

**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ОБРАЗОВАНИЕ»
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ**

С.В. ГУСАКОВ

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ДИЗЕЛЯХ
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ
ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Учебное пособие

**Москва
2008**

ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ОБРАЗОВАНИЕ»

РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

С.В. Гусаков

Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников

Учебное пособие

Москва

2008

Рецензенты:

Гусаков С.В.

Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 288 с.

ISBN 978-5-209

Учебное пособие посвящено анализу перспектив применения в двигателях внутреннего сгорания топлив, получаемых из растительного сырья и других возобновляемых источников. Рассматривается структура топливно-энергетического комплекса, роль альтернативных топлив, способы их получения и особенности применения в дизелях.

Для обучающихся в магистратуре по направлению «Энергетическое машиностроение» специализации «Комбинированные двигатели внутреннего сгорания», учащихся других форм обучения, связанных с конструированием, исследованиями и эксплуатацией ДВС.

© С.В. Гусаков, 2008

© Российский университет дружбы народов, Издательство, 2008

Источники непрерывно возобновляемых в биосфере земли видов энергии: солнечная, ветровая, океаническая, гидроэнергия рек, геотермальная, энергия биомассы и другие

1. Современные тенденции ресурсосбережения и топливно-энергетической безопасности

1.1. Роль возобновляемых источников энергии в развитии топливно-энергетического комплекса

В течение многих лет нетрадиционные [возобновляемые источники энергии](#) не рассматривались в качестве серьезной энергетической альтернативы. Сегодня большая часть потребностей в энергии в мире по данным EIA¹ покрывается за счет использования нефти (38%), угля (26%), газа (23%), возобновляемых источников энергии (7%) и атомной энергии (6%). Изменение климата, сокращение запасов ископаемого топлива, а также негативные последствия и риски, связанные с использованием ядерной энергии, делают развитие всех видов возобновляемой энергетики настоятельной необходимостью XXI в.

Энергетическая стратегия России на период до 2020 года утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 августа 2003 г. В этом документе проанализированы перспективы развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) нашей страны. Оптимизация топливно-энергетического баланса страны определила задачи в области энергообеспечения национального хозяйства и развития отраслей ТЭК, в частности:

- увеличение производства первичных энергоресурсов с 1418 млн. т у.т.² в 2000 г. (1515 млн. т у.т. в 2002 г.) до 1700–1820 млн. т у.т. в 2010 г. и до 1810–2030 млн. т у.т. в 2020 г.;
- рост выработки электроэнергии с 878 млрд. кВт · ч в 2000 г. (892 млрд. кВт · ч в 2002 г.) до 1015–1070 млрд. кВт · ч в 2010 г. и до 1215 – 1365 млрд. кВт · ч в 2020 г.;
- увеличение добычи нефти с 324 млн. т в 2000 г. (379 млн. т в 2002 г.) до 445–490 млн. т в 2010 г. и до 450–520 млн. т в 2020 г.;
- рост производства моторных топлив с 83 млн. т в 2000 г. (88 млн. т в 2002 г.) до 100–110 млн. т в 2010 г. и до 115– 135 млн. т в 2020 г.;
- увеличение добычи газа с 584 млрд. м³ в 2000 г. (595 млрд. м³ в 2002 г.) до 635 – 665 млрд. м³ в 2010 г. и до 680 – 730 млрд. м³ в 2020 г.;
- рост добычи угля с 258 млн. т в 2000 г. (253 млн. т в 2002 г.) до 310–330 млн. т в 2010 г. и до 375–430 млн. т в 2020 г.;

В этом постановлении определенная роль отводится и возобновляемым источникам энергии, и местным видам топлива.

[Возобновляемые источники энергии](#) – источники непрерывно возобновляемых в биосфере земли видов энергии: солнечной, ветровой, океанической, гидроэнергии рек, геотермальной, энергии биомассы и др.

Стратегическими целями использования возобновляемых источников энергии и [местных видов топлива](#) являются следующие:

- сокращение потребления невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов;
- снижение экологической нагрузки от деятельности топливно-энергетического комплекса;

- обеспечение децентрализованных потребителей и регионов с дальним и сезонным завозом топлива;
- снижение расходов на дальнепривозное топливо.

В названном постановлении Правительства РФ сказано, что неистощаемость и экологическая чистота этих ресурсов обуславливают необходимость их интенсивного использования. По оценкам, технический потенциал возобновляемых источников энергии составляет порядка 4,6 млрд. т у.т. в год, т.е. в пять раз превышает объем потребления всех топливно-энергетических ресурсов России, а экономический потенциал определен в 270 млн. т у.т. в год, что немногим больше 25% от годового внутреннего потребления энергоресурсов в стране.

Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии составила в 2002 году около 0,5% от общего производства или 4,2 млрд. кВт · ч, а объем замещения органического топлива – около 1% общего потребления энергии или около 10 млн. т у.т. в год. По оценкам специалистов, к 2010 г. может быть осуществлен ввод в действие около 1000 МВт электрических и 1200 МВт тепловых мощностей на базе возобновляемых источников энергии при соответствующей государственной поддержке.

К местным видам топлива относятся в первую очередь торф и дрова. Общие запасы торфа на территории Российской Федерации оцениваются в размере 162,7 млрд. т (при влажности 40%). Торф является природным ресурсом, запасы которого могут при соответствующих условиях возобновляться. Ежегодный прирост торфа на болотах России составляет 250 млн. т (при влажности 40%). Благодаря низкой трудоемкости и энергоемкости добычи топливного торфа, простоте транспортных схем и коротким расстояниям вывозки торф в ряде регионов сохраняет конкурентоспособность с другими видами ввозимого твердого топлива. Кроме того, торф характеризуется низким содержанием серы и золы, что обеспечивает невысокий уровень вредных выбросов при его сжигании. В 2000 г. на электростанциях России было использовано 1,7 млн. т торфа. Прогнозируются следующие показатели производства и использования в энергетике торфа на период до 2020 г.: обеспечение новых тепловых электростанций мощностью по 20–30 МВт и котельных в обеспеченных торфом и энергодефицитных северных регионах – до 4 млн. т; расширение использования кускового торфа в качестве местного топлива за счет увеличения его добычи – до 3 млн. т; восстановление и развитие производства торфяных брикетов – до 1 млн. т. Такой вид топлива, как дрова в настоящее время используют более 5 млн. семей. На эти цели расходуется свыше 50 млн. м³ древесины. Централизованно топливоснабжающими предприятиями реализуется около 6 млн. м³ дров.

Важным местным видом топлива, особенно в целях теплоснабжения, являются городские бытовые отходы. Необходимо создать условия для включения их в топливно-энергетический баланс и решения одновременно экологических проблем. Децентрализованные потребители могут использовать также древесные и сельскохозяйственные отходы. Для преодоления отставания России в использовании возобновляемых источников энергии, сохранения запасов истощаемого органического топлива для будущих поколений, существенного улучшения энергоснабжения удаленных от электросетей населенных пунктов, а также улучшения экологической обстановки в экологически напряженных районах необходимо: разработать и принять федеральный закон «О возобновляемых источниках энергии» и соответствующий акт Правительства РФ; осуществлять государственную поддержку создания межсезонных запасов торфяного и дровяного топлива.

Следует отметить, что торф, древесина и отходы могут служить исходным сырьем для производства моторных топлив для ДВС.

В начале 2008 г. ряду федеральных органов исполнительной власти были даны поручения внести в Правительство РФ предложения по повышению энергоэффективности, направленные, в частности:

- на максимально эффективное использование топлива;
- развитие возобновляемых источников энергии;
- повышение эффективности использования и качества моторного топлива;

- повышение экологических требований к автомобильному транспорту.

Все эти положения демонстрируют, что в нашей стране намечается разворачивание широкомасштабных работ по созданию, производству и применению топлив, получаемых из возобновляемых источников, в энергетике и, в частности, в двигателях внутреннего сгорания – дизелях.

К традиционным видам моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания относят топлива, сырьем для получения которых являются ископаемые ресурсы и их производство осуществляется на традиционной производственной базе: жидких топлив – на нефтеперегонных заводах, газообразных – на предприятиях снабжения природным газом и по производству сжиженного газа.

К альтернативным моторным топливам относят топлива, также получаемые из ископаемых ресурсов, но по иным, часто, принципиально отличным от классических технологиям, и топлива, получаемые из возобновляемых источников: органической массы растений, микроорганизмов и пр., а также отходов сельского хозяйства, промышленного производства или другой деятельности человека.

Организовать промышленное производство топлива из возобновляемых источников важно не только в связи с исчерпанием запасов ископаемого горючих веществ, но и потому, что сжигание последних ведет к глобальным негативным последствиям, интенсивному поступлению в атмосферу углерода, накопленного в недрах в виде органических соединений за предыдущие миллионы лет.

Антропогенное воздействие на природу — прямое осознанное или косвенное и неосознанное воздействие человека и результатов его деятельности, вызывающее изменение природной среды и естественных ландшафтов

1.2. Антропогенное воздействие парниковых газов

Возникновение и развитие жизни на планете обусловлено круговоротом веществ под действием лучистой энергии Солнца. Борьба между накоплением энергии и ее рассеиванием в пространстве является главной во всей цепи сложнейших преобразований, осуществляемых всей биосферой. Своим многообразием растительный и животный мир нашей планеты обязан углероду, который стал основой органического мира.

В «Основах химии» Д.И. Менделеев писал, что «ни в одном из элементов такой способности к усложнению не развито в такой мере, как в углероде», который участвует в непрерывном кругообороте в природе. Растения развиваются, образуя сложные органические соединения из атмосферного углекислого газа и воды при непосредственном участии хлорофилла и солнечных лучей. Животные поедают растения и своих собратьев, чтобы в свою очередь синтезировать нужные организму жиры, белки и углеводы. Со временем в почве накапливаются органические вещества, служащие основой для роста растений. Очень важную роль в кругообороте углерода играет углекислый газ. Им «питаются» растения, превращая его в органические вещества. К тому же он является своеобразным «одеялом» Земли. Углекислый газ, находящийся в атмосфере, легко пропускает ультрафиолетовые лучи, идущие от Солнца и обогревающие нашу планету, и отражает обратно на Землю инфракрасные лучи, излучаемые с ее поверхности в космическое пространство. И если вдруг углекислый газ исчезнет из атмосферы, то на Земле станет гораздо прохладнее, дожди будут выпадать очень редко. Однако в действительности сжигание ископаемых органических веществ: нефти, угля, природного газа – постепенно увеличивает содержание углекислого газа в атмосфере.

Главным источником растущей обеспокоенности относительно возможного изменения климата стали такие бесспорно существующие и взаимно коррелирующие явления, наблюдаемые на протяжении последних 100–150 лет, как увеличение антропогенной эмиссии парниковых газов (прежде всего CO₂ и CH₄), рост концентрации этих газов в атмосфере и, как следствие, повышение средней температуры земной поверхности примерно на 0,6–0,8 °C за последнее столетие (рис. 1.1).

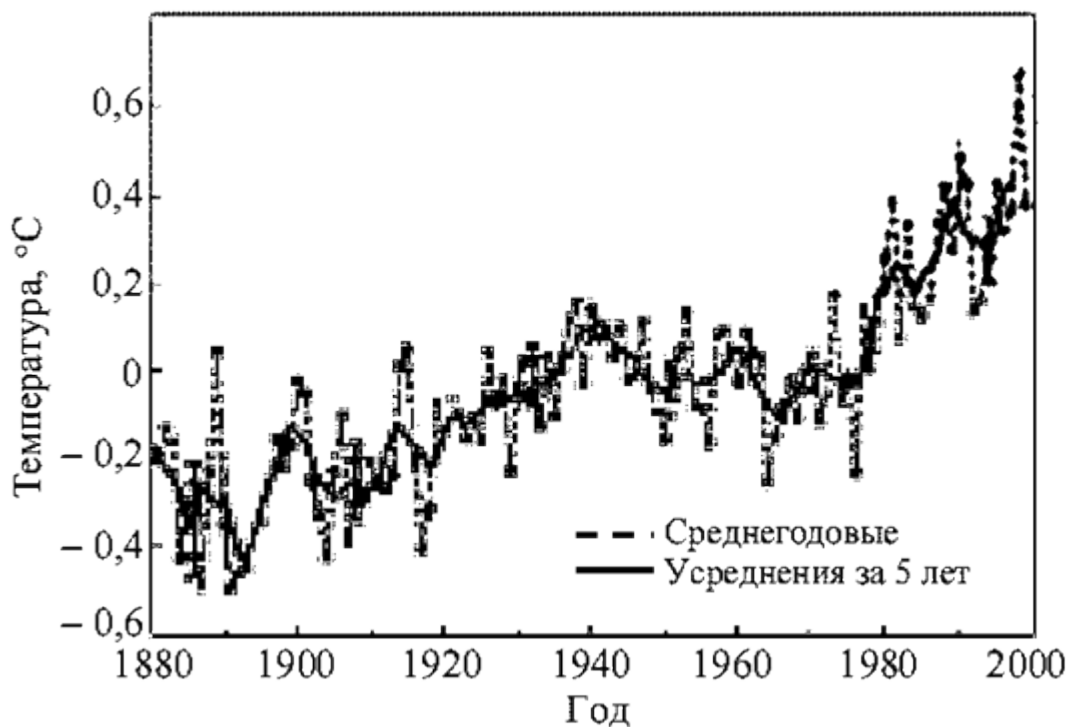


Рис. 1.1. Изменение средней температуры поверхности по результатам прямых метеорологических измерений

Основным [парниковым](#) газом и с точки зрения его влияния на изменение климата (более 60%), и с точки зрения естественных и антропогенных потоков в атмосфере является диоксид углерода. С начала индустриальной революции его концентрация в атмосфере возросла примерно на 30%.

Время жизни диоксида углерода в атмосфере определяется скоростью обмена с поверхностью океана и составляет 10 лет, но при учете перемешивания океанских вод и поглощения диоксида углерода осадочными породами реальное время релаксации его концентрационных изменений может достигать многих десятков и даже сотен лет.

Основным источником антропогенной эмиссии CO_2 в атмосферу (примерно 6,5 млрд. т углерода в год) является энергетика. В США она ответственна за эмиссию 98% диоксида углерода, 24% метана и 18% закиси азота. Контроль за любыми экологически проблемными выбросами требует значительных затрат и накладывает тяжелое бремя не только на производителя, но и прежде всего на потребителя. Такса за выбросы углерода, применяемая некоторыми странами для стимулирования сокращения выбросов CO_2 , составляет до 50 долл. на тонну CO_2 , что приводит к дополнительным затратам на электростанциях.

К 1990 году прямые затраты и косвенное сдерживающее влияние экологического регулирования оказало сильное влияние на американскую экономику. По оценкам, в отсутствие экологического регулирования ВВП США мог быть, вероятно, на 20% выше, чем реально достигнутый к этому времени. К каждому доллару прямых затрат на сокращение выбросов необходимо добавить еще 3 – 4 долл., потерянных за счет снижения эффективности и объема производства.

2. Обоснование необходимости применения альтернативных топлив в энергетике

По мнению академика Е.П. Велихова, директора атомного Центра России им. И.В. Курчатова, к 2030 г. потребление энергии в мире вырастет на 60%. Очевидно, что при этом потребуется увеличение производства различных видов энергоносителей и их источников. Важная особенность решения данной проблемы в XXI веке состоит в том, что энергопроизводство должно быть экологически чистым. Совершенно ясно, что потребуется увеличение вклада биомассы в общий энергобаланс, в том числе и для производства моторных топлив для двигателей внутреннего сгорания.

Для того чтобы оценить потенциальные возможности России как крупного участника мирового рынка биотоплив необходимо представлять себе современное состояние этого рынка и вклада биомассы в мировое производство энергии.

Прогноз роста вклада возобновляемых источников энергии в мировой энергетический баланс до 2040 г. представлен в табл. 2.1. Скорость прироста вклада биомассы в мировой энергетический баланс, как видно из таблицы, существенно меньше, чем у других видов возобновляемых источников. Однако в 2001 г., при общем производстве энергии в мире 10 млрд. т нефтяного эквивалента (н.э.³) вклад биомассы составил 1,1–1,2 млрд. т н.э., а суммарный вклад всех возобновляемых источников энергии – 1,36 млрд. т н.э. По прогнозам, к 2040 г. общее потребление энергии в мире достигнет 13,5 млрд. т н.э. (100%), вклад всех возобновляемых источников – 47,7% (6,44 млрд. т н.э.), вклад биомассы – 23,8% (3,21 млрд. т н.э.). В 2003 г. вклад биомассы в общий энергобаланс Европейского Союза (15 стран) был несколько, выше, чем у всех остальных возобновляемых источников – 3,6% против 3,4%.

Таблица 2.1

Прогноз роста вклада возобновляемых источников энергии в мировой энергетический баланс, %

Технология	Годы				
	1996-2001	2001-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040
Биомасса	2,2	2,2	3,1	3,3	2,8
Большие ГЭС	2	2	1	1	0
Малые ГЭС	6	8	0	8	6
Ветер	3,3	2,8	2,0	7	2
Фотоэлектричество	2,5	2,8	3,0	2,5	13
Солнечное	1	1	1	1	7

теплоснабжение	0	6	6	4	
Солнечное электроснабжение	2	1	2	1	15
Геотермальная	6	8	8	6	4
Морская (приливы, волны)		8	1	2	21

К 2010 г. в странах ЕС этот вклад планируется увеличить до 12%, что, с одной стороны, будет способствовать защите окружающей среды, особенно от транспортных выбросов, а с другой – уменьшению зависимости ЕС от импорта энергоносителей. Это может негативно отразиться на экспорте энергоносителей из России, но Россия в состоянии восполнить возможные потери в экспорте традиционных энергоносителей производством и экспортом экологически чистых видов топлив.

Перспективы потребления биотоплив в Европе при цене 350–450 евро за 1 т н.э. оцениваются следующим образом (млн. т н.э./год): 2005 г. – 5,0, 2010 г. – 17,0, 2020 г. – 37,0 (в 2000 г. оно составило 0,9 млн. т н.э.).

Водород, продукт переработки биомассы, получаемый: брожением сахаросодержащего или крахмалистого сырья; каталитическим изменением биосинтезгаза — смеси монооксида углерода и водорода, получаемых из твердой биомассы; разделением биосинтезгаза на мембранах из водного раствора биоэтанола; из биометанола через паровое реформирование; с помощью микроорганизмов и водорослей.

2.1. Основные направления использования биомассы в энергетике

Рассмотрим кратко основные направления использования биомассы в энергетике Европейского Союза: производство пиллет (горючих брикетов) и древесной щепы (прямое сжигание); газификация и [пиролиз](#) (синтез-газ, метанол для транспорта); производство биоэтанола, биодизельного топлива, [биоводорода](#) и [биогаза](#).

2.1.1. Пиллеты

Производство пиллет включает в себя 5 основных стадий: складирование и подготовка сырья; его сушка до влажности 18–19%; производство пиллет; их охлаждение, упаковка и складирование. Энергосодержание пиллет составляет 17–18 МДж/кг (3 м³ древесных пиллет по энергосодержанию примерно эквивалентны 1 м³ нефти), плотность – 650–700 кг/м³, диаметр – 6–16 мм, длина – 20–30 мм; содержание золы – 0,4–1,0%, влажность – 7–12%, стоимость – 60–90 евро за 1 т.

Пиллеты могут применяться для получения био[Синтезгаза](#) и [биоводорода](#), быстрого [пиролиза](#), производства метанола, газификации, прямого сжигания, т.е. ряда технологий получения моторного топлива. Они широко используются в странах Европейского Союза для выработки тепловой и электрической энергии. Например, в Австрии общее количество приобретенных за период с 1997 по 2003 гг. бытовых бойлеров, работающих на пиллетах, составило около 22 тысяч комплектов, причем в 1997 г. было куплено 425 комплектов, а в 2003–5193.

При газификации из 1 кг пиллет можно получить около 0,6 кг био[Синтезгаза](#) (0,28 кг н.э./кг пиллет). Кроме специально подготовленных пиллет сырьем для газификации является древесина, солома,

стебли кукурузы, багасса, отходы растениеводства и лесоводства, кроме того, сырье выращивается на специальных плантациях. Стоимость 1 т биоСинтезгаза составляет 250 евро (500 евро за 1 т н.э.) при стоимости исходной биомассы 20 евро/т (влажность 10%) и мощности завода 130 т биоСинтезгаза/год. БиоСинтезгаз служит для получения водорода, метанола, аммония, электрической энергии.

2.1.2. Твердые бытовые отходы

При производстве биоСинтезгаза все шире используются твердые бытовые отходы (ТБО). В состав синтез-газа, получаемого из твердых бытовых отходов при температуре 1200 °С, входят водород (25–42%), угарный газ (25–42%), углекислый газ (10–35%), азот (2–5)%, метан >1%.

В Японии в префектуре Чива работает завод по переработке 300 т твердых бытовых отходов в сутки для производства Синтезгаза, идущего на получение водорода для сталелитейного завода, в префектуре Мутсу – по переработке 140 т/сут. ТБО для производства электроэнергии, в префектуре Нагасаки – 300 т/сут. ТБО также для производства электроэнергии, в префектуре Курашики – 555 т/сут. ТБО для сталелитейного завода, в префектуре Юории – 450 т/сут. ТБО для паровых турбин, в префектуре Токушима – 120 т/сут. ТБО для производства электроэнергии, в префектуре Изуши – 95 т/сут. для паровых турбин.

В Италии, в местечке Фондотто, работает электростанция на синтез-газе, получаемом при газификации ТБО. Завод, производящий синтез-газ, перерабатывает 95 т ТБО в сутки. На заводе в местечке Карлсрух (Германия) перерабатывается 720 т/сут. ТБО для производства тепловой энергии для муниципальных целей и эксплуатации паровых турбин.

При производстве синтез-газа путем газификации ТБО из 1000 кг отходов с добавлением кислорода и природного газа (514 кг) получается синтез-газ (890 кг), минеральные вещества (230 кг), металлы (29 кг), сера (2 кг) цинковые соединения (3 кг), смесь солей (10 кг), чистая вода (350 кг).

2.1.3. Бионефть

Кроме газообразного топлива, пиролизом – процессом переработки лигноцеллюлозных материалов без доступа воздуха – можно получать жидкие органические топлива – бионефть.

Завод для получения бионефти пиролизом компании «Дина Мотив энерджи систем» (Канада, провинция Онтарио) имеет мощность по переработке 200 т/сут. В этом процессе можно использовать до 20 видов биомассы, из которых пиролизом получают от 580 до 800 кг бионефти из 1 т исходного сырья – кукурузной шелухи, еловой и сосновой древесины, древесины лиственницы, багассы, березы, черного тополя, кедра, соломы, ТБО. Наилучшим сырьем является кукурузная шелуха, 1 т которой дает до 800 кг бионефти, 120 кг активированного угля и 70 кг газов. Из сосново-еловой древесины (смеси) получается до 70% бионефти, 14% угля, 13% газов, из соломы пшеницы – 58% бионефти, 18% угля, 24% газов.

2.1.4. Биоэтанол

Сырьем для получения биоэтанола (C₂H₅OH, молекулярный вес 46,1, стехиометрическое отношение воздух/этанол = 9,0) является сахарная свекла, сахарный тростник, кукуруза, пшеница, картофель, сладкое сорго и др. (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Объем производства с площади в 1 га и стоимость 1 м³ спирта из разных культур

Сырье	Объем производства,	Стоимость долл./м ³

	т/га	
Сахарная свекла (цена 15 евро/т)	3,0 2,5 –	300 – 400
Сахарный тростник	5,0 3,5 –	160
Кукуруза	2,5	250 – 400
Пшеница	2,0 0,5 –	380 – 400
Картофель	2,7 1,2 –	800 – 900
Сладкое сорго	5,0 3,0 –	200 – 300
Кассава	6,0 1, 5 –	700
Синтетический спирт		540
ТБО	20 м ³ /т	

Цены на мировом рынке этанола представлены в табл. 2.3. Мировая потенциальная потребность в этаноле составляет 2 млрд. т в год, современное мировое производство – 32 млн. т в год, из них 4 млн. м³ – пищевой этанол, 8 млн. м³ – этанол для химической промышленности, 20 млн. м³ – топливный этанол.

Методы производства этанола и сырье для производства различаются: 7% этанола производят химическим синтезом, 93% – брожением; 60% получают из сахара, 40% – из зерна. В двигателях внутреннего сгорания используется 26% этанола в смеси с бензином, в дизелях – 3%.

Таблица 2.3

Цены на мировом рынке этанола

Страна	Цена (евро/м³)
Бразилия	160
Бразилия (безводный спирт)	220
США (безводный спирт)	250

Европа (безводный спирт из сахарной свеклы)	350 – 450
Импорт спирта в Европу	190

Крупнейший производитель этанола, Бразилия, в 1999 г. вырабатывала 6,5 млн. т этого продукта в год, что обеспечивало 13% ее общих потребностей в энергоресурсах и 19% потребности в жидком топливе и позволило сэкономить 35,6 млрд. долл. при стоимости спирта – 25 долл./баррель, бензина – 35 долл./баррель. Современное производство этанола в Бразилии составляет 13 млн. м³/год (сахарный тростник) при потреблении 12,6 млн. м³/год.

Вторая страна по производству этанола – США, где 90% его получают из кукурузы, 8% – из сорго (в 2003 г. было произведено 5,5 млн. м³, в 2004 г. – 12,66 млн. м³). На эти цели идет 13% урожая кукурузы. Конгресс США рассматривает законопроект, предусматривающий увеличение производства этанола в 3 раза. В штате Калифорния введен запрет на употребление метилтретбутилового эфира, а 70% бензина, используемого на юге штата, и 57% – на севере штата, смешиваются с этанолом. По существующим прогнозам предполагается, что к 2012–2015 гг. потребление этанола в США составит 19 млн. м³.

Добавление 1 части этанола в бензин ведет к экономии 3 частей нефти. Спирт является единственным возобновляемым жидким источником топлива, добавление которого к бензину не требует изменения конструкции двигателей.

Кукуруза – не лучшее сырье для производства этанола, так как затраты на производство в этом случае в 2 раза превышают стоимость полученного топлива. Необходимо искать другие сырьевые источники, такие, например, как древесная целлюлоза (полимер глюкозы) или традиционные источники сахарозы и крахмала: сахарная свекла (меласса, свекольный жом), сахарный тростник (багасса), сладкое сорго, картофель и т.д. В этом плане представляет интерес Европейский проект «Сладкое сорго». Из сладкого сорго с площади в 1 га можно получить 15 т багассы (сухой), 5 т зерна, 7 т сахара, 1,88 т листьев, 2,3 т корней, т.е. 3 – 5 м³ этанола.

По прогнозу, производство и потребление спирта к 2020 г. достигнет в мире – 120 млн. т/год, в США и Канаде – 40 млн. т/год.

Биоэтилтретбутиловый эфир (англ. bio-ette) получается смешиванием биоэтанола (48% по объему) и третичного бутанола с последующим нагреванием в присутствии катализаторов. Получающийся продукт имеет отличные антидетонационные свойства как моторное топливо: октановое число – 112, поэтому используется в смеси с бензином для любых серийных двигателей.

2.1.5. Биодизельное топливо

Под биодизельным топливом принято понимать производные растительных масел. Мировое потребление дизельных топлив составляет 145 л/человек, в год, современное производство составляет: мировое – 1,7 млн. т/год, из них: Европейский Союз – 1,5 млн. т/год, Восточная Европа – 0,1 млн. т/год, США – 0,07 млн. т/год. По прогнозу, к 2020 г. мировое производство биодизельного топлива может составить 23 млн. т.

В Европе дизельное топливо получают из рапсового масла при выходе 1 – 1,5 т/га посевных площадей рапса. Растительное масло эритрифизируется метанолом, при этом получается на 1 т масла 100 кг метанола и 100 кг глицерина и добавляется в определенном количестве к традиционному дизельному топливу. Однако современные

дизели после определенных доработок могут работать на 100-процентном биодизельном топливе – чистом растительном масле.

2.1.6. Биометанол и другие жидкие топлива

Биометанол может стать предпочтительным топливом для топливных элементов. Его производят из Синтезгаза, или смеси H_2 и CO , получаемых из биомассы в присутствии O_2 (производство синтетического метанола составляет 27 млн. т/год).

Биометилтрибутиловый эфир (англ. bio-mtbe) – аналогичен bio-etbe, получается смешиванием биометанола (36% по объему) и третичного бутанола при нагревании и катализаторах.

Биодиметил эфир (англ. bio-dme) добавляется к дизельному топливу (2%) для улучшения его качеств. Может быть получен из Синтезгаза или чистого метанола в присутствии алюмосодержащих катализаторов.

Широкий ряд чистых биосинтетических топлив можно производить из биоСинтезгаза, получаемого из биомассы или из водорода и угарного газа по реакции Фишера-Тропша.

2.1.7. Биоводород

Биоводород, продукт переработки биомассы, представляет собой превосходное чистое топливо. Его энергоемкость на единицу веса в 3 раза выше, чем у нефти. В процессе сгорания биоводород, в отличие от всех углеродсодержащих топлив, не выделяет углекислого газа в атмосферу.

Известно несколько путей его получения:

- брожение сахаросодержащего или крахмалистого сырья (багассы, мелассы и т.д.);
- электролиз воды с использованием биоэлектричества. Это очень эффективный процесс, но относительно дорогостоящий (2000–3000 евро/т водорода при его энергоемкости $4,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$);
- каталитическое изменение биоСинтезгаза – смеси монооксида углерода и водорода, получаемых из твердой биомассы;
- разделение биоСинтезгаза на мембранах из водного раствора биоэтанола;
- паровое реформирование биометанола;
- с помощью микроорганизмов и водорослей.

2.1.8. Биогаз

Биогаз, имеющий средний состав: 55–75% метана, 25– 45% двуокиси углерода, получается метановым брожением биомассы при 80–90% влажности. Его низшая теплота сгорания составляет 20–30 МДж/м³ и определяется концентрацией метана в его составе. Количество метана, в свою очередь, зависит от биофизико-химических особенностей сырья и в некоторых случаях от применяемой технологии. Выход биогаза на 1 т абсолютно сухого вещества составляет 250–350 м³ для отходов крупного рогатого скота, 400 м³ для отходов птицеводства, 300–600 м³ для различных видов растений, до 600 м³ – для отходов (барды) спиртовых и ацетонобутиловых заводов.

Больше всего малообъемных крестьянских биогазовых установок находится в Китае – более 10 млн. Они производят около 7 млрд. м³ биогаза в год, что обеспечивает топливом примерно 60 млн. крестьян. Среди промышленно развитых стран ведущее место в производстве и использовании биогаза принадлежит Дании – биогаз занимает до 18% в ее общем энергобалансе.

С 1987 по 1995 годы в Европе построено свыше 150 крупных промышленных биоэнергетических станций на базе использования [биогаза](#). В мире в 2001 году было введено в эксплуатацию более 1000 [биогазовых](#) установок и станций, из них 45% в Европе, 15% в США, далее следуют Бразилия, Китай, Индия и т.д. Значительная часть производимого [биогаза](#) идет на получение электроэнергии, причем коэффициент полезного действия установок оценивают в 31%, а производительность по электроэнергии варьирует от 48 до 104 кВт · ч/т перерабатываемого сырья, как правило, органических отходов.

Таблица 2.4

Число установок в мире с энергооборудованием различного типа, работающем на [лендфиллгазе](#)

Тип оборудования	Число установок
Газовые двигатели (двигатели внутреннего сгорания)	581
Газовые котлы	277
Теплоэлектростанции	187
Газовые турбины	39
Системы выпаривания	17
Печи для обжига	14
Системы очистки газа до качества природного газа	13
Паровые турбины	11
Установки с комбинированными циклами	7
Микротурбины	3
Оборудование, использующее транспортное топливо	2
Оборудование с топливными элементами	1
Итого	1152

К производству [биогаза](#) относится также получение [лендфиллгаза](#), или [биогаза](#) из мусора со свалок. В настоящее время во многих странах создаются специальные обустроенные хранилища для твердых бытовых отходов с целью извлечения из них [биогаза](#) для производства электрической и тепловой

энергии. В мире уже работают установки с энергооборудованием различного типа, использующим [лендфиллгаз](#) (табл. 2.4).

В США к 2002 г. находилось в эксплуатации 350 за-водов по производству [лендфиллгаза](#), в Европе – 750, всего в мире – 1152, общее количество производимой энергии – 3929 МВт, объем обрабатываемых отходов – 4548 млн. т.

Достижения различных стран – развитых и развивающихся – в области производства и потребления биотоплив открывают перед Россией значительные перспективы – как для решения локальных энергетических проблем на современном этапе, так и в плане выхода нашей страны в качестве крупного поставщика биотоплива на мировой и европейский рынки.

Водород, продукт переработки биомассы, получаемый:
брожением сахаросодержащего или крахмалистого сырья;
каталитическим изменением биосинтезгаза — смеси монооксида углерода и водорода, получаемых из твердой биомассы;
разделением биосинтезгаза на мембранах из водного раствора биоэтанола; из биометанола через паровое реформирование;
с помощью микроорганизмов и водорослей.

2.1. Основные направления использования биомассы в энергетике

Рассмотрим кратко основные направления использования биомассы в энергетике Европейского Союза: производство пиллет (горючих брикетов) и древесной щепы (прямое сжигание); газификация и [пиролиз](#) (синтез-газ, метанол для транспорта); производство биоэтанола, биодизельного топлива, [биоводорода](#) и [биогаза](#).

2.1.1. Пиллеты

Производство пиллет включает в себя 5 основных стадий: складирование и подготовка сырья; его сушка до влажности 18–19%; производство пиллет; их охлаждение, упаковка и складирование. Энергосодержание пиллет составляет 17–18 МДж/кг (3 м³ древесных пиллет по энергосодержанию примерно эквивалентны 1 м³ нефти), плотность – 650–700 кг/м³, диаметр – 6–16 мм, длина – 20–30 мм; содержание золы – 0,4–1,0%, влажность – 7–12%, стоимость – 60–90 евро за 1 т.

Пиллеты могут применяться для получения био[Синтезгаза](#) и [биоводорода](#), быстрого [пиролиза](#), производства метанола, газификации, прямого сжигания, т.е. ряда технологий получения моторного топлива. Они широко используются в странах Европейского Союза для выработки тепловой и электрической энергии. Например, в Австрии общее количество приобретенных за период с 1997 по 2003 гг. бытовых бойлеров, работающих на пиллетах, составило около 22 тысяч комплектов, причем в 1997 г. было куплено 425 комплектов, а в 2003–5193.

При газификации из 1 кг пиллет можно получить около 0,6 кг био[Синтезгаза](#) (0,28 кг н.э./кг пиллет). Кроме специально подготовленных пиллет сырьем для газификации является древесина, солома, стебли кукурузы, багасса, отходы растениеводства и лесоводства, кроме того, сырье выращивается на специальных плантациях. Стоимость 1 т био[Синтезгаза](#) составляет 250 евро (500 евро за 1 т н.э.) при стоимости исходной биомассы 20 евро/т (влажность 10%) и мощности завода 130 т био[Синтезгаза](#)/год. Био[Синтезгаз](#) служит для получения водорода, метанола, аммония, электрической энергии.

