

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

М.И. Мысник, А.Е. Свистула

В статье представлен краткий обзор и анализ теплофизических свойств основных видов альтернативных топлив, используемых в двигателях внутреннего сгорания, в сравнении с традиционными видами топлива.

This article gives the short review and analysis of the heat transfer properties of the most types of the alternative fuel which are used in the internal – combustion engines, in comparison with the traditional types of fuel.

Самое большое количество производимой человеком энергии на земле приходится именно на долю двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – примерно до 90 %, что наносит огромный ущерб окружающей среде. В этой связи в последнее время во всём мире заметна тенденция в области ужесточения тре-

бований вредных выбросов с ОГ в воздушный бассейн от ДВС. Столь активное внедрение ДВС потребовало более активного использования энергоресурсов, запасы которых, как известно, строго ограничены (рисунок 1).



Рисунок 1 – Состояние и перспективы применения жидкого топлива в мире [8]

В последние несколько десятилетий намечена тенденция поиска и внедрения альтернативных источников энергии. В настоящее время ведётся много разработок, и уже есть случаи внедрения в производство двигателей внутреннего сгорания с использованием альтернативных источников энергии.

Альтернативные топлива (от лат. alter – другой, один из двух), все виды топлив, применяемых в настоящее время в двигателях внутреннего сгорания, по роду исходного сырья можно подразделить на три большие группы – нефтяного происхождения и биотоплива, а также газы различного происхождения. Основные виды альтернативных топлив: сжиженные и компримированные горючие

газы; спирты, продукты их переработки и смеси с бензином; топливные смеси; искусственное жидкое топливо; водород, рапс или метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ).

ГАЗ

Из множества альтернативных источников энергии наибольшее распространение для мобильных агрегатов, особенно для автомобильного транспорта, получило использование газа в сжатом и сжиженном виде. Газ успешно используется на транспортных средствах, оборудованных двигателями с искровым зажиганием. Возможно его использование на дизельных двигателях, которые будут работать по газодизельному циклу.

Обычно к категории «газообразное топливо» относят все горючие газообразные смеси, пригодные для сжигания в двигателе.

Физические и химические свойства различных горючих газов чрезвычайно разнообразны, но только те газы, характеристики которых соответствуют определенному диапазону, могут использоваться в газовых двигателях – в силу их конструкции и принципа работы.

Газовые двигатели оптимально настраиваются производителями на тот состав газа, для которого они изначально предназначались. Изменение состава газа, используемого в качестве топлива, особенно превышение указанных в инструкциях предельных значе-

ний, может снизить эффективность работы двигателя, который очень чутко реагируют на любое отступление от заложенных характеристик.

Элементарный состав газообразного топлива представляет собой смесь газов. Топливо в том виде, в котором оно поступает для сжигания в ДВС, называется рабочим. В Элементный состав рабочего топлива входят углерод C, водород H, кислород O, азот N и летучая сера S, а также негорючие минеральные примеси – зола A и влага W.

В таблице 1 представлены некоторые из применяемых газов, их состав и некоторые физико-химические свойства.

Таблица 1 – Физико-химические свойства газов [1, 2, 7]

№	Показатель	Природный газ	Нефтяной газ	Биогаз	Генераторный газ	Кокsovый	Бензин
1	Состав	95-98 % метана, до 1 % этана, N ₂ и CO ₂ до 2%	Пропан и бутан, зимой 80 % пропана и 20 % бутана, летом 40 % пропана и 60 % бутана	Метан 35 %, CO до 10 %, N ₂ , O ₂ , CO ₂ -65 %	CO-25-30 %, H ₂ -10 %, N ₂ , O ₂ , CO ₂ -30 %	H ₂ -25-30 %, CH ₄ -15-35 %, CO-10-20%, N ₂ , O ₂ , CO ₂ -30 %	
2	Калорийность	Высоко-калорийный	Высоко-калорийный	Низко-калорийный	Низко-калорийный	Средне-калорийный	
3	H _i , Мдж/м ³	34-35,6	37-54,6	3,8-5,0	4,7-6,4	14,7-22	44
4	Предел воспламенения: α _{min} α _{max}	0,4 1,94	0,4 1,6				0,6 1,3
5	Октановое число (моторный метод)	110-120	95-100				85-86
6	Метановое число	100	60-90	120-135	130-150		
7	Степень сжатия	до 12	10-12	9-9,5	9-9,5		8,5-9,5
8	Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг/кг	14,2	15,6-15,7				14,96
9	Температура кипения, °C	-167	-0,5 бутан, -45 пропан				

