы периодической системы Д.И. Менделеева. Наилучшими показателями обладает металлическое горючее – кремний (металлоид), алюминий, бериллий, литий (табл. 6).

Таблица 6

Основные характеристики элементарного неорганического топлива [5]

Топливо	Окислитель				
	кислород			фтор	
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$Q_n$ , кДж/кг	Продукты сгорания	$Q_n$ , кДж/кг	Продукты сгорания
Водород H <sub>2</sub>	-	120 000	H <sub>2</sub> O газообразный	13 350	HF газообразный
Литий Li	0.534	20 000	Li <sub>2</sub> O твёрдый	23 700	LiF твёрдый
Бериллий Be	1.85	2 250	BeO твёрдый	20 250	BeF <sub>2</sub> твёрдый
Бор B	2.3	18 200	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> твёрдый	15 900	BF <sub>3</sub> газообразный
Магний Mg	2.25	13 120	MgO твёрдый	17 750	MgF <sub>2</sub> твёрдый
Алюминий Al	2.69	16 100	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> твёрдый	15 500	AlF <sub>3</sub> твёрдый
Кремний Si	2.4	14 340	SiO <sub>2</sub> твёрдый	14 900	SiF <sub>4</sub> газообразный

При нормальных условиях оно находится в твёрдом состоянии, поэтому его подают в КС в составе суспензий, распыливают в виде порошка или впрыскивают в расплавленном состоянии. Можно также весь запас горючего поместить в камеру сгорания и, расплавив и воспламенив его с помощью порции обычного топлива, сжигать постепенно, регулируя подачу окислителя.

ГРГ представлены в табл. 7. Поскольку окислитель (вода) черпается из окружающей среды, теплота сгорания отнесена только к количеству ГРГ. Показатели ГРГ значительно превышают показатели лучшего ра-

кетного топлива на металлической основе. Проблема подачи твердых ГРГ решается так же, как и для ракетного топлива.

Таблица 7

Основные характеристики типичных ГРГ [5]

ГРГ	Удельная масса, кг/л	Температура плавления, °С	Газообразование	
			м <sup>3</sup> /кг	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Литий Li	0,534	186	1,61	800
Натрий Na	0,971	97,5	0,485	470
Калий K	0,89	62,3	0,285	245
Кальций Ca	1,55	850	0,56	370
Алюминий Al	2,69	660	1,24	3220
Магний Mg	1,74	651	0,92	1600
Диборан B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,477	165,5	4,536	2220
Тетраборан B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,56	120	4,62	2720
Пентаборан B <sub>5</sub> H <sub>9</sub>	0,61	46,6	4,26	2600

Важной задачей при использовании металлов является предотвращение оседания твёрдых и жидких продуктов сгорания на деталях двигателя, а следовательно, их износа и выхода из строя.

Интерес представляют также бороводороды: B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, B<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, B<sub>5</sub>H<sub>9</sub> и др. Одни из них при нормальных условиях являются жидкостями, другие – твёрдыми или очень вязкими веществами. Теплота сгорания бороводородов достигает 60–75 МДж/кг. Основные их недостатки – ядовитость, высокая температура застывания, термическая нестойкость, нестойкость при хранении на воздухе (реагируют с влагой), образование отложений на деталях двигателя. Бороводороды хорошо реагируют не только с кислородом воздуха и тем более с чистым кислородом, но и с водой. Поэтому их рассматривают и как возможные ГРГ для судов.

Для увеличения теплоты сгорания приготавливают суспензии металлов (магний, алюминий и т. п.) в углеводородном горючем, сжигание которых позволяет повысить температуру в камере сгорания до 6000–7000°С, что приводит к резкому увеличению тяги двигателя.

Топливо на основе жидкого кислорода обеспечивает наибольшую удельную тягу из всего применяемого сегодня ракетного топлива. Его основной недостаток – низкая температура кипения окислителя. Это затрудняет использование его в боевых ракетах, которые должны длительное время находиться в боевой готовности к пуску.

С жидким кислородом могут применяться такие горючие как керосин, несимметричный диметилгидразин, аммиак. Особое место занимает топливо кислород+водород. Оно обеспечивает удельную тягу на 30–40% большую, чем другое распространенное топливо.