2.1.2. Твердые бытовые отходы

При производстве био[Синтезгаза](#) все шире используются твердые бытовые отходы (ТБО). В состав синтез-газа, получаемого из твердых бытовых отходов при температуре 1200 °С, входят водород (25–42%), угарный газ (25–42%), углекислый газ (10–35%), азот (2–5)%, метан >1%.

В Японии в префектуре Чива работает завод по переработке 300 т твердых бытовых отходов в сутки для производства [Синтезгаза](#), идущего на получение водорода для сталелитейного завода, в префектуре Мутсу – по переработке 140 т/сут. ТБО для производства электроэнергии, в префектуре Нагасаки – 300 т/сут. ТБО также для производства электроэнергии, в префектуре Курашики – 555 т/сут. ТБО для сталелитейного завода, в префектуре Юории – 450 т/сут. ТБО для паровых турбин, в префектуре Токушима – 120 т/сут. ТБО для производства электроэнергии, в префектуре Изуши – 95 т/сут. для паровых турбин.

В Италии, в местечке Фондотц, работает электростанция на синтез-газе, получаемом при газификации ТБО. Завод, производящий синтез-газ, перерабатывает 95 т ТБО в сутки. На заводе в местечке Карлсрух (Германия) перерабатывается 720 т/сут. ТБО для производства тепловой энергии для муниципальных целей и эксплуатации паровых турбин.

При производстве синтез-газа путем газификации ТБО из 1000 кг отходов с добавлением кислорода и природного газа (514 кг) получается синтез-газ (890 кг), минеральные вещества (230 кг), металлы (29 кг), сера (2 кг) цинковые соединения (3 кг), смесь солей (10 кг), чистая вода (350 кг).

[2.1.3. Бионефть](#)

Кроме газообразного топлива, [пиролизом](#) – процессом переработки лигноцеллюлозных материалов без доступа воздуха – можно получать жидкие органические топлива – [бионефть](#).

Завод для получения бионефти [пиролизом](#) компании «Дина Мотив энеджерджи систем» (Канада, провинция Онтарио) имеет мощность по переработке 200 т/сут. В этом процессе можно использовать до 20 видов биомассы, из которых [пиролизом](#) получают от 580 до 800 кг бионефти из 1 т исходного сырья – кукурузной шелухи, еловой и сосновой древесины, древесины лиственницы, багассы, березы, черного тополя, кедра, соломы, ТБО. Наилучшим сырьем является кукурузная шелуха, 1 т которой дает до 800 кг бионефти, 120 кг активированного угля и 70 кг газов. Из сосново-еловой древесины (смеси) получается до 70% бионефти, 14% угля, 13% газов, из соломы пшеницы – 58% бионефти, 18% угля, 24% газов.

[2.1.4. Биоэтанол](#)

Сырьем для получения биоэтанола (C_2H_5OH , молекулярный вес 46,1, стехиометрическое отношение воздух/этанол = 9,0) является сахарная свекла, сахарный тростник, кукуруза, пшеница, картофель, сладкое сорго и др. (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Объем производства с площади в 1 га и стоимость 1 м³ [спирта](#) из разных культур

Сырье	Объем производства, т/га	Стоимость долл./м³
Сахарная свекла (цена 15 евро/т)	2,5 – 3,0	300 – 400
Сахарный тростник	3,5 – 5,0	160
Кукуруза	2,5	250 – 400

Пшеница	2,0	0,5 –	380 – 400
Картофель	2,7	1,2 –	800 – 900
Сладкое сорго	5,0	3,0 –	200 – 300
Кассава	6,0	1, 5 –	700
Синтетический спирт			540
ТБО		20 м ³ /т	

Цены на мировом рынке этанола представлены в табл. 2.3. Мировая потенциальная потребность в этаноле составляет 2 млрд. т в год, современное мировое производство – 32 млн. т в год, из них 4 млн. м³ – пищевой этанол, 8 млн. м³ – этанол для химической промышленности, 20 млн. м³ – топливный этанол.

Методы производства этанола и сырье для производства различаются: 7% этанола производят химическим синтезом, 93% – брожением; 60% получают из сахара, 40% – из зерна. В двигателях внутреннего сгорания используется 26% этанола в смеси с бензином, в дизелях – 3%.

Таблица 2.3

Цены на мировом рынке этанола

Страна	Цена (евро/м ³)
Бразилия	160
Бразилия (безводный спирт)	220
США (безводный спирт)	250
Европа (безводный спирт из сахарной свеклы)	350 – 450
Импорт спирта в Европу	190

Крупнейший производитель этанола, Бразилия, в 1999 г. вырабатывала 6,5 млн. т этого продукта в год, что обеспечивало 13% ее общих потребностей в энергоресурсах и 19% потребности в жидком топливе и позволило сэкономить 35,6 млрд. долл. при стоимости [спирта](#) – 25 долл./ баррель, бензина – 35 долл./баррель. Современное производство этанола в Бразилии составляет 13 млн. м³/год (сахарный тростник) при потреблении 12,6 млн. м³/год.

Вторая страна по производству этанола – США, где 90% его получают из кукурузы, 8% – из сорго (в 2003 г. было произведено 5,5 млн. м³, в 2004 г. – 12,66 млн. м³). На эти цели идет 13% урожая кукурузы. Конгресс США рассматривает законопроект, предусматривающий увеличение производства этанола в 3 раза. В штате Калифорния введен запрет на употребление метилтретбутилового эфира, а 70% бензина, используемого на юге штата, и 57% – на севере штата, смешиваются с этанолом. По существующим прогнозам предполагается, что к 2012–2015 гг. потребление этанола в США составит 19 млн. м³.

Добавление 1 части этанола в бензин ведет к экономии 3 частей нефти. [Спирт](#) является единственным возобновляемым жидким источником топлива, добавление которого к бензину не требует изменения конструкции двигателей.

Кукуруза – не лучшее сырье для производства этанола, так как затраты на производство в этом случае в 2 раза превышают стоимость полученного топлива. Необходимо искать другие сырьевые источники, такие, например, как древесная целлюлоза (полимер глюкозы) или традиционные источники сахарозы и крахмала: сахарная свекла (меласса, свекольный жом), сахарный тростник (багасса), сладкое сорго, картофель и т.д. В этом плане представляет интерес Европейский проект «Сладкое сорго». Из сладкого сорго с площади в 1 га можно получить 15 т багассы (сухой), 5 т зерна, 7 т сахара, 1,88 т листьев, 2,3 т корней, т.е. 3 – 5 м³ этанола.

По прогнозу, производство и потребление [спирта](#) к 2020 г. достигнет в мире – 120 млн. т/год, в США и Канаде – 40 млн. т/год.

[Биоэтилтретбутиловый эфир](#) (англ. bio-etbe) получается смешиванием биоэтанола (48% по объему) и третичного бутанола с последующим нагреванием в присутствии катализаторов. Получающийся продукт имеет отличные антидетонационные свойства как моторное топливо: октановое число – 112, поэтому используется в смеси с бензином для любых серийных двигателей.

2.1.5. Биодизельное топливо

Под биодизельным топливом принято понимать производные [растительных масел](#). Мировое потребление дизельных топлив составляет 145 л/человек, в год, современное производство составляет: мировое – 1,7 млн. т/год, из них: Европейский Союз – 1,5 млн. т/год, Восточная Европа – 0,1 млн. т/год, США – 0,07 млн. т/год. По прогнозу, к 2020 г. мировое производство биодизельного топлива может составить 23 млн. т.

В Европе дизельное топливо получают из рапсового масла при выходе 1 – 1,5 т/га посевных площадей рапса. [Растительное масло](#) эритрифизируется метанолом, при этом получается на 1 т масла 100 кг метанола и 100 кг глицерина и добавляется в определенном количестве к традиционному дизельному топливу. Однако современные дизели после определенных доработок могут работать на 100-процентном биодизельном топливе – чистом растительном масле.

2.1.6. Биометанол и другие жидкие топлива

[Биометанол](#) может стать предпочтительным топливом для топливных элементов. Его производят из [Синтезгаза](#), или смеси Н₂ и СО, получаемых из биомассы в присутствии О₂ (производство синтетического метанола составляет 27 млн. т/год).

[Биометилтретбутиловый эфир](#) (англ. bio-mtbe) – аналогичен bio-etbe, получается смешиванием [биометанола](#) (36% по объему) и третичного бутанола при нагревании и катализаторах.

[Биодиметил эфир](#) (англ. bio-dme) добавляется к дизельному топливу (2%) для улучшения его качеств. Может быть получен из [Синтезгаза](#) или чистого метанола в присутствии алюмосодержащих катализаторов.

Широкий ряд чистых биосинтетических топлив можно производить из био[Синтезгаза](#), получаемого из биомассы или из водорода и угарного газа по реакции Фишера-Тропша.

[2.1.7. Биоводород](#)

[Биоводород](#), продукт переработки биомассы, представляет собой превосходное чистое топливо. Его энергоемкость на единицу веса в 3 раза выше, чем у нефти. В процессе сгорания [биоводород](#), в отличие от всех углеродсодержащих топлив, не выделяет углекислого газа в атмосферу.

Известно несколько путей его получения:

- брожение сахаросодержащего или крахмалистого сырья (багассы, мелассы и т.д.);
- электролиз воды с использованием биоэлектричества. Это очень эффективный процесс, но относительно дорогостоящий (2000–3000 евро/т водорода при его энергоемкости $4,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$);
- каталитическое изменение био[Синтезгаза](#) – смеси монооксида углерода и водорода, получаемых из твердой биомассы;
- разделение био[Синтезгаза](#) на мембранах из водного раствора биоэтанола;
- паровое реформирование [биометанола](#);
- с помощью микроорганизмов и водорослей.

[2.1.8. Биогаз](#)

[Биогаз](#), имеющий средний состав: 55–75% метана, 25–45% двуокиси углерода, получается метановым брожением биомассы при 80–90% влажности. Его низшая теплота сгорания составляет 20–30 МДж/м³ и определяется концентрацией метана в его составе. Количество метана, в свою очередь, зависит от биофизико-химических особенностей сырья и в некоторых случаях от применяемой технологии. Выход [биогаза](#) на 1 т абсолютно сухого вещества составляет 250–350 м³ для отходов крупного рогатого скота, 400 м³ для отходов птицеводства, 300–600 м³ для различных видов растений, до 600 м³ – для отходов (барды) [спиртовых](#) и [ацетонобутиловых](#) заводов.

Больше всего малообъемных крестьянских [биогазовых](#) установок находится в Китае – более 10 млн. Они производят около 7 млрд. м³ [биогаза](#) в год, что обеспечивает топливом примерно 60 млн. крестьян. Среди промышленно развитых стран ведущее место в производстве и использовании [биогаза](#) принадлежит Дании – [биогаз](#) занимает до 18% в ее общем энергобалансе.

С 1987 по 1995 годы в Европе построено свыше 150 крупных промышленных биоэнергетических станций на базе использования [биогаза](#). В мире в 2001 году было введено в эксплуатацию более 1000 [биогазовых](#) установок и станций, из них 45% в Европе, 15% в США, далее следуют Бразилия, Китай, Индия и т.д. Значительная часть производимого [биогаза](#) идет на получение электроэнергии, причем коэффициент полезного действия установок оценивают в 31%, а производительность по электроэнергии варьирует от 48 до 104 кВт · ч/т перерабатываемого сырья, как правило, органических отходов.

Таблица 2.4

Число установок в мире с энергооборудованием различного типа, работающем на [лендфиллгазе](#)

Тип оборудования	Число установок
Газовые двигатели (двигатели внутреннего сгорания)	581
Газовые котлы	277
Теплоэлектростанции	187
Газовые турбины	39
Системы выпаривания	17
Печи для обжига	14
Системы очистки газа до качества природного газа	13
Паровые турбины	11
Установки с комбинированными циклами	7
Микротурбины	3
Оборудование, использующее транспортное топливо	2
Оборудование с топливными элементами	1
Итого	1152

К производству [биогаза](#) относится также получение [лендфиллгаза](#), или [биогаза](#) из мусора со свалок. В настоящее время во многих странах создаются специальные обустроенные хранилища для твердых бытовых отходов с целью извлечения из них [биогаза](#) для производства электрической и тепловой энергии. В мире уже работают установки с энергооборудованием различного типа, использующим [лендфиллгаз](#) (табл. 2.4).

В США к 2002 г. находилось в эксплуатации 350 за-водов по производству [лендфиллгаза](#), в Европе – 750, всего в мире – 1152, общее количество производимой энергии – 3929 МВт, объем обрабатываемых отходов – 4548 млн. т.

Достижения различных стран – развитых и развивающихся – в области производства и потребления биотоплив открывают перед Россией значительные перспективы – как для решения локальных энергетических проблем на современном этапе, так и в плане выхода нашей страны в качестве крупного поставщика биотоплива на мировой и европейский рынки.

3.2. Перспективы газификации твердой биомассы

[Газогенерация](#) и [пиролиз](#) – перспективные направления переработки твердого топлива в топлива, которые могут применяться в качестве моторных в двигателях внутреннего сгорания. В этой области биоэнергетики Россия имеет определенные реальные успехи в создании современного оборудования для газификации твердой биомассы (древесины, лузги, ТБО). Компанией «Энерготехника» (г. Санкт-Петербург) создано несколько типов [газогенераторов](#):

- [газогенератор](#) Г-3М, мощность 4 МВт, топливо – лузга подсолнечника, расход топлива – 30 т/ч, КПД – 86%;
- [газогенератор](#) Г-50, мощность – 100 кВт, расход топлива – 40 кг/ч, КПД – 76%, выход сухого газа – 70 м³/ч;
- [газогенератор](#) Г-600, мощность 600 кВт, КПД – 83%, выход сухого газа – 500 м³/ч, расход топлива – 380 кг/ч.

При переработке указанных выше потенциальных объемов древесины и соломы в [Синтезгаз](#) методами газификации можно получать в год до 85 млрд. м³ синтезгаза на сумму 15 млрд. евро.

3.3. Применение этанола в качестве топлива

Получение этанола и экспорт транспортного этанола также может стать в перспективе серьезным источником валюты и экологически чистым энергетическим товаром России на международном топливном рынке. В 2002 г. в России было произведено 1,31 млн. м³ этанола из пищевого сырья, производство синтетического этанола составило 0,15 млн. м³, технического гидролизного этанола – 0,044 млн. м³. Россия располагает мощностями, применяющими гидролизные технологии и позволяющими вырабатывать до 0,2 млн. т гидролизного [спирта](#). Однако гидролизные технологии, основанные на использовании серной кислоты, являются экологически вредными. Необходимо разрабатывать современные экологически чистые технологии эффективного разложения древесины на целлюлозу (полимер глюкозы) и лигнин.

Обеспечить производство этанола в России могут и другие виды сырья, такие как меласса (отходы сахарного производства), картофельный крахмал, сладкое сорго.

Объем производства мелассы в 2004 г. равнялся 1,1 млн. т. Из 100 кг мелассы можно получить 30 л этанола, или из 1,1 млн. т – 330000 м³ стоимостью 99 млн. долл. В качестве сырья для получения этанола можно использовать также свекловичный жом, объем производства которого в 2003 г. был 17,4 млн. т. Из этого количества жома можно получить 380 тыс. м³ этанола на сумму 114 млн. долл. Таким образом, общий выход этанола из отходов производства сахара может составить 710 тыс. м³ на общую сумму 213 млн. долл. Если для производства этанола использовать непосредственно сахарную свеклу, урожай которой в 2003 г. в России составил 21,7 млн. т, то при содержании сахара в ней 16% выход этанола мог бы равняться 1,7 млн. м³ на сумму 510 млн. долл.

Вторым сырьевым источником крахмала для производства этанола в России является картофель, из 1 т которого получается до 60 л этанола. При урожае картофеля в 36,6 млн. т (данные на 2004 г.) потенциальный объем этанола – 2,2 млн. м³ на сумму 660 млн. долл. Картофель – культура, широко распространенная в регионах рискованного земледелия России. Выращивание его для технических целей, например для производства этанола, может оказать существенное

влияние на подъем экономики в этих регионах. Чтобы выйти по производству этанола на уровень его современного производства в США, России нужно засеять картофелем до 15 млн. га.

Сладкое сорго – еще один вид потенциального сырья для производства этанола в России. Оно культивируется на Северном Кавказе, Дальнем Востоке и Поволжье. Урожай сладкого сорго – 20–30 т/га. Из 1 т массы сорго получают 800–850 л сока с содержанием 20% углеводов, или до 80 л этанола, т.е. с 1 га – 2 м³ этанола на сумму 600 долл.

Следовательно, перспектива развития производства транспортного этанола в России с последующим его экспортом достаточно оптимистична. Но совершенно очевидно, что основным сырьем для его производства в нашей стране должна стать древесина, что требует создания современных технологий ее разложения на лингин и целлюлозу.

3.4. Получение водорода из биомассы

Получение [биоводорода](#) из биомассы можно осуществлять путем бутилового или ацетобутилового брожения сахарозы или крахмала. При этом из 1 т мелассы образуется 80 м³ водорода. Это означает, что с 1 га плантаций сахарной свеклы (мелассы) можно получить до 140 м³ водорода, или в пересчете на всю произведенную в 2003 г. мелассу –

88 млн. м³. Дополнительно к водороду 1 т мелассы дает до 114 кг бутанола и до 36 кг ацетона, а весь годичный объем мелассы – 125000 т бутанола и 40000 т ацетона.

Методом бутилового брожения можно произвести водорода:

- из 1 т мелассы – до 140 м³, т.е. из всего урожая мелассы в 2003 г. – 154 млн. м³;
- с 1 га плантаций сахарной свеклы в России – 245 м³;
- из 1 т картофеля – 42 м³, или с 1 га плантаций – 1500 м³;
- из 1 т стеблей сладкого сорго – 50 м³, или с 1 га плантаций – 1500 м³.

При ацетобутиловом брожении можно произвести водорода:

- из 1 т картофеля можно получить 25 м³ водорода, 340 кг бутанола и 110 кг ацетона, т.е. с 1 га картофельных плантаций – 875 м³ водорода, 12 т бутанола и 4 т ацетона;
- из 1 т стеблей сорго – 30 м³ водорода, 114 кг бутанола и 40 кг ацетона, или с 1 га плантаций сахарного сорго – 900 м³ водорода, 3,4 т бутанола и 1,2 т ацетона.

В СССР до конца 70-х годов XX столетия в эксплуатации находилось 4 ацетобутиловых завода: в городах Грозном, Нальчике, Талица (Свердловской области) и Ефремов (Тульской области). К концу 90-х годов остались Грозненский и Ефремовский заводы, причем Ефремовский завод нуждается в восстановлении.

Ефремовский завод производил до 50 т различных растворителей (бутанол/ацетон/этанол = 13/4/1) и до 29 тыс. м³ водорода в сутки, или 15 тыс. т растворителей и до 8,7 млн. м³ водорода в год, а Грозненский завод – 74 т растворителей и 43 тыс. м³ водорода в сутки, или до 22 тыс. т растворителей и 12,9 млн. м³ водорода в год. К сожалению, весь образующийся водород в то время выпускался в атмосферу, а углекислый газ шел на производство жидкой и твердой углекислоты.

В конце 60-х гг. XX столетия на Ефремовском ацето-нобутиловом заводе (1967 г.) и Грозненском АБЗ (1969 г.) были введены в эксплуатацию два цеха по производству кормового витамина В₁₂ методом термофильного метанового брожения жидких отходов этих производств – барды

(3000 м³/сутки). Кроме витамина В₁₂, каждый цех производил в сутки до 30 тыс. м³ [биогаза](#), который целиком направлялся на производство тепловой энергии для всего производственного цикла.

Таким образом, в конце 60-х гг. в СССР впервые в мире были созданы промышленные производства биотоплив из биомассы ([биоводород](#), биометан, биобутанол, биоацетон и биоэтанол).

Основа производства моторных топлив. Непосредственное использование растительных масел в дизелях затруднено из-за различий физико-химических свойств растительных жиров и нефтяных топлив. Недостатками топлив этого вида по сравнению с дизельными являются их более высокая вязкость (в 2...10 раз), плохие низкотемпературные свойства, низкое цетановое число, высокая температура воспламенения, повышенная коксуемость

3.5. Перспективы производства топлива из [растительных масел](#)

Перспективы производства биодизельного топлива в России весьма широки. Россия имеет все возможности для выработки [растительных масел](#) с целью производства и экспорта биодизельного топлива. В 2000 г. в стране было произведено более 4 млн. т [растительных масел](#). Основными продуцентами [растительных масел](#) у нас являются подсолнечник, лен, горчица, в меньших количествах – кукуруза, соя и рапс. Среди них ведущее место занимает подсолнечник. Очень перспективно для России расширение посевов льна в средней полосе (традиционное российское производство льна) с получением льняного волокна и семян для отжима масла, а также подсолнечника, сои и рапса в Южных регионах.

Биогаз, имеет средний состав: 55 — 75% метана, 25 — 45% двуокиси углерода и получается метановым брожением биомассы при 80 — 90% влажности. Его низшая теплота сгорания составляет от 20 до 30 МДж/м³ и определяется концентрацией метана в его составе

3.6. Потенциальные возможности получения [биогаза](#)

В силу целого ряда обстоятельств, связанных с топливно-энергетическими, экологическими, климатическими, экономическими условиями, в России (ранее в СССР) с начала 80-х гг. ведущее место в решении проблемы использования биомассы в энергетике, помимо газификации древесины и лигноцеллюлозных материалов, занимали разработка и создание [биогазовых технологий](#) и оборудования для производства [биогаза](#), тепловой и электрической энергии из органических отходов сельскохозяйственного производства и пищевой и легкой промышленности, стоков и твердых бытовых отходов городов (в соответствии с постановлениями Правительства РФ).

Результатом развития этого направления явилось создание в компании «Центр "ЭкоРос"» высокорентабельных [биогазовых технологий](#) и необходимого оборудования со сроком окупаемости 1–1,5 года независимо от мощности установок и места их эксплуатации. Индивидуальная [биогазовая установка](#) этой компании для крестьянского хозяйства ИБГУ-1 перерабатывает до 200 кг отходов крупного рогатого скота и производит в сутки до 10–12 м³ [биогаза](#).

В 2002 г. Всероссийским институтом электрификации сельского хозяйства введена в эксплуатацию в агрохозяйстве «Красная пойма» (Луховицкий район Московской области) [биогазовая установка](#) с реактором-метантенком объемом 65 м³, усовершенствованная конструкция которой позволила повысить качество получаемых удобрений. Производительность установки по переработке отходов крупного рогатого скота – 6,5 т/сут., по производству [биогаза](#) – 180–200 м³/сут. и удобрений – 6,5 т/сут. Температура процесса 52–55 °С.

Спирты - органические соединения, характеризующиеся присутствием в их молекуле одной или нескольких гидроксильных групп OH.

4. физико-химические характеристики топлив, получаемых из возобновляемых источников

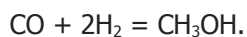
Рассмотрим кратко технологию производства и физико-химические свойства топлив, получаемых из возобновляемых источников.

4.1. Физико-химические свойства [спиртов](#) как моторных топлив

Одним из перспективных альтернативных топлив для дизелей являются [спирты](#). Это прежде всего метиловый [спирт](#) (метанол), этиловый [спирт](#) (этанол), а также н-бутиловый [спирт](#) (бутанол) и др. Как уже указывалось, производство [спиртов](#) возможно практически из любого сырья, содержащего углерод, но широкое применение [спиртов](#) сдерживается тем обстоятельством, что по ряду физико-химических свойств они существенно отличаются от стандартных дизельных топлив.

[Спирты](#) – органические соединения, характеризующиеся присутствием в их молекуле одной или нескольких гидроксильных групп OH. По числу этих групп [спирты](#) подразделяют на одноатомные, двухатомные и многоатомные. В зависимости от положения гидроксильной группы различают первичные RCH_2OH , вторичные $RCHOH$ и третичные [спирты](#) $RCOH$ (R – радикал). Наиболее исследованными и перспективными для использования в дизелях являются одноатомные первичные [спирты](#) – метиловый [спирт](#) (метанол) CH_3OH и этиловый [спирт](#) (этанол) C_2H_5OH .

Простейший из [спиртов](#) – метанол – представляет собой ядовитую жидкость со слабым [спиртовым](#) запахом. Основой современного метода его производства является получение путем каталитического гидрирования монооксида углерода CO синтез-газа (смесь CO и H_2) по реакции



Синтез-газ, в свою очередь, получают при окислении природного газа или, что для нас наиболее важно, путем газификации твердого углеродсодержащего сырья (метанол может быть получен сухой перегонкой древесины, поэтому иногда его называют древесным [спиртом](#)) или из биомассы.

Другой характерный [спирт](#) – этиловый – представляет собой бесцветную жидкость со жгучим вкусом. Он смешивается с водой в любых пропорциях. Этиловый [спирт](#) является хорошим растворителем смол, жиров и других органических веществ. Это позволяет получать на его основе различные смесевые топлива, приближающиеся по своим свойствам к стандартным дизельным топливам.

Этот [спирт](#) может быть получен путем гидратации этилена C_2H_4 или сбраживанием сахаристых веществ, содержащихся в биомассе.

Кроме рассмотренных простых алифатических [спиртов](#) (этанола и метанола), в качестве топлив для двигателей внутреннего сгорания могут быть использованы и высшие [спирты](#): пропиловый, бутиловый и амиловый; нормальный деканол, а также смеси [спиртов](#) с другими топливами (например, [газохол](#) – смесь бензина с этанолом в соотношении 9:1). Определение возможности сжигания этих топлив в дизелях проводится с учетом их физико-химических свойств, некоторые из которых представлены в табл. 4.1.

Данные табл. 4.1 свидетельствуют о том, что метанол и этанол по своим физико-химическим свойствам близки к бензинам. В частности, они имеют повышенную испаряемость, сравнительно невысокие плотность и вязкость, приемлемые для двигателей с принудительным воспламенением октанового числа (91–92 ед.). Преимуществом метанола является его низкая пожароопасность. Положительное свойство [спиртов](#) – наличие в молекулах атомов кислорода, поэтому их используют в качестве [оксигенатов](#) (кислородсодержащих компонентов), повышающих детонационную стойкость бензинов и способствующих снижению выбросов сажи и монооксида углерода как в бензиновых двигателях, так и в дизелях.

Метанол может смешиваться с бензином и служить основой для эфирной добавки – метилтретбутилового эфира ([МТБЭ](#)). В 1998 г. в США произведено около 12,5 млрд. л [МТБЭ](#), при этом бензин с [МТБЭ](#) составляет примерно 30% всего объема продаж бензина в США. В настоящее время [МТБЭ](#) замещает в США большее количество бензина и сырой нефти, чем другие альтернативные топлива вместе взятые.

В России метанол в качестве моторного топлива пока не используется, что объясняется его повышенной стоимостью по сравнению с традиционными моторными топливами.

Этанол обладает высоким октановым числом и в не-которых странах широко применяется в качестве моторного топлива на транспорте. Так, Бразилия в период 1970– 1990-х гг. ежедневно замещала этанолом до 250 тыс. баррелей импортируемой нефти. Начиная с 1976 года в этой стране этанолом было замещено около 140 млрд. л бензина, что дало экономический эффект в размере 50 млрд. долл. США. В 1990-х гг. в Бразилии чистый этанол в качестве моторного топлива использовали в более 7 млн. автомобилей и еще в 9 млн. транспортных средств – его смесь с бензином ([газохол](#)). Однако в последние годы наметился спад в использовании этанола как моторного топлива.

Таблица 4.1

Физико-химические свойства [спиртов](#)

Показатель	Метанол	Этанол	Нормальный бутанол	Изобутанол	Нормальный деканол	Газохол
Формула	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₁₀ H ₂₁ OH	
Молекулярная масса	32,04	46,07	74,12	74,12	158,3	
Плотность при 20 °С, кг/м ³	792	789	813	810	831	730 - 760
Вязкость кин. 20 °С, мм ² /с	0,73	1,51	2,9			
Цетановое число	3	8	18	15		
Температура плавления, °С	97,9	114,2	79,9	138,5	+ 7,0	
Температура кипения, °С	64,5	78,4	117,5	108,1	231	25 – 210
Температура вспышки, °С	8	13	19	8		
Температура самовоспламен., °С	464	426	390	235	288	
Теплота сгорн. ^{низшая} кДж/кг	19670	26780	33100	33000	41477	41900
Колич-во воздуха L ₀ , кг/кг	6,4	9,0	11,2	11,2	13,1	14,0
Теплота испарения, кДж/кг	1115	870	591	578		465
Давление насыщен. паров при 0,1 МПа и 20 °С, кПа	13,0	5,7	3,0	2,3		55 – 110
Теплоемкость при 0,1 МПа и 20 °С, кДж/кг·град	2,51	2,43	2,4	1,43		

Вторым мировым лидером по широкомасштабному использованию этанола для нужд автотранспорта являются США, где для производства 3,8 млрд. л этанола в год собирают урожай технических культур с 2 млн. га. В 1994 г. производство этанола оценивалось в 5,3 млрд. л и дополнительно строились новые предприятия для его производства в размере еще 900 млн. л в год. Этанол используется как «чистое» топливо в 21 штате, а этанол-бензиновая смесь составляет 10% топливного рынка США и используется более чем в 100 млн. двигателях. Стоимость этанола до недавнего времени была выше стоимости бензина. Однако, по некоторым оценкам, этанол становится конкурентоспособным при цене нефти в 60 долл. США за баррель. В связи с этим, а также с учетом налоговых льгот на продажу этанола для автотранспорта, действующих в ряде стран, вновь возрос интерес к использованию этанола в качестве моторного топлива.

Приведенные данные свидетельствуют о перспективности использования [спиртовых](#) топлив в двигателях с принудительным воспламенением. Следует отметить, что сжигание [спиртовых](#) топлив, причем с лучшей топливной экономичностью, возможно и в дизелях. Однако при организации процесса сгорания [спиртов](#) в цилиндрах дизеля возникает проблема их воспламенения, поскольку [спиртовые](#) топлива имеют низкие цетановые числа. Воспламенение [спиртов](#) в условиях камеры сгорания дизеля возможно с помощью дополнительно установленных свечей зажигания или при использовании катализаторов (оксидов металлов NiO, Cr₂O₃, CuO и благородных металлов), снижающих температуру воспламенения [спирта](#) и ускоряющих реакцию его горения. Эффективное воспламенение [спиртовых](#) топлив в дизелях достигается при подаче в камеру сгорания ([КС](#)) запальной дозы дизельного топлива.

Одним из наиболее перспективных [спиртовых](#) топлив для дизелей является метанол. Для производства метанола имеются обширные сырьевые ресурсы, его стоимость по сравнению с другими альтернативными топливами невысока. Кроме того, метанол как топливо для дизелей позволяет решить проблему снижения выбросов оксидов азота и особенно твердых частиц. Это объясняется тем, что при сгорании метанола не выделяются промежуточные продукты, из которых затем образуются ароматические и ацетиленовые углеводороды, которые способствуют зарождению и росту сажевых частиц. В продуктах сгорания метанола практически нет и сернистых соединений.

Основным недостатком метанола является большая теплота испарения (1115 кДж/кг против 250 кДж/кг у дизельного топлива) при низкой температуре кипения, что обуславливает чрезмерное охлаждение воздушного заряда при испарении [спирта](#) и при низких цетановых числах и высоких температурах самовоспламенения [спиртов](#) приводит к плохому воспламенению в камере сгорания дизеля.

Меньшие значения нижней теплоты сгорания по сравнению с дизельным топливом (соответственно 19670 и 42500 кДж/кг) приводят к необходимости корректирования цикловой подачи топлива для сохранения мощностных показателей дизеля. Плохие смазывающие свойства и высокая гигроскопичность оказывают отрицательное воздействие на прецизионные пары топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунок, поэтому применение [спиртов](#) в дизелях в чистом виде требует конструктивных изменений двигателя.

В частности, с целью улучшения воспламенения [спиртов](#) используют двухтопливные системы питания, которые наряду с подачей [спирта](#) обеспечивают подачу запальной дозы дизельного топлива. Подача же смесей [спирта](#) с дизельным топливом с помощью традиционной дизельной топливной аппаратуры затруднена из-за плохой смешиваемости этих двух видов топлив. Кроме того, [спирты](#) токсичны, коррозионно-активны и агрессивны по отношению к алюминиевым сплавам, резинам и другим конструкционным материалам. Однако с учетом уменьшения запасов нефти и возможности использования возобновляемых сырьевых ресурсов при производстве [спиртов](#) их следует рассматривать в качестве одного из перспективных энергоносителей.

Указанных недостатков [спиртов](#) отчасти лишены их производные (изомеры) – эфиры, получаемые при воздействии неорганических кислот на соответствующие [спирты](#). Наиболее перспективны из них [метил-трет-бутиловый эфир](#) и [диметилвый эфир](#). Первый из них используется как кислородсодержащий компонент, заменяющий в бензинах тетраэтилсвинец, повышающий их

детонационную стойкость и уменьшающий выбросы сажи и оксида углерода. Второй рассматривается как перспективное топливо для дизелей, имеющее сравнительно высокое цетановое число и практически не образующее сажи и оксида углерода при сгорании. Однако пока стоимость эфиров существенно выше, чем традиционных нефтяных топлив.

4.2. Физико-химические свойства топлив на основе растительных масел

В связи с уменьшением запасов полезных ископаемых возрастает значение возобновляемых источников энергии, в частности топлив, получаемых из растительных масел. В Европе наиболее перспективными считаются топлива, вырабатываемые из рапсового масла. США является ведущей страной, производящей соевое масло. В странах Азии (Китай, Япония, Индонезия и др.) имеются большие сырьевые ресурсы соевого и арахисового масел. Для России перспективным представляется использование топлив, получаемых при производстве подсолнечного масла.

Непосредственное использование растительных масел в дизелях затруднено из-за различий физико-химических свойств растительных жиров и нефтяных топлив. Недостатками топлив этого вида по сравнению с дизельными являются их более высокая вязкость (в 2–10 раз), плохие низкотемпературные свойства, низкое цетановое число (ЦТ), высокая температура воспламенения, повышенная коксуемость. Кроме того, из-за наличия в маслах кислородсодержащих соединений их теплотворная способность на 7–10% меньше, чем у дизельных топлив. Поэтому растительные масла обычно используют в качестве топлива только после рафинирования или в смеси с дизельным или спиртовым топливом. Однако наиболее перспективно использование в качестве топлива не самих растительных масел, а эфиров (в частности, метилового и диметилового). Эти эфиры отличаются от самих масел меньшими плотностью и вязкостью, более высоким цетановым числом, меньшей температурой воспламенения (табл. 4.2). Положительными качествами топлив из растительных масел являются их практически полная биоразлагаемость и более низкая токсичность из-за практически полного отсутствия в них серы и полициклических ароматических углеводородов.

Эфиры представляют собой органические кислородсодержащие соединения, являющиеся изомерами соответствующих спиртов и получаемые путем нагревания этих спиртов в присутствии серной кислоты (или каким-либо другим способом).

Различают простые и сложные эфиры. Простые эфиры имеют структуру R – O – R, в которой атом кислорода соединяет радикалы R (где R – одинаковые или различные радикалы типа CH₃, C₂H₅, C₆H₅ и др.). Сложные эфиры являются производными кислот (органических или неорганических) и спиртов. Они содержатся в эфирных маслах и составляют главную часть растительных и животных жиров.