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Газообразное топливо, как правило, состоит из нескольких компонентов, разделяемых на два класса: основные газы и микрэлементы (примеси). Основные газы определяют процесс горения, температуру сгорания, линейную скорость распространения пламени, пределы воспламеняемости, устойчивость к детонации, задают характеристики газовоздушной смеси и ее теплотворность. К ним относятся:

- высшие углероды: метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , оксид углерода (угарный газ) CO , водород H_2 , сероводород H_2S , аммиак NH_3 , кислород O_2 ;
- летучие газы: азот N_2 , двуокись углерода (углекислый газ) CO_2 ;
- благородные газы: гелий He , неон Ne , аргон Ar .

Концентрация основных газов в исходном топливе обычно измеряется в объемных процентах, $V\%$.

Метановое число (МЧ) газовых смесей зависит от многих компонентов, при этом главными являются только четыре: метан,

водород, высшие углеводороды и летучие газы.

- **Метан:** CH_4 ; МЧ = 100. Наиболее значимый компонент любого газового топлива (составляет 95 % природного газа). Без запаха, самый легкий из насыщенных углеводородов, хорошо горюч, стабилен, имеет высокую антидетонационную стойкость. Продуктом неполного сгорания является CO . Идеально подходит для газовых двигателей, номинальная мощность которых указывается при работе на природном газе.

- **Водород H_2 :** МЧ = 0. Газ без цвета и запаха. Не встречается в свободном состоянии в природе, принимает участие во многих химических процессах, горюч.

- **Летучие газы N_2 и CO_2 ,** не принимающие активного участия в процессе горения. Эти газы сильно повышают метановое число газовой смеси, при этом воздействие CO_2 , в 3 раза выше, чем N_2 .

В таблице 2 приведены некоторые физико-химические свойства основных компонентов горючих газов и воздуха.

Таблица 2 – Основные параметры компонентов топлив [1, 2, 7]

Параметры	Метан (CH_4)	Пропан (C_3H_8)	Бутан (C_4H_{10})	Водород H_2	Оксис углерода (CO)
Молекулярный вес	16,03	44,06	58,08	2,015	28
Температура кипения при $p=0,1 \text{ МПа}$, $^{\circ}\text{C}$	-161,6	-42,2	-0,5	-253	-190
Показатель адиабаты	1,28	1,15	1,11	1,408	-
Теплота испарения, $\text{МДж}/\text{кг}$	514,92	432,6	394,8	-	-
Низшая теплота сгорания: в парообразном состоянии, $\text{МДж}/\text{м}^3$ то же, $\text{МДж}/\text{кг}$	35797 49948	91251 45938	118645 45406	9372 119872	12075 10180.8
Количество воздуха необходимое для сгорания: 1м^3 вещества, $\text{м}^3/\text{м}^3$ 1кг вещества, $\text{кг}/\text{кг}$	9,53 14,2	23,08 15,7	30,94 15,6	2,4 34,5	2,38 2,01
Теплота сгорания стехиометрической смеси*, $\text{МДж}/\text{м}^3$	3234	3557,4	3591	3036,6	3570
Температура самовоспламенения, $^{\circ}\text{C}$	590-690	510-580	480-540	550-600	625-675
Температура горения стехиометрической смеси, $^{\circ}\text{C}$	2020	2043	2057	2230	2370
Коэффициент молекулярного изменения при сгорании стехиометрической смеси	1	1,042	1,047	0,851	0,851

Примечание. *При температуре 15°C и давлении 760 мм.рт.ст.

Газовым топливам характерно более высокое октановое число по отношению к бензину, что позволяет увеличить степень сжатия. Газ не разжижает моторное масло и не даёт нагара при сгорании. Газообразные топлива имеют более широкий предел воспламеняемости по сравнению с бензином. У

газообразных топлив ниже скорость горения, что вызывает рост теплонапряжённости деталей КШМ, и незначительно ухудшает экономические показатели. Более низкая теплота сгорания вызывает падение мощности на 20 % в зависимости от применяемого газа.