Топливо на основе азотной кислоты в смеси 20–30%  $\text{NO}_x$  существенно уступает кислородному топливу по удельной тяге, но обладает преимуществом по удельному весу. Кроме того, это топливо является высококипящим, долгохранимым веществом, что позволяет держать боевые ракеты в полностью снаряженном и заправленном виде длительное время.

Такие горючие, как смесь аминов и некоторые другие вещества, образуют с азотнокислотными окислителями самовоспламеняющееся топливо. Керосин и другие углеводороды требуют принудительного зажигания.

Топливо на основе четырехоксида азота дает несколько большую удельную тягу, чем азотнокислотное, однако оно имеет пониженный удельный вес. Несмотря на такой эксплуатационный недостаток, как высокая температура затвердевания окислителя, оно находит применение в ракетах дальнего действия. Оно заменило кислородное топливо, так как дает возможность хранить ракету в заправленном состоянии, готовой к запуску.

Преимуществом топлива на основе четырехоксида азота является также самовоспламеняемость.

*Твёрдое ракетное топливо.* По внешнему виду все заряды твёрдого топлива представляют собой плотные твёрдые тела главным образом тёмных цветов. Ракетные пороха имеют темно-коричневый цвет. Если они включают добавки в виде сажи, то цвет их бывает чёрным.

Твёрдое топливо безопасно как по воздействию на организм человека, так и по отношению к различным конструкционным материалам. При хранении в обычных условиях оно не выделяет агрессивных веществ.

*Ракетный порох.* Ракетный порох является сложной многосоставной системой, в которой каждому веществу отведена своя роль с целью получения заданных свойств того или иного вида пороха. Основная составная часть пороха – нитраты целлюлозы. При сгорании пороха они выделяют наибольшую часть тепловой энергии. Они же определяют и

физико-химические свойства пороха. Рассмотрим некоторые составные части пороха:

1. Нитроглицерин – мощное взрывчатое вещество. Он легко взрывается при ударе или трении. Горение происходит за счёт кислорода, содержащегося в нитрогруппах. При этом кислорода в нём имеется в избытке, поэтому часть кислорода идёт на дополнительное окисление нитроцеллюлозы, что приводит к общему увеличению запаса энергии твёрдого топлива. С увеличением содержания нитроглицерина в порохе растут их энергетические показатели, а также взрывоопасность, чувствительность к удару и т. д. Ракетный порох с большим содержанием нитроглицерина способен обеспечить высокую удельную тягу.

2. Нитродигликоль, так же как и нитроглицерин, представляет собой взрывчатое вещество. Однако он менее чувствителен к механическим воздействиям. Получается в результате нитрации диэтиленгликоля. Запас кислорода в молекуле нитродигликоля меньше, чем у нитроглицерина, поэтому применение его в качестве растворителя ухудшает энергетические показатели пороха.

3. Стабилизаторы химической стойкости вводятся в состав пороха для предотвращения его быстрого химического разложения. При длительном хранении пороха происходит разложение нитроцеллюлозы. При этом образуются  $\text{NO}_x$ , которые ускоряют её дальнейшее разложение и делают её взрывоопасной. Стабилизаторы замедляют разложение: соединяясь с выделяющимися окислами азота, они связывают их, превращают в химически нейтральные вещества.

Вещества, улучшающие горение пороха, обеспечивают ускорение, замедление или стабилизацию процесса горения в камере твёрдотопливного ракетного двигателя. К ним относится большое число солей или окислов различных металлов (олова, марганца, цинка, хрома, свинца, титана, калия, бария и т. д.).

*Смесевое ракетное топливо.* Смесевое топливо, по составу значительно проще по сравнению с порохом. Оно включают в себя два-три, редко четыре компонента.

Порошкообразные металлы могут вводиться в состав смесевого топлива в качестве дополнительного горючего компонента. Для этого пригодны чистые бериллий, литий, алюминий, магний, а также некоторые их соединения. В результате введения металлов происходит

повышение запаса энергии топлива, т. е. увеличивается удельная тяга двигателей. Кроме того, металлические добавки повышают удельный вес топлива, что улучшает характеристики двигателя. При этом следует учитывать, что чем больше содержание металлического горючего, тем выше будет температура продуктов горения в КС. Почти все современное смесевое топливо имеет в своем составе металлическое горючее в различном количестве.