Характерный представитель простых эфиров – диметилвый эфир (ДМЭ) CH₃ – O – CH₃ (или C₂H₆O), в котором два метиловых радикала CH₃ соединены атомом кислорода. Его получают из синтез-газа, являющегося продуктом переработки органической массы или природного газа. В настоящее время ДМЭ рассматривается как одно из наиболее перспективных топлив для транспортных дизелей.

Таблица 4.2

Растительные масла и топлива, вырабатываемые из растительных масел

Показатель	Топлива на основе					
	подсолнечного масла	арахисового масла	рафината рапсового масла	рафината соевого масла	метилового эфира рапсового масла	метилового эфира соевого масла

Плотность при 15 °С, кг/м ³	923,3	917,3	920	923	879	884
Вязкость кинематическая, мм ² /с при: 20 °С 40 °С 100 °С:	65,2 30,7 7,44	81,5 36,5 8,32	34,4	31,2	2,47	4,08
Цетановое число	33,4	36,6	40	27	50	46
Теплота сгоран. ^{низш.} , кДж/кг	36981	37023				
Температура застывания, °С			20	12	21	1
Температура помутнения, °С	6,7	3,3				
Температура вспышки, °С			202	220	71	141
Содержание серы, % (масс.)			0,007	0,005-0,01	0,005	0,005-0,01

Другой простой эфир – этиловый или [диэтиловый](#) (серный эфир) C₂H₅ – O – C₂H₅ (или C₄H₁₀O) – представляет собой бесцветную летучую жидкость. В молекуле этого эфира атом кислорода соединяет два этиловых радикала C₂H₅. Он вырабатывается путем воздействия серной кислоты на этиловый [спирт](#).

В двигателях внутреннего сгорания с принудительным воспламенением используется [МТБЭ](#), который является [оксигенатом](#) (кислородсодержащим компонентом), заменяющим в бензинах тетраэтилсвинец, повышающий их детонационную стойкость и уменьшающий выбросы сажи и монооксида углерода. Другой [оксигенат](#), применяемый в двигателях внутреннего сгорания, – [Изоамиловый эфир](#) C₁₀H₂₂O.

Отдельную группу нетрадиционных топлив для дизелей представляют сложные эфиры, получаемые из [растительных масел](#). Они по своим свойствам более близки к дизельным топливам, чем простые эфиры. Следует отметить, что, как и у [спиртовых](#) топлив, молекулы эфиров содержат значительное количество кислорода, но отличаются от [спиртов](#) высокими цетановыми числами и сравнительно низкими температурами самовоспламенения. Поэтому при работе дизелей на эфирах, как правило, не требуются мероприятия по принудительному воспламенению рабочей смеси, а в отработавших газах ([ОГ](#)) содержится очень небольшое количество сажи.

Источником [растительных масел](#) являются [масличные растения](#), содержащие в различных своих частях (главным образом в семенах или плодах) растительные жиры. Различают собственно [масличные растения](#) (рапс, горчица, подсолнечник, клещевина, лен-кудряш, кунжут, масличный мак, сафлор, тунговое дерево, маслина и др.) и растения, масла которых являются побочным продуктом при их промышленном использовании (хлопчатник, лен-долгунец, конопля).

Существует несколько климатических зон, в которых выращиваются [масличные растения](#), являющиеся сырьем для производства [растительных масел](#) и их эфиров. Рапс выращивается в Западной и Центральной Европе (Австрия, Германия, Польша, Франция, Чехия, Швеция, Россия), в некоторых районах Азии (в первую очередь в Китае и Индии) и в Канаде. К ведущим производителям сои относятся США, Бразилия, Аргентина и Китай. Подсолнечник культивируют в России, Испании, Австрии, США, Канаде. Россия и Украина в значительных объемах производят подсолнечное масло. В странах Азии (Китай, Япония, Индонезия и др.) имеются большие сырьевые ресурсы для производства арахисового масла. Кокосовые пальмы выращивают в странах с субтропическим и тропическим климатом (побережье Средиземного моря, Юго-Восточная Азия).

Наибольшее промышленное значение имеют следующие виды масел: бобовое (соевое), рапсовое, подсолнечное, пальмовое, кукурузное (маисовое), касторовое, конопляное, кунжутное (сезамовое), льняное, маковое, хлопковое, миндальное. Объем производства [растительных масел](#) в мире к 2000 г, достиг уровня 80 млн т/год. При этом с одного гектара посевных площадей собирают 1000–1500 кг семян рапса (из которых можно получить до 1000 кг метилового эфира). Урожай сои достигает 1600–2700 кг/га (в зависимости от региона выращивания); урожай семян подсолнечника – 2400– 3200 кг/га. Масличные культуры содержат следующее количество [растительных масел](#) (в % на абсолютно сухое вещество): подсолнечник – 29–57; соя – 15–26; лен масличный – 35– 52; горчица – 20–45; арахис – 41–57; рапс – 45–50; кунжут – 50–56.

В мировом сельском хозяйстве рапс занимает прочные позиции как одна из основных масличных культур.

В 1990-е гг. его посевы составляли 20–27 млн га или около 9–12% общей площади посевов масличных культур в мире. Площади посевов рапса уступают только таким важнейшим масличным культурам, как соя (29–33% от площади посевов масличных культур) и хлопчатник (15–19%), и превосходят посевные площади подсолнечника (9–10%). В некоторых странах Западной Европы посевные площади рапса достигают 20% площади пахотных земель. Валовой сбор семян рапса в мире в 1999–2000 годах оценивается в 40–43 млн т/г. Главные регионы мира по производству семян рапса – Азия (46,8% мирового производства), Европа (30,3%), Северная Америка (19,2%), причем, если в Азии рапс выращивается в основном для пищевого использования, то в Северной

Америке и особенно в Европе – для получения биодизельного топлива.

Получаемое при переработке [рапсовое масло](#) может быть использовано как самостоятельное топливо для дизелей, в смесях различного состава со стандартным дизельным топливом или переработано в метиловый или этиловый эфиры рапсового масла. Последние, в свою очередь, используются или как самостоятельное биотопливо, или как смесевое (в смеси с дизельным топливом).

[Метиловый эфир рапсового масла](#) получают в результате прямой этерификации жирных кислот рапсового масла с метиловым [спиртом](#) (метанолом) при температуре 80– 90 °С в присутствии катализатора – гидроксида калия (едкого калия). При этерификации из 1040 кг рапсового масла и 144 кг метанола получают 1 т метилового эфира рапсового масла и около 200 кг глицерина (табл. 4.3).

При переработке семян рапса получают рапсовый шрот (жмых), являющийся высокобелковым концентратом для кормления сельскохозяйственных животных (табл. 4.3). Он не уступает соевому и подсолнечному шротам и содержит до 40% протеина и 8–11% жира.

Таблица 4.3

Расходные материалы и продукты, получаемые при производстве 1 т биодизельного топлива (метилового эфира рапсового масла)

Расходные материалы и продукты	Расход / выход, кг
Маслосемена рапса	3050
Рапсовое масло	1040
Метанол	144
Гидроксид калия	19
Фильтрующий материал	6

Прессованный жмых	1952
Глицерин	200

Растительные масла являются жирами семян или плодов различных растений, получаемыми прессованием или извлечением с использованием растворителей. Растительные масла состоят главным образом (на 95–97%) из триацил-глицеринов – органических соединений, сложных полных эфиров глицерина, а также моно- и диацилглицеринов. Ацилглицерины, в свою очередь, содержат в своем составе молекулы различных жирных кислот, связанные с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$.

По своей химической структуре молекулы жирных кислот отличаются друг от друга только содержанием атомов углерода и уровнем насыщения жирной кислоты, поэтому свойства [растительных масел](#) определяются в основном содержанием и составом жирных кислот, образующих триацилглицерины. Обычно это насыщенные и ненасыщенные (с одной – тремя двойными связями) жирные кислоты с четным числом атомов углерода (преимущественно C_{16} и C_{18}). Кроме того, в растительных маслах в небольшом количестве присутствуют жирные кислоты с нечетным числом атомов углерода (от C_{15} до C_{23}). Растительные масла при нормальных условиях могут находиться в твердом состоянии, но чаще они представляют собой маслянистые жидкости с повышенными по сравнению с дизельным топливом плотностью (обычно $\rho = 900\text{--}1000 \text{ кг/м}^3$) и вязкостью ($\nu = 60\text{--}100 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\nu = 30\text{--}40 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ и сравнительно невысокой температурой самовоспламенения.

Жидкие растительные масла делятся на высыхающие (льняное, конопляное, тунговое), полувысыхающие (маковое, хлопковое, соевое, подсолнечное, рапсовое) и невысыхающие (касторовое).

Жирные кислоты, являющиеся основным компонентом [растительных масел](#), представляют собой высокомолекулярные кислородсодержащие соединения с углеводородным основанием. Поэтому все растительные масла являются горючими и могут применяться в качестве моторных топлив.

Низкая испаряемость и высокая вязкость [растительных масел](#) исключают их использование в бензиновых двигателях. Однако они могут успешно применяться в качестве топлива для дизельных двигателей. Этому способствуют сравнительно невысокая термическая стабильность [растительных масел](#) и приемлемая температура их самовоспламенения, равная $t_{\text{св}} = 280\text{--}320 \text{ }^\circ\text{C}$ и лишь немного превышающая температуру самовоспламенения дизельных топлив $t_{\text{св}} = 230\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом цетановое число различных [растительных масел](#) изменяется в пределах от 33 до 50 (табл. 4.4), что сопоставимо с цетановым числом дизельных топлив ($\text{ЦЧ} = 40\text{--}55$).

Особенностью [растительных масел](#) является наличие в их составе достаточно большого количества кислорода (8–12%). Это приводит к некоторому снижению их теплоты сгорания. Так, низшая теплота сгорания [растительных масел](#) составляет 36–39 МДж/кг против 42–43 МДж/кг у дизельных топлив, практически не содержащих кислорода. Присутствие в растительных маслах кислорода снижает температуру их сгорания в дизельных двигателях и значительно улучшает экологические свойства этих топлив. В многочисленных исследованиях дизелей, работающих на растительных маслах, отмечается снижение дымности [ОГ](#) и содержания в них продуктов неполного сгорания топлива.

Использование [растительных масел](#) в чистом виде в качестве топлива для дизелей сдерживается повышенным нагарообразованием – отложением кокса на распылителях форсунок и других деталях, образующих камеру сгорания. Увеличению нагарообразования способствует наличие в растительных маслах смолистых веществ, т.е. их повышенной коксуемостью. Если дизельные топлива по ГОСТ 305-82 имеют коксуемость 10-процентного остатка, не превышающую 0,3%, то коксуемость большинства [растительных масел](#) обычно составляет 0,4–0,5% (табл. 4.4). Для снижения коксуемости [растительных масел](#) необходима их очистка от смолистых веществ, а также применение мероприятий, снижающих коксообразование в условиях камеры сгорания дизеля (периодическая работа на

высокофорсированных режимах, периодическая подача водотопливных эмульсий через распыливающие отверстия и др.).

Таблица 4.4

Физико-химические свойства [растительных масел](#)

Физико-химические свойства	Масла							
	рапсовое	арахисовое	подсолнечное	соевое	пальмовое	оливковое	хлопковое	касторовое
Плотность при 20 °С, кг/м ³	916	917	923	924	918	914	919	1069
Вязкость кинематическая, мм ² /с при: 20 °С; 40 °С; 100 °С	75,0 36,0 8,1	81,5 36,5 8,3	65,2 30,7 7,4	32,0 7,7	8,6	8.4	7,7	19,9
Цетановое число	36	37	33	50	49	–	"	–
Количество воздуха L ₀	12,6	11,2	11.1	–	–	–	–	–
Тепл. сгор. ^{низшая} , H _i , МДж/кг	37,3	37,0	37,0	37,5	37,1	–	–	–
Температура самовоспламенен., °С	318	–	320	318	315	285	316	296
Температура застывания, °С	-20	–	-16	-12	+30	-12	-18	-27
Содержание серы, масс. %	,002	–	–	–	–	–	–	–
Содержание, масс. % С Н О	78,0 10,0 12,0	78,0 12,3 9,4	–	–	–	–	–	–
Кислотность, мг КОН/100мл	4,66	–	2,14	0,03	0,17	5,90	4,25	1,18
Коксуемость, %, не более	0,40	–	0,51	0,44	0,12	0,20	0,23	0,19

Смолообразование зависит прежде всего от наличия в составе [растительных масел](#) нестойких непредельных углеводов или органических кислот, которые при контактировании с кислородом воздуха образуют высокомолекулярные продукты окисления – смолы. С увеличением содержания смол в растительных маслах, как правило, увеличивается и их кислотность. Повышенная кислотность топлив вызывает коррозию деталей системы топливоподачи и двигателя в целом. Кислотность большинства [растительных масел](#) не превышает кислотности дизельных топлив по ГОСТ 305-82, равной 5 единицам.

Поэтому коррозионная агрессивность [растительных масел](#) сравнительно невысока и находится на уровне, соответствующем стандартным дизельным топливам.

Недостатком [растительных масел](#), используемых в качестве топлив для дизельных двигателей, является высокая температура их застывания, обусловленная главным образом наличием в их составе ненасыщенных жирных кислот. Наилучшие низкотемпературные свойства имеют рапсовое и льняное масла (температура застывания $t_s = 20$ °С), хлопковое ($t_s = 18$ °С) и подсолнечное ($t_s = 16$ °С) масла.

Важным свойством [растительных масел](#) является способность смешиваться в любых пропорциях с большинством органических растворителей (в том числе и с нефтепродуктами – бензином и дизельным топливом), что связано с небольшой полярностью масел: их диэлектрическая проницаемость при 20 °С равна 3,0–3,2. Следует отметить и хорошую совместимость различных [растительных масел](#) между собой. Этанол и метанол растворяют масла ограниченно, и лишь при нагреве растворимость рапсового масла в этих продуктах возрастает. Это свойство [растительных масел](#) позволяет получать моторные топлива с заданными физико-химическими свойствами путем смешивания различных компонентов в требуемых пропорциях.

Топлива из [растительных масел](#) отличаются высокой [биоразлагаемостью](#). Попадая в почву и природные водные бассейны, они практически полностью разлагаются в течение нескольких недель. Растительные масла отличаются хорошими экологическими качествами из-за малого содержания в них серы и полициклических ароматических углеводородов.

Типичным представителем класса [растительных масел](#) является рапсовое – маслянистая жидкость бурого цвета, приобретающая после рафинирования светло-желтый цвет. [Рапсовое масло](#) (и близкое к нему по составу сурепное масло) представляет собой смесь моно-, ди- и триацилглицеринов. [Рапсовое масло](#) среднего состава содержит как насыщенные жирные кислоты – пальмитиновую и стеариновую, так и ненасыщенные – олеиновую, линолевую, линоленовую, эйкозеновую, эруковую кислоты.

Большое разнообразие в строении молекул ацилглицеринов существенно влияет на физико-химические свойства рапсового масла. В табл. 4.5 приведены физико-химические свойства рапсового масла среднего состава. Плотность рапсового масла составляет $\rho_t = 900\text{--}950$ кг/м³, кинематическая вязкость при 20°С – $\nu_t = 70\text{--}80$ мм²/с. Это масло отличается высоким содержанием эруковой кислоты. Его йодное число, характеризующее содержание смол в масле, равно 95–106 (количество йода, присоединяющегося к 100 мл топлива). Температура застывания – от 10 – 20°С.

Таблица 4.5

Содержание жирных кислот в среднем по составу рапсовом масле

кислоты	Наименование	Формула	Содержание, масс. %
	Пальмитиновая	$C_{16}H_{32}O_2$	4,8
	Стеариновая	$C_{18}H_{36}O_2$	1,7
	Олеиновая	$C_{18}H_{34}O_2$	43,7
	Линолевая	$C_{18}H_{32}O_2$	20,9
	Линоленовая	$C_{18}H_{30}O_2$	8,5
	Эйкозеновая	$C_{20}H_{38}O_2$	4,8
	Эруковая	$C_{22}H_{42}O_2$	15,6

Отличия физических свойств рапсового масла от свойств стандартных дизельных топлив оказывает влияние на протекание рабочих процессов дизельных двигателей.

В первую очередь это относится к процессам топливоподачи и смесеобразования. Так, высокие плотность и вязкость рапсового масла, подаваемого в камеру сгорания штатной системой топливоподачи дизельного двигателя, являются причиной увеличения цикловой подачи рапсового масла и его часового расхода по сравнению с дизельными топливами по ГОСТ 305-82. Повышенная вязкость рапсового масла приводит к увеличению дальности топливной струи, попаданию части топлива на стенки камеры сгорания и уменьшению доли объемного смесеобразования. При этом уменьшается угол раскрытия топливного факела и ухудшается мелкость распыливания – увеличивается средний диаметр капель. Повышенное поверхностное натяжение рапсового масла повышает неоднородность его распыливания. Из-за повышенных плотности и вязкости этого масла увеличивается максимальное давление впрыскивания. Действительный момент начала впрыскивания топлива смещается при этом в сторону увеличения угла опережения впрыскивания топлива. Эти факторы свидетельствуют о целесообразности корректирования процесса топливоподачи при работе дизельного двигателя на рапсовом масле.

Рапсовое масло является высокоэкологичным сырьем для производства биотоплив. Содержание в рапсовом масле 10–12 масс. % кислорода позволяет заметно уменьшить выбросы в атмосферу вредных веществ – углеводородов СН и сажи С. Снижение температур сгорания при работе дизеля на этом биотопливе сопровождается также уменьшением эмиссии оксидов азота NO_x. Рапсовое масло практически не содержит соединений серы, что приводит к отсутствию в ОГ ее оксидов SO_x – сернистых газов и образующихся из них кис-лот. В рапсовом масле отсутствуют и полициклические ароматические углеводороды, обычно содержащиеся в ОГ дизелей и являющиеся канцерогенами, вызывающими онкологические заболевания. Все вышеизложенное позволяет существенно улучшить экологические показатели транспортных дизелей при работе на рапсовом масле.

Таблица 4.6

Физико-химические свойства топлив, вырабатываемых из растительных масел

Физико-химические свойства	Топлива на основе масла					
	рафинада подсолнечного	рафинада соевого	метилового эфира рапсового	этилового эфира рапсового	метилового эфира соевого	метилового эфира пальмового
Плотность при 20 °С, кг/м ³	920	923	877	895	884	870
Вязкость кинематическая, мм ² /с при: 20 °С; 40 °С	34,4	31,2	8,0 2,5	32,0	4,1	4,5
Цетановое число	40	27	48	-	46	62
Количество воздуха L _o	-	-	12,6	12,6	-	-
Тепл. сгор. ^{низшая} , H _u , МДж/кг	-	-	37800	36800	-	40100
Температура самовоспламенен., °С	202	220	230	-	141	174
Температура застывания, °С	20	-12	-21	-	1	-
Содержание серы,	0,007	0,005-0,01	0,002	-	0,005-0,01	-

масс. %						
Содержание, масс. %	-	-	77,5 12,0 10,5	77,6 12,0 10,4	-	-
С Н О						
Коксуемость, %, не более	-	-	0,3	0,3	-	-

Приведенные данные (табл. 4.4) свидетельствуют об отличиях физико-химических свойств [растительных масел](#) от свойств дизельных топлив по ГОСТ 305-82. Поэтому в дизелях чаще используют продукты переработки [растительных масел](#): рафинады, этиловые и метиловые эфиры, физико-химические свойства некоторых альтернативных топлив для дизелей приведены в табл. 4.6.

Высокие экологические свойства топлив из [растительных масел](#) и возобновляемость сырьевых ресурсов для производства этих топлив делают их одними из наиболее перспективных альтернативных топлив.

Особые аппараты, называемых газогенераторами служат для превращения твердого топлива в газ, сгорающий в смеси с воздухом в двигателе внутреннего сгорания. Превращение твердого топлива в генераторный газ совершается при высокой температуре; при этом углерод топлива взаимодействует с кислородом воздуха и водяным паром

5. ПРОИЗВОДСТВО моторных топлив ПУТЕМ ГАЗИФИКАЦИИ

5.1. Основные понятия о процессе газификации

В нашей стране развитие теории процессов газификации твердого топлива, очистки и сгорания получаемого газа, а также большой опыт, накопленный в практике конструирования, производства и эксплуатации транспортных [газогенераторных](#) установок, привели в 50-е гг. прошлого века к созданию образцов [газогенераторных](#) автомобилей и тракторов, по производительности и сроку службы приближающихся к транспортным средствам работающим на традиционном жидком топливе.

Сегодня этот опыт востребован, так как во всем мире идет поиск путей сокращения потребления моторных топлив нефтяного происхождения.

Превращение твердого топлива в газ, сгорающий в смеси с воздухом в двигателе внутреннего сгорания и выделяющий при этом тепловую энергию, трансформируемую в механическую, можно осуществлять в особых аппаратах, называемых [газогенераторами](#). В [газогенераторах](#) может быть использовано твердое топливо различных видов, в том числе и получаемое из возобновляемых источников. В сельском хозяйстве большое значение имеет использование в [газогенераторных](#) тракторах разнообразных местных топлив: древесины, [торфобрикетов](#), соломы и т.п., в лесной промышленности получили распространение [газогенераторные](#) автомобили и тракторы, работающие на газе из древесины (отходов).

В Советском Союзе первые опытные конструкции [газогенераторных](#) автомобилей появились в 1923–1928 гг. В последующие годы производство [газогенераторных](#) автомобилей и тракторов было возложено на автотракторную промышленность. Был создан ряд конструкций [газогенераторов](#) для тракторов и автомобилей. Организация пробегов [газогенераторных](#) автомобилей ГАЗ-42 и ЗИС-21 в 1934–1938 годах, а также сравнительные испытания ряда конструкций [газогенераторных](#) установок на тракторах в лесной промышленности в 1935–1939 годах и в сельском хозяйстве в 1936–1938 годах способствовали

совершенствованию конструкции [газогенераторных](#) тракторов и автомобилей и популяризации идеи использования твердого топлива для работы автотракторного парка.

В послевоенные годы на Ленинградском Кировском заводе было организовано производство [газогенераторных](#) трелевочных тракторов КТ-12. [газогенераторная](#) установка этого трактора имеет общую схему и ряд однотипных узлов с [газогенераторной](#) установкой трактора ХТЗ-Т2Г. В дальнейшем производство тракторов КТ-12 было перенесено на Минский тракторный завод.

В 1952 г. было организовано производство нового [газогенераторного](#) трактора ГБ-58 на базе дизельного трактора ДТ-54. В этом тракторе была повышена мощность двигателя, облегчен пуск двигателя на газе, для разжигания топлива в [газогенераторе](#) применен вентилятор, детали, работающие при высокой температуре, сделаны сменными, кроме того, улучшена очистка газа. В те годы были решена одна из важнейших задач газификации влажных топлив путем удаления избыточной влаги из бункера [газогенератора](#). В системе очистки газа, помимо значительного улучшения конструкции центробежных очистителей, нашли применение фильтры новых типов с большей поверхностью межфазового контакта; появились газопромыватели с механическим приводом.

Превращение твердого топлива в [генераторный газ](#) совершается при высокой температуре; при этом углерод топлива взаимодействует с кислородом воздуха и водяным паром. Данный процесс называется газификацией. Аппараты, служащие для получения [генераторного газа](#), называются [газогенераторами](#). В зависимости от свойств топлива и назначения газа газификация производится в различных по схеме и устройству [газогенераторах](#). Топливо в процессе газификации подвергается различным физико-химическим изменениям при нагреве и взаимодействии с окислительной и восстановительной средой.

При получении газа из твердого топлива различают четыре стадии изменения топлива:

- испарение гигроскопической влаги при сушке;
- сухая перегонка вследствие термического распада органической массы топлива при нагреве;
- горение углерода коксового остатка;
- газификация коксового остатка.

Каждая из этих стадий имеет большое значение в процессе газификации. При газификации древесины и [торфа](#), содержащих большое количество гигроскопической влаги, топливо подвергается сушке при температуре 105–150 °С. Выделение летучих из топлива происходит при нагреве от 150 до 600 °С.

Термический распад органической массы топлива при сухой перегонке сопровождается выделением смол, [спиртов](#), кислот и других продуктов. Точка росы смол равна 20–30 °С, поэтому возможна их конденсация в газопроводах до двигателя или после смещения газа с воздухом в смесителе и впускном трубопроводе вследствие понижения температуры газо-воздушной смеси. При выпадении сконденсировавшихся углеводородов на них осаждаются пыль, вследствие чего сужаются проходные сечения газопроводов и нарушается работа органов газораспределения двигателя. Слабые растворы кислот (уксусной, муравьиной и др.), выделяющихся при сухой перегонке топлива, вызывают коррозию стальных деталей.

В [силовом газе](#) для двигателей внутреннего сгорания не допускается содержание смолистых веществ более 0,5 г/м³.

Для того чтобы обеспечить нормальную работу [газогенераторной](#) установки и двигателя, необходимо разложить в [газогенераторе](#) продукты сухой перегонки на элементарные неконденсирующиеся при атмосферных условиях газы: СО, СО₂, Н₂ и др. Этого достигают пропуская продукты возгонки летучих через раскаленный до 800–1000 °С коксовый остаток из данного топлива.

Таблица 5.1

Характеристика газов, воздуха, водяного пара и углерода

Наименование вещества	Символ или формула	Молекулярная масса	Плотность при 0 °С и 760 мм рт.ст., кг/м ³	
Углерод	C	12,011	0,5360	
Кислород	O ₂	32,000	1,4290	
Углекислый газ	CO ₂	44,011	1,9770	
Моноксид	CO	28,011	1,2500	
углерода	CH ₄	16,043	0,7170	
	Метан	C ₂ H ₆	30,070	1,3560
	Этан	H ₂	2,016	0,0899
Водород	H ₂ O	18,016	0,8040	
Водяной пар	N ₂	28,016	1,2500	
Азот	-	28,853	1,2930	
Воздух	H ₂ S	34,082	1,5390	
Сероводород	SO ₂	64,066	2,9270	
Сернистый ангидрид				

Горение углерода коксового остатка происходит при взаимодействии с кислородом воздуха, поступающего в [газогенератор](#). При окислении углерода температура повышается до 1300–1500 °С, поэтому для снижения ее при газификации тощих топлив вместе с воздухом в [газогенератор](#) вводят водяной пар.

Физическое тепло продуктов реакции горения углерода – CO₂, CO и перегретого в окислительной зоне водяного пара – передается углю в восстановительной зоне, в которой протекают реакции восстановления CO₂ в CO и разложения водяного пара. Скорости реакций восстановления CO₂ и разложения H₂O зависят от целого ряда физико-химических факторов.

Характеристики газов, входящих в состав [генераторного газа](#), а также воздуха, водяного пара и углерода, дана в табл. 5.1.

Как указывалось выше, большое количество летучих имеют битуминозные топлива. Топлива, имеющие малое содержание летучих, относятся к тощим. В зависимости от указанных выше свойств топлив для получения силового [генераторного газа](#), используемого для питания двигателей внутреннего сгорания, применяют два основных процесса газификации: прямой или противоточный процесс для тощих топлив и обратный или прямоточный процесс для битуминозных топлив.

Особые аппараты, называемых газогенераторами служат для превращения твердого топлива в газ, сгорающий в смеси с воздухом в двигателе внутреннего сгорания. Превращение твердого топлива в генераторный газ совершается при высокой температуре; при этом углерод топлива взаимодействует с кислородом воздуха и водяным паром

5.2. Установки для газификации твердого топлива

При прямом процессе газификации топливо и воздух в смеси с водяным паром движутся навстречу один другому. Схема этого процесса газификации изображена на рис. 5.1, а.

В этом случае топливо, заполняющее [газогенератор](#), опускается вниз по мере выгорания коксового остатка на колосниковой решетке, а через колосниковую решетку снизу подводится паро-воздушная смесь. Газы, образовавшиеся в окислительной зоне, поднимаются вверх, нагревают лежащие выше слои топлива, реагируют с углеродом топлива в восстановительной зоне и выходят из [газогенератора](#) после прохождения всего слоя топлива или части его. Отбор газа из середины слоя применяют для топлив, содержащих небольшое количество летучих компонентов, чтобы разложить их в слое кокса, нагретом до температуры 800–900 °С, через который летучие проходят перед выходом из [газогенератора](#).

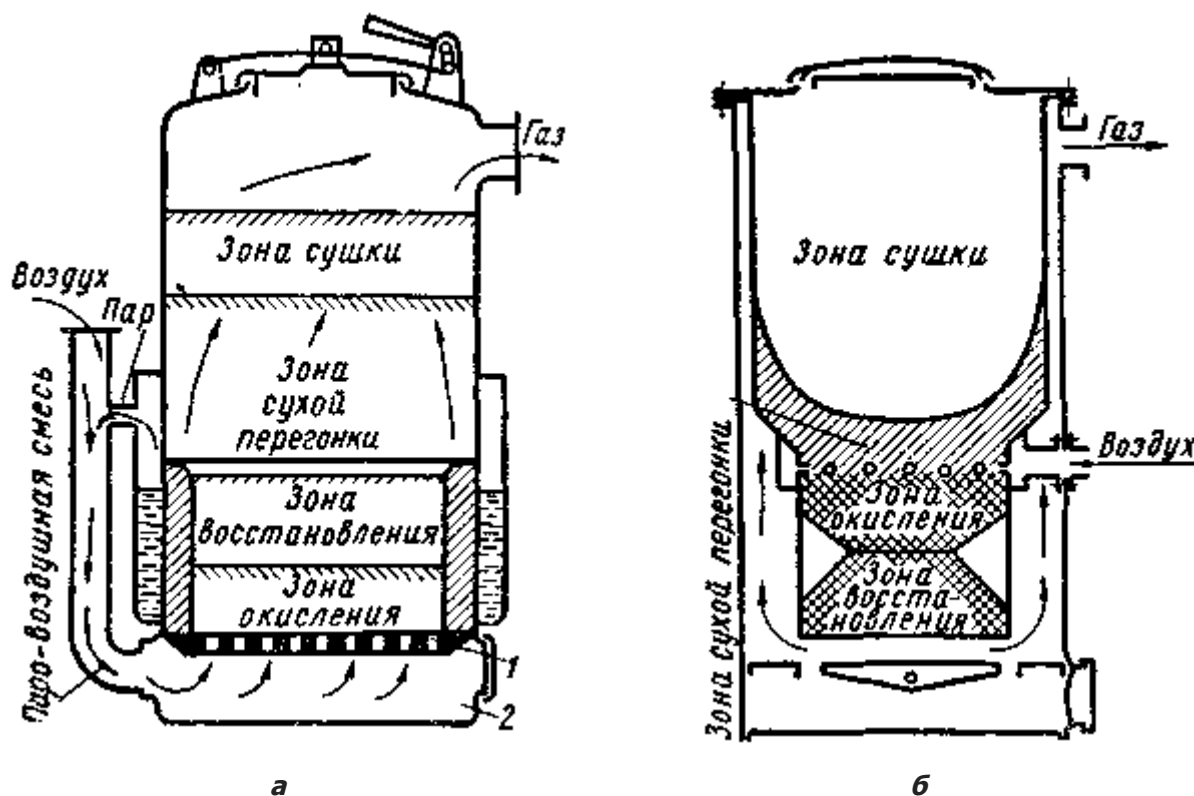


Рис. 5.1. Схема прямого процесса газификации (а) и обратного процесса газификации (б):

1 – колосниковая решетка; 2 – зольник

[газогенераторы](#) с прямым процессом газификации и отбором газа в середине слоя называются [газогенераторами](#) с разложением смол. Количество тепла, выделяющееся в нижнем слое топлива в зоне горения, обычно всегда больше, чем необходимо для подсушки и нагрева топлива до температуры воспламенения, поэтому прямой процесс называется также процессом газификации с неограниченным воспламенением. Этот процесс применяют для использования в одном [газогенераторе](#) двух-трех видов тощих топлив с содержанием летучих компонентов от 2 до 12%.

Схема обратного, или прямоточного, процесса газификации показана на рис. 5.1, б. Этот процесс получил широкое распространение в транспортных [газогенераторных](#) установках. В данном случае воздух поступает в середину слоя топлива, а образовавшиеся газы опускаются вниз и проходят через слой

раскаленного угля. При этом происходит разложение смолистых веществ, кислот, [спиртов](#) и других продуктов сухой перегонки топлива, выделяющихся из топлива в слое, расположенном над окислительной зоной.

В транспортных [газогенераторных](#) установках получил также некоторое распространение так называемый горизонтальный (поперечный) процесс газификации. Он отличается от описанных выше процессов тем, что поток продуктов газификации проходит поперек опускающегося вниз топлива. Продукты сухой перегонки частично примешиваются при этом к генераторному газу в конце зоны газификации перед выходом из [газогенератора](#).

5.3. Основы теории газификации

В транспортных [газогенераторных](#) установках вырабатывается воздушный и паро-воздушный (смешанный) [генераторный газ](#).

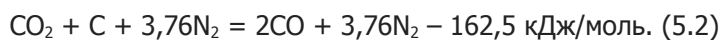
5.3.1. Получение [воздушного газа](#)

При теоретическом рассмотрении процесса газификации для получения [воздушного газа](#) принимают, что реакция протекает между чистым углеродом и кислородом воздуха. В окислительной зоне протекает реакция получения углекислого газа:

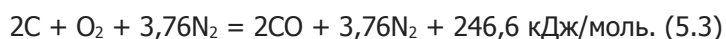


В этом случае количество тепла, выделяющегося при реакции, отнесено к 1 молю углерода. Коэффициент 3,76 означает количество моль азота в воздухе на 1 моль кислорода.

Вследствие выделения большого количества теплоты продукты горения нагревают следующие по ходу газа слои топлива, где происходит реакция восстановления CO_2 с поглощением тепла по уравнению



Суммарный результат реакции получения [воздушного газа](#) может быть выражен следующим уравнением:



В идеальном случае образовавшийся газ будет состоять из 34,7% CO и 65,3% N_2 . Теплотворность идеального [воздушного газа](#) составляет 4441 кДж/м³.

При получении [воздушного газа](#) значительное количество теплоты остается неиспользованным в эндотермических химических реакциях, вследствие чего газ нагревается до высокой температуры. По теоретическому тепловому расчету (без учета внешних потерь [газогенератора](#) и при пользовании спектроскопическими данными по теплоемкости CO и N_2 при постоянном давлении) температура газа, выходящего из [газогенератора](#), получается равной приблизительно 1330 °C.

5.3.2. Коэффициент полезного действия [газогенератора](#)

Условным КПД [газогенератора](#) η_r называется отношение количества теплоты, заключенной в газе, к количеству теплоты в топливе, израсходованном на получение данного количества газа, т. е.

$$\eta_r = \frac{v_r Q_H^r}{Q_H^T}, \quad (5.4)$$

где v_r – выход газа на 1 кг топлива, м³; Q_H^r – низшая теплота сгорания газа, кДж/м³; Q_H^T – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Для рассмотренного идеального случая газификации без потерь топлива выход газа можно определить по следующему уравнению:

$$v_{\Gamma} = \frac{22,4 \cdot 100}{12 \cdot x} = \frac{186,7}{x}, \quad (5.5)$$

где 22,4 – объем 1 кмольа газа, м³; 12 – молекулярная масса углерода, кг/кмоль; x – содержание CO в газе, %.