СПИРТ

Одним из наиболее вероятных альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания являются спирты. Это, прежде всего метиловый спирт (метанол) и этиловый спирт (этанол). Применяются продукты переработки спиртов и спиртобензиновые смеси. Наиболее перспективен метанол, который благодаря высокому октановому числу и небольшому загрязнению атмосферы выхлопными газами может использоваться как автомобильное топливо непосредственно или в смесях с

бензином. Достоинство этанола – доступность сырьевых ресурсов, метанола – горит при более низкой температуре, чем бензин; недостатки метанола – низкая теплота сгорания (примерно вдвое меньше, чем у бензина), высокая токсичность. Производство спиртов различно, они могут быть произведены как из углей и газов (этанол или биоэтанол), так и из природных ингредиентов: пшеница, кукуруза, сахарная свёкла и др. Основные физико-химические свойства спиртов в сравнении с бензином представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-химические свойства спиртов в сравнении с бензином [3, 6]

Показатели	Бензин	Метанол	Этанол
Формула состава	C _n H _m	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH
Молекулярная масса, кг/кмоль	18-130	32	46,1
Элементарный состав: С, Н, О %	85,5;14,5;0;	37,5;12,5;50;	52,8;13;34,2;
Вязкость, мм ² /с	1,5-2,5	0,6	1,2
Плотность, кг/м ³	740-780	783	794
Октановое / цетановое число	92-98 / -	110 / 3-5	10,4 / 8
Температура самовоспламенения, °С	350-450	470	423
Температура кипения, °С	35-195	64,5	78,4
Теоретически необходимое количество воздуха, кг/кг	14,96	6,45	9,0
Температура застывания, °С	-70	-98	-111
Температура вспышки, °С	30-45	11	13
Низшая теплота сгорания Hu, МДж/кг	45	20,15	27,2
Скрытая теплота испарения, кДж/кг	350-400	1100	857

Увеличенная доля кислорода приводит к уменьшению теоретически необходимого количества воздуха и низшей теплоты сгорания, поэтому необходимо увеличивать цикловую порцию для обеспечения того же пробега и мощности. Высокое октановое число обеспечивает хорошие моторные свойства для двигателя с искровым зажиганием и негативные для двигателей с воспламенением от сжатия, высокая скрытая теплота испарения приводит к охлаждению заряда и может вызвать обледенение впускного тракта. Низкая температура кипения спиртов вызывает необходимость обеспечивать конструктивные мероприятия, направленные на предотвращение паровых пробок. Меньшая вязкость оказывается на работе топливной аппаратуры вызывая утечки через зазоры в топливной аппаратуре, также падает смазывающая способность, и меняются параметры топливного факела. Повышенная агрессивность спиртов по отношению к материалам приводит к тому, что появляется карозия цветных металлов, а

также негативное взаимодействие с резиновыми вставками и полимерами.

ТОПЛИВА ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Среди многообразия альтернативных источников энергии значительный интерес представляют виды топлива растительного происхождения, полученные из растительно-го сырья. Использование топлив растительного происхождения позволяет сохранять баланс углекислого газа в атмосфере, так как его выбросы при сжигании топлив из растительного сырья сопоставимы с количеством углекислого газа, поглощаемого при выращивании этого вида сырья в процессе фотосинтеза. Вне сомнения, для выращивания сельскохозяйственных культур, являющихся сырьём для топлива, используются вещества, необходимые для поддержания плодородия почвы. Однако урон, наносимый окружающей среде при их производстве, существенно ниже, чем при добыче топливного сырья из недр земли.

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Получение топлива выполняется на основе использования растительных и животных жиров, а также маслоотходов пищевого производства. Основное место занимает использование растительных масел для получения топлив альтернативных бензину, дизельному и котельному.

Ниже представлена таблица 4 физико-химических свойств растительных масел в сравнении с дизельным топливом.

По составу растительные масла близки друг к другу, а от нефтяного топлива отличаются присутствием кислорода (9,6 – 11,5 %).

Недостатками растительных жиров как топлива, по сравнению с нефтепродуктами, являются их меньшая теплота сгорания (на 7 – 10 %), более высокая (в 6 и более раз) вязкость, повышенная склонность к нагарообразованию, низкая испаряемость, а также возможность загрязнения моторного масла продуктами полимеризации триглицеридов. Поэтому большинство современных дизельных двигателей может работать на чистых растительных маслах лишь короткое время.