Наиболее эффективным металлическим горючим является бериллий. Однако перспективы применения бериллия очень ограничены, потому что его запасы в земной коре незначительны, а продукты сгорания крайне ядовиты. Следующий по эффективности металл – литий. Его применение тормозится очень низкой температурой плавления ( $+186^{\circ}\text{C}$ ) и самовоспламенением на воздухе в расплавленном состоянии. Самым широко распространенным и наиболее дешёвым металлическим горючим является алюминий. Применение тонко измельченного порошка алюминия в смесевом топливе не только повышает удельную тягу двигателей, но и улучшает надежность их запуска и увеличивает стабильность горения топлива. Магний применяется редко, так как он в топливе дает малую удельную тягу.

Кроме чистых металлов, изучается применение их соединений с водородом (гидридов) в качестве дополнительного горючего.

Катализаторы и другие добавки вводятся в смесевое топливо в небольших количествах для улучшения процесса горения (сажа, соли некоторых металлов), придания топливу пластичных свойств (растительные, минеральные и синтетические масла), улучшения стойкости при хранении и стабильности состава (диэтилфталат, этилцентралит), облегчения технологии производства.

Изготовление зарядов из смесевое топлива включает смешение компонентов топлива, отливку и отверждение.

## 6. ОКИСЛИТЕЛИ

Во всех обычных энергетических и тепловых установках в качестве окислителя используется атмосферный воздух. На морских судах используют воду.

В жидкостных ракетах количество окислителя по весу превышает количество горючего в среднем в 3–6 раз, а вес топлива в 9 раз больше веса конструкции двигателя [5].

Свойства топлива во многом зависят от характера окислителя. Например, по важнейшей характеристике – по удельной тяге такое топливо, как жидкий кислород и керосин, отличаются от азотной кислоты и керосина примерно на 15%.

Из низкокипящих окислителей наибольшее применение в распространенных двигателях имеет жидкий кислород. Исследуется возможность использования жидкого фтора, его соединений с кислородом и озона.

Из высококипящих окислителей широко применяются азотная кислота и ее смеси с четырехокисью азота. Может применяться четырехокись азота, перекись водорода. Исследуются соединения фтора с хлором и тетранитрометаном.

Рассмотрим некоторые виды окислителей.

*Жидкий кислород.* Представляет собой подвижную жидкость голубоватого цвета, несколько тяжелее воды.

Особенности: жидкий кислород является одним из наиболее мощных окислителей, так как его молекула не содержит атомов, не участвующих в процессе окисления, как это имеет место, например, в азотной кислоте. Топлива более эффективные, чем с кислородом могут быть получены только с озоном, фтором или фтористым кислородом.

Основное свойство, определяющее особенности работы с жидким кислородом, заключается в его низкой температуре кипения. Из-за этого он быстро испаряется, что вызывает его большие потери при хранении и заправке ракеты. Бак ракеты заправляется жидким кислородом непосредственно перед запуском. Потери на испарение при заправке составляют до 50%, а при содержании в ракете – 3% в час. Жидкий кислород хранится и транспортируется в специальных ёмкостях – танках из металла с обеспечением хорошей тепловой изоляции.

Жидкий кислород не ядовит. Кратковременное соприкосновение его в небольших количествах с открытыми участками тела человека неопасно: образующийся газообразный слой не допускает обмороживания кожи.

Жидкий кислород — один из наиболее дешевых окислителей, что объясняется простотой производства и обилием сырья. В составе воды он составляет 89% по весу, а в воздухе — 23%. Обычно получают кислород из воздуха путем сжижения и отделения в жидком виде от азота и других газов земной атмосферы.

*Азотная кислота.* Химически чистая 100% концентрации является бесцветной легкоподвижной тяжелой жидкостью, сильно дымящей в воздухе.

Особенности: 100% кислота неустойчива и легко разлагается на воду, свободный кислород и окислы азота.

Азотная кислота является мощным окислителем, поскольку в ней содержится 76% кислорода. При окислении различного горючего она разлагается на воду, кислород и азот. От всех широко используемых окислителей она отличается большим удельным весом. Вследствие высокой теплоёмкости она может быть использована в качестве охлаждающего компонента КС в жидкостных реактивных двигателях.