Как уже указывалось выше, для идеального [воздушного газа](#) x = 34,7%, следовательно

$$v_{\Gamma} = \frac{186,7}{34,7} = 5,38 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Если принять, что теплота сгорания чистого углерода $Q_{\text{н}} = 34094$ кДж/кг, то по уравнению (5.4) условный КПД равен

$$\eta_{\Gamma} = \frac{5,38 \cdot 4441}{34094} = 0,70$$

Таким образом, в данном процессе не используется 30% теплоты топлива; газ выходит из [газогенератора](#) с высокой температурой и имеет небольшую теплоту сгорания.

В приведенных расчетах не учитывались тепловые потери, так как процесс рассматривался как идеальный. В действительных условиях восстановление CO₂ в CO происходит не полностью вследствие понижения температуры в восстановительной зоне и уменьшения концентрации углерода из-за наличия в рабочем топливе влаги и золы. Температура в зоне горения снижается в результате значительных потерь тепла на излучение и перегрев водяного пара. В действительных условиях показатели, характеризующие процесс, имеют следующие значения: $Q_{\text{н}} = 4190$ кДж/м³; $v_{\Gamma} = 4,8 - 5,0$ м³/кг, $\eta_{\Gamma} = 0,60$. Температура выходящего газа равна 900– 1000 °С. Равновесный состав [воздушного газа](#) приведен в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Равновесный состав [воздушного газа](#) (в % по объему)

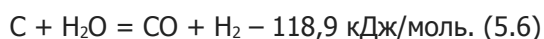
Температур а, °С	CO	CO	N ₂	$\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot 100$
650	10, 8	16, 9	72, 3	61,0
800	1,6 9	31. 5	66, 5	95,2
900	0,4 1	34, 5	65, 5	98,8
1000	0,2 4	34, 4	65, 4	99,4

Все это показывает, что экономичность процесса получения [воздушного газа](#) сравнительно невелика и значительная часть тепла остается неиспользованной. Избыточное тепло может быть использовано для получения горючих газов при разложении водяного пара.

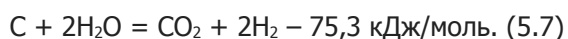
Для получения водяного газа подачу воздуха и водяного пара в газогенератор производят поочередно. Образующийся при этом воздушный газ отводится отдельно и не смешивается с водяным газом. Таким способом достигается получение высококалорийного водяного газа, который в идеальном случае состоит из 50% CO и 50% H₂

5.3.3. Получение водяного газа

Между углеродом и водяным паром может протекать следующая эндотермическая реакция:



При увеличении концентрации водяного пара возможно протекание и другой реакции его с углеродом:

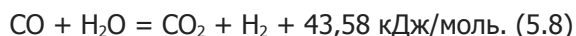


Для получения [водяного газа](#) подачу воздуха и водяного пара в [газогенератор](#) производят поочередно. Образующийся при этом воздушный газ отводится отдельно и не смешивается с водяным газом. Таким способом достигается получение высококалорийного [водяного газа](#), который в идеальном случае состоит из 50% CO и 50% H₂.

Теплота сгорания [водяного газа](#) составляет 11774 кДж/м³, КПД [газогенератора водяного газа](#) 60–65%. Этот способ широко применяют в стационарных [газогенераторах](#); для транспортных [газогенераторов](#) его не применяют вследствие большой сложности конструкции таких [газогенераторов](#) и необходимости выбрасывания в окружающую среду значительного количества [воздушного газа](#).

5.3.4. Получение [смешанного газа](#)

В транспортных [газогенераторах](#) получают смешанный газ при подаче в [газогенератор](#) паро-воздушной смеси. При этом избыток тепла используется для разложения пара по уравнениям (5.6) и (5.7). Ряд исследователей указывает, что реакции (5.2), (5.6) и (5.7) протекают в восстановительной зоне одновременно. Конечный состав газа определяется равновесным состоянием реакции



Эта реакция обратима, т.е. при одних условиях она может протекать слева направо, а при других справа налево. Условия течения и равновесия реакций будут приведены ниже.

В идеальном случае, когда все свободное тепло после восстановления CO₂ будет использовано для разложения водяного пара, при ведении смешанного процесса газификации на паро-воздушном дутье достигается повышение теплотворности газа. Количество разложенного водяного пара может быть определено из отношения располагаемого количества тепла и необходимого для образования CO и H₂

$$246,6 / 118,9 = 2,07 \text{ моль.}$$

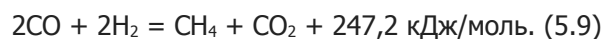
Состав полученного газа (называемого иногда полуводяным) в идеальном случае будет следующий (в моль).



Теплота сгорания такого газа равна 7513 кДж/м³. Количество разложенного пара составляет 0,76 кг на 1 кг угле-рода.

В действительных условиях нельзя разложить такое количество пара и, следовательно, достичь такой теплоты сгорания газа, так как реакция между углеродом и паром не может протекать при температуре ниже определенной. Как указывалось выше, восстановление CO_2 также происходит не полностью из-за потери тепла в окружающую среду. Все эти причины приводят к тому, что количество разлагаемого пара уменьшается до 0,4–0,6 кг на 1 кг углерода, теплота сгорания газа понижается до 5000–6000 кДж/м³, а температура выходящего газа повышается до 300–400 °С.

Необходимо отметить, что в процессе газификации возможно образование метана по уравнению



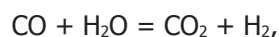
Эта реакция протекает при температуре 700–800 °С.

Для понимания факторов, влияющих на ход реакций, необходимо ознакомиться с основными понятиями и законами кинетики химических реакций, а также с применением первого и второго законов термодинамики, на основе которых определяются тепловые эффекты реакции. Развитие теории активации, учения о теплообмене и диффузии позволило уточнить на основе кинетической теории газов влияние основных факторов, определяющих скорости реакций.

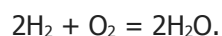
5.3.5. Основы химической кинетики при газификации

Различают два вида реакций. Реакции, происходящие между веществами, находящимися в одинаковом агрегатном состоянии в газовой фазе, называются гомогенными. Реакции между веществами, различными по своим агрегатным состояниям, из которых одно является газом, а другое твердым телом, называются гетерогенными.

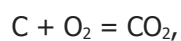
К гомогенным реакциям относится происходящая в газовой фазе реакция между окисью углерода и водяным паром



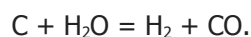
а также реакции сгорания окиси углерода и водорода



К [гетерогенным реакциям](#) относится реакция между углеродом и кислородом



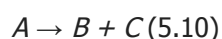
а также реакция между углеродом и водяным паром



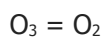
[Порядок реакции](#) определяется в зависимости от количества веществ, участвующих в реакции. Если в реакции

изменяется только один вид молекул, то такая реакция называется мономолекулярной, или реакцией первого порядка. Стехиометрический коэффициент реакции первого порядка равен единице (стехиометрический коэффициент реакции характеризует количество молекул, принимающих участие в реакции).

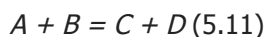
В общем виде реакция первого порядка может быть схематически записана следующим уравнением



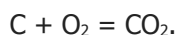
К реакциям первого порядка относятся такие, при которых происходит распад вещества на более простые молекулы, например реакция распада озона



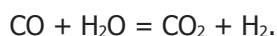
К реакциям бимолекулярным, или реакциям второго порядка, относятся те, в которых участвуют два различных вида молекул или две молекулы одного вида. Схематически реакции второго порядка могут быть выражены уравнением



При этом продуктами реакции будут вещества, образованные в результате соединения реагирующих молекул или обмена атомами. Первые реакции называются реакциями соединения, а вторые – реакциями обмена. К реакциям соединения относится, например, реакция образования CO_2



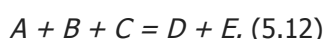
К реакциям обмена относится, например, следующая реакция:



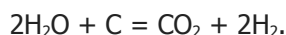
Стехиометрический коэффициент реакции второго порядка равен 2. Реакции второго порядка являются наиболее распространенными и представляют значительный интерес для изучения. По кинетической теории столкновение двух молекул, участвующих в химической реакции, является наиболее вероятным и происходит очень часто.

К тримолекулярным реакциям, или реакциям третьего порядка, относятся такие, в которых принимают участие три молекулы одного вида или разных видов. Стехиометрический коэффициент такой реакции соответственно равен 3.

Реакция третьего порядка протекает по схеме



К реакциям третьего порядка может быть отнесена реакция между углеродом и водяным паром при избытке последнего



Из кинетической теории следует, что реакции третьего порядка протекают весьма редко, так как для их осуществления необходимо столкновение 3 молекул; при этом удар двух молекул недостаточен для завершения реакции. Реакции третьего порядка чаще протекают через несколько промежуточных стадий с образованием веществ на каждой стадии по реакции второго порядка.

Химические реакции протекают с различными скоростями. В некоторых условиях они протекают медленно, в других чрезвычайно быстро, со скоростями, приближающимися к взрыву. Скорость реакции принято определять как количество вещества, прореагировавшего в единицу времени. В ходе реакции количество реагирующего вещества уменьшается, и поэтому скорость реакции не остается постоянной, так как при этом уменьшается также и концентрация вещества в составе образовавшейся смеси исходных веществ и продуктов реакции.

По закону действия масс скорость химической реакции пропорциональна активным массам реагирующих веществ. Под активной массой в физической химии принято считать молекулярную концентрацию реагирующих веществ, присутствующих в единице объема. Концентрация вещества измеряется количеством молей в единице объема.

Скорость реакции в дифференциальной форме будет выражаться первой производной от концентрации по времени dc/dt и будет представлять собой скорость изменения концентрации dc реагирующего вещества за время dt .

5.3.6. Константа скорости реакций газификации

Для определения скорости реакции необязательно следить за исчезновением всех реагирующих и образующихся вновь веществ, достаточно определить изменение одного вещества, так как реакции совершаются в строго определенных стехиометрических соотношениях.

Рассмотрим, как определяются скорости реакций в зависимости от их порядка. Начнем с реакций первого порядка и обозначим концентрацию реагирующего вещества в данном объеме через c , а время протекания реакций через τ . Скорость реакции в дифференциальной форме будет выражаться первой производной от концентрации по времени $dc/d\tau$ и будет представлять собой скорость изменения концентрации dc реагирующего вещества за время $d\tau$. Учитывая коэффициентом k влияние всех факторов, кроме концентрации, действующих на течение реакции, например, температуры, давления, можно на основании закона действия масс выразить скорость реакции следующим дифференциальным уравнением:

$$-\frac{dc}{d\tau} = k \cdot c$$

Знак «минус» обозначает уменьшение концентрации реагирующего вещества за время $d\tau$.

Разделив переменные и проинтегрировав это уравнение, получим

$$-\ln c = k\tau + D. (5.14)$$

Постоянную D в этом уравнении определим из начальных условий. В начале реакции при $\tau = 0$, $c = c_0$ (c_0 – начальная концентрация вещества), и поэтому

$$D = \ln c_0.$$

Подставив найденное значение D в уравнение (5.14), получим

$$-\ln c = k\tau - \ln c_0 \text{ или}$$

$$k\tau = \ln (c_0/c). (5.15)$$

Это уравнение может быть представлено в следующем виде

$$c = c_0 e^{-k\tau}. (5.16)$$

Постоянная k в уравнении (5.16) называется константой скорости реакции, или удельной скоростью реакции. Размерность константы k в реакциях первого порядка – сек^{-1} .

Из уравнения (5.15) следует, что при графическом изображении реакции первого порядка в полулогарифмических координатах с осью абсцисс, представляющей время, и осью ординат, представляющей логарифмы концентраций, на графике получается прямая линия. При этом константа k скорости реакции представляет собой тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс (рис. 5.2).

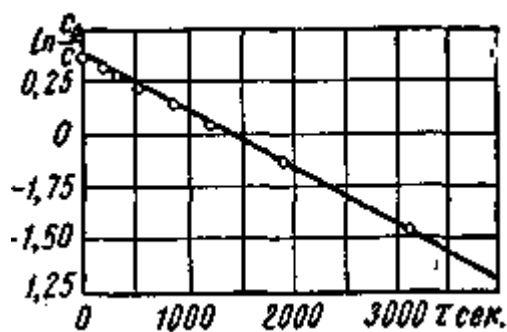


Рис. 5.2. Зависимость логарифма концентрации от времени в реакциях первого порядка

Константу скорости реакции можно выразить не только через концентрацию, но и через количество молей вещества, реагирующего за определенный отрезок времени τ . Обозначив объем смеси реагирующего вещества и продуктов реакции через V и предположив, что в начале реакции при $\tau = 0$ было a молей, а за время τ прореагировало x молей вещества, можем получить, что через промежуток времени τ концентрация будет равна

$$c = (a - x) / V. (5.17)$$

Дифференцируя это уравнение по времени, найдем скорость реакции

$$\frac{dc}{d\tau} = -\frac{1}{V} \frac{dx}{d\tau}. (5.18)$$

Подставив выражения (5.17) и (5.18) в уравнение (5.13), получим

$$\frac{dx}{d\tau} = k(a - x)$$

$$\frac{dx}{a - x} = kd\tau$$

Разделив переменные $a - x$ и проинтегрировав

$$-\ln(a - x) = k\tau + D,$$

определим постоянную D из начальных условий при $\tau = 0$ и $x = 0$

$$D = -\ln a.$$

Подставив значение постоянной D , получим

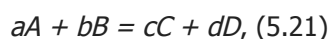
$$-\ln(a - x) = k\tau - \ln a$$

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{a}{a - x} (5.19)$$

Скорость реакций второго порядка определяется изменением концентрации молекул двух веществ, участвующих в реакции. Обозначив концентрацию реагирующих веществ и продуктов реакции в реакции второго порядка через c_A , c_B , c_C и c_D , можно написать, что скорость реакции при условии необратимости процесса

$$-\frac{dc_A}{d\tau} = -\frac{dc_B}{d\tau} = kc_Ac_B. \quad (5.20)$$

В том случае, когда количество реагирующих между собой веществ находится не в стехиометрических соотношениях, а отличается от них, скорость реакции будет зависеть от величины изменения концентрации в степени, прямо пропорциональной количеству веществ. В данном случае уравнение реакции в общем виде можно написать так:



где a и b – количества веществ A и B , участвующих в реакции; c и d – количества образующихся веществ C и D .

Скорость реакции при этом выразится уравнением

$$\frac{dc}{d\tau} = kc_A^a c_B^b. \quad (5.22)$$

Если за время τ прореагировало x моль каждого вещества, то скорость реакции второго порядка определится из уравнения

$$\frac{dx}{d\tau} = k(a-x)(b-x) \quad (5.23)$$

Если начальные количества веществ равны, т.е. $a = b$, то

$$\frac{dx}{d\tau} = k(a-x)^2 \quad (5.24)$$

Разделив переменные и проинтегрировав уравнение (5.24), получим

$$\frac{1}{a-x} = k\tau + C. \quad (5.25)$$

Постоянную C находим из условия $\tau = 0$ и $x = 0$; следовательно

$$C = \frac{1}{a}.$$

Подставив ее значение в уравнение (5.25), получим

$$k = \frac{x}{\tau a(a-x)}. \quad (5.26)$$

В том случае, когда реагирующие вещества находятся в неравных количествах, для определения константы скорости реакции пользуются уравнением (5.23). Интегрируя его и определяя постоянную интегрирования при условии $\tau = 0$ и $x = 0$, находим

$$k\tau = \frac{1}{a-b} \ln \frac{b(a-x)}{a(b-x)}. \quad (5.27)$$

Из уравнения (5.27) определим k , заменив при этом натуральные логарифмы десятичными

$$k = \frac{2,303}{\tau(a-b)} \lg \frac{b(a-x)}{a(b-x)}. \quad (5.28)$$

Графическое изображение константы k в полулогарифмических координатах, если по оси абсцисс откладывать время τ , а по оси логарифм

$$\lg \frac{b(a-x)}{a(b-x)},$$

представляет собой прямую линию (рис.

5.3). Умножив тангенс угла наклона прямой при данных координатах на величину $\frac{2,303}{(a-b)}$, найдем k . В этом случае константа k имеет размерность $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{сек})$. Концентрации a и b выражаются в молях на 1 м^3 .

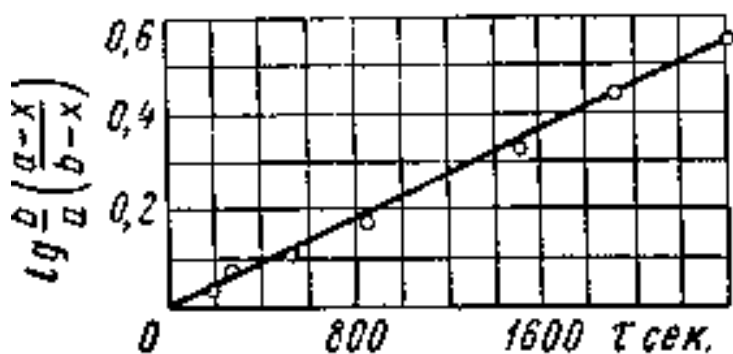


Рис. 5.3. Зависимость логарифма концентрации от времени в реакциях второго порядка при неравновесных начальных концентрациях веществ

Отношение констант скоростей реакций называется константой равновесия

5.3.7. Константа равновесия реакций газификации

Все указанные выше реакции мы рассматривали как необратимые и на основании этого определяли скорости реакций. В действительных условиях не происходит изменения всего количества реагирующих веществ, так как образовавшиеся продукты реагируют между собой, что приводит к [обратной реакции](#).

В этом случае, например, реакция второго порядка, согласно уравнению (5.21), может быть записана следующим образом:



Реакция, протекающая слева направо, называется [прямой реакцией](#), а справа налево – [обратной реакцией](#). Направление реакции обозначается стрелками.

Скорость [прямой реакции](#) второго порядка для данного соотношения участвующих в реакции веществ в соответствии с уравнением (5.22) имеет следующий вид:

$$-\frac{dc}{d\tau} = k_1 c_A^a c_B^b,$$

а скорость [обратной реакции](#)

$$-\frac{dc}{d\tau} = k_2 c_C^c c_D^d.$$

Равновесное состояние реакции наступает при равенстве скоростей прямой и [обратной реакций](#)

$$k_1 c_A^a c_B^b = k_2 c_C^c c_D^d. \quad (5.29)$$

Отношение констант скоростей реакций называется константой равновесия и выражается уравнением

$$K_c = \frac{k_2}{k_1} = \frac{c_A^a c_B^b}{c_C^c c_D^d}. \quad (5.30)$$

Определение константы равновесия имеет большое значение, так как, зная константу, можно выяснить соотношение реагирующих веществ.

Константа равновесия реакции второго порядка может быть выражена не только через концентрации веществ, участвующих в реакции, но и через парциальные давления. Последним выражением особенно удобно пользоваться для реакций, протекающих в газовой фазе, так как парциальные давления пропорциональны объемам газов в смеси.

Для каждого газа, входящего в состав смеси, уравнение состояния может быть написано в следующем виде:

$$p_i V = n_i RT, \quad (5.31)$$

где p_i – парциальное давление газа в смеси; V – общий объем смеси; n_i – число молей данного газа; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура, при которой происходит реакция.

$$\frac{n_i}{V}$$

Если обозначить концентрацию компонента смеси $\frac{n_i}{V}$ через c_i , то парциальное давление газа из уравнения (5.31), будет равно

$$p_i = c_i RT,$$

откуда следует, что концентрация, равна

$$c_i = \frac{P_i}{RT}.$$

Подставив полученное выражение в уравнение (5.30), найдем

$$K_c = \frac{\frac{P_i^a}{(RT)^a} \cdot \frac{P_i^b}{(RT)^b}}{\frac{P_i^c}{(RT)^c} \cdot \frac{P_i^d}{(RT)^d}}$$

или

$$K_c = \frac{P_i^a P_i^b}{P_i^c P_i^d} RT^{(c+d)-(a+b)} \quad . (5.33)$$

Обозначив изменение числа молей реагирующих веществ $(c + d) - (a + b)$ через Δn , а константу равновесия реакции (выраженную через парциальные давления) через K_p , уравнение (5.33) можно написать в следующем виде:

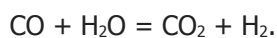
$$K_c = K_p (RT)^{\Delta n} \quad (5.34)$$

или

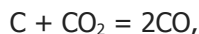
$$K_p = K_c (RT)^{-\Delta n}. \quad (5.35)$$

В общем случае K_p не равно K_c . Равенство констант будет иметь место только для реакций, протекающих без изменения числа молей, когда $\Delta n = 0$. В этом случае $K_c = K_p$. Следует отметить, что эти соотношения действительны для идеальных газов.

Без изменения объема или числа молей ($\Delta n = 0$) происходит гомогенная реакция [водяного газа](#)

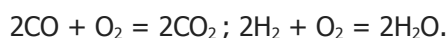


С увеличением объема протекает реакция восстановления оксида углерода



так как объем углерода, находящегося в твердой фазе, является весьма малым по сравнению с объемами реагирующего и образующегося газов.

С уменьшением числа молей и, соответственно, объема происходят реакции сгорания CO и H₂



Константа равновесия реакции второго порядка может быть выражена и через [степень диссоциации](#). Степенью диссоциации α называется доля молекул (выраженная в процентах) образующихся веществ, распавшихся к моменту равновесия на исходные реагирующие вещества.

Зависимость между K и α имеет особый вид для разных реакций, при которых происходит изменение числа молей в реакции.

Различают три группы реакций:

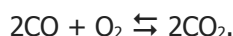
- а) реакции с уменьшением числа молей ($\Delta n < 0$);
- б) реакции с увеличением числа молей ($\Delta n > 0$);
- в) реакции, протекающие без изменения числа молей ($\Delta n = 0$).

Все три вида реакций протекают при газификации твердого топлива в [газогенераторах](#) и при сгорании [генераторного газа](#) в двигателях. На равновесное состояние реакции оказывает влияние изменение объема, давления и температуры.

5.3.8. Влияние на константу равновесия физических параметров

Рассмотрим вначале на примерах, как определяется зависимость между K и α при изменении числа молей в продуктах реакции при $p = \text{const}$ и $T = \text{const}$.

В качестве реакции с уменьшением числа молей возьмем гомогенную реакцию



Константа равновесия этой реакции определяется уравнением

$$K_c = \frac{c_{\text{CO}}^2 \cdot c_{\text{O}_2}}{c_{\text{CO}_2}^2} \quad (5.36)$$

Примем, что при данной температуре распалось α молекул (в процентах) CO_2 на CO и O_2 . В момент равновесия остается $(100 - \alpha)$ молей от каждой молекулы CO_2 , а от двух молекул $\text{CO}_2 - 2 \cdot (100 - \alpha)$ молей. Соответственно при этом в смеси появятся 2α молей CO и α молей O_2 . Таким образом, смесь газов при равновесии будет состоять из следующего количества веществ

$$\text{CO}_2 = 2(100 - \alpha)$$

$$\text{CO} = 2\alpha$$

$$\text{O}_2 = \alpha$$

$$\Sigma = 200 + \alpha.$$

Парциальное давление каждого компонента смеси пропорционально его объемной доле, т.е.

$$p_i = r_i p$$

где r_i – объемная доля данного компонента в смеси газов;
 p – общее давление смеси.

Определим парциальное давление каждого компонента смеси

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{2(100 - \alpha)}{200 + \alpha} p;$$

$$p_{\text{CO}} = \frac{2\alpha}{200 + \alpha} p;$$

$$p_{\text{O}_2} = \frac{\alpha}{200 + \alpha} p.$$

(5.32) Определим концентрацию каждого компонента в момент равновесия, пользуясь уравнением

$$c_{\text{CO}_2} = \frac{2(100 - \alpha)}{200 + \alpha} \cdot \frac{p}{RT};$$

$$c_{\text{CO}} = \frac{2\alpha}{200 + \alpha} \cdot \frac{p}{RT};$$

$$c_{\text{O}_2} = \frac{\alpha}{200 + \alpha} \cdot \frac{p}{RT}.$$

Подставив полученные выражения концентрации в уравнение (5.36), получим

$$K_c = \frac{\frac{4\alpha^2}{(200 + \alpha)^2} \cdot \left(\frac{p}{RT}\right)^2 \cdot \frac{\alpha}{200 + \alpha} \cdot \frac{p}{RT}}{\frac{4(100 - \alpha)^2}{(200 + \alpha)^2} \cdot \left(\frac{p}{RT}\right)^2}$$

или после преобразования

$$K_c = \frac{\alpha^3}{(100 + \alpha)^2 (200 + \alpha)} \cdot \frac{p}{RT}. \quad (5.37)$$

(5.35), приняв, что при этой реакции

$$\Delta n = 2 - 2 - 1 = -1$$

следовательно,

$$K_c = K_p (RT)^{-1},$$

отсюда

$$K_p = K_c RT.$$

Подставив в это уравнение значение константы K_c по формуле (5.37), получим

$$K_c = \frac{\alpha^3 \cdot p}{(100 + \alpha)^2 (200 + \alpha)}. \quad (5.38)$$

Рассматривая ту же реакцию при V и $T = \text{const}$, можно найти зависимость между K_c и α и определить влияние объема на положение равновесия.

Обозначая число распавшихся молей CO_2 через α , будем иметь к моменту равновесия смесь, в которой количество образовавшихся молей CO равно 2α , кислорода – α и оставшихся молей $\text{CO}_2 - 2(1 - \alpha)$.

Концентрации газов в момент равновесия могут быть выражены соотношениями

$$c_{\text{CO}_2} = \frac{2(1 - \alpha)}{V};$$

$$c_{\text{CO}} = \frac{2\alpha}{V};$$

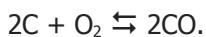
$$c_{\text{O}_2} = \frac{\alpha}{V}.$$

После подстановки этих выражений в уравнение (5.36) константы равновесия реакции получим следующее уравнение:

$$K_c = \frac{4\alpha^2 \alpha V^2}{V^2 V 4(1 + \alpha)^2} = \frac{\alpha^3}{(1 + \alpha)^2} \cdot \frac{1}{V}. \quad (5.39)$$

Для реакций, сопровождающихся увеличением числа молекул, константу равновесия, выраженную через [степень диссоциации](#), находят следующим образом.

Рассмотрим реакцию образования CO



В данном случае

$$\Delta n = 2 - 1 = 1, \text{ т. е. } \Delta n > 0,$$

а константа равновесия, равна

$$K_c = \frac{c_{\text{O}_2}}{c_{\text{CO}}^2}. \quad (5.40)$$

Распавшуюся часть молей CO (%) обозначим через α , тогда в момент равновесия реакции останется $2(100 - \alpha)$ молей окиси углерода; кислорода образуется α молей. Данная реакция гетерогенная, и поэтому объем углерода в твердом виде не принимаем во внимание.

Следовательно, в смеси имеется моль

$$\begin{array}{r} \text{CO} = \\ + 2(100 - \alpha) \\ \text{O}_2 = \alpha \\ \Sigma = \\ 200 - \alpha \end{array}$$

При давлении $p = \text{const}$ концентрации компонентов смеси могут быть выражены соотношениями

$$c_{\text{CO}} = \frac{2(100 - \alpha)}{200 - \alpha} \cdot \frac{p}{RT};$$

$$c_{\text{O}_2} = \frac{\alpha}{200 - \alpha} \cdot \frac{p}{RT}.$$

Найдем константу равновесия по уравнению (5.40)

$$K_c = \frac{\alpha(200 - \alpha)^2}{(200 - \alpha)4(100 - \alpha)^2 \cdot \left(\frac{p}{RT}\right)^2} \frac{p}{RT}$$

или

$$K_c = \frac{\alpha(200 - \alpha)}{4(100 - \alpha)^2} \cdot \frac{RT}{p}. \quad (5.41)$$

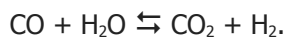
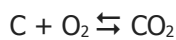
Определим константу

$$K_p = \frac{K_c}{RT} = \frac{\alpha(200 - \alpha)}{4(100 - \alpha)^2} \cdot \frac{1}{p}. \quad (5.42)$$

При рассмотрении диссоциации реакции при $V = \text{const}$ и $T = \text{const}$ (обозначив через α число молей CO , распадающихся на C и O_2) на основании изложенных выше выводов можно написать следующее выражение для константы равновесия:

$$K_c = \frac{\alpha V}{4(1 - \alpha)^2}. \quad (5.41)$$

Для реакций, протекающих без увеличения числа молей ($\Delta n = 0$), в качестве примера можно указать на следующие:



Для первой реакции константа равновесия, выраженная через [степень диссоциации](#) α (%), равна

$$K_p = K_c = \frac{\alpha}{100 - \alpha}. \quad (5.42)$$

Для второй реакции

$$K_p = K_c = \frac{\alpha^2}{(100 - \alpha)^2}. \quad (5.43)$$

Полученные выражения констант равновесия через [степень диссоциации](#) позволяют сделать выводы о влиянии изменения давления и объема веществ, участвующих и образующихся при реакции, на [степень диссоциации](#).

Для реакций, при которых $\Delta n < 0$, с увеличением давления при температуре $T = \text{const}$ [степень диссоциации](#) уменьшается. При этом равновесие сдвигается вправо в сторону увеличения выхода продуктов реакции. Увеличение объема при давлении $p = \text{const}$ действует в обратном направлении.

Для реакций, сопровождающихся увеличением числа молей ($\Delta n > 0$), повышение давления способствует диссоциации и равновесие сдвигается в сторону уменьшения выхода продуктов реакции. Увеличение объема в этом случае сдвигает равновесие вправо.

В реакциях, когда $\Delta n = 0$, изменение объема или давления при температуре $T = \text{const}$ не влияет на положение равновесия.

Следует отметить, что равновесие реакций зависит главным образом от температуры. Каждая химическая реакция сопровождается изменением внутренней энергии вещества или системы веществ. Под изменением внутренней энергии вещества понимают разность ΔU между начальной U_1 и конечной U_2 величинами энергии системы в ходе реакции

$$\Delta U = U_1 - U_2.$$

К концу реакции энергия системы изменяется. Распределение оставшейся энергии на совершение полезной работы и на теплоту зависит от характера протекания реакции, от наличия в ней необратимых явлений.

К необратимым явлениям относятся: рассеяние световой энергии, работа расширения и др. Чем больше энергии затрачивается на необратимые явления, тем меньше ее переходит в работу.

В отличие от учета теплоты, который принят в термодинамике для физических явлений, в данной работе принято считать теплоту, отданную во внешнюю среду, положительной, а воспринятую из внешней среды – отрицательной.

На основании первого закона термодинамики изменение внутренней энергии ΔU системы может быть представ-

лено как сумма энергии, распределенной на выделившуюся теплоту Q и произведенную работу W

$$\Delta U = Q + W. (5.46)$$

Произведенная во время реакции работа может достигать максимального значения, если происходящие во время реакции физические явления являются обратимыми. В этом случае выделившаяся теплота Q принимает минимальное значение, а большая часть внутренней энергии ΔU переходит в работу W_{\max} и уравнение (5.46) принимает вид

$$\Delta U = Q_{\min} + W_{\max}. (5.47)$$

В работу W_{\max} входит работа расширения W_p , которая является неизбежной затратой энергии при изобарно-изотермической реакции ($p = \text{const}$, $T = \text{const}$), и полезная работа реакции W_0 , т. е.

$$W_{\max} = W_p + W_0.$$

О взаимодействии веществ судят по химическому сродству, за меру которого принимают величину полезной (максимальной) работы реакции W_0 . С увеличением полезной работы реакции количество продуктов реакции увеличивается, и константа равновесия реакции уменьшается.

Для оценки химического сродства и полезной работы реакции в химической термодинамике вводятся две функции, характеризующие термодинамическое изменение состояния системы. Кратко опишем их.

Первая функция определяется из представления о свободной энергии F системы в изохорно-изотермических реакциях ($V = \text{const}$ и $T = \text{const}$) и зависит от внутренней энергии U и связанной энергии TS . Свободная энергия F характеризует ту часть внутренней энергии системы, которая может переходить в полезную работу реакции, так как в данной реакции работа расширения отсутствует. Вывод функциональной

связи свободной энергии F с величинами U и TS производится на основании рассмотрения изменения энтропии системы в процессе реакции.

Второй функцией, по которой можно судить об изменении состояния системы при изобарно-изотермической реакции, является изобарный потенциал Z . Изобарный потенциал Z характеризует часть теплосодержания J системы, переходящую в полезную работу реакции.

Величины F и Z связаны между собой следующим выражением:

$$Z = F + pV. (5.48)$$

Зависимость между максимальной полезной работой реакции и константой равновесия в простейшем случае имеет вид

$$W_0 = -RT \ln K, (5.49)$$

где $K = K_c$ – для изохорно-изотермических реакций; $K = K_p$ – для изобарно-изотермических реакций.

На основе введенных представлений о свободной энергии и изобарном потенциале реакции зависимость между полезной работой реакции и тепловым эффектом ее может быть выражена известным уравнением Гибса–Гельмгольца

$$W_0 = Q + T \frac{dW_0}{dT} \quad (5.50)$$

Это уравнение является общим по форме для изохорных и изобарных реакций и после преобразований с учетом (5.49) является исходным для вычисления константы равновесия

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{Q}{RT^2} \quad (5.51)$$

На основании этого уравнения можно сделать следующие выводы.

1. Если величина выделившейся теплоты $Q > 0$, то $(d \ln K / dT) > 0$. Это означает, что в экзотермических реакциях константа равновесия увеличивается при повышении температуры. Но с ростом константы равновесия K увеличиваются концентрации или парциальные давления исходных веществ, вследствие чего увеличивается [степень диссоциации](#), равновесие сдвигается влево и уменьшается выход продуктов реакции. Следовательно, в экзотермической реакции более полному ее протеканию, т. е. увеличению выхода продуктов реакции, благоприятствует низкая температура.

2. Если величина $Q < 0$, то $(d \ln K / dT) < 0$. Это означает, что в эндотермических реакциях с увеличением температуры константа равновесия уменьшается. Это может быть только при уменьшении концентрации или парциальных давлений исходных веществ, поэтому при этих реакциях увеличивается выход продуктов реакции, диссоциация уменьшается и равновесие сдвигается вправо. Следовательно, в эндотермических реакциях более полному выходу продуктов реакции благоприятствует высокая температура.

В данных выводах не отрицается увеличение скорости реакции с повышением температуры, но указывается на смещение равновесного состояния при изменении температуры.

В табл. 5.3 приведен равновесный состав газовой смеси в зависимости от температуры при эндотермической реакции восстановления CO_2 .

Из данных таблицы следует, что с повышением температуры равновесие реакции сдвигается в сторону увеличения выхода CO .

Интегрирование уравнения (5.51) в пределах изменения температуры от T_1 до T_2 с переходом от натуральных к десяти-

тичным логарифмам позволяет получить следующее соотношение:

$$\lg K = \frac{1}{2,303} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{Q}{RT^2} dT \quad (5.52)$$

Предположим, что [тепловой эффект реакции](#) не связан с изменением температуры, т. е. $Q = \text{const}$, тогда

$$\lg K = -\frac{Q}{2,303R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (5.53)$$

Таблица 5.3

Состав газовой смеси, образующейся по реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$

Температура, °C	Содержание, %	
	CO_2	CO
450	97,80	2,20

650	60,20	39,80
700	41,30	58,70
750	24,10	75,90
800	12,40	87,60
850	5,90	94,10
900	2,90	97,10
950	1,20	98,80
1000	0,90	99,10

Данное уравнение широко применяется в технических расчетах для определения значения K при любой температуре, если известен тепловой эффект Q реакции и имеется значение K при начальной температуре T_1 . В табл. 5.4 приведены значения константы равновесия в зависимости от температуры для реакции $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$.