Таблица 4 – Физико-химические свойства растительных масел [3, 4, 5]

№	Параметр	Арахи-совое	Подсол-нечное	Соевое	Рапсовое	МЭРМ	ДТ
1	Состав: C,H,O %	0,78; 0,123; 0,097	0,776; 0,115; 0,109	0,775; 0,115; 0,110	0,776; 0,116; 0,109	77,03; 12,14; 10,83	0,864; 0,121; 0,95
2	Плотность, кг/м ³	917	924	923	917	879	820-840
3	Кинематическая вязкость при 20°C, мм ² /с	81,5	63	25	76	-	3,5-8,5
4	Низшая теплота сгорания Hu, МДж/м ³	37	36	39	37,1	37,30	42,5
5	Цетановое число	36	32	21	40	52,9	45-52
6	Температура вспышки, °C	320	220	318	100	71	60
7	Температура застывания, °C	-	-16	-11	-23	-21	-10,-35
8	Содержание серы, %	-	0,005	0,005	0,005	0,005	0,5

К положительным свойствам растительных топлив можно отнести тот факт, что это возобновляемые топлива, также при работе на этом виде топлива достигаются высокие экологические показатели.

Одним из наиболее перспективных биотоплив является рапс или метиловый эфир рапсового масла, производство которых возможно как централизовано на специализированных предприятиях, так и децентрализовано в отдельно взятых фермерских хозяйствах или сельхозпредприятиях.

Двигатели, работающие на рапсовом масле, в два раза меньше выделяют двуокиси углерода. При попадании в природу растительные топлива почти полностью биоразлагаемы.

К недостаткам относится следующее: высокая вязкость усиливает дальнобойность топливной струи, что приводит к попаданию на стенки камеры сгорания большего количества топлива и уменьшает долю объемного

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №1-2 2009

смесеобразования, плохие низкотемпературные свойства, низкое цетановое число, повышенная коксуюемость, нагары и лакоотложения связаны с тем, что масла полностью не сгорают и оставляют минеральные остатки. Из-за наличия кислорода в молекулах теплопроводная способность масел меньше на 7 – 10 %, вследствие чего необходимо производить перерегулировку топливной аппаратуры.

С целью охраны окружающей среды рапсовое масло, кроме использования для производства биотоплива, широко применяется в западных странах при производстве смазочных материалов, особенно для гидравлических систем.

Учитывая химико-физические свойства рапсового масла, оно часто используется для производства присадок для масел. Применение смазочных материалов на базе нефтепродуктов во многих отраслях развитых стран законодательно ограничено, особенно на

водном транспорте, в сельхозтехнике и на оборудовании в пищевой промышленности.

СИНТЕТИЧЕСКИЕ ТОПЛИВА ИЗ УГЛЯ

Различают несколько видов угольного сырья, перерабатываемого в моторное топливо. Первый способ: синтез из смеси CO + H₂ лёгких углеводородов с числом атомов в молекуле от 5 до 10. Второй способ: термическое растворение при давлении 3,5 МПа, температуре 400 °C, расход H₂ – 5 %, выход продукта около 35 %. Третий способ: пиролиз (коксование) углей и последующий гидрогениз угольной смолы. Процесс идёт при атмосферном давлении, температуре 320-370 °C. Выход жидких углеводородов – 24 %, газа – 15 %, кокса – 54 %, воды – 7 %.

Таблица 5 – Физико-химические свойства топлив из угля в сравнении с дизельным топливом [6]

№	Показатель	Дизельное топливо	СЖТ из угля	СЖТ из сланцев
1	Состав: C,H,O	0,864; 0,121; 0,95	0,6-0,98; 0,01-0,12; 0,02-0,2	-
2	Температура кипения, °C	150-360	150-350	160-350
3	Цетановое число	52	45	30-35
4	Плотность, кг/м ³	840-860	865	845
5	Вязкость, мм ² /с	5	5,5	2,5
6	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	42,5	42,6	40
7	Температура застывания, °C	-10	-15	-60
8	Содержание серы, %	0,2	0,4	0,8
9	Содержание смол, М, г/л	22	80	-

По своим физико-химическим свойствам Синтетические жидкие топлива (СЖТ) очень сильно зависят от исходного сырья и технологии переработки. Характерной особенностью для всех топлив из угля является повышенное содержание ароматических углеводородов, содержание серы и азота.