При обычных условиях эксплуатации азотная кислота — жидкость, что является одним из ее преимуществ. Ракеты, в которых она используется в качестве окислителя, могут длительное время храниться заправленными, в постоянной готовности к пуску. К недостаткам в эксплуатации относится значительное повышение давления в герметически закрытых ёмкостях с азотной кислотой вследствие процесса ее разложения. Главный недостаток азотной кислоты — высокая коррозионная активность по отношению к большинству материалов. Агрессивность азотной кислоты значительно усложняет обращение с ней. Хранение и транспортировка ее производится с использованием специальных ёмкостей.

Недостатки: азотная кислота обладает ядовитыми свойствами. Попадание её на кожу человека вызывает появление болезненных, долго не заживающих язв. Вредны для здоровья также пары азотной кислоты. Они превосходят по ядовитости угарный газ в 10 раз.

Стоимость азотной кислоты невелика. Основной метод получения азотной кислоты — окисление аммиака кислородом воздуха в присутствии платины и растворение получившихся окислов азота в воде.

*Четырехокись азота.* Представляет собой при обычной температуре жёлтую жидкость.

Особенности: с увеличением температуры распадается на двуокись азота, окрашенную в красно-бурый цвет.

Является несколько более эффективным окислителем, чем азотная кислота.

Топливо на её основе имеет удельную тягу примерно на 5 % больше, чем азотнокислотное.

Недостатки: по отношению к материалам четырехокись азота значительно менее агрессивна, чем азотная кислота, но не менее ядовита.

Главный недостаток — низкая температура кипения и высокая температура затвердевания, что резко уменьшает возможность её использования в ракетном топливе в чистом виде. Условия её применения улучшаются в смесях с другими окислами азота.

*Перекись водорода.* Бесцветная прозрачная тяжелая жидкость. Особенности: она является нестойким химическим соединением, легко разлагающимся на воду и кислород. Склонность к разложению возрастает с ростом концентрации. При разложении выделяется значительное количество тепла.

Наибольшее распространение получили её водные растворы 80% и 90% концентрации. Химической стойкости растворов и безопасности работы с ними можно добиться введением веществ-стабилизаторов. К ним относятся фосфорная, уксусная и щавелевая кислоты. Обязательное условие стабилизации перекиси водорода — чистота. Незначительные примеси и загрязнения резко ускоряют её разложение и даже могут привести к взрыву.

По сравнению с азотной кислотой перекись водорода обладает малой коррозионной активностью, но некоторые металлы она окисляет.

Недостатки: она является пожаро- и взрывоопасной. Органические вещества при соприкосновении с ней легко загораются. При температуре +175 °С она взрывается. Попадание её на кожу вызывает тяжёлые ожоги.

В настоящее время перекись водорода редко применяется, т.к. топливо на её основе дает сравнительно невысокую тягу.

*Жидкий фтор.* Представляет собой тяжелую жидкость ярко-жёлтого цвета.

Особенности: он обладает лучшими окислительными свойствами, чем кислород. Из всех химических элементов он наиболее активен, вступая в соединения почти со всеми окисляющимися веществами при обычной комнатной температуре. При этом часто происходит воспламенение. Даже кислород окисляется фтором, сгорая в его атмосфере.

Из-за своей исключительно высокой химической активности фтор со всеми горючими образует самовоспламеняющееся топливо. Однако фторное топливо дает более высокую удельную тягу, чем кислородное, только при условии, если горючее богато водородом. Горючее, содержащее много углерода, образуют с фтором значительно менее эффективное топливо.

Недостатки: фтор очень ядовит. Он сильно разъедает кожу, глаза, дыхательные пути. В ракетной технике используется только в опытных двигателях.

Окислители смесового топлива, как правило, соли неорганических кислот — азотной и хлорной. Их особенность — большой процент кислорода в молекуле. Все они по весу примерно наполовину состоят из кислорода. В обычных условиях они обладают химической стойкостью, но при сильном нагревании способны распадаться с выделением свободного кислорода. Все твёрдые окислители имеют в своем составе, помимо кислорода, химические элементы, способные к окислению. Поэтому при их разложении часть кислорода оказывается связанной с этими элементами и свободного кислорода выделится значительно меньше, чем имеется в молекуле.