Однако [тепловой эффект реакции](#) изменяется с изменением температуры и зависит от условий протекания реакции, изменения числа молекул в ходе реакции, а также от состояния продуктов реакции, так как это связано с работой расширения.

Таблица 5.4

Значение константы K реакции $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Температура, °С	Константа равновесия K	
	Опытные данные	Вычисленные значения
686	0,5340	0,5800
786	0,8400	0,8600
886	1,1970	1,1900
986	1,5710	1,5500
1005	1,6200	1,6200
1086	1,9560	1,9100
1205	2,1260	2,3300
1405	2,4900	2,9400

Связь тепловых эффектов реакций, протекающих при постоянном давлении и постоянном объеме, выражается следующим уравнением:

$$Q_p = Q_v - \Delta n \cdot RT, \quad (5.54)$$

где Q_p – [тепловой эффект реакции](#) при постоянном давлении; Q_v – [тепловой эффект реакции](#) при постоянном объеме; Δn – приращение числа молекул в ходе реакции; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура, при которой происходит реакция.

Влияние температуры на [тепловой эффект реакции](#) может быть определено из следующего выражения

$$Q_p = Q_{p0} + \alpha T + \beta T^2 + \dots, \quad (5.55)$$

где Q_{p0} – тепловой эффект реакции при абсолютном нуле;
 α и β постоянные коэффициенты.

Таблица 5.5

Тепловой эффект реакций, происходящих в процессе газификации

Реакция	Тепловой эффект (при 25 °С), кДж/моль	Реакция	Тепловой эффект (при 25 °С), кДж/моль
$C + O_2 = CO_2$	+ 409,2	$2CO + O_2 = 2CO_2$	+ 571,7
$2C + O_2 = 2CO$	+ 246,6	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	+ 484,5
$C + H_2O = CO + H_2$	- 118,9	$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	+ 43,57
$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$	- 75,29	$C + 2H_2 = CH_4$	+ 87,45
$C + CO_2 = 2CO$	- 162,5		

По формуле 5.55 можно вычислить тепловой эффект реакции при любой температуре, если известен тепловой эффект при какой-либо температуре, известны теплоемкости реагирующих веществ и зависимость теплоемкостей от температуры. В табл. 5.5 приведены тепловые эффекты реакций, происходящих при газификации.

5.3.9. Энергия активации реакций газификации

Изложенный выше вывод уравнения (5.22) скорости реакции был основан на кинетической теории газов, по которой реакция протекает вследствие столкновения реагирующих молекул; при этом число столкновений и скорость реакции пропорциональны концентрациям веществ.

Однако в реальных условиях не каждое столкновение молекул приводит к химической реакции, что было установлено экспериментальным путем. В опытах скорость реакции обычно оказывалась ниже, чем это должно было соответствовать числу столкновений молекул. Число столкновений оказывалось по опытам неизмеримо больше числа реагирующих молекул.

Согласно теории активации, столкновения, приводящие к реакции, происходят между молекулами, которые обладают определенным запасом кинетической энергии, достаточным для разрушения химических связей. Эта энергия называется энергией активации и обозначается буквой E .

При заданной температуре молекулы могут обладать различной скоростью. При движении молекул с большой скоростью и центральном столкновении суммарная энергия молекул может оказаться больше определенного минимума энергии, необходимого для перегруппировки атомов и молекул, т.е. больше энергии активации E . Такие молекулы называются активными. К химической реакции приводит столкновение только активных молекул. Число активных молекул в газах может быть различным. Скорость реакции тем больше, чем больше число активных молекул, а число последних возрастает с уменьшением энергии активации.

Кроме того, скорость реакции увеличивается с повышением температуры, так как при этом возрастает скорость движения молекул, их кинетическая энергия и число столкновений молекул.

Источником активации молекул может служить не только кинетическая энергия молекул, но и световая энергия, поглощаемая электронами, находящимися на периферии и слабо связанными с ядром атома. При этом электроны переходят на другую орбиту, соответствующую большей величине потенциальной энергии. Удары электронов другой молекулы могут также привести к аналогичным результатам. Возбужденные молекулы оказываются активными, что ускоряет протекание химической реакции.

Таким образом, согласно теории активации, скорость реакции определяется соотношением между числом активных и неактивных молекул. Число активных молекул $N_{\text{акт}}$ определяется законом распределения Максвелла–Больцмана

$$N_{\text{акт}} = N_{\text{общ}} e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (5.56)$$

где $N_{\text{общ}}$ – общее число молекул.

Величина $e^{-\frac{E}{RT}}$ определяет долю молекул, обладающих минимальной энергией (выше средней), которую должен иметь 1 моль сталкивающихся молекул для протекания химической реакции. В экзотермических реакциях активные молекулы должны обладать запасом энергии активации, большей, чем сумма $Q + E$. Величина энергии активации E для образования CO_2 составляет 118,9 кДж/моль, для образования CO – 1171,8 кДж/моль. Величина E характеризует не вещество, а реакцию и мало зависит от температуры.

Если в уравнении (5.51), выражающем связь теплового эффекта реакции с константой равновесия,

$$\frac{k_2}{k_1}$$

заменить константу K через отношение $\frac{k_2}{k_1}$, то

$$\frac{d \ln k_2}{dT} - \frac{d \ln k_1}{dT} = \frac{E_2}{RT^2} - \frac{E_1}{RT^2}, \quad (5.57)$$

где E_1 и E_2 – соответственно энергия активации прямой и [обратной реакций](#); k_1 и k_2 – соответственно константы скорости прямой и [обратной реакций](#).

Разность энергии активации обратной и [прямой реакции](#)

$$E_2 - E_1 = Q.$$

При этом для каждой прямой или [обратной реакции](#) справедливо следующее равенство:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E}{RT^2} + D. \quad (5.58)$$

В этом уравнении Аррениус допустил, что $D = 0$ и получил широко известное уравнение связи константы скорости и температуры реакции:

$$\ln k = B - \frac{E}{RT}, \quad (5.59)$$

где B – постоянная уравнения.

Многочисленные экспериментальные работы различных исследователей подтвердили уравнение Аррениуса. Интегрируя уравнение (5.59) при $D = 0$, находим

$$k = e^{-\frac{E}{RT}} \quad (5.60)$$

Отсюда следует, что при постоянных значениях величин E и K константа скорости реакции k возрастает с повышением температуры. Константа скорости реакции с учетом совместного влияния столкновений и активации выразится следующим уравнением:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (5.61)$$

где k_0 – константа скорости реакции при условии, что каждое столкновение приводит к реакции.

Скорость W гомогенной реакции второго порядка с учетом столкновений и активации выразится уравнением

$$k = k_0 \cdot (c_1 c_2) \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (5.62)$$

Таким образом, скорость реакции второго порядка зависит не только от концентрации реагирующих веществ, но и от доли активных молекул, участвующих в реакции.

В процессе газификации протекают [гетерогенные реакции](#), как, например, реакции окисления углерода и восстановления углекислого газа. В этих реакциях наряду с химическими факторами большое значение имеют и физические факторы. К ним в первую очередь относится диффузия газов.

5.3.10. Влияние диффузии на процессы газификации

В гетерогенных реакциях большое значение имеет перенос веществ из газовой фазы к поверхности твердого тела и отводу от него продуктов реакции. Этот процесс переноса веществ называется диффузией.

Процесс диффузии выражается следующим уравнением:

$$dq = -DF \frac{dc}{dx} d\tau \quad (5.63)$$

где dq – количество вещества, диффундирующего в течение времени $d\tau$ через слой dx к поверхности F , при разности концентраций dc , пропорционально коэффициенту диффузии D . Коэффициент диффузии D имеет размерность скорости м/сек.

Для [гетерогенных реакций](#) между кислородом воздуха и углеродом, протекающих на его поверхности, уравнение диффузии принимает следующий вид:

$$dq = -DF \frac{c_0 - c_w}{\delta} d\tau \quad (5.64)$$

где F – реагирующая поверхность углерода; c_0 и c_w – концентрация кислорода соответственно в газовом потоке и на поверхности углерода; δ – толщина ламинарного слоя, окружающего углерод.

Толщина пограничного слоя около поверхности твердого вещества зависит от скорости движения реагирующего газа и определяется критерием движения Re (критерием Рейнольдса)

$$\delta = a l Re^{-0,8}, \quad (5.65)$$

где a – постоянная величина; l – линейный размер, определяющий форму вещества (для цилиндрической и шаровой поверхностей – диаметр).

Критерий Рейнольдса Re выражает следующую зависимость параметров:

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (5.66)$$

где w – скорость движения; d – гидравлический диаметр потока газа; ρ – плотность газа; μ – динамическая вязкость газа. Из уравнений (5.64) – (5.66) следует, что с повышением скорости движения обтекающего газа диффузионный перенос вещества увеличивается, а толщина пленки, окружающей тело, уменьшается. Скорость реакции при повышении температуры с T_0 до T определяется в области диффузии изменением коэффициента диффузии:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (5.67)$$

где D_0 – коэффициент диффузии при температуре T_0 ; $n = 1,5-2,0$.

Изучение диффузионной кинетики реакций весьма плодотворно и дало исключительно положительные результаты при разрешении ряда важнейших научных проблем в области горения и газообразования. На основе этой теории были получены убедительные объяснения образования различных продуктов реакции при взаимодействии двух однородных тел вследствие различных физических условий протекания реакций. В [гетерогенных реакциях](#) различают две области: кинетическую и диффузионную. Разделение этих областей основано на преимущественном значении в каждой области кинетических или диффузионных процессов, определяющих скорость реакции.

Скорость реакции в кинетической области строго пропорциональна величине свободной реагирующей поверхности и не зависит от скорости газового потока. В диффузионной области скорость суммарного процесса всецело зависит от скорости диффузии, и наблюдаемая эффективная реакция не зависит от кинетики реакции на поверхности. Все реакции в этой области имеют первый порядок по концентрации реагирующего вещества и не зависят от общего давления. Скорость реакции очень мало зависит от температуры, но зависит от скорости газового потока так же, как и критерий Нуссельта (т.е. пропорциональна скорости газового потока в степени 0,4–0,5 при обтекании отдельных кусков снаружи и в степени 0,8 при турбулентном движении, т.е. при течении потока газа внутри канала).

В диффузионной области скорости различных реакций будут разные, так как различны коэффициенты диффузии реагирующих веществ. В случае обратимых реакций скорость реакции зависит от условий равновесия.

Для диффузионной области характерны большая скорость реакции и малая скорость диффузии, т.е. реакция протекает при высокой температуре, большом давлении и малой скорости газового потока.

Кинетическая область превалирует в противоположных условиях: при низком давлении и большой скорости газового потока. Этими условиями пользуются, когда хотят выявить истинную кинетику [гетерогенных реакций](#).

В кинетической области скорость реакции в значительной степени зависит от температуры и удовлетворяет уравнению (5.60).

Между диффузионной и кинетической областями находится переходная область. Для определения области протекания реакции пользуются различными методами. Наиболее правильный метод – это проведение реакции в определенных гидродинамических условиях, при которых можно с достаточной точностью вычислять скорость диффузии. Если наблюдаемая скорость реакции значительно меньше вычисленной скорости диффузии, то процесс находится в кинетической области.

Зависимость скорости реакции от температуры служит признаком течения реакции в кинетической области, а зависимость скорости реакции от скорости газового потока указывает на то, что реакция протекает в диффузионной области.

Многочисленными исследованиями установлено, что процесс горения углерода при высокой температуре (1100–1300 °С) протекает в диффузионной области.

Торф является природным ресурсом, запасы которого могут при соответствующих условиях возобновляться. Ежегодный прирост торфа на болотах России составляет 250 млн. т

5.4. Подготовка сырья и производство газообразного топлива на борту транспортного средства

В Советском Союзе опытные конструкции газогенераторных автомобилей появились в 1923–1928 годах, а серийный выпуск [газогенераторных](#) автомобилей был начат в 1936 году. Двигатели [газогенераторных](#) автомобилей работают на газе, полученном путем газификации твердого топлива в специальной установке, смонтированной на шасси автомобиля или на прицепе.

Применение [газогенераторных](#) автомобилей в Советском Союзе определялось необходимостью использования [местных видов твердого топлива](#) в отдаленных районах, куда завозить жидкое топливо экономически нецелесообразно. Завоз нефтяного топлива в такие районы требует значительных затрат и создает дополнительную загрузку транспорта.

Наиболее распространенным топливом для [газогенераторных](#) автомобилей являлось дерево (древесные чурки) и древесный уголь, т.е. топливо, получаемое из возобновляемых источников. Различного вида сельскохозяйственные отходы, например, солома, лузга также могут быть использованы как генераторное топливо. Однако, будучи по своим качествам низкосортным топливом, они в меньшей степени пригодны для автомобильных [газогенераторов](#).

Любой вид твердого топлива, предназначенного для [газогенераторных](#) автомобилей, должен иметь:

1. определенный размер кусков;
2. определенную влажность;
3. минимальное количество вредных примесей и, в частности, золы; температура плавления золы не должна выходить за определенные пределы;
4. определенное количество «летучих» компонентов;
5. высокую реакционную способность;
6. достаточную механическую прочность, чтобы топливо не рассыпалось при транспортировке, хранении, а также при газификации в [газогенераторе](#);
7. высокую удельную теплотворность;
8. невысокую стоимость, включая стоимость разделки топлива до необходимых размеров.

Первые семь показателей влияют на гибкость и устойчивость процесса газификации [газогенераторного](#) автомобиля, надежность работы [газогенератора](#) и периодичность его догрузки. Последний показатель определяет экономичность применения того или иного топлива.

Соответственно указанным показателям топлива можно ориентировочно распределить на следующие четыре класса:

- 1) топлива хорошего качества – древесная чурка, древесный уголь, древесноугольные брикеты;
- 2) топлива вполне удовлетворительного качества – [торфяной](#) кокс, малозольный [торф](#), полукокс;
- 3) топлива удовлетворительного качества – многозольный [торф](#), бурый уголь, антрацит;
- 4) топлива неудовлетворительного качества – саксаул, солома, лузга и прочие сельскохозяйственные отходы.

Характеристики [газогенераторных](#) топлив получаемых из восстанавливаемых источников приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Топливо	Размер кусков, мм	Содержание, % по массе				Температура плавления золы, °С не менее	Плотность насыпная масса, кг/м³	Теплота сгорания насыпного объема, МДж/л
		Не более лаги	Волокна	Зеленых веточек	Лесные сучья			
Древесные чурки	Длина 40–70, толщина и ширина 30–60	≤ 4	≤ 2	≤ 0,4–1	≤ 7	400	20–360	100
Древесный уголь	Длина 20 и ширина 1–40	≤ 6	≤ 1	≤ 12 и ≤ 3–25	≤ 8	400	20–220	100
Древесно-угольные брикеты	Диаметр 20, высота 15	≤ 2	≤ 1	≤ 3–12	≤ 8	400	500–650	5–700

В зависимости от содержания в топливах летучих веществ и золы их разделяют на следующие группы:

- битуминозные (смолистые) малозольные (до 4%) и многозольные (более 4%);
- небитуминозные (тощие или бессмольные) малозольные (до 4%) и многозольные (более 4%).

В СССР существовал ГОСТ 2720-44 «Топливо древесное для [газогенераторных](#) автомашин и тракторов», который определял, что для заготовки чурок может быть использована как ствольная часть

дерева, так и сучья толщиной не менее 3 см. Чурки мягких пород можно применять только в смеси с чурками твердых пород (50% мягких пород и 50% твердых пород). Сосновые чурки должны применяться без примеси мягких пород.

В чурках допускаются все пороки древесины (сучковатость, трещины и т.п.) за исключением ситовой, трухлявой и белой гнили. Сырье заготавливается в виде длинных (2 м и более) или коротких (от 0,5 до 1,75 м) дров. Длинные дрова (долготье) сначала распиливают на плашки, которые потом разделяют на чурки. Короткие дрова обычно раскалывают на тонкие поленья, которые потом распиливают на чурки – куски любой формы. Разделка сырья на чурки производится, как правило, механизированным путем, т.е. с применением механических пил и колунов или пыльно-кольных агрегатов.

Сушка древесины производится естественным или искусственным путем. Естественная сушка в бревнах занимает от 1,5 до 2 лет. Сушка дров, сложенных в поленницы, длится от 2 до 4 мес. Чурки, заготовленные из свежесрубленной древесины, обычно сушат на эстакадах (деревянных настилах), на которые они насыпаются слоем в 0,3–0,5 м. Срок сушки чурок от 2 недель до 2 месяцев весенне-летнего периода в зависимости от метеорологических условий. Если после естественной сушки влажность чурок превышает 20–22%, то их подсушивают в специальных сушилках передвижного или стационарного типа.

Естественная сушка чурок может быть полностью заменена искусственной сушкой в сушилках. Но искусственная сушка связана с дополнительной затратой рабочей силы, расходом древесины на отопление сушилок (до 30% веса чурок), значительными капиталовложениями и т.п., что значительно увеличивает себестоимость готового топлива.

На основе указанной классификации топлива производится выбор типа [газогенератора](#) для работы на том или ином виде топлива.

Древесина состоит из органической (горючей) массы и балласта. В состав органической массы входят углерод С, водород Н, кислород О и азот N. К балласту топлива относятся зола и гигроскопическая влага. Соотношение между отдельными компонентами органической массы древесины почти не зависит от породы и в среднем составляет (в % по весу):

углерода.....50
 водорода.....6
 кислорода.....43
 азота.....1.

Низшая теплота сгорания органической массы равна примерно 18 МДж/кг. Зольность сухой древесины в зависимости от породы изменяется от 0,4 до 1%. Зольность в сучьях и корнях превышает указанное значение (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Содержание золы, %

Порода	Содержание золы, %	
	стволе	сучьях
Сосна	0,24	1,72
Береза	0,35	2,42
Осина	0,75	2,35

В корнях содержание золы достигает 5%.

Влажность древесины изменяется в широких пределах. В свежесрубленной древесине содержание влаги достигает 80–110%. Влажность воздушно-сухой древесины составляет 20–25%. Сера в древесине отсутствует.

Эти цифры характеризуют абсолютную влажность, которая определяется в процентах как отношение веса влаги к весу абсолютно сухой древесины. Чем выше влажность древесины, тем ниже ее теплотворность (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Зависимость низшей теплоты сгорания древесины от влажности

Абсолютная влажность, %	0	20	30	40	50	60	70	80
	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	5,9	4,7	3,4	2,4	1,5	0,7	0,1

При сухой перегонке древесины, т.е. при нагревании ее без доступа воздуха, она дает ряд продуктов. В табл. 5.9 показан процентный состав (по весу) продуктов сухой перегонки, выделяющихся из различных пород древесины.

Таблица 5.9

Состав продуктов перегонки древесины

Продукты сухой перегонки	Порода древесины			
	сосна	ель	береза	бук
Уголь				
Газы:				
CO ₂	37,83	37,81	31,80	34,97
C ₂ H ₄	10,13	10,30	9,96	10,90
CO	0,23	0,20	0,19	0,20
CH ₄	3,74	3,78	3,32	4,22
Метиловый спирт	0,59	0,62	0,54	0,47
Ацетон	0,88	0,96	1,60	2,07
Метилацетат	0,18	0,20	0,19	0,20
Уксусная кислота	0,01	0,02	0,02	0,03
	3,50	3,19	7,08	6,04
Смола	11,79	8,08	7,93	8,11
Прочие органические вещества	8,03	7,75	8,15	5,89
	22,27	25,70	27,81	26,58
Вода	0,82	1,39	1,41	0,32
Потери				
Итого:	100,00	100,00	100,00	100,00

Взятая для опытов древесина содержала 7–9% влаги, в результате же сухой перегонки выделилось от 22 до 27% воды. Следовательно, в процессе сухой перегонки образовалось значительное количество химической влаги. Поэтому при газификации даже абсолютно сухой древесины в [газогенераторе](#) все же происходят реакции образования «водяного газа».

Образующиеся в процессе сухой перегонки древесины побочные продукты (смола, уксусная кислота) оказывают отрицательное влияние на двигатель.

Незначительная зольность древесины и высокая температура плавления золы (более 1400 °С) не вызывают осложнений при газификации древесины, а высокая реакционная способность древесного угля, который образуется из древесины в процессе сухой перегонки, способствует образованию горючего газа в относительно небольшом по высоте слое топлива.

Важно только, чтобы древесина, употребляемая как [газогенераторное](#) топливо в виде чурок определенного размера, имела влажность W_{abc} не более 22% и давала прочный древесный уголь.

Последнему условию удовлетворяет древесина твердых пород (береза, бук, граб, ясень, клен, вяз, ильм, лиственница). Мягкие породы дерева (ель, осина, ольха, липа, кедр, пихта) дают уголь более слабый, который крошится при транспортировке и при использовании в [газогенераторных](#) автомобилях. В этом случае повышается сопротивление слоя топлива проходу газа и требуется более частая чистка зольника [газогенератора](#). Относительная прочность древесных углей может быть выражена следующими цифрами: береза – 1,00, сосна – 0,58, осина – 0,46, ель – 0,43, пихта – 0,39.

Древесина, предназначенная для газификации в автомобильных [газогенераторах](#), должна быть разделана на чурки длиной от 4 до 7 см, шириной и толщиной от 3 до 6 см. При большем размере чурок затрудняется осадка топлива в бункере (происходит зависание топлива). Разделка древесины на чурки меньших размеров связана с большой затратой времени и увеличивает их стоимость.

Так, если стоимость 1 т чурок естественной сушки принять за 100%, то стоимость 1 т чурок искусственной сушки составит 180%. Следовательно, искусственная сушка увеличивает себестоимость чурок почти в 2 раза. Количество чурок измеряют в насыпных кубических метрах или же по весу (кг). Вес 1 м³ (насыпного) чурок воздушной сушки может быть принят следующим (кг):

граб, ясень.....	360
береза, клен, бук, вяз, лиственница, ильм.....	320
сосна.....	250
ольха, осина, липа, кедр, пихта, ель.....	220.

Также в качестве топлива для [газогенераторных](#) автомобилей может применяться древесный уголь. Выжигание угля из древесины не представляет больших затруднений и широко применяется для нужд металлургии и в лесохимической промышленности. Особенно целесообразно выжигать порубочные остатки лесосек, которые так или иначе должны быть уничтожены по законам лесной охраны.

Древесный уголь, обладая высокой реакционной способностью, является одним из лучших видов топлива для транспортных [газогенераторов](#), обеспечивающих наиболее высокие эксплуатационные качества [газогенераторных](#) автомобилей. К недостаткам древесного угля следует отнести его малую прочность и большую гигроскопичность.

Древесный уголь может быть получен путем нагревания и разложения древесины без доступа воздуха (сухая перегонка в ретортах) или при ограниченном доступе воздуха (углежжение в ямах, печах, кострах). Углежжение отличается от сухой перегонки более высокой температурой процесса за счет сгорания части древесины. При этом уголь получается более прочным, с большим содержанием углерода.

В табл. 5.10 приведены конечные температуры процесса выжигания угля и состав угля в зависимости от способа его получения.

Из таблицы видно, что с увеличением температуры выжигания выход угля уменьшается за счет уменьшения содержания летучих компонентов. Практически при углежжении влажной древесины, имеющей

абсолютную влажность 30–35%, выход угля составляет 21–24% веса заложенного сырья. Таким образом, из 1 м³ древесины получается около 70–75 кг древесного угля теплотой сгорания около 29 МДж/кг.

Таблица 5.10

Характеристики угля в зависимости от способа получения

Способ выжигания	Средняя температура выжигания, °С	Количество летучих в угле, % по массе	Состав угля, % по массе (на горючую массу)			Выход угля, % по массе абсолютно сухой древесины
			C	H+N	O	
В ретортах	350–400	35–40	76,11	3,93	19,96	44
В стационарных печах	400–450	20–25	83,50	3,80	12,70	35
В кострах	600 и выше	6–9	92,20	2,60	5,20	30

Уголь с меньшим содержанием летучих компонентов более легкий по весу, трудновоспламеняемый; при газификации он дает менее калорийный газ.

Сухая перегонка древесины в ретортах широко применяется в лесохимическом производстве для добычи смол, скипидара и древесного спирта. Древесный уголь в этом случае является побочным продуктом. Существуют самые разнообразные системы реторт, емкостью от 1 до 400 м³. Длительность процесса перегонки в ретортах, включая загрузку и выгрузку, колеблется от 12 час до 20 дней в зависимости от емкости реторты.

Углежжение в стационарных печах широко применяют в металлургической промышленности. При емкости печей от 50 до 200 м³ процесс углежжения (и охлаждения) длится от 100 до 200 ч в зависимости от объема, влажности и породы древесины.

Наиболее старым и примитивным способом является углежжение древесины в кострах или кучах. Костры устраивают объемом от 20 до 300 м³. Сложенную в костер древесину покрывают сверху угольной мелочью и землей и поджигают. Продолжительность углежжения в кострах составляет от 6–8 дней до нескольких недель в зависимости от объема костра (или кучи) и влажности древесины. Углежжение в кострах – очень трудоемкий процесс и должен производиться опытными углежогами. Поэтому стоимость такого угля выше стоимости печного угля.

В 50–60 годах прошлого века получили распространение переносные углевыжигательные печи. Сырьем для этих печей служат порубочные остатки древесины. При емкости печей 2,5 м³ за 12 час выжигается около 150 кг древесного угля. Стоимость угля, полученного в этих печах, значительно ниже, чем стоимость угля, полученного в кострах.

Уголь, выжженный из сучьев, по своим качествам не хуже угля, выжженного из ствольной части древесины, но содержит большее количество золы. Предназначенная для углежжения древесина должна быть предварительно отсортирована по породам, размерам и влажности. Примесей других пород при выжиге должно быть не более 5%.

Выжиг древесного угля для транспортных газогенераторов может быть осуществлен по любому способу, но наиболее качественный уголь дают ретортный и печной способы выжигания.

Химический состав печного древесного угля (% по массе):

углерода.....80,0
 водорода.....3,5
 кислорода и азота.....14,5
 золы.....2,0.

В древесном угле для [газогенераторных](#) автомобилей не должно быть камней, земли, песка, щепы, опилок и других посторонних примесей, а также головней и недожога. По внешнему виду уголь должен быть плотным и иметь в изломе блестящий черный цвет.

В зависимости от породы исходной древесины древесный уголь в соответствии с ГОСТ 4635-49 «Уголь древесный для [газогенераторных](#) автомобилей и тракторов» распределяется на следующие три группы:

1-я группа – береза, бук, граб, ясень, клен, вяз, ильм, дуб и лиственница;

2-я группа – сосна;

3-я группа – осина, ольха, липа, кедр, ель и пихта.

По данным ЦНИИМЭ, механические свойства и насыпная масса древесного угля указанных групп характеризуются следующими показателями (табл. 5.11).

Таблица 5.11

Свойства древесного угля

Показатель	Группа		
	1-я	2-я	3-я
Сопротивление на сжатие вдоль волокон, кг/см ²	180–100	100–50	50–25
Сопротивление на истирание в барабане, %	70–60	60–50	50–40
Насыпная масса, кг/м ³	60–180	50–140	40–120
	220–180	180–140	140–120

Для транспортных [газогенераторов](#) следует применять угли 1-й и 2-й групп. Угли 3-й группы могут быть использованы только в смеси с углями 1-й группы в количестве не более 50%. При этом насыпной вес смеси должен быть порядка 160–170 кг/м³.

По содержанию летучих древесный уголь делится на два класса (табл. 5.12). Размер кусков древесного угля, применяемого для [газогенераторов](#) поперечного процесса газификации, должен быть в пределах 6–20 мм, для других типов [газогенераторов](#) – 21–40 мм.

Древесный уголь должен быть расфасован в бумажные крафт-мешки. При хранении древесный уголь должен быть обязательно защищен от атмосферных осадков (дождя, воды, снега) и от пыли.

Если принять стоимость угля, полученного в стационарных печах, за 100%, то стоимость угля, полученного в переносных печах, составит 137%, а в кострах – 250%.

Таблица 5.12

Классы древесного угля

Компоненты	Класс углей	
	1-й	2-й
Летучие вещества, %	8–12	13–25
Влага W^p	12	12
Зола A^p	3	3
Мелочь	5	5
<p><i>Примечание.</i> Мелочью считается уголь размером для мелкого угля менее 6 мм, а для крупного – менее 20 мм.</p>		

Особенно выгодно использование отходов металлургического древесного угля (размером менее 25 мм). Их стоимость составляет не более 20–25% стоимости крупного древесного угля, получаемого в стационарных печах.

Древесноугольная мелочь может быть с успехом использована для изготовления брикетов. Обладая всеми положительными качествами кускового древесного угля, брикеты лишены его недостатков, так как они не гигроскопичны и более прочны. Большой удельный вес брикетов обеспечивает длительную работу [газогенераторного](#) автомобиля на одной заправке бункера.

Древесноугольные брикеты, изготовленные посредством перемешивания со смолой (связующий элемент), прессования, сушки и прокалки древесноугольной массы, должны иметь следующие показатели:

размеры брикета в мм:

диаметр 20–30

высота 15–20

зольность, %, не выше 5

абсолютная влажность, % ...4–8

содержание смолы, %, не выше 0,6–0,8

содержание летучих, % 12–15

удельный вес, г/см³ 0,65–0,75

гигроскопичность (по количеству влаги, поглощаемой брикетом при погружении

в воду на 24 часа), %.....10

механическая прочность:

разрушающая нагрузка в кг/см² 40–80

Биореакторы — это приборы для оптимального культивирования и функционирования микроорганизмов. Биореакторы для получения водорода из микроорганизмов считаются большинством исследователей абсолютно необходимыми для промышленного получения водорода из водорослей и бактерий

6. Производство [биоводорода](#) с помощью микроорганизмов

Микроскопические водоросли и бактерии выделяют молекулярный водород, используя для этого неорганические вещества, например воду, или органические вещества, например сахар. Получение водорода с помощью водорослей и бактерий может найти практическое применение в ближайшем будущем, однако в настоящее время наиболее перспективные способы производства водорода из микроорганизмов находятся на стадии экспериментальных разработок. Рассмотрим некоторые из этих способов.

Биологическое производство водорода имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами получения водорода. Оно требует небольших водоемов или простых устройств – [фотобиореакторов](#), которые могут быть простым прозрачным баком или пластиковыми трубками. [Биореакторы](#), основанные на брожении или шифт-реакции, могут быть использованы уже сегодня. Другое преимущество биологического производства водорода – это низкие энергетические затраты, особенно при производстве из водорослей и бактерий, использующих солнечный свет как источник энергии. Технология получения водорода, основанная на солнечной энергии, может быть внедрена в практику, если найти путь эффективного использования солнечного света водорослями и бактериями. Потенциально фотосинтетические водоросли и бактерии могут превращать солнечную энергию в энергию водорода с 30–40% эффективности. Однако в настоящее время максимальная эффективность конверсии солнечной энергии в водород водорослями, описанная в литературе, была 24%. Тем не менее, это намного больше эффективности концентрации солнечной энергии в другие биологические топлива, основанные на [фотосинтезе](#), такие как биоэтанол и биодизель (в настоящее время меньше 4%). В связи с этим Национальный научный совет США советует скорректировать национальную исследовательскую программу по биологическим топливам, с тем чтобы больше времени и ресурсов уходило на фундаментальные исследования в области выделения водорода водорослями и бактериями, основанного на [фотосинтезе](#).

6.1. Получение водорода из воды с помощью [фотосинтеза](#)

Получение водорода из воды возможно с помощью фотосинтетических микроорганизмов. В определенных условиях микроскопические зеленые водоросли и цианобактерии могут выделять молекулярный водород в фотосинтетических реакциях, используя воду и солнечный свет как источник энергии. Получение водорода из воды водорослями и цианобактериями под действием солнечного света – наиболее перспективный метод, так как запасы воды и солнечной энергии практически неисчерпаемы и возобновляемы.

Как зеленые водоросли, так и цианобактерии используют фотосинтетический аппарат для выделения водорода. [Фотосинтез](#) – это комплекс биохимических реакций для конверсии солнечной энергии в химическую энергию органических веществ, таких как углеводы. В процессе [фотосинтеза](#) электроны из воды переносятся на углекислый газ, который превращается в углеводы. В безвоздушных условиях (без углекислого газа, кислорода и азота) зеленые водоросли и цианобактерии переносят электроны на протоны и выделяют молекулярный водород. Впервые способность к выделению водорода зелеными водорослями была обнаружена Гаффроном и Рубиным около 65 лет назад. В течение долгого времени способность к выделению водорода зелеными водорослями рассматривалась как не имеющая особой практической значимости, так как большинство водорослей выделяли водород в меньшем количестве, чем другие микроорганизмы. Наиболее изученной водорослью среди выделяющих водород является *Chlamydomonas reinhardtii* – эта одноклеточная водоросль удваивает биомассу в течение 6 ч и широко используется в исследовательских лабораториях для изучения различных аспектов [фотосинтеза](#) в качестве модельной

системы. Фермент гидрогеназа катализирует производство водорода у зеленых водорослей согласно уравнению



Выделение водорода водорослями регистрируется только при отсутствии кислорода (анаэробных условиях). Чтобы получить водород из зеленых водорослей, их клетки нужно поместить в атмосферу инертного газа, например аргона, или в атмосферу молекулярного азота, или в условия частичного вакуума. К тому же нужно постоянно удалять кислород, который выделяется водорослями в процессе [фотосинтеза](#).

Ведутся работы по получению мутантов зеленых водорослей нечувствительных или мало чувствительных к кислороду. Так, удалось получить мутант 330% менее чувствительных к кислороду, повысить скорость и продолжительность выделения водорода. Последние достижения вызвали большой интерес в мире к зеленым водорослям как источнику [биоводорода](#). Водоросли выделяют водород со скоростью от 4,0 до 5,5 мл/ч на грамм сухой клеточной биомассы (табл. 6.1).

Таблица 6.1

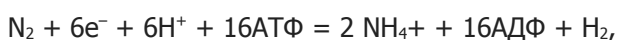
Образование водорода водорослями и бактериями

Микроорганизм	Скорость выделения водорода, мл/(час·г сухой биомассы)
Зеленые водоросли	до 5,5
Цианобактерии	до 40
Бактерии осуществляющие брожение	до 400
Пурпурные бактерии	до 700

Образование водорода клетками цианобактерий было впервые показано в 1973 г. Цианобактерии по строению клеток и на молекулярном уровне являются типичными бактериями. Однако их кислородовыделяющий [фотосинтез](#) типичен для водорослей, и поэтому цианобактерии также известны под названием сине-зеленых водорослей. Для поддержания культур цианобактерий требуется меньше питательных веществ по сравнению с зелеными водорослями; многие представители цианобактерий способны получать азот для построения клеточных компонентов из воздуха. Однако растут они намного медленнее зеленых водорослей, таких как *Chlamydomonas*. Для выделения водорода цианобактерии используют два фермента: нитрогеназу и гидрогеназу.

Исследования по изучению выделения водорода зелеными водорослями считаются в настоящее время наиболее перспективными.

Нитрогеназа катализирует следующую реакцию:



где АТФ – аденозинтрифосфорная кислота; АДФ – аденозиндифосфорная кислота.