Исследование применения СЖТ из угля в ДВС для разных типов смесеобразования, показывают, что моторные свойства весьма

близки к аналогичным топливам нефтяного происхождения; особенность химического состава топлив из угля предопределяет незначительное ухудшение рабочего процесса и более резкое ухудшение экологических показателей.

Наличие большого числа ароматических углеводородов увеличивает октановое число для бензинов и уменьшает цетановое число для дизельного топлива.

Поэтому применение их в дизельных двигателях увеличивает период задержки самовоспламенения, максимальное давление и жёсткость рабочего процесса, содержание окислов азота увеличивается вследствие наличия соединений азота в самом топливе.

Повышенное содержание непредельных углеводородов приводит к нестабильности топлива при хранении, соединения серы и азота приводят к нагаро- и лакообразованию. Кроме того, наличие ароматических и олефиновых углеводородов приводит к более высокой токсичности жидких топлив из угля.

ВЫВОДЫ

Проведённый анализ показывает, что альтернативные топлива, по своим физико-химическим свойствам не только не уступают, но и по некоторым параметрам превосходят традиционные топлива, в частности по экологическим параметрам, исключение составляют синтетические топлива угольного происхождения.

Газовые топлива по своему элементарному составу весьма различны, но для них характерно повышенное содержание метана (от 30 до 95 % в зависимости от происхождения) и окси азота, они более устойчивы к детонации, что позволяет повысить степень сжатия.

Для спиртовых топлив характерно увеличенное содержание кислорода (до 30 %), что приводит к уменьшению теоретически необходимого количества воздуха и низшей теплоты сгорания. Высокое октановое число у метанола по сравнению с бензином соответствует более низкой температуре вспышки.

По составу растительные масла близки друг к другу, а от нефтяного топлива отличаются присутствием кислорода (9,6 – 11,5 %).

Недостатками растительных жиров как топлива, по сравнению с нефтепродуктами, являются их меньшая теплота сгорания (на 7 – 10%), более высокая (в 6 и более раз) вязкость, повышенная склонность к нагарообразованию, низкая испаряемость, а также

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

возможность загрязнения моторного масла продуктами полимеризации триглицеридов.

У топлив из угля большое число ароматических углеводородов, увеличивающих октановое число, повышенное содержание окислов азота в ОГ вследствие наличия соединений азота в самом топливе. Соединения серы и азота приводят к нагаро- и лакообразованию. Кроме того, наличие ароматических и олефиновых углеводородов приводит к более высокой токсичности жидкого топлива из угля.

Различный элементарный состав топлив предопределяет отличия в протекании рабочего процесса, создавая предпосылки к более детальному изучению процессов, протекающих в двигателе. Приведенные сведения об элементарном составе топлив, теплофизических свойствах позволяют подготовить исходные данные для моделирования рабочего процесса ДВС и топливоподачи с учетом вида альтернативного топлива.

При определенной регулировке топливной аппаратуры можно добиться более высоких эффективных показателей. Стоит учитывать и то, что альтернативные топлива является возобновляемым источником энергии. Процесс практического и массового внедрения альтернативных видов топлива неизбежен, так как определяется объективными причинами ограниченности запасов нефти в мире и возрастающими требованиями по экологии. Внедрение альтернативных видов

топлива будет происходить не революционно, а эволюционно с максимальным использованием существующей инфраструктуры топливного рынка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 193 с.
2. Колеров, Л. К. Газовые двигатели поршневого типа / Л. К Коллеров. – Л.: Машиностроение, 1968. - 248 с.
3. Марков, В. А. Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей / В. А. Марков, С. И. Козлов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 296с.
4. Марченко, А. П. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. А. Прохоренко // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков. – 2004. – №1. – С.46-51.
5. Tyson Shaine Biodiesel handling and use guidelines // National Renewable energy laboratory. – 2001. – September. – Р.17. – NREL/TP-580-30004.
6. Итинская, Н. И. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости / Н. И. Итинская. – М.: Колос, 1969. – 360 с.
7. Орлин, А. С. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / А. С. Орлин, М. Г. Круглов - М.: Машиностроение, 1980. – 288 с.
8. Дринча, В. М. Предпосылки применения альтернативных источников энергии в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. / В.М. Дринча. – Режим доступа: <http://www.sibfti.sorashn.ru/index.php?id=110>. – Загл. с экрана.