Самым распространенным окислителем твёрдого топлива является перхлорат аммония. Он представляет собой белый кристаллический порошок. Разлагается при температуре нагревания выше 150°C. На воздухе незначительно увлажняется. Чувствителен к удару и трению, особенно при наличии органических примесей. Может гореть без горючего и взрываться. При горении не выделяет твёрдых веществ, но в продуктах горения содержится агрессивный и довольно ядовитый газ — хлористый водород, который при наличии влаги образует с ней соляную кислоту. Преимущества перхлората аммония состоят в том, что он обладает невысокой температурой разложения, разлагается только на

газообразные продукты с небольшим молекулярным весом, обладает малой гигроскопичностью, доступен, дешев.

Другим окислителем является перхлорат калия. Разлагается при температуре  $440^{\circ}\text{C}$ . На воздухе не увлажняется (негигроскопичен), не горит и не взрывается. Весь кислород, содержащийся в молекуле, является активным, при горении в составе топлива выделяется твердый продукт — хлористый калий, который создает плотное дымовое облако. Наличие хлористого калия в продуктах горения резко ухудшает их свойства, т. е. условия перехода тепловой энергии в кинетическую в сопле ракетного двигателя.

Ещё один окислитель — нитрат аммония (аммиачная селитра) также имеет вид белого кристаллического порошка. Разлагается при температуре  $243^{\circ}\text{C}$ . Способен гореть и взрываться. При горении выделяется большое количество только газообразных продуктов. Смеси с органическими веществами способны самовозгораться, поэтому хранение ракетного топлива на его основе представляет серьезную проблему. Имеет ядовитые свойства.

## Библиографический список

1. Луканин, В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. – М. : Высшая школа, 2005. – 671 с.
2. Терентьев, Г.А. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Г.А. Терентьев, В.М. Тюков, Ф.В. Смаль. – М. : Химия, 1989. – 272 с.
3. Белосельский, Б.С. Энергетическое топливо / Б.С. Белосельский, В.К. Соляков. – М. : Энергия, 1980. – 168 с.
4. Тройб, С.Г. Расчёт температуры горения / С.Г. Тройб. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1960. – 36 с.
5. Алексеев, Г.Н. Общая теплотехника / Г.Н. Алексеев. – М. : Высшая школа, 1980. – 552 с.
6. Емельянов, В.Е. Альтернативные экологически чистые виды топлива для автомобилей: Свойства, разновидности, применение / В.Е. Емельянов, И.Ф. Крылов. – М : ООО «Издательство Астрель» ; ООО «Издательство АСТ», 2004. – 128 с.
7. Магарил, Е.Р. Моторные топлива / Е.Р. Магарил, Р.З. Магарил. – М. : КДУ, 2008. – 160 с.
8. Емельянов, В.Е. Всё о топливе. автомобильный бензин: Свойства, ассортимент, применение / В.Е. Емельянов. – М. : ООО «Издательство Астрель» ; ООО «Издательство АСТ», 2003. – 79 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА.....	4
1.1. Химический состав.....	4
1.2. Теплота сгорания топлива.....	8
1.3. Условное топливо.....	10
1.4. Температура горения топлива.....	10
1.5. Теплофизические и термодинамические свойства моторного топлива.....	11
2. ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО.....	13
2.1. Нефтяной газ.....	13
2.2. Природный газ.....	15
2.3. Водород.....	20
3. ЖИДКОЕ ТОПЛИВО.....	26
3.1. Спирт.....	28
3.2. Водотопливная эмульсия (ВТЭ).....	35
3.3. Биотопливо .....	39
3.4. Мазут.....	42
3.5. Керосин.....	46
3.6. Композиционное топливо.....	47
3.7. Особенности сжигания жидкого топлива.....	52
4. ТВЁРДОЕ ТОПЛИВО.....	60
4.1. Общая характеристика твёрдого топлива.....	60
4.2. Состав твёрдого топлива.....	60
4.3. Свойство твёрдого топлива.....	61
4.4. Стадии горения твёрдого топлива.....	62
5. НЕОРГАНИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО.....	65
6. ОКИСЛИТЕЛИ.....	70
Библиографический список .....	75

Учебное издание

*Коломиец Павел Валерьевич*

## ТОПЛИВО

Учебное пособие по дисциплине «Химмотология»  
для подготовки магистров по направлению  
140500.68 «Энергомашиностроение», магистерская программа  
140506 «Поршневые и комбинированные двигатели»

Редактор *Е.Ю. Жданова*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Дизайн обложки: *Г.В. Карасёва*

Подписано в печать 28.09.2011. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 4,53.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-94-10.

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14