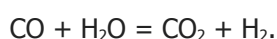
Основная функция этой реакции – ассимиляция молекулярного азота из воздуха, а водород выделяется циано-бактериями как сопутствующий продукт. Как и гидрогеназа, фермент нитрогеназа очень чувствителен к кислороду. У цианобактерий, которые используют этот фермент, нитрогеназа находится в специализированных клетках

– гетероцистах – и защищена от ингибирующего воздействия кислорода. Описанные свойства делают гетероцистные цианобактерии единственными организмами, способными выделять водород в присутствии молекулярного кислорода в воздушной атмосфере.

Другой фермент, ответственный за выделение водорода у цианобактерий, – это так называемая обратимая (двухсторонняя) гидрогеназа, которая может катализировать также и поглощение водорода. Способность цианобактерий к выделению водорода, катализируемая только гидрогеназой, изучена слабо. Большинство исследований посвящено выделению водорода с помощью нитрогеназы у содержащих гетероцисты цианобактерий. Изучалась способность многочисленных видов и штаммов цианобактерий к выделению водорода. Скорость производства водорода варьируется в пределах 10–40 мл/ч на грамм сухой клеточной биомассы (см. табл. 6.1). По сравнению с зелеными водорослями вода, однако, вовлечена в производство водорода у гетероцистных цианобактерий через серию промежуточных реакций. Недостатком водородовыделяющих систем, основанных на гетероцистных цианобактериях, является то, что они тратят много клеточной энергии на этот процесс. Таким образом, катализируемое нитрогеназой выделение водорода является очень энергозависимым процессом. С этой точки зрения более перспективным было бы использование цианобактерий, не содержащих гетероцист, которые могут использовать для выделения водорода только гидрогеназу, не потребляя при этом огромного количества энергии. Однако широкое использование цианобактерий без гетероцисты для выделения водорода упирается в ту же проблему чувствительности гидрогеназы к кислороду, что и у зеленых водорослей.

6.2. Получение водорода путем конверсии монооксида углерода

Получение водорода путем конверсии оксида углерода основано на уникальной реакции, найденной Уффеном у фотосинтетической пурпурной бактерии. Пурпурные бактерии – это одноклеточные микроорганизмы своеобразной розовой или красной окраски, связанной с наличием у них пигментов [фотосинтеза](#). Культуры штамма пурпурной бактерии, описанной Уффеном, выделяют водород в результате так называемой шифт-реакции (реакции конверсии) согласно уравнению



Образование водорода в этом случае происходит из воды, что было показано в опытах с использованием тяжелой воды. В отличие от цианобактерий и водорослей пурпурные бактерии не используют для разложения воды солнечную энергию, и показанная выше реакция идет в темноте. Большим преимуществом по сравнению с подобной же химической реакцией, которая требует высоких температур и нескольких стадий, является то, что эта реакция происходит при комнатной температуре в одну стадию. Выделение водорода катализируется двумя ферментами: гидрогеназой и специфической СО-гидрогеназой, работающими вместе.

Многочисленные штаммы пурпурных бактерий были выделены в чистую культуру в Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии в США и исследованы на выделение водорода. Скорости выделения водорода этими бактериями варьируются от 140 до 700 мл/ч на грамм сухой клеточной биомассы (см. табл. 6.1).

Существует ряд проблем на пути практического применения шифт-реакции, например токсичность монооксида углерода. Потребность в достаточно большом количестве СО при практическом применении этой реакции для промышленного получения водорода может стать другой проблемой. В настоящее время предполагаемым источником СО представляется газ, получаемый путем термической газификации биомассы и содержащий большое количество монооксида углерода.

6.3. Получение водорода методом брожения органических веществ

Получение водорода возможно на основе брожения. Многие бактерии могут выделять водород в результате брожения, используя для этого органические соединения, например сахар. Бактерии, выделяющие водород, найдены среди представителей 25% родов бактерий, представленных в последнем издании определителя бактерий Берги. Способность бактерий выделять водород известна еще с XIX в. Гидрогеназа катализирует этот процесс. Скорости образования водорода бактериями, осуществляющими брожение (до 400 мл/ч на грамм сухой клеточной биомассы), намного выше по сравнению со скоростями образования водорода фотосинтетическими микроорганизмами (см. табл. 6.1). Однако эффективность образования водорода при брожении невысока – обычно 20–30% энергии, заключенной в используемом органическом веществе. Наряду с выделением водорода при сбраживании сахара происходит образование других продуктов, например уксусной кислоты. В этих продуктах и остается остаток невысвобожденной энергии. К тому же стоимость органических веществ – исходных продуктов для выделения водорода, таких как сахар или крахмал, – относительно высока, и количество их для промышленного производства недостаточно.

Определенный интерес в прикладном плане представляют бактерии, способные расти в дешевых органических средах, включая бытовые и сельскохозяйственные отходы. Можно, например, сочетать генерацию водорода с очисткой сточных вод, которые содержат большое количество органических веществ, подходящих для брожения. Обычно конечный продукт такого брожения – метан, выделяемый архибактериями. Образование метана идет через стадию образования водорода. Теоретически можно остановить процесс на уровне водорода. Установки для образования метана уже действуют в некоторых странах, например, в США, Китае и Индии. Их можно будет использовать и для получения водорода. Проблема здесь – неэффективность сбраживания органического вещества сточных вод в водород. Только малая часть энергии, заключенной в органических веществах, высвобождается при этом процессе по сравнению с 80–90% энергии при образовании метана. Повышение выхода энергии при выделении водорода из сточных вод потребует больших исследовательских усилий. Другой проблемой при массовом производстве водорода может стать ограниченное количество сточных вод.

В качестве сырья для брожения можно также использовать целлюлозу. Некоторые бактерии способны сбраживать это вещество, составляющее основу клеточных стенок растений. Целлюлоза – самое распространенное органическое вещество на планете. К сожалению, эффективное сбраживание целлюлозы представляет еще большую проблему по сравнению со сточными водами.

В этом плане более выгодным кажется производство водорода в виде сопутствующего продукта при получении высокоценных и требуемых в больших количествах веществ. Водород может быть получен, например, при производстве уксусной кислоты. Еще более перспективным может стать использование пурпурных фотосинтетических бактерий для получения водорода из органических соединений в результате так называемого фотоброжения. Некоторые органические соединения могут разлагаться пурпурными бактериями в присутствии света с полным высвобождением энергии. Единственными продуктами такого метаболизма являются только H_2 и CO_2 .

Недавно был предложен еще один альтернативный способ получения водорода при совместном использовании водорослей и бактерий. Предполагаемый процесс основан на использовании водорослей, выращиваемых в прудах для получения из них крахмала. Этот крахмал предполагается затем использовать для производства водорода при бактериальном брожении. Для этого процесса могут быть испытаны термостабильные бактерии, эффективность образования водорода при брожении которых может составлять до 83% энергии, заключенной в используемом органическом веществе. Предложенный альтернативный процесс не ингибируется кислородом (не использует чувствительную к кислороду гидрогеназу водорослей) и не представляет никакой опасности для людей (как в случае CO – шифт-реакции).

6.4. Технологическое оборудование для получения **биоводорода**

Биореакторы для получения водорода из микроорганизмов считаются большинством исследователей абсолютно необходимыми для промышленного получения водорода из водорослей и бактерий, поэтому проектирование **биореакторов** началось с момента обнаружения выделения водорода этими организмами. **Биореакторы** – это приборы для оптимального культивирования и функционирования микроорганизмов (или выделения водорода микроорганизмами). Водоросли и бактерии, особенно фотосинтетические, в большом количестве можно выращивать в открытых водоемах. В таких условиях можно получать достаточное для выделения водорода количество организмов, однако очень трудно контролировать рост водорослей или бактерий. Водоемы могут, например, быть загрязнены другими микроорганизмами, не выделяющими водород. Для получения водорода были испытаны несколько типов **биореакторов**.

Эти биореакторы могут быть разделены на две группы на основе природы реакции выделения водорода:

- **фотобиореакторы** с использованием цианобактерий и зеленых водорослей для фотовыделения водорода;
- **биореакторы**, использующие процессы брожения или конверсии оксида углерода для выделения водорода бактериями.

Фотобиореакторы (до сих пор только лабораторные) в виде плоских закрытых бутылок использовали для зеленых водорослей. Для цианобактерий наиболее практичны трубчатые **фотобиореакторы**. Так, **фотобиореактор** для выделения водорода из мутанта цианобактерий *Anabaena variabilis* состоит из прозрачной поливинилхлоридной трубки (42 м длиной, диаметром 7,9 мм), закрученной спиралью вокруг вертикального пластикового прозрачного цилиндра. Это так называемый трубчатый спиральный **фотобиореактор**. Объем **фотобиореактора** 2 л, высота 0,4 м. Через **фотобиореактор** пропускается под давлением смесь воздуха и углекислого газа (до 5%) для снабжения цианобактерий углеродом и отделения водорода. Скорость выделения водорода в таком **фотобиореакторе** достигала 19 мл $\text{H}_2/\text{м}^2$ в час при освещении флуоресцентной лампой с интенсивностью 3 Вт/м². **Фотобиореактор** был испытан также при естественном освещении и в естественных температурных условиях в теплице.

Другой трубчатый **фотобиореактор** был построен на открытом воздухе на Гавайских островах. **Фотобиореактор** располагался на поставленной под углом 10° платформе и состоял из 20 метровых пластиковых труб диаметром 3,8 см и общим объемом до 230 л. Через **фотобиореактор** пропусклась смесь воздуха и углекислого газа. Подобные **фотобиореакторы** для выращивания водорослей и бактерий объемом до 10000 л строили в Советском Союзе в 80-х гг. на базе Института биотехники в Москве и Узбекистане. Недостаток такого **фотобиореактора** в том, что нужно много пространства для его установки.

Традиционные ферментеры, так называемые **биореакторы-баки**, используемые, например, при пивоварении, обычно применяются для получения водорода в экспериментальных установках при использовании брожения. **Биореакторы** с полыми волокнами были успешно испытаны для получения водорода бактериями при использовании шифт-реакции. Полые волокна сделаны из полупроницаемой мембраны. Небольшие молекулы и газы свободно проходят через мембрану полых волокон, клетки же из-за своих размеров не могут пройти через мембрану. Таким образом, **биореакторы** с полыми волокнами позволяют быстро отделять водород от клеточной суспензии. Бактериальные клетки растут на полых волокнах. Такие клетки называются иммобилизованными. Многие водоросли и бактерии существуют в природе в иммобилизованном состоянии, на частичках почвы или в симбиозе с другими организмами. Считается, что иммобилизация повышает физиологические функции водорослей и бактерий. **Биореактор**, который успешно использовался для шифт-реакции, состоял из пластиковой колонки (Asahi Medical CO., Япония) с полыми волокнами 180 мкм диаметром. Объем колонки **биореактора** 48 мл, а общая площадь полых волокон 0,8 м². Большая разница между поверхностью и объемом **биореактора** позволяла построить компактную систему с высокой плотностью клеток внутри. **Биореактор** был построен так, что CO и питательная среда с помощью насоса поступали из внутреннего пространства волокон наружу внутри

колонки [биореактора](#). Бактерии были иммобилизованы на внешней стороне полых волокон. Выделение водорода со средней скоростью 125 мл/ч на грамм сухой клеточной биомассы (максимальная скорость 700 мл/ч на грамм сухой клеточной биомассы) наблюдалась более 8 месяцев. Водород (20% H₂ в атмосфере CO₂), полученный в [биореакторе](#) с полыми волокнами, после удаления углекислого газа можно было непосредственно использовать в топливных элементах.

7. Анализ эффективности применения в дизелях топлив из возобновляемых источников с учетом полного жизненного цикла

По мере истощения запасов нефти и природного газа все большее внимание привлекают к себе [возобновляемые источники энергии](#). В двигателях внутреннего сгорания могут использоваться различные биотоплива, в том числе получаемые на основе [растительных масел](#) или их производных. Такие смесевые топлива получили название биодизельных. [Биодизельное топливо](#) обладает целым рядом преимуществ в сравнении с дизельным топливом (ДТ) нефтяного происхождения: оно имеет более высокое цетановое число, исключительно низкое содержание серы в топливе, безвредно для окружающей среды, снижает выбросы CO, CH и дисперсных частиц при работе дизеля, снижает выбросы [парниковых](#) газов (с учетом поглощения CO₂ из атмосферы в период роста биомассы).

Однако следует учитывать комплексные затраты и возможные негативные эффекты при производстве такого вида топлива с учетом затрат энергии, выбросов вредных веществ и экономики использования этого вида альтернативных топлив. Такой подход к анализу получил название оценки эффективности применения биотоплив в полном жизненном цикле.

7.1. Методика оценки эффективности топлива в полном жизненном цикле

Проведем анализ несколько вариантов топлив: смесевых топлив, содержащих различное количество биодобавок, и биодизельного топлива в чистом виде. В рассмотрение включены два вида биотоплив, потенциально применимых в условиях Российской Федерации: из рапсового и соевого масла (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Варианты топлив для проведения анализа жизненного цикла

Вариант топлива	Обозначение
Смесь 20% биодизельного топлива (соя) и 80% ДТ	Б20 (соя)
Смесь 50% биодизельного топлива (соя) и 50% ДТ	Б50 (соя)
Чистое Биодизельное топливо из сои	Б100 (соя)
Смесь 20% биодизельного топлива (рапс) и 80%	Б20 (рапс)

ДТ	
Смесь 50% биодизельного топлива (рапс) и 50% ДТ	Б50 (рапс)
Чистое <u>Биодизельное топливо</u> из рапса	Б100 (рапс)

На основании математической модели материальных и энергетических потоков, а также методик расчета ущерба, наносимого окружающей среде, и расчета экономической эффективности применения биотоплив были проведены расчеты показателей в полном жизненном цикле для всех выбранных вариантов. В ходе расчетов были определены: расход невозобновляемых природных ресурсов; расход энергии; выброс вредных веществ в атмосферу; ущерб, наносимый окружающей среде; экономические затраты на реализацию жизненного цикла топлива.

Все представленные ниже результаты оценки полного жизненного цикла отнесены на 1 кВт·ч работы, производимой дизелем, для удобства сравнения вариантов.

Принято, что дизель, рассматриваемый в ходе данного анализа, удовлетворяет требованиям норм Евро-2 для двигателей автомобилей полной массой более 3,5 т (Правила № 49 ЕЭК ООН), действующим в настоящее время в Российской Федерации. Показатели дизеля, работающего на дизельном топливе, представлены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Показатели дизеля при работе на дизельном топливе (по испытательному циклу в соответствии с Правилами 49 ЕЭК ООН), г/кВт·ч

Показатель	Величина	Показатель	Величина
Уд.расход топлива	240	Выброс PM	0,15
Выброс CO	4	Выброс SO ₂	0,12
Выброс CH	1,1	Выброс CO ₂	773,3
Выброс NO _x	7	Выброс CH ₄	0,025

При оценке стадии эксплуатации полного жизненного цикла использовались показатели двигателей в 13-ступенчатом испытательном цикле в соответствии с Правилами 49 ЕЭК ООН. Было принято, что при конвертации двигателей для работы на биотопливах обеспечивалась такая же мощность на режимах испытательного цикла, как и при работе на нефтяном топливе.

7.2. Результаты оценки эффективности применения топлив, получаемых их возобновляемых источников

Показатели силовых установок при использовании различных видов топлив в дизеле представлены в табл. 7.3. Показатели были получены на основе проведенных экспериментальных исследований и данных специальной литературы и заданы в процентах по отношению к дизелю (принятому за 100%), работающему на дизельном топливе.

Для расчета экономических показателей альтернативных топлив использовались следующие величины стоимости топлив (на 1.01.2007 г.), полученные на основе анализа рыночных цен: дизельное топливо – 17,4 руб./л, [Биодизельное топливо](#) – 10 руб./кг (8,8 руб./л).

В расчетах принято, что дизель работает на смесевых и чистых биодизельных топливах без какого-либо изменения конструкции и имеет тот же ресурс, что и при работе на дизельном топливе. Заправка осуществляется с использованием существующей инфраструктуры для дизельного топлива.

Таблица 7.3

Относительные показатели использования альтернативных топлив в дизеле

Характеристики вариантов	Б		Б		Б		Б	
	20 (соя)	50 (соя)	100 (соя)	20 (рапс)	50 (рапс)	100 (рапс)	Б	
КПД	100	100	100	100	100	100	100	
CO	78	87	65	91	87	75	55	
CH	98	72	44	87	76	77	33	
NO _x	101,2	103	106	101,5	103	106	101	
PM	28	70	45	88	75	75	55	
SO ₂	80	85	85	80	85	85	85	
CH ₄	100	100	100	100	100	100	100	

При расчетах не учитывались капиталовложения в развитие производственных мощностей по получению биотоплив.

В табл. 7.4 представлены результаты оценки полного жизненного цикла дизтоплива и биотоплив.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что наибольшее количество энергии расходуется при получении биодизельного топлива из соевого масла, что связано с более высокими затратами энергии на процесс выращивания биосырья. В то же время получение биотоплив связано с

M		,30	,26	,22	,15	,31	,32	,35
O ₂	S	1,23	1,05	0,77	0,27	1,01	0,66	0,04
O ₂	C	865,6	752,6	573,7	247,76	742,85	547,77	189,83
H ₄	C	0,74	0,76	0,78	0,82	0,61	0,41	0,04

Суммарные выбросы вредных веществ при переходе на биотоплива уменьшаются (на 17–18% на чистом биодизельном топливе), однако наблюдается некоторый рост выбросов оксидов азота.

Наибольший расход энергии наблюдается в полном жизненном цикле соевого биодизельного топлива, наименьший – дизельного топлива, т.е. применение биотоплив связано с увеличением суммарного расхода энергии из-за больших затрат энергии на стадии производства биотоплив в сравнении с дизтопливом.

Вклад стадии производства топлив в расход энергии за [полный жизненный цикл](#) находится на уровне 25% для дизельного топлива и возрастает по мере увеличения доли биодизельного топлива до 37% у топлива из соевого масла и 32% – из рапсового масла.

Выбросы CO₂ в полном жизненном цикле топлив в противовес расходу энергии тем меньше, чем выше доля используемого биотоплива. Применение биотоплив позволяет снизить выбросы диоксида углерода в 3,5–4,6 раза. Большее значение соответствует топливу, полученному из рапсового масла.

Ущерб от выброса вредных веществ уменьшается по мере увеличения доли используемого биотоплива и на чистом биодизельном топливе он на 15–16% ниже, чем при работе на дизтопливе. Такое относительно небольшое снижение ущерба связано с тем, что наряду с уменьшением выбросов продуктов неполного сгорания (CO, CH, частиц) при работе на биотопливах наблюдается увеличение выбросов оксидов азота.

Для удобства анализа полученных результатов диаграммы для расхода природных ресурсов, энергии, выбросов CO₂ и ущерба, наносимого окружающей среде, представлены в относительных единицах, где за 100% принято дизельное топливо (рис. 7.1).

Основные результаты расчетов экономических показателей альтернативных топлив в полном жизненном цикле представлены в табл. 7.5.

Анализ полученных результатов показывает, что применение биотоплив при цене 10 руб./кг является экономически эффективным и позволяет при переходе на чистое [Биодизельное топливо](#) снизить затраты

в полном жизненном цикле

с учетом ущерба на 40%. Некоторое отличие показателей при использовании биотоплив из соевого и рапсового масла связано с различной теплотой сгорания этих топлив, а следовательно, с различным их расходом в эксплуатации.

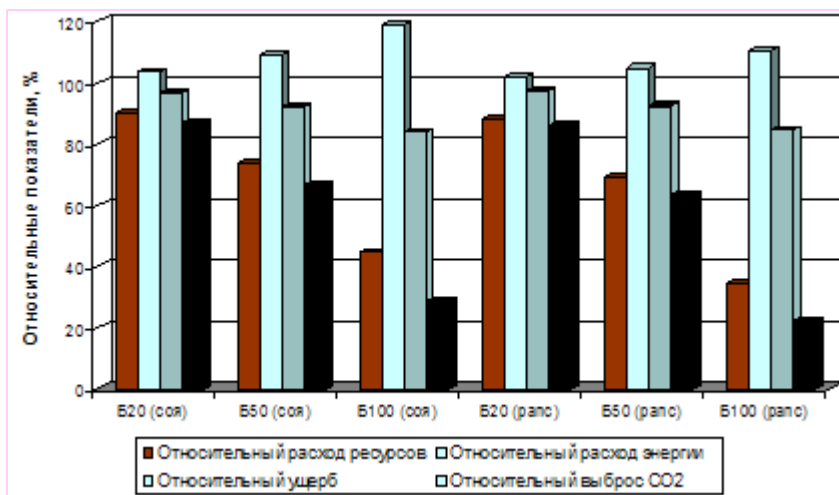


Рис. 7.1. Относительные показатели сравниваемых вариантов топлив (за 100% приняты показатели дизельного топлива)

Основные результаты энерго-эколого-экономического анализа топлив показывают, что применение биодизельного топлива в сравнении с дизельным топливом в полном жизненном цикле позволяет:

- снизить расход невозобновляемых природных ресурсов на 55–65%;
- уменьшить выбросы парниковых газов в 3,5–4,6 раза;
- снизить ущерб окружающей среде на 15–16%;
- уменьшить затраты с учетом ущерба на 40%.

Таблица 7.5

Результаты технико-экономической оценки биотоплив в полном жизненном цикле

Показатель	Т	Д	Б	Б	Б	Б	Б	Б
		20 (соя)	50 (соя)	100 (соя)	20 (рапс)	50 (рапс)	100 (рапс)	
Затраты за <u>полный жизненный цикл</u> , руб./кВт·ч	,87	,47	,84	,68	,48	,85	,70	
Ущерб от загрязнения окружающей среды, руб./кВт·ч	,08	,04	,99	,91	,05	,00	,92	
Затраты на ПЖЦ с учетом ущерба, руб./кВт·ч	,95	,51	,83	,59	,53	,85	,62	

В то же время применение биодизельного топлива связано с увеличением затрат энергии в полном жизненном цикле на 10–20% по сравнению с дизельным топливом.

8. оценка влияния физических показателей альтернативных топлив на характеристики впрыскивания и распыливания

Различие в физико-химических и теплотехнических свойствах альтернативных топлив и традиционных моторных топлив оказывает влияние на рабочий процесс двигателей внутреннего сгорания. Остановимся более подробно на рассмотрении вопроса, связанного с разработкой математической модели процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля жидких альтернативных топлив.

К физическим свойствам топлива, оказывающим влияние на динамику топливной струи и мелкость распыливания при прочих равных условиях, относятся вязкость, поверхностное натяжение и плотность. При повышении вязкости возрастает дальнобойность топливной струи, что уменьшает долю объемного смесеобразования и приводит к попаданию на стенки камеры сгорания большего количества топлива. С понижением вязкости топлива средний диаметр капель топлива уменьшается и становится более однородным распыл. Однако при этом угол рассеивания топливной струи увеличивается, а дальнобойность уменьшается. Чем выше поверхностное натяжение, тем более устойчива капля к воздействию внешних сил и тем больше ее размеры. Чем меньше поверхностное натяжение, тем тоньше и однороднее распыливание топлива, что способствует ускорению процессов смесеобразования и сгорания.

К физическим характеристикам топлива, оказывающим влияние на процессы его испарения и выгорания, можно отнести среднюю объемную температуру кипения по характеристикам разгонки топлива, критическую температуру и давление фазового перехода жидкого топлива в пар и др. С учетом отличия этих характеристик альтернативных топлив от характеристик дизельных топлив можно определить константу испарения топлива и по кинетическим уравнениям испарения и выгорания распыленного топлива рассчитать характеристики тепловыделения на участках впрыскивания, развитого диффузионного горения и догорания.

В связи со сложностью протекания физико-химических процессов в цилиндре дизеля теоретические соотношения, полученные на основании законов химической кинетики, необходимо дополнить эмпирическими коэффициентами, учитывающими особенности протекания процесса сгорания в цилиндре дизеля. Значения этих коэффициентов можно получить путем идентификации математической модели процесса сгорания альтернативных топлив по экспериментальным характеристикам тепловыделения. Это, безусловно, требует проведения экспериментальных исследований по оценке влияния характеристик альтернативных топлив на процессы смесеобразования и сгорания, а также показатели работы двигателя.

При создании и разработке математической модели смесеобразования и сгорания альтернативных жидких углеводородных топлив (метанол, этанол, [рапсовое масло](#), метилэфир рапсового масла и др.) могут быть применены математические выражения и критериальные зависимости, предложенные А.С. Лышевским и уточненные Н.Ф. Разлейцевым применительно к быстроходным форсированным дизелям. Далее приводится оценка возможности использования критериальных зависимостей для определения дальнобойности l_T топливного факела и угла раскрытия топливной струи γ_T , мелкости распыливания d_T применительно к жидким альтернативным топливам. В математических выражениях присутствуют такие физические параметры топлива, как плотность топлива ρ_T , динамическая вязкость μ_T и поверхностное натяжение σ_T . Для стандартного (летнего) дизельного топлива вышеуказанные параметры имеют такие значения:

$\rho_T = 860 \text{ кг/м}^3$;	$\mu_T = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$;	$\sigma_T = 28 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.
---------------------------------	---	---

При получении А.С. Лышевским критериальных зависимостей использовались данные опытов с жидкостями, для которых ρ_T , μ_T и σ_T изменялись в пределах:

$\rho_T = (0,4 \dots 0,89,7) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;	$\mu_T = (0,7 \dots 30,7) \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$;	$\sigma_T = (22 \dots 30,7) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.
---	--	--

Исходя из того, что для жидких альтернативных топлив ρ_T , μ_T и σ_T не выйдут за пределы крайних значений указанных величин (например, для рапсового масла $\rho_T = 915 \text{ кг/м}^3$; $\mu_T = 69 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$), можно сделать вывод о том, что характеристики впрыскивания и динамику развития струи можно рассчитывать по критериальным зависимостям А.С. Лышевского.

Рассматривая структуру выражений для определения величин l_T , γ_T , d_T , можно отметить, что при неизменных режимных, конструктивных и регулировочных параметрах двигателя значения величин ρ_{TA} , μ_{TA} и σ_{TA} претерпевают изменения (в случае применения альтернативных топлив).

Рассмотрим математические выражения, по которым определяются характеристика впрыскивания топлива и критериальные зависимости.

8.1. Влияние показателей топлива на дальность топливного факела

Средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива

$$U_0 = \frac{B_u}{\mu f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{впр}}, \quad (8.1)$$

где B_u – цикловая порция топлива; μf_c – площадь эффективного проходного сечения распыливающих отверстий; i_c – количество распыливающих отверстий; $\tau_{впр}$ – продолжительность впрыскивания порции топлива.

В формулах для расчета показателей струи распыленного топлива используются следующие критерии:

– критерий Вебера, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и инерции,

$$W_e = \frac{U_0^2 \cdot d_c \cdot \rho_T}{\sigma_T}; \quad (8.2)$$

– критерий M , характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости,

$$M = \frac{\mu_T^2}{\rho_T \cdot d_c \cdot \sigma_T}; \quad (8.3)$$

– отношение плотностей воздуха и топлива,

$$\rho = \frac{\rho_a}{\rho_T}, \quad (8.4)$$

где d_c – диаметр соплового отверстия форсунки; ρ_a – плотность воздуха в цилиндре двигателя.

Проведем оценку влияния физических параметров топлива на характеристики впрыскивания и распыливания, считая, что изменяются только физические параметры топлива (традиционного и альтернативного), а режимные, регулировочные и конструктивные параметры двигателя остаются без изменений.

Запишем выражение для расчета границы между начальным и основным участками развития струи

$$l_T = C_s \cdot d_c \cdot W_e^{0,25} \cdot \mu^{0,4} \cdot \rho^{-0,6}, \quad (8.5)$$

где $C_s = 8,85$ – эмпирический коэффициент.

$$l_T = C_s \cdot d_c \cdot (U_0^2 \cdot d_c \cdot \rho_T \cdot \sigma^{-1})^{0,25} \cdot (\mu_T^2 \cdot \rho^{-1} \cdot d_c^{-1} \cdot \sigma_T^{-1})^{0,4} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_T}\right)^{-0,4} \quad (8.6)$$

После ряда несложных преобразований получим выражение l_T функции величин ρ_T , μ_T и σ_T

$$l_T = A \cdot \rho_T^{-0,05} \cdot \sigma_T^{-0,65} \cdot \mu_T^{0,8} \quad (8.7)$$

где A – множитель, включающий в себя постоянные величины.

Аналогично (8.7) запишем выражение для альтернативного топлива

$$l_{T_A} = A \cdot \rho_{T_A}^{-0,05} \cdot \sigma_{T_A}^{-0,65} \cdot \mu_{T_A}^{0,8} \quad (8.8)$$

Разделив выражение l_{T_A} на l_T , получаем

$$\frac{l_{T_A}}{l_T} = A \cdot \left(\frac{\rho_{T_A}}{\rho_T}\right)^{-0,05} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_A}}{\sigma_T}\right)^{-0,65} \cdot \left(\frac{\mu_{T_A}}{\mu_T}\right)^{0,8} \quad (8.9)$$

Как видно из выражения (8.9), увеличение или уменьшение плотности топлива относительно стандартной величины практически не влияет на границу между начальным и основным участками развития струи. Увеличение поверхностного натяжения и уменьшение вязкости топлива без изменения прочих условий распыла приводит к приближению к распылителю границы участков. Основным фактором, влияющим на расположение границы между участками, является величина динамической вязкости топлива, так как ее значение в зависимости от вида топлива может изменяться в широком диапазоне (десятки раз), тогда как поверхностное натяжение изменяется в 1,3... 1,5 раза.

8.2. Влияние показателей топлива на время достижения факелом стенки камеры сгорания

Проведем оценку относительного времени достижения струей альтернативного топлива стенки камеры сгорания, для чего рассчитаем относительное время τ_{SA} / τ_S достижения струей альтернативного топлива стенки камеры сгорания. При проведении расчетов принимаем, что путь, проходимый струей традиционного и альтернативного топлива одинаков и равен расстоянию от распылителя форсунки до стенки камеры. Запишем выражение для определения дальности струи топлива на основном участке ее развития:

$$l_T = B_s^{0,5} \cdot \tau_s^{0,5} \quad (8.10)$$

$$B_s = \frac{d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16}}{D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho}$$

где

$D_s = 4... 5$ – коэффициент.

Время достижения топливной струей стенки камеры сгорания τ_s запишем следующим образом:

$$\tau_s = l_T^2 \cdot \frac{D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho}{d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16}} \quad (8.11)$$

После преобразований получим выражение

$$\tau_s = l_T^2 \cdot D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_T^{0,37} \cdot \sigma_T^{0,37} \cdot \mu_T^{-0,32} \quad (8.12)$$

Для альтернативного топлива

$$\tau_{s_A} = l_T^2 \cdot D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_{T_A}^{0,37} \cdot \sigma_{T_A}^{0,37} \cdot \mu_{T_A}^{-0,32} \quad (8.13)$$

Относительное время достижения вершиной струи топлива стенки камеры сгорания

$$\frac{\tau_{s_A}}{\tau_s} = \left(\frac{\rho_{T_A}}{\rho_T} \right)^{0,37} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_A}}{\sigma_T} \right)^{0,37} \cdot \left(\frac{\mu_{T_A}}{\mu_T} \right)^{-0,32} \quad (8.14)$$

Как видно из (8.14), по мере увеличения ρ_{TA} и σ_{TA} по сравнению с аналогичными величинами для летнего дизельного топлива и постоянном (мало изменяющемся) значении μ_{TA} увеличивается время прохождения топливной струей расстояния от распылителя форсунки до стенки камеры сгорания. Это приводит к увеличению количества испарившегося топлива в объеме камеры сгорания, что оказывает влияние на динамику тепловыделения в начальной фазе процесса сгорания и увеличению «жесткости» работы двигателя. Если величина динамической вязкости топлива значительно увеличивается (например, [рапсовое масло](#) $\mu_{TA} = 67 \cdot 10^{-3}$ Па·с, летнее дизельное топливо $\mu_T = 3,8 \cdot 10^{-3}$ Па·с) время τ_{sA} уменьшается в 2,5 раза, что в конечном итоге приводит к увеличению доли пленочного смесеобразования и «мягкой» работе двигателя. При этом рациональное проектирование формы камеры сгорания и впускных каналов позволит исключить возможное попадание топлива на относительно холодную поверхность днища головки цилиндра и интенсифицировать процессы смесеобразования.

8.3. Влияние показателей топлива на мелкость распыливания

Проведем оценку влияния физических параметров топлива на мелкость его распыливания. Критериальное уравнение для отыскания средних диаметров капель топливной струи записывается в следующем виде:

$$d_k = E_k \cdot d_c \cdot (\rho \cdot W_e)^{-0,266} \cdot M^{0,0733} \quad (8.15)$$

где E – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции форсунки и способа осреднения размеров капель.

В связи с тем, что конструкция форсунки остается неизменной при переходе на альтернативное топливо, коэффициент E не изменяется.

Раскроем составляющие уравнения (8.15) для отыскания среднего диаметра капель традиционного топлива

$$\begin{aligned} d_k &= E_k \cdot d_c \cdot \left[\frac{\rho_v}{\rho_T} \cdot \left(\frac{B_c}{\mu f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{впр}} \right)^2 \cdot d_c \cdot \frac{\rho_T}{\sigma_T} \right]^{-0,266} \cdot (\mu_T^2 \cdot \rho_T^{-1} \cdot d_c^{-1} \cdot \sigma_T^{-1}) \\ &= D \cdot \rho_T^{0,4587} \cdot \sigma_T^{0,1927} \cdot \mu_T^{0,1466} \quad (8.16) \end{aligned}$$

где B – константа, включающая в себя все величины, неизменные для разных видов топлива.

Уравнение для расчета среднего диаметра капель альтернативного топлива

$$d_{k_A} = D \cdot \rho_{T_A}^{0,4587} \cdot \sigma_{T_A}^{0,1927} \cdot \mu_{T_A}^{0,1466} \quad (8.17)$$

Относительное изменение диаметра капель при переходе от традиционного топлива к альтернативному

$$\frac{d_{кА}}{d_к} = \left(\frac{\rho_{кА}}{\rho_к} \right)^{0,4587} \cdot \left(\frac{\sigma_{кА}}{\sigma_к} \right)^{0,1927} \cdot \left(\frac{\mu_{кА}}{\mu_к} \right)^{0,1466} \quad . (8.18)$$

Как видно из выражения (8.18), на диаметр капель оказывают влияние плотность, поверхностное натяжение и вязкость топлива. По мере увеличения $\rho_{ТА}$, $\sigma_{ТА}$ и $\mu_{ТА}$ (переход к более тяжелым и вязким топливам) средний диаметр капель возрастает. При применении в качестве топлива рапсового масла средний диаметр капли топлива увеличивается в 1,6 раза (по сравнению с летним дизельным топливом). Некоторое увеличение дальности топливной струи (за счет роста диаметра капель) несколько компенсирует ухудшение процессов испарения и смесеобразования более крупных капель топлива.

8.4. Влияние показателей топлива на угол раскрытия топливного факела

Проведем оценку угла раскрытия топливной струи. Наиболее интенсивно идут процессы испарения и смесеобразования распыленного топлива на основном участке развития струи (при малоизменяющемся угле раскрытия струи возрастает ее боковая поверхность по мере удаления от распылителя форсунки).

Критериальное уравнение определения угла раскрытия топливной струи на основном участке

$$\gamma_T = 2 \arctg \left(F_s \cdot W_e^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot \rho^{0,5} \right), \quad (8.19)$$

где $F_s = 0,009$ – постоянный коэффициент.

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_T}{2} \right) = F_s \cdot W_e^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot \rho^{0,5} \quad . (8.20)$$

Раскроем составляющие уравнения (8.20):

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_T}{2} \right) = F_s \cdot \left[\left(\frac{B_c}{\mu f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{\text{впр}}} \right)^2 \cdot d_c \cdot \frac{\rho_T}{\sigma_T} \right]^{-0,32} \cdot \left(\mu_T^2 \cdot \rho_T^{-1} \cdot d_c^{-1} \cdot \sigma_T^{-1} \right)^{-0,07} \cdot \left(\frac{\rho_6}{\rho_T} \right)^{0,5} \quad . (8.21)$$

После преобразований получим следующее уравнение:

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_T}{2} \right) = F_s \cdot C \cdot \mu_T^{-0,14} \cdot \rho_T^{-0,75} \cdot \sigma_T^{-0,25} \quad , (8.22)$$

где C – константа, включающая в себя все величины, неизменные для различных топлив.

Аналогично для струи альтернативного топлива запишем

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\gamma_{ТА}}{2} \right) = F_s \cdot C \cdot \mu_{ТА}^{-0,14} \cdot \rho_{ТА}^{-0,75} \cdot \sigma_{ТА}^{-0,25} \quad . (8.23)$$

Относительное изменение угла рассеивания топливной струи при переходе от традиционного топлива к альтернативному

$$\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_{T_A}}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_T}{2}\right)} = \left(\frac{\rho_{T_A}}{\rho_T}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_A}}{\sigma_T}\right)^{-0,25} \cdot \left(\frac{\mu_{T_A}}{\mu_T}\right)^{-0,14} \quad . (8.24)$$

При впрыскивании в цилиндр двигателя, например, вязкого рапсового масла угол рассеивания топливной струи и ее боковая поверхность уменьшается, что приведет к уменьшению количества испарившегося топлива за [период задержки воспламенения](#) и более «мягкой» работе двигателя. Уменьшение угла рассеивания топливной струи позволит увеличить число сопловых отверстий и интенсифицировать «закрутку» воздушного заряда, что в конечном итоге положительно отразится на топливной экономичности двигателя.

9. Особенности протекания процесса смесеобразования и сгорания альтернативного топлива в дизеле

Процесс сгорания топлива в дизеле с преимущественно объемным смесеобразованием, в том числе и получаемого из воспламеняемых источников, может быть представлен как совокупность следующих основных процессов.

9.1. Современные представления о феноменологии смесеобразования и сгорания в дизеле

С начала впрыскивания топлива в камеру сгорания (рис. 9.1) происходит развитие топливного факела. Этот процесс носит ярко выраженный турбулентный характер с вероятностной составляющей распределения концентрации топлива в локальных объемах. Однако, проведя усреднение с линейным размером, превышающим характерный размер турбулентных пульсаций, можно рассматривать изменение концентрационных полей как монотонное. При этом концентрация топлива в факеле максимальна на его оси, снижаясь к периферийным зонам. В этом случае топливный факел можно представить состоящим из вложенных друг в друга поверхностей с равным соотношением топлива и воздуха. Текущая площадь одной из поверхностей, на которой топливо и воздух находятся в стехиометрическом соотношении ($\alpha = 1$), равна $F(\tau)$.

С обеих сторон этой поверхности (рис. 9.1, б) со скоростью смешения $W_{см}(\tau)$ формируется объем факела с топливовоздушной смесью, лежащей в концентрационных пределах горения ($\alpha_{нкл} < \alpha < \alpha_{вкл}$). Процесс смешения можно рассматривать как [взаимодиффузию топлива и воздуха через изостехиометрическую поверхность](#).

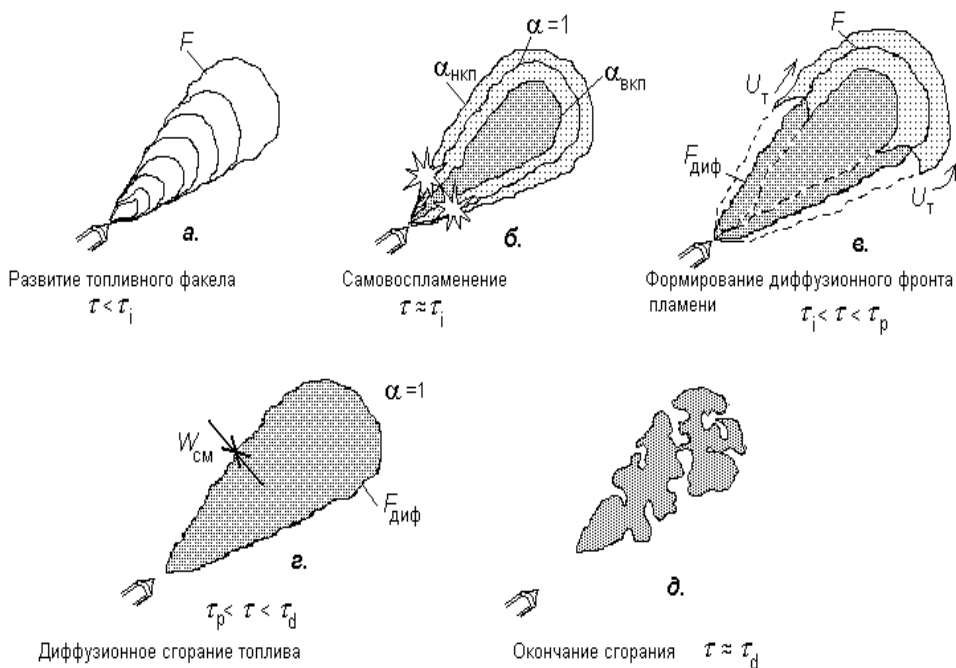


Рис. 9.1. Феноменологическая модель сгорания топлива в дизеле при объемном смесеобразовании

Образовавшаяся топливоздушная смесь может выгорать двумя способами: объемным сгоранием и путем нормального распространения пламени. Объемное сгорание характерно для больших периодов задержки воспламенения (пуск, холостой ход, малые нагрузки), когда неравномерность распределения температуры подготовленной к сгоранию смеси выравняется и процесс сгорания начинается практически одновременно во множестве микрообъемов. При малых периодах задержки воспламенения (режимы максимального крутящего момента и номинальной мощности) условия самовоспламенения микрообъемов смеси значительно различаются, и характерным является возникновение первичного очага горения.

Следует отметить, что эти два способа, математически могут быть описаны единой функцией, определяющей или относительный объем выгоревшей смеси, или относительную долю поверхности, охваченной пламенем.

Рассмотрим в качестве примера механизм распространения пламени. В момент времени t_1 образуется первичный очаг воспламенения (рис. 9.1, б), от которого пламя распространяется по всей поверхности топливного факела. Процесс распространения пламени идет со скоростью U_T (рис. 9.1, в). За фронтом турбулентного пламени в зонах, где смешанное с воздухом топливо выгорело, устанавливается фронт диффузионного пламени площадью $F_{\text{диф}}$. Скорость процесса формирования диффузионного фронта пламени может характеризовать относительная поверхность $F^* = F_{\text{диф}}/F$.

Процесс горения в первой стадии определяется скоростью турбулентного горения заранее подготовленной за период задержки воспламенения квазигомогенной смеси, поэтому данная стадия носит название кинетической, т.е. определяемой кинетикой химических реакций. Существуют и другие названия: стадия быстрого сгорания – так как ее продолжительность невелика и составляет 5–15 °ПКВ; неуправляемое сгорание – скорость не зависит от закономерностей топливоподачи; объемное сгорание – регистрируемое при малом временном разрешении, практически одновременный охват пламенем топливного факела; взрывное сгорание. Стадия заканчивается к моменту времени t_p , когда фронт диффузионного пламени сформируется на всей поверхности топливного факела.

Диффузионное горение (рис. 9.1, г) происходит на изостехиометрической поверхности раздела топлива и окислителя, а его скорость определяется скоростью взаимодиффузии паров топлива и воздуха $W_{\text{см}}(t)$. Поэтому данная стадия носит название диффузионной. Процесс горения заканчивается (рис.9.1, д) к

моменту времени τ_d , когда выгорит практически все топливо. Таким образом процесс сгорания топлива в дизеле происходит двумя способами, осуществляющимися определенное время совместно.

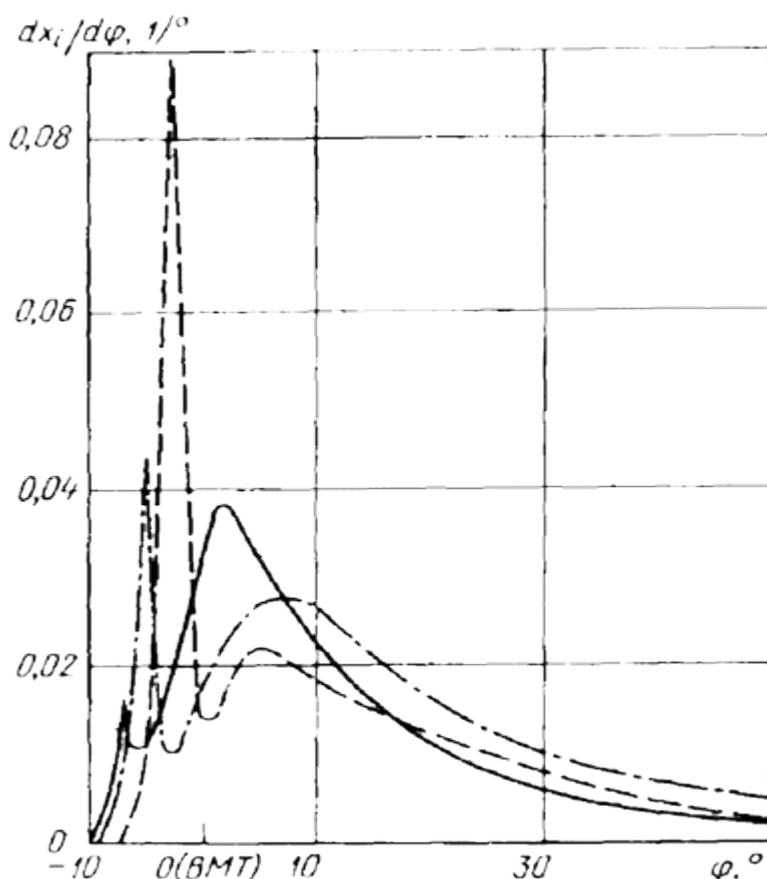


Рис. 9.2. Характер тепловыделения ($\alpha = 1,6$; $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$) в зависимости от типа смесеобразования в дизелях:

— Дойтц без наддува; - - - - КамаЗ без наддува;
 — · — КамаЗ с наддувом ($p_k = 0,163 \text{ МПа}$, $t_k = 66 \text{ °C}$)

Следует отметить, что реально в дизеле часть топлива при впрыскивании попадает на стенки камеры сгорания (и этот эффект, как правило, имеет место при применении альтернативных топлив, отличающихся своими физико-химическими свойствами от традиционных топлив). При этом механизм смесеобразования изменяется (происходит испарение топлива и диффузия паров из пристеночного слоя в объем камеры сгорания), и динамика выгорания топлива может сильно измениться. Это хорошо видно из графиков на рис. 9.2, где сравниваются скорости тепловыделения дизеля КамаЗ с преимущественно объемным и дизеля Дойтц с пристеночно-объемными типами смесеобразования.

9.2. Методы исследования самовоспламенения топлив биологического происхождения

Известно, что для характеристики склонности топлива к самовоспламенению используется показатель цетанового числа, от которого зависит длительность периода задержки воспламенения.

На [период задержки воспламенения](#) в дизеле существенно влияют такие внешние факторы, как температура и давление в цилиндре, зависящие от нагрузочного и скоростного режима, атмосферные условия и условия теплообмена, состав смеси, качество распыливания топлива, а также скорость предпламенных реакций. Вследствие этого для определения периода задержки воспламенения важно проводить эксперименты в сопоставимых условиях при контроле над внешними параметрами.

Для проведения таких опытов представляется целесообразным использовать установку ИДТ-69, предназначенную для оценки воспламеняемости дизельных топлив методом совпадения вспышек и обладающую всеми необходимыми компонентами для стабилизации внешних условий.

Установка (рис. 9.3) представляет собой стенд с одноцилиндровым вихрекамерным дизелем, электродвигателем для поддержания постоянной частоты вращения и осуществления пуска, пультом управления, подогревателем воздуха (на входе цилиндра) и масла (в картере) для поддержания постоянной температуры в процессе испытаний, холодильником термосифонно-испарительного типа (циркуляционный теплообмен происходит вследствие разности удельных весов жидкости, нагретой в рубашке цилиндра и охлаждаемой в холодильнике) и другими вспомогательными агрегатами. Преимущество использования этой установки состоит в возможности проведения контролируемого однофакторного эксперимента, в котором оценивается влияние только степени сжатия при постоянном угле опережения впрыскивания топлива и цикловой подаче топлива.

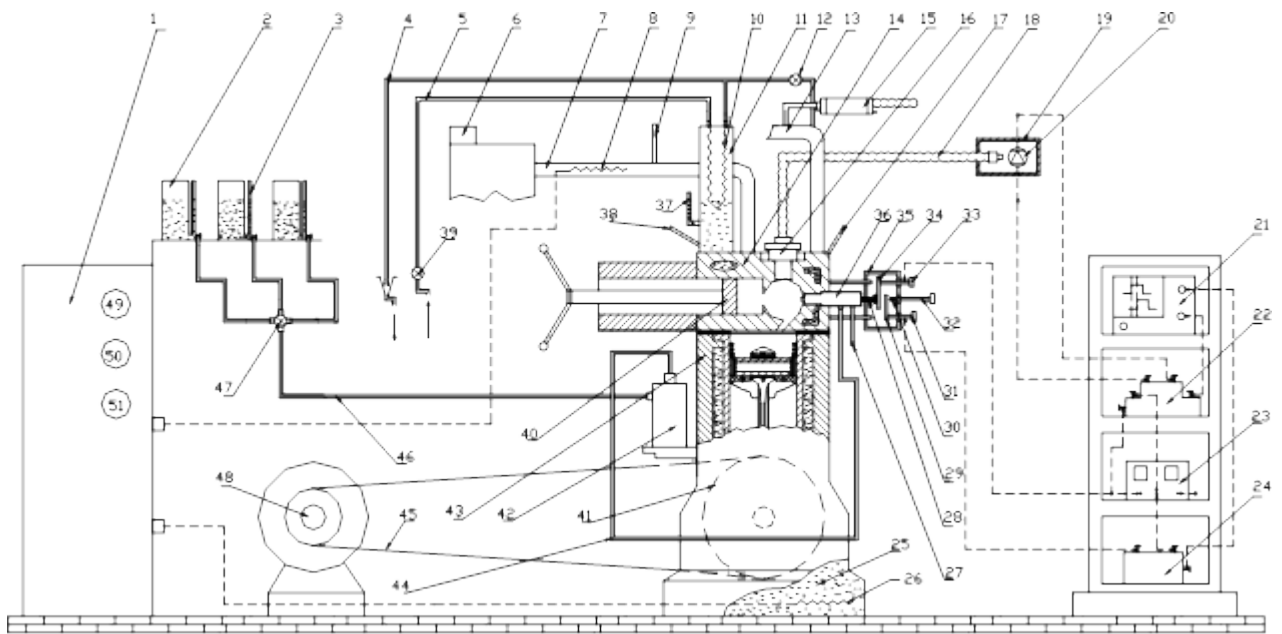


Рис. 9.3. Схема установки ИДТ-69

1 – пульт управления; 2 – топливный бак; 3 – расходомер топлива; 4 – сливной шланг воды; 5 – подводящий шланг воды; 6 – расходомер воздуха; 7 – впускной коллектор; 8 – подогреватель воздуха; 9; 17; 38 – термометр; 10 – змеевик; 11 – холодильник; 12 – кран для регулирования подачи воды к форсунке; 13 – выхлопная трубка; 14 – головка; 15 – дымометр; 16 – оптический датчик; 18 – световод; 19 – втулка; 20 – фотодиод; 21 – осциллограф; 22 – усилитель; 23 – блок питания; 24 – погаситель колебаний; 25 – подогреватель масла; 26 – картер; 27 – сливной кран форсунки; 28 – изолятор; 29; 34 – медная пластина; 30; 33 – клем и винт для регулирования зазора между пластинами; 35 – датчик хода иглы форсунки; 36 – штифтовая форсунка; 37 – расходомер воды; 39 – сливной кран воды; 40 – горизонтальный поршень; 41 – моховик; 42 – тнвд; 44 – линия высокого давления; 45 – ременная передача; 46 – линия низкого давления; 47 – кран; 48 – электродвигатель; 49 – манометр; 50 – реостат; 51 – термометр.

Однако при работе установки ИДТ-69 на рапсовом масле необходимо перерегулировать топливный насос высокого давления, для того чтобы получить одинаковое количество энергии при сгорании топлива с меньшей теплотворной способностью, так как теплота сгорания рапсового масла ниже, чем теплота сгорания дизельного топлива.

Для определения периода задержки воспламенения на установке ИДТ-69 необходимо было модернизировать систему измерения. Для этого датчик мембранного типа заменен системой регистрации продолжительности времени между началом подачи топлива и моментом вспышки. При этом момент

вспышки регистрируется оптическим методом по продолжительности времени между моментом начала подачи топлива и моментом начала вспышки. Предложенный метод определения периода задержки воспламенения на установке ИДТ-69 позволил увеличить точность эксперимента.

В датчике используется кварцевое стекло, имеющее низкий коэффициент расширения, за счет чего оно выдерживает высокую температуру, способствующую самоочищению его поверхности от нагара.

Определение периода задержки воспламенения на установке ИДТ-69 производится следующим образом: сигнал от датчика хода иглы форсунки 35 поступает на первый вход осциллографа 21 (см. рис. 9.3). Момент начала горения регистрируется фотодиодом 20, размещенным в оптической схеме световода 19, передающего излучение пламени. Излучение поступает через кварцевое стекло 9 (рис. 9.4), установленное в головке двигателя 14. Формируемый фотодиодом 20 и предварительно усиленный сигнал в усилителе 22 поступает на второй вход осциллографа 21. [Период задержки воспламенения](#) регистрируется непосредственно на экране осциллографа по смещению сигналов от датчиков хода иглы форсунки и фотодиода.

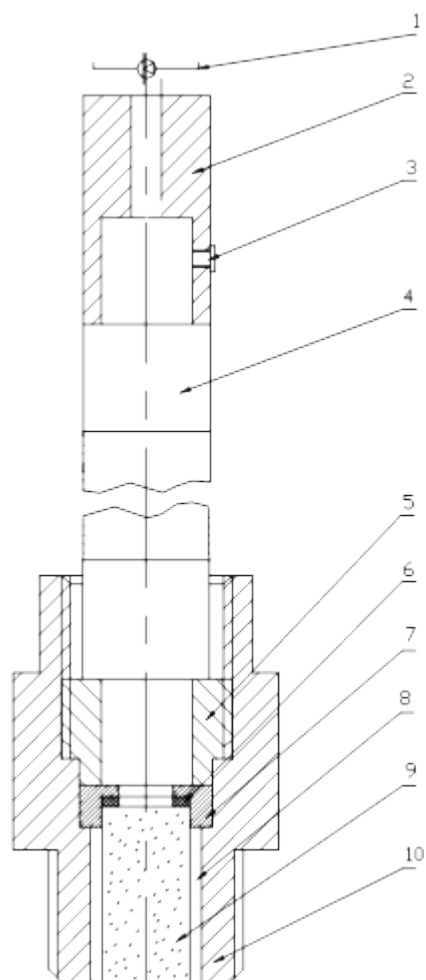


Рис. 9.4. Схема оптического датчика:

1 – фотодиод; 2, 5, 7 – втулка; 3 – винт; 4 – световод; 6 – прокладка; 8 – уплотнение; 9 – кварцевое стекло; 10 – корпус.

Результаты измерения периода задержки воспламенения для дизельного топлива и рапсового масла при $\theta_{впр} = 13$ °ПКВ до ВМТ, но при разных степенях сжатия представлены на рис. 9.5.

Результаты измерения периода задержки воспламенения для дизельного топлива и рапсового масла при $\varepsilon = 18$, но при разных углах опережения впрыскивания представлены на рис. 9.6.

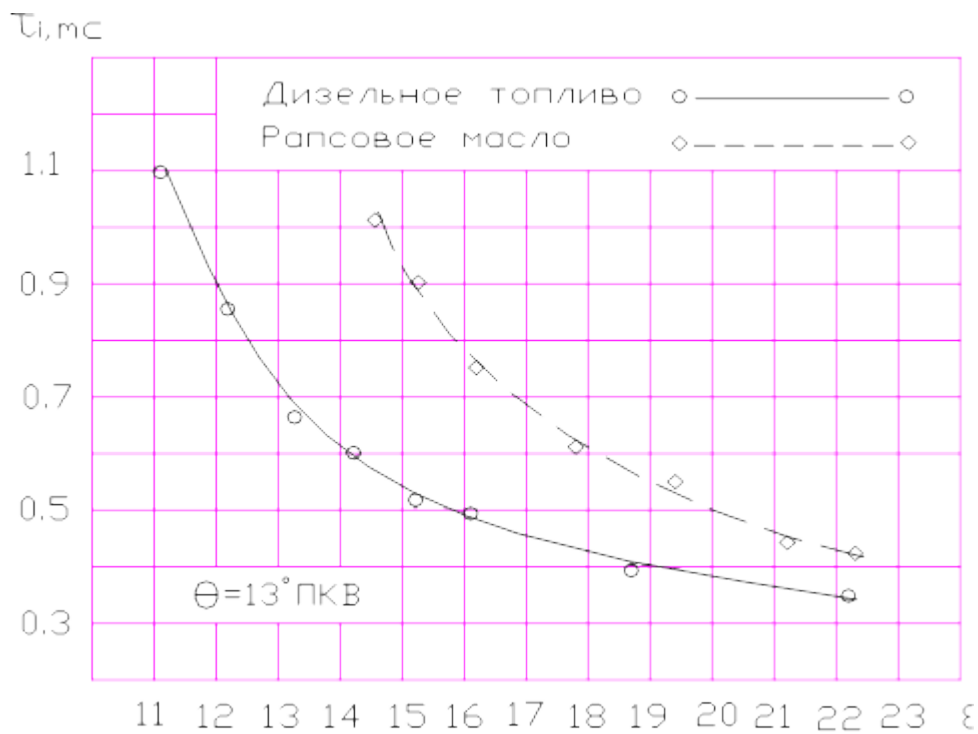


Рис. 9.5. Зависимость периода задержки воспламенения от степени сжатия ϵ , полученная на установке ИДТ-69

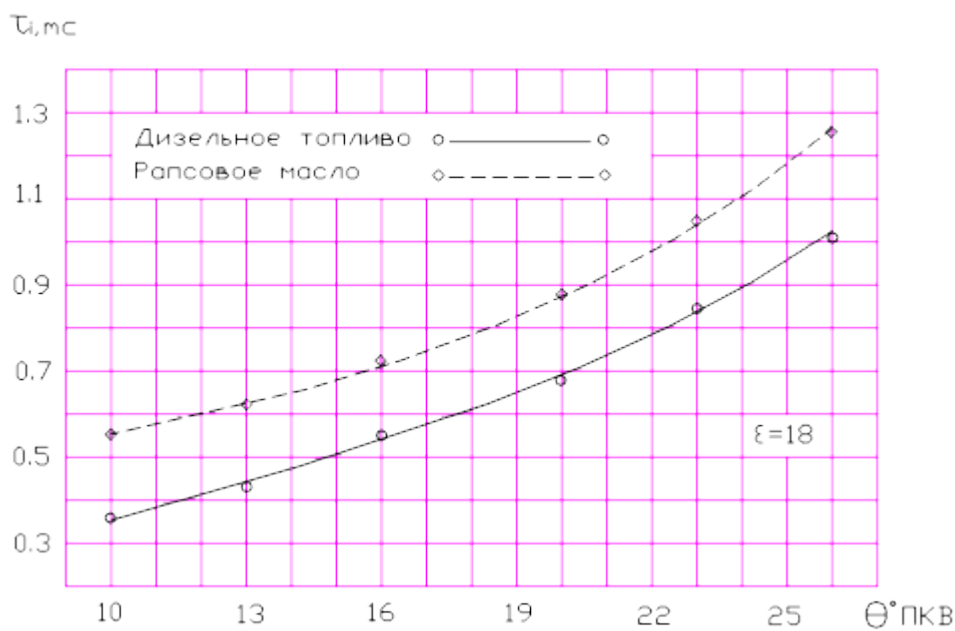


Рис. 9.6. Зависимость периода задержки воспламенения от угла опережения впрыскивания на установке ИДТ-69

Для нахождения значений кинетических констант по данным эксперимента было использовано полученное О.М.Тодесом приближенное решение дифференциального уравнения саморозогрева при тепловом взрыве

$$\tau_i = c \cdot P^{-(n-1)} \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}}, \quad (9.1)$$

где T – температура, К; P – давление, МПа; $R = 8,33$ кДж/(кмоль · К) – газовая постоянная; τ – период задержки воспламенения, мс; n – порядок реакции; c – постоянный множитель; E – условная энергия активации, МДж/кмоль.

При определении τ важно правильно выбрать постоянные коэффициенты, входящие в уравнение (9.1). Однако публикуемые значения констант E , n , c в различных источниках весьма часто не содержат сведений ни о применяемых методах измерения или расчета, ни об условиях, в которых проводились опыты. Данное обстоятельство может привести к ошибке в расчетах и далее к противоречивым выводам. Значения констант E , n , c для рапсового масла до настоящего времени в литературе не приводились, что затрудняет моделирование рабочего процесса дизеля, работающего на выбранном биологическом топливе.

Для определения значения E , n , c для дизельного топлива и рапсового масла в уравнение (9.1) подставляются значения для трех различных углов опережения впрыскивания при постоянной степени сжатия $\varepsilon = 18$. В результате решения системы трех уравнений с тремя неизвестными, получаются уравнения для определения E , n , c :

$$n = 1 + \frac{A \cdot \ln \frac{\tau_{i2}}{\tau_{i3}} - B \cdot \ln \frac{\tau_{i1}}{\tau_{i3}}}{B \cdot \ln \frac{P_1}{P_3} - A \cdot \ln \frac{P_2}{P_3}}, \text{ где } \begin{cases} A = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3}; \\ B = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}. \end{cases} ; (9.2)$$

$$E = \frac{R}{A} \cdot \left[\ln \frac{\tau_{i1}}{\tau_{i3}} - (n-1) \cdot \ln \frac{P_1}{P_3} \right]; (9.3)$$

$$c = \tau_{i3} \cdot P_3^{(n-1)} \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_3}}. (9.4)$$

Период задержки воспламенения был получен экспериментальным путем непосредственно на установке ИДТ-69.

Текущее давление, которое соответствует статическому углу начала впрыскивания топлива, определялось непосредственно в развернутой диаграмме (рис. 9.7), полученной при индцировании процесса сжатия и расширения в ци-линдре установки ИДТ-69 на разных степенях сжатия равных 14, 16, 18.

Текущая температура в цилиндре установки в момент начала впрыскивания топлива определялась следующим образом:

$$T = T_a \cdot \left(\frac{V_a}{V} \right)^{(k-1)}, (9.5)$$

где $T_a = 343$ – температура всасываемого воздуха, К; k – коэффициент политропы сжатия; $V_a = V_n + V_g$; V – текущий объем, определяемый с учетом кинематики движения поршня в установке ИДТ-69, л.

Коэффициент политропы сжатия соответствующий статическому углу начала впрыскивания определяется по формуле

$$k = \ln \left(\frac{P}{P_a} \right) / \ln \left(\frac{V_a}{V} \right), \quad (9.6)$$

где $P_0 = 0,103$ – атмосферное давление, МПа; $P_a = 0,95 \cdot P_0$ – начальное давление, МПа; P – текущее давление, МПа;

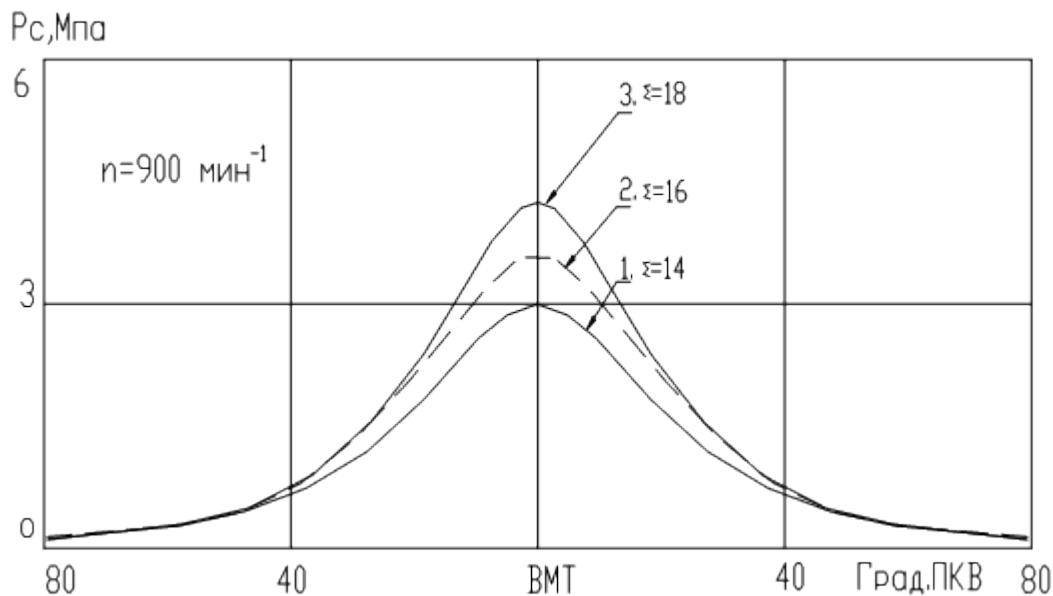


Рис. 9.7. Индексирование характера изменения давления на такте сжатия и расширения на установке ИДТ-69

На основе этой методики были получены следующие результаты, представленные в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Параметры, характеризующие воспламеняемость дизельного топлива (ДТ) и рапсового масла (РМ)

опливо	T	ε впр	θ i , мс	τ , МПа	P , К	T , МДж/к моль	E	η	σ
Т	8	1	1	0	2	7	12,25	1,519	,1201
	8	1	2	0	2	6			
	8	1	2	1	1	6			
РМ	8	1	1	0	2	7	13,67	1,402	,1064
	8	6	,020	,58	18,63				

	1	2	0	2	6			
8	1	,920	,07	69,53				
8	1	2	1	1	6			
6	,255	,58	18,63					

Полученные изложенным расчетно-экспериментальным методом кинетические константы были использованы в дальнейшем при моделировании процесса в малоразмерном высокооборотном дизеле МД-6 при его работе на дизельном топливе и рапсовом масле.

10. ПРОБЛЕМЫ ВЫБРОСОВ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ДИЗЕЛЕ

Многие типы моторного топлива, получаемого из возобновляемых источников, содержат кислород. Наличие окислителя в топливе снижает его склонность к сажеобразованию в условиях камеры сгорания дизеля. Однако влияние присутствующего в топливе кислорода не столь велико, чтобы полностью исключить проблему дымности при работе дизелей на этих видах топлива. Поэтому целесообразно более подробно рассмотреть феноменологию и влияние различных факторов на динамику образования сажи в цилиндре дизеля.

10.1. Феноменология и модель образования сажи в дизеле

Процесс смешения топлива с окислителем при отдельной подаче их в камеру сгорания в самом общем виде можно рассматривать как сумму процессов вынужденной и естественной взаимодиффузии компонентов, интенсивность которой может быть определена D_T – эффективным коэффициентом турбулентной диффузии. Рассматривая процессы в условиях камеры сгорания дизеля, следует рассматривать ограниченную диффузию. Относительная концентрация топлива в условно сферической камере сгорания на радиусе r в момент времени t в этом случае будет равна

$$\bar{c}_T(r, t) = \frac{M_{cik}(1 - \delta_m)}{8\rho(\pi D_T t)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4D_T t}} + \bar{c}_{Tcr} + \bar{c}_{Tint}, \quad (10.1)$$

где M_{cik} – масса топлива, кг; ρ – плотность воздуха в КС, кг/м³; \bar{c}_{Tint} – относительная средняя концентрация топлива в камере сгорания, создаваемая за счет его доли δ_m , поступившей непосредственно во впускной коллектор дизеля, определяемая как $\bar{c}_{Tint} = \delta_m M_{cik} / V_{kc}$; \bar{c}_{Tcr} – относительная средняя (добавочная) концентрация топлива, определяемая через количество топлива M_{top} , которое могло бы продиффундировать на расстояние, превышающее условный радиус камеры сгорания R_{kc} при свободной диффузии $\bar{c}_{Tcr} = M_{top} / V_{kc}$.

Объем камеры сгорания V_{kc} , определяемый как доля $V_n / (\varepsilon - 1)$ рабочего объема цилиндра с учетом степени сжатия ε , рассматривается условно как сферический, откуда радиус КС равен $R_{kc} = 0,6204 \sqrt[3]{V_{kc}}$. Цикловая подача топлива может быть определена через L_0 – количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания кг топлива, средний по КС коэффициент избытка воздуха

α , коэффициент наполнения η_v и плотность воздуха ρ_a , приведенную к условиям в цилиндре на начало такта сжатия рабочего тела $M_{cik} = \eta_v V_h \rho_a / (L_0 \alpha)$.

Количество топлива $M_{top} = M_{cik}(1 - \delta_r) - M_{vn}$ может быть вычислено путем интегрирования текущей концентрации топлива в пределах условного радиуса камеры сгорания R_{kc} при свободной диффузии. Так как аналитически вычислить этот интеграл не представляется возможным, в программе реализован численный метод

$$M_{vn} = \sum_{r_i=0}^{R_{kc}} \bar{c}_{Ti\infty}(r_i) \cdot V_{sf}(r_i)$$

На каждом временном шаге определяется масса топлива, заключенного в сферу радиусом R_{kc} , путем суммирования произведений объема

i -го шарового слоя $V_{sf}(r_i) = 4,18879[(r_i + \Delta r)^3 - r_i^3]$ на среднюю концентрацию топлива в этом слое $\bar{c}_{Ti}(r, t) = M_{cik}(1 - \delta_o) / [8\rho(\pi D_T t)^{3/2}] \cdot \exp[-(r_i + \Delta r/2)^2 / 4D_T t]$.

В результате вычисление «добавочной» концентрации топлива при ограниченной диффузии в условиях [КС](#) дизеля производится по зависимости $\bar{c}_{Tcr} = [M_{cik}(1 - \delta_m) - M_{vn}] / V_{kc}$.

Решая уравнение (10.1) относительно радиуса, можно определить положение любой изоконцентрационной поверхности. Действительно, учитывая, что $\bar{c}_{Ti} = 1 / L_0 \alpha_i$, т.е., выразив относительную концентрацию топлива на i -й поверхности через локальный коэффициент избытка воздуха, имеем

$$r_i = \sqrt{-4D_T t \lg \left[\frac{8\rho(\pi D_T t)^{3/2}}{M_{cik}(1 - \delta_m)} \left(\frac{1}{L_0 \alpha_i} - \bar{c}_{Tcr} - \bar{c}_{Tint} \right) \right]}. \quad (10.2)$$

Приняв процесс смешения топлива с воздухом, подчиняющимся закономерностям диффузии, мы считаем, что изменение концентрации топлива по радиусу [КС](#) монотонно. Следовательно, заключенное в шаровом слое, границами которого являются изоконцентрационные поверхности, соответствующие концентрационным пределам горения, количество топливовоздушной смеси подготовлено к сгоранию в первой стадии тепловыделения в дизеле. Для определения массы топлива M_{kp} , входящего в подготовленную к сгоранию часть смеси, следует проинтегрировать уравнение (10.1) в пределах радиусов изоповерхностей с коэффициентами избытка воздуха, соответствующими верхнему и нижнему концентрационным пределам

$$M_{kp} = \sum_{r_i=r_{vkp}}^{r_{nkp}} \bar{c}_T(r_i) \cdot V_{sf}(r_i)$$

горения или при численном решении найти сумму

Для вычисления радиусов изоконцентрационных поверхностей, соответствующих верхнему r_{vkp} и нижнему r_{nkp} пределам горения гомогенных смесей, требуется задаться эквивалентными значениями коэффициентов избытка воздуха. Пределы горения [квазигомогенных](#) смесей углеводородного топлива с воздухом в условиях дизеля, по нашему мнению, составляют $\alpha_{vkp} = 0,37-0,25$ и $\alpha_{nkp} \approx 1,6$.

Как было отмечено ранее, масса M_{kp} представляет собой то топливо, которое потенциально подготовлено выгорать по кинетическому механизму сгорания. Если средний по [КС](#) коэффициент избытка воздуха лежит в концентрационных пределах горения, то масса M_{kp} стремится к M_{cik} , т.е. все топливо образует горючую смесь. Если среднее значение коэффициента избытка воздуха не лежит в

концентрационных пределах горения гомогенных смесей данных топлива и окислителя, то в этом случае доля топливоздушная смеси, способной сгорать по кинетическому механизму, с какого-то момента развития процесса смешения начнет уменьшаться в пределе до нуля, когда вся смесь окажется вне концентрационных пределов горения. Именно этим объясняется отсутствие нормального воспламенения и горения топлива в дизеле при очень больших углах опережения впрыскивания топлива.

Начало кинетического сгорания отстает на [период задержки воспламенения](#), который можно

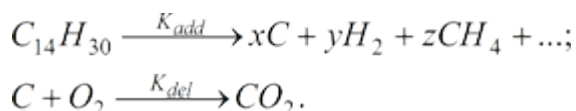
определить, используя зависимость $\tau_i = A p_0^{1-n} \exp E_a / RT$.

используем полученные в результате обработки экспериментальных данных значения входящих в уравнение предэкспоненциального множителя, порядка реакции и эффективной энергии активации. После выгорания топлива, находившегося в смеси, подготовленной к сгоранию, формируется фронт диффузионного пламени на [изостехиометрической поверхности](#) радиуса r_i . Внутри горящего по диффузионному механизму топливного факела или совокупности турбулентных молей будет содержаться

$$M_{ob} = \sum_{r_i=0}^{r_{vkr}} \bar{c}_T(r_i) \cdot V_{sf}(r_i)$$

M_{ob} топлива, массу которого можно вычислить по зависимости

Топливо, находящееся внутри [изостехиометрической поверхности](#) в условиях отсутствия окислителя, подвергается термическому воздействию со стороны сгорающей части заряда. Такие условия приводят к термическому разложению углеводородного топлива, его дегидрогенизации и образованию элементарного углерода. Так как целью разработки данной математической модели является создание инструмента исследования влияния процессов организации подачи топлива в дизель на уровень сажеобразования в [ОГ](#), воспользуемся упрощенным подходом к описанию химической сути процессов сажеобразования. Заменяем систему химических уравнений результирующего сажевыделения в дизеле двумя одностадийными брутто-уравнениями образования и выгорания сажи в дизеле (для условного состава топлива $C_{14}H_{30}$)



Скорость образования свободного углерода, пользуясь законом формальной кинетики для мономолекулярной реакции распада, можно записать как

$$dc_C / dt = k_{0add} M_{ob} \cdot \exp[-E_{add} / (RT_0^*)],$$

где k_{0add} – предэкспоненциальный множитель; E_{add} – эффективная энергия активации брутто-

реакции образования свободного углерода; $T_0^* = T_a \varepsilon^{n_1-1} [p_j / p_a \varepsilon^{n_1}]^{(k-1)/k}$ – температура в зоне сажеобразования с учетом предварительного сжатия и дальнейшего поджатия за счет горения топлива. Текущее давление в [КС](#) вычисляется на каждом расчетном шаге через долю топлива, выгоревшего на этом шаге.

Осуществив численное интегрирование кинетического уравнения

образования углерода, получим его текущую массу $M_C = \sum \Delta c_C \cdot \Delta t$.

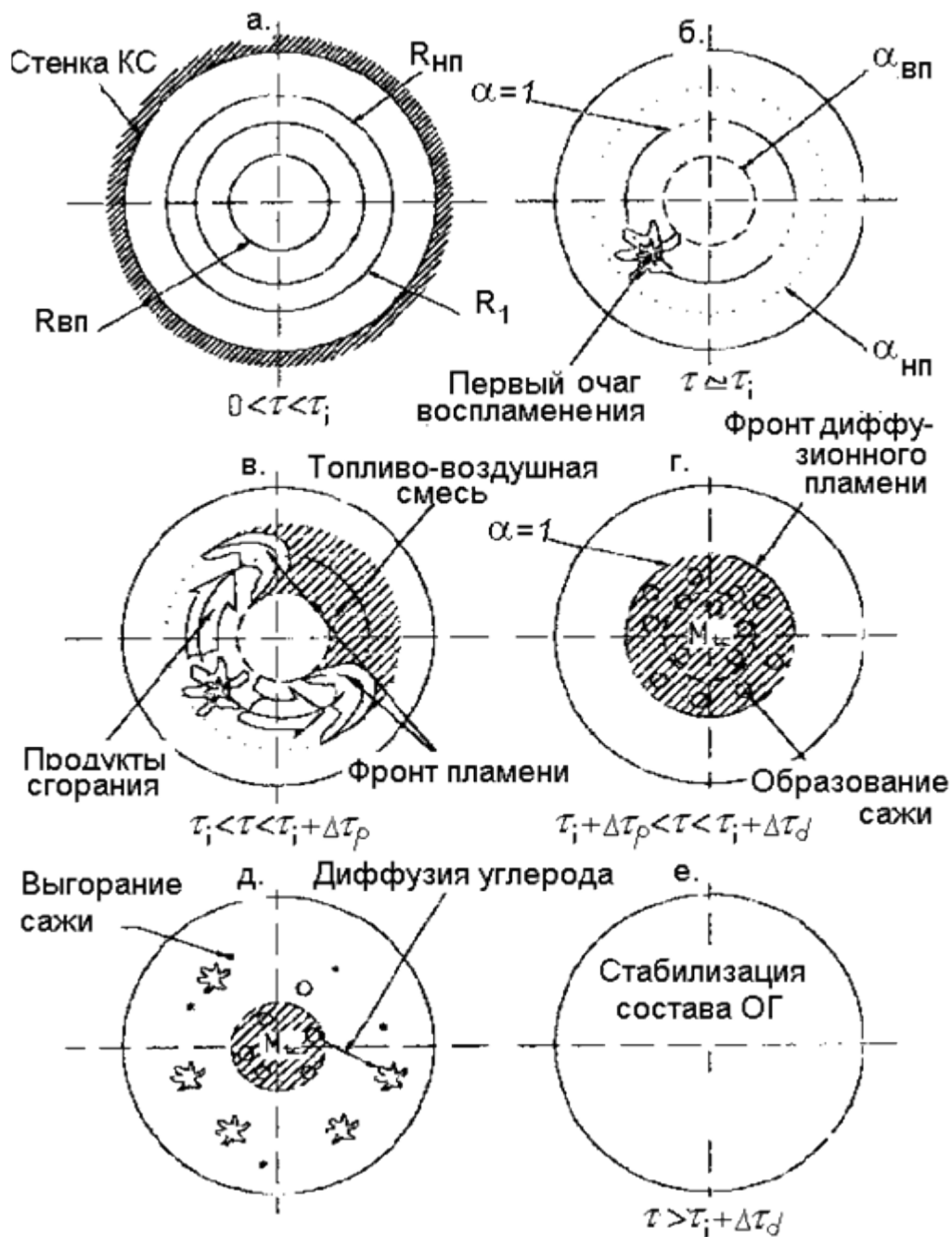


Рис. 10.1. Характерные стадии развития процесса сгорания в дизеле

Образовавшийся углерод диффундирует в зоны богатые кислородом, где сгорает в соответствии с кинетическим уравнением

$$dc_{CC} / dt = k_{0del} M_C M_{O_2} \cdot \exp[-E_{del} / (RT_0^*)]$$

Результирующее количество

свободного углерода в отработавших газах вычисляется по зависимости $M_{CC} = \sum \Delta c_{CC} \cdot \Delta t$.

На рис. 10.1 показаны характерные стадии развития рабочего процесса в дизеле, реализованные в модели. В первый период (рис. 10.1, а), от начала впрыскивания топлива ($\tau = 0$) до начала активного тепловыделения ($\tau = \tau_i$), идет процесс взаимодиффузии топлива и окислителя, что выражается в увеличении массы топлива $M_{кр}$, находящегося в концентрационных пределах горения и потенциально способного выгорать в [кинетической стадии сгорания](#) как это показано на графике рис. 10.2. Одновременно снижается масса топлива, находящегося в переобогащенной зоне $M_{об}$. Видно, что при увеличении периода задержки воспламенения τ_i доля топлива, подготовленного к сгоранию в первой стадии

увеличивается, а доля топлива в переобогащенной зоне, в которой и образуется свободный углерод, уменьшается.

Период задержки воспламенения заканчивается формированием первичного очага самовоспламенения (рис. 10.1, б). На первой стадии сгорания (рис. 10.1, в) продолжительностью $\Delta\tau_p$ происходит выгорание массы топлива M_{kp} путем нормального распространения пламени по квазигомогенной смеси. Изменение массы в пределах поверхности с нижним концентрационным пределом горения на этом временном участке происходит с $M_{kp}+M_{ob}$ в момент τ_i до M_{ob} к концу первой стадии сгорания $\tau_i+\Delta\tau_p$ (рис. 10.2). Диффузионное пламя устанавливается на поверхности смешения с $\alpha = 1$ (рис. 10.1, г). Внутри этой зоны после окончания первого периода сгорания остается масса топлива M_{ob} , выгорающая по диффузионному механизму, до момента вырождения изостехиометрической поверхности при $\tau = \tau_i + \Delta\tau_p + \Delta\tau_d$. В этот период идет образование свободного углерода внутри переобогащенной зоны, его диффузия в зону обогащенную кислородом и выгорание углерода (рис. 10.1, д).

При достижении момента открытия выпускного клапана (рис. 10.1, е) считается, что процессы образования и выго-

рания сажи завершены и результирующая концентрация определяет сажесодержание в отработавших газах (ОГ).

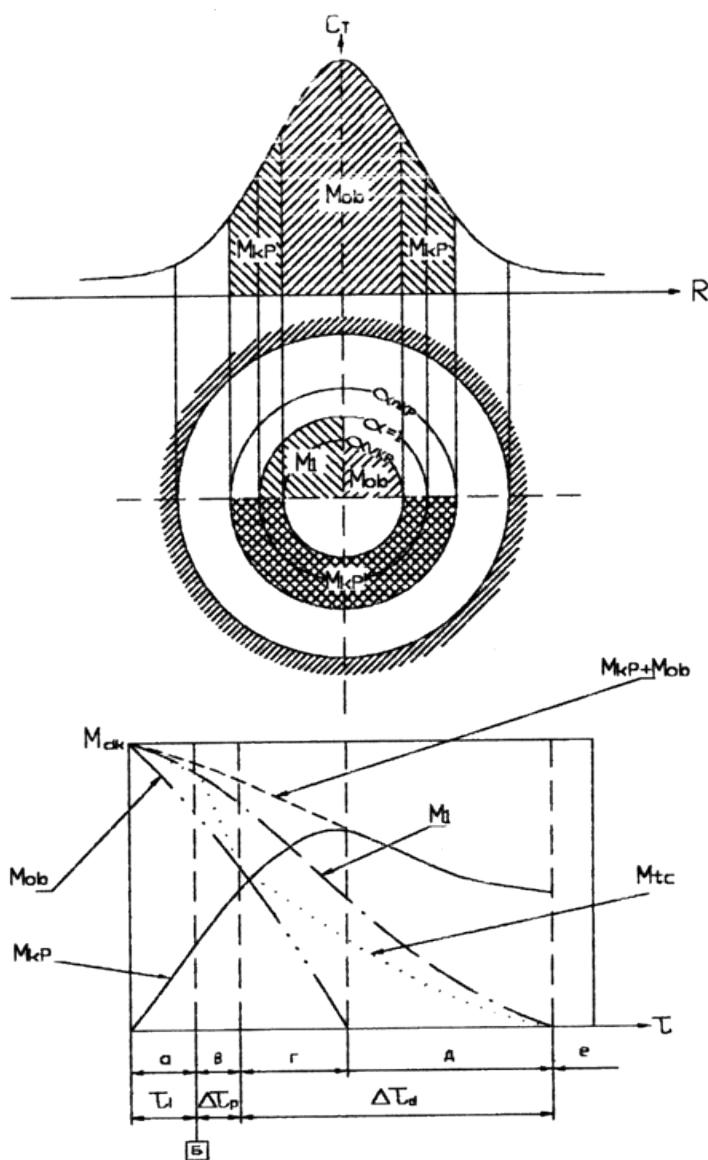


Рис. 10.2. Динамика изменения локальной концентрации топлива

10.2. Анализ влияния подачи дополнительной порции топлива на впуск при работе дизеля на рапсовом масле

В качестве проверки адекватности отображения реальных процессов в **КС** дизеля был проведен параметрический анализ разработанной модели. Модель адекватно реагирует и дает соответствующие опытным количественные соотношения по сажеобразованию в **ОГ** при изменении коэффициента избытка воздуха и угла опережения впрыскивания топлива.

На рис. 10.3 приведены расчетные графики, показывающие влияние дополнительной подачи топлива на впуск дизеля на текущее сажеобразование в дизеле.

Общее количество топлива, подаваемого в **КС** через штатную форсунку и во впускной коллектор, оставалось постоянным. Видно, что при увеличении доли топлива, подаваемого на впуск дизеля, несмотря на уменьшение периода задержки воспламенения конечное сажеобразование снижается. Одновременно уменьшается количество топлива сгорающего как в первой, так и во второй стадиях сгорания за счет уменьшения количества топлива, впрыскиваемого штатной системой топливоподачи дизеля. Сокращается продолжительность сгорания, что должно было бы привести к повышению КПД рабочего цикла. Однако, такой эффект возможен только при небольшой доле топлива, подаваемого на впуск. С ее увеличением возрастает негативный эффект по КПД цикла, связанный со следующим явлением. Из всего топлива, поступающего в **КС** с воздухом во время такта впуска, значительная часть попадает в зону переобедненной смеси, вялое принудительное выгорание которой за счет диффузии в нее активных радикалов и «горячих» молекул, происходит в фоновом режиме на протяжении всего рабочего хода. Понятно, что такое сгорание не может происходить с высоким КПД. Косвенным доказательством сказанного служит увеличение эмиссии продуктов неполного сгорания при увеличении доли топлива подаваемого на впуск.

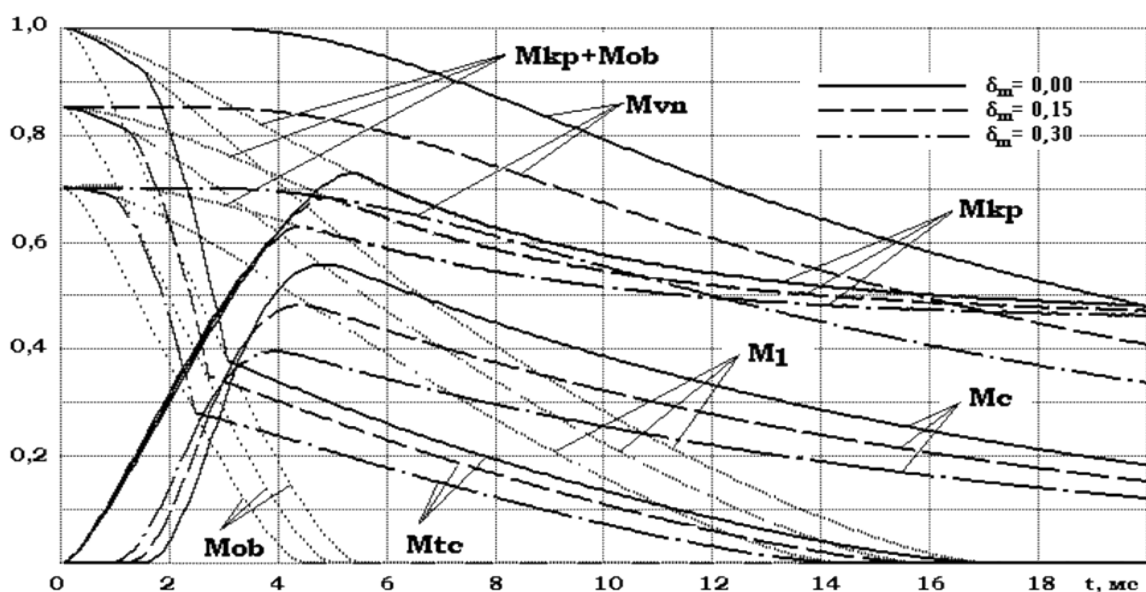


Рис. 10.3. Результаты вычислений текущих параметров в различных зонах камеры сгорания дизеля

Таким образом, разработанная физическая модель и расчетная программа сажеобразования в дизеле адекватно отражают физико-химические процессы, протекающие в **КС** дизеля. Они позволяют на основе процессов смесеобразования и сгорания объяснить снижение выбросов углеродистых частиц дизелем при подаче части топлива во впускной трубопровод.

топливо для дизелей, в смесях различного состава со стандартным дизельным топливом или переработано в метиловый или этиловый эфиры рапсового масла

11. Методы адаптации дизелей для работы на топливах, получаемых на основе растительных масел

Рассматривая данные по испытаниям дизелей на маслах растительного происхождения (в том числе и рапсового масла), можно сделать вывод о том, что серьезным препятствием в использовании их в качестве топлива в дизелях с непосредственным впрыскиванием является повышенная склонность к нагарообразованию и ухудшенные характеристики воспламеняемости.

Решить эти проблемы можно тремя путями:

- за счет полной модификации конструкции дизеля с целью максимального снижения влияния негативных свойств рапсового масла на рабочий процесс дизеля;
- улучшения физико-химических свойств рапсового масла, т.е. приближение его свойств к стандартному дизельному топливу;
- частичной модификации конструкции дизеля, обеспечивающей, минимизацию затрат на конвертацию двигателя для работы на биотопливе.

11.1. Работа дизеля на чистом рапсовом масле

Полная модификация конструкции двигателя предусматривает разработку нового дизеля, способного работать на чистом рапсовом масле, прошедшем лишь стадию механической очистки от примесей путем фильтрации. Так, фирма «Эльсбет конструкторов» создала полуадиабатический дизель «Эльсбет мотор», в котором процесс осуществляется благодаря изоляции стенок камеры сгорания поступающим в цилиндр воздухом для уменьшения тепловых потерь. В основном это трехцилиндровые дизели с непосредственным впрыскиванием топлива и рабочим объемом 1,5 л для автомобилей мощностью 66 кВт (рис. 11.1). Они устанавливаются на автомобили «Мерседес-Бенц 190», «Аудио 80», «Фольксваген Гольф». Конструктивные особенности этого двигателя: отсутствие системы жидкостного или воздушного охлаждения; днище поршня и блок цилиндров изготавливаются из одного и того же материала – серого чугуна; зазор между верхним краем поршня над верхним кольцом и стенкой цилиндра составляет порядка 0,02 мм (такой зазор препятствует отложению нагара на поверхности колец, т.е. их закоксуванию); поршень дизеля составной с полуоткрыто-конусообразной камеры сгорания (площадь сечения в месте перехода днища поршня к поясу, где размещаются два компрессионных кольца и одно маслоотъемное, уменьшена до минимума, чтобы снизить теплоотдачу от камеры сгорания к стенкам цилиндра); нагнетательные секции высокого давления, установленные непосредственно в головке цилиндров (с целью уменьшения длины трубопроводов высокого давления); впрыскивание осуществляется в центр [КС](#) через штифтовую форсунку.

Рабочий процесс осуществляется следующим образом: [рапсовое масло](#) впрыскивается в центр полуоткрыто-конусообразной камеры сгорания через штифтовую форсунку, обладающую свойствами самоочистки от нагара, в конце такта сжатия, где благодаря особому подводу всасываемого воздуха вращается горячий воздушный конус с интенсивным тангенциальным движением. В процессе сгорания под воздействием центробежных сил у стенок камеры сгорания образуется теплоизолирующий слой и происходит отделение избыточного воздуха от воздуха, участвующего в процессе сгорания.

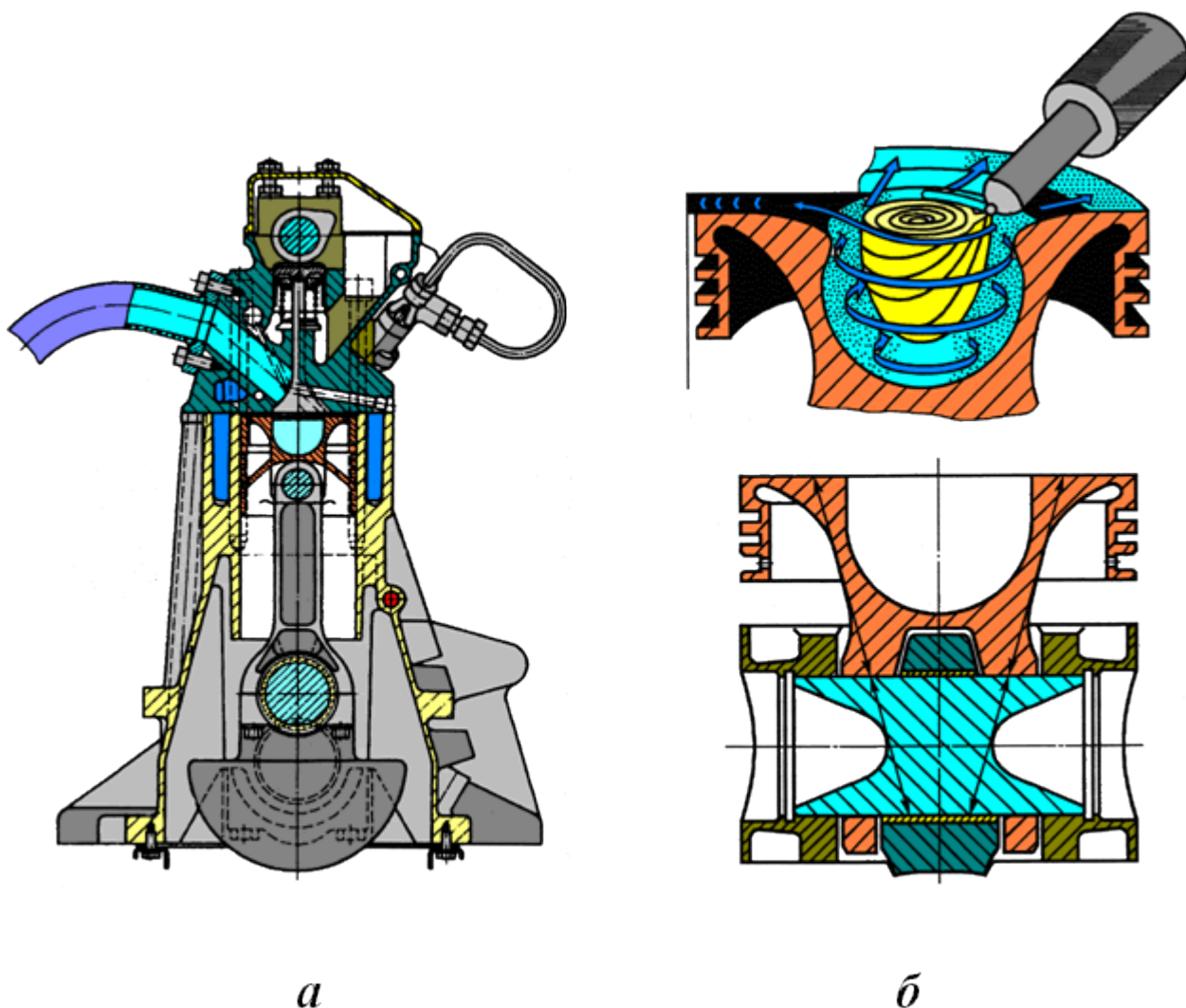


Рис. 11.1. Схема дизеля «Эльсбет-мотор»:

а – оперечный разрез дизеля; *б* – поршневая группа.

Такая конструкция камеры сгорания обеспечит более полное сгорание рапсового масла, что обеспечит более низкие расходы топлива. Так, автомобиль «Мерседес-Бенц», оборудованный двигателем «Эльсбет», показал, что на 100 км пробега расход топлива составляет 5,5 л при скорости 170 км/ч, несмотря на повышенную температуру отработавших газов. Для этого дизеля характерны более низкие выбросы CO, CH и дисперсных частиц, чего нельзя сказать о NO_x.

Несмотря на хорошие экономические и экологические показатели дизеля «Эльсбет-мотор» и то, что он может работать на любом топливе, его конструкция с точки зрения практического внедрения в производство связана с решением многих вопросов. Вызваны они тем, что основные мировые компании по производству дизелей до сих пор не решаются на крупные капиталовложения в серийное производство двигателей такого типа.

11.2. Улучшение свойств биотоплива на основе рапсового масла

Другим путем для практического применения рапсового масла в существующих дизелях является его химическая переработка, позволяющая получить новое топливо со свойствами близкими к дизельному топливу.

Одним из методов по переработки рапсового масла является этерификация, сущность которой заключается в разделении молекулы триглицерина на четыре составляющие – глицерин и три жирные кислоты, с последующим соединением молекул глицерина и трех жирных кислот с молекулой метанола (рис. 11.2).

Полученное новое топливо обычно называется рапсовым метилэфиром. Его преимуществом перед рапсовым маслом является низкая молекулярная масса, что обуславливает практическое выравнивание с вязкостью дизельного топлива, улучшение других показателей и отсутствие склонности к нагарообразованию на деталях цилиндропоршневой группы, клапанах и распылителе форсунки.

При работе дизеля на метилэфире рапсового масла по сравнению с ДТ снижаются выбросы сажи на 50% и CO – на 20%, а выбросы NO_x и альдегидов увеличиваются на 10%.

С другой стороны, у этого топлива отмечается низкая стабильность при хранении и отрицательное влияние на моторное масло. Кроме того, метилэфир рапсового масла растворяет лакокрасочные покрытия и резину. Поэтому переход на это топливо для дизелей требует замены некоторых деталей.

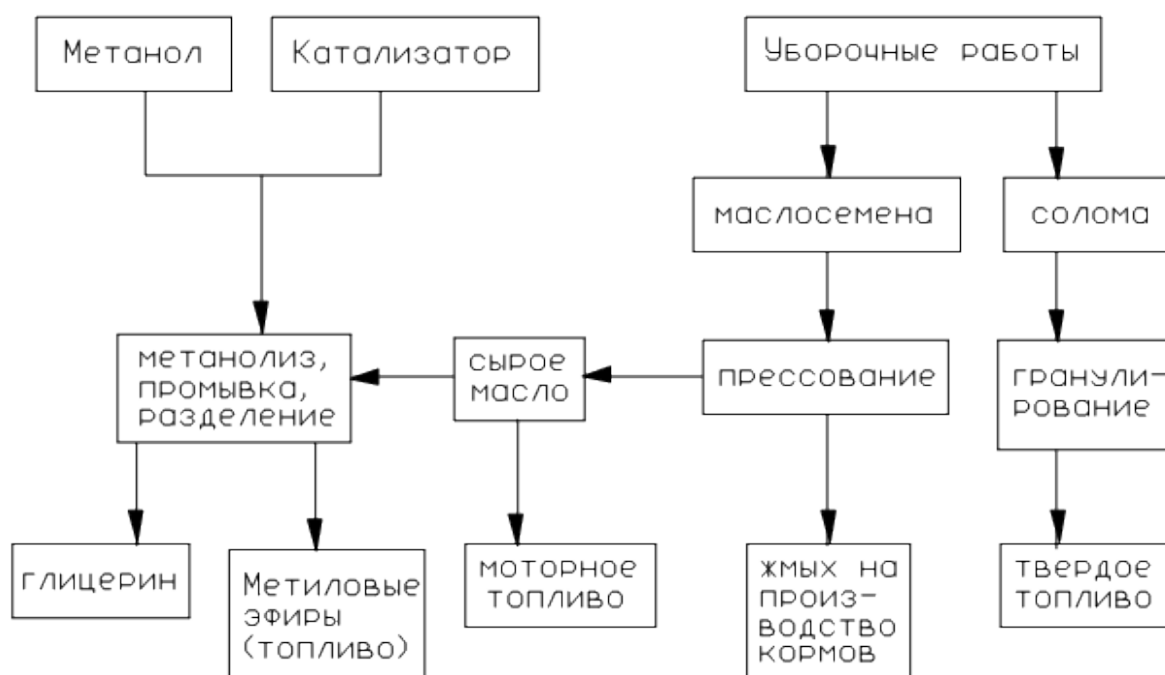


Рис. 11.2. Схема использования продуктов перегонки рапса

Применение метилэфира рапсового масла с экономической точки зрения в настоящее время не выгодно, поскольку необходимо рассматривать затраты не только на выращивание и уборку урожая рапса, но и на транспортировку и переработку в топливо (метилэфир рапсового масла), пригодное к применению в дизелях.

Применение «чистого» рапсового масла в качестве топлива для высокооборотных малоразмерных дизелей с непосредственным впрыскиванием существенно усложняется, так как они имеют большие скорости нарастания давления в фазе быстрого сгорания ($dP/d\varphi = 0,6 - 1,2$ МПа/°ПКВ) и высокие значения давления сгорания ($P_2 = 8 - 12$ МПа) при работе на дизельном топливе по сравнению с двигателями с разделенной камерой сгорания. Кроме того, дизели с непосредственным впрыскиванием более чувствительны к сорту топлива.

Повышенная частота вращения коленчатого вала сокращает время рабочего цикла, что влечет за собой уменьшение времени впрыскивания. Чтобы обеспечить определенную цикловую подачу топлива в цилиндр для получения положительной работы, необходимо увеличить объемную скорость подачи топлива (за счет увеличения диаметра плунжера или его хода), что приводит к росту динамического фактора (σ).

Таким образом, повышенный σ_i у этих дизелей при более низком цетановом числе рапсового масла относительно дизельного топлива приведет к существенному увеличению жесткости рабочего процесса двигателя.

Как показал многолетний опыт эксплуатации дизелей, от жесткости рабочего процесса в значительной степени зависит износ основных деталей двигателя, уровни шума и вибрации, содержание токсических компонентов и дымность в отработавших газах.

С увеличением скорости нарастания давления ($dP/d\phi$), максимального давления сгорания (P_z) растут термические и механические напряжения в дизеле. У дизелей с непосредственным впрыскиванием с воздушным охлаждением теплонапряженность выше, чем у дизелей с жидкостным охлаждением из-за более высоких температур стенок цилиндра и больших зазоров в паре цилиндр–поршень. Например, в дизелях с воздушным охлаждением в наиболее тяжелых условиях работают поршень и поршневые кольца, при этом их температура выше на 20–30 °С по сравнению с дизелями с жидкостным охлаждением. Также растут тепломеханические напряжения в головке цилиндров.

Увеличение тепломеханических напряжений приводит к увеличению деформации деталей и уменьшению зазоров между цилиндром и поршневыми кольцами, а также между сопряженными деталями кривошипного шатунного механизма. Уменьшение зазоров между сопряженными деталями кривошипно-шатунного механизма возникает и от сил давления газов в основном в фазе быстрого сгорания. Таким образом, уменьшение зазоров между деталями ухудшает условия смазки, разрушает масляную пленку, увеличивает силу трения между движущимися относительно друг друга поверхностями, что влечет за собой увеличение износа, следовательно, снижение моторесурса двигателя.

Другими немаловажными параметрами при эксплуатации дизелей являются шум и вибрация, так как от них зависят условия труда людей. Уровень шума тесно связан с характером сгорания в его первой фазе. Как известно, спектр шума состоит из двух частей: низкой и высокой. Низкочастотная часть спектра шума определяется величиной P_z , а высокочастотная часть спектра существенно зависит от характера скорости нарастания давления.

Таким образом, увеличение жесткости сгорания дизеля ($dP/d\phi$, P_z) приводит к увеличению уровня шума и вибрации. Высокий уровень шума и вибрации особенно заметен в малоразмерных дизелях с непосредственным впрыскиванием с воздушным охлаждением из-за отсутствия рубашки охлаждения, которая играет роль глушителя шума, а также из-за неуравновешенной силы инерции второго порядка и больших зазоров в паре цилиндр–поршень.

Наряду с повышением жесткости сгорания в рассматриваемых дизелях увеличивается содержание токсических компонентов (особенно NO_x) и сажи в [ОГ](#). Это связано с тем, что в стадии быстрого сгорания резко возрастает скорость тепловыделения, что приводит к увеличению локальных температур в пространстве [КС](#), и при наличии атомарного кислорода происходит высокотемпературное окисления азота воздуха и образование NO_x . Увеличение температуры на этой стадии также приводит к активному образованию сажи, так как при высокой температуре в камере сгорания происходит разложение топлива с выделением углерода, т.е. при высоких температурах процессы крекинга могут опередить процессы испарения топлива.

Кроме того, повышенное содержание сажи в высокооборотных дизелях с непосредственным впрыскиванием связано с тем, что при большом числе оборотов коленчатого вала ухудшается полнота сгорания топлива вследствие недостатка времени, отводимого для сгорания. Особое влияние на образование сажи оказывает распространение турбулентного пламени по гетерогенному составу смеси в [диффузионной стадии сгорания](#), где процессы окисления топлива и смешения его паров происходят с меньшей скоростью и при определенном дефиците кислорода.

По этим причинам можно сказать, что одной из важнейших задач при создании высокоэффективного рабочего процесса высокооборотного малоразмерного дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива при работе на рапсовом масле является поиск путей применения относительно простых конструктивных и регулировочных изменений в серийных дизелях.

11.3. Методы улучшения рабочего процесса дизеля при работе на топливах растительного происхождения

Одним из способов организации рабочего процесса с низким уровнем токсичности и дымности в отработавших газах без существенных конструктивных изменений дизеля является применение сажевых фильтров, системы подачи воды (с присадками или без них) во впускной коллектор, присадок, подающихся вместе с топливом через штатную систему, каталитических катализаторов, рециркуляции отработавших газов, что заметно увеличивает металлоемкость и ухудшает экономичность малоразмерного дизеля, а также усложняет его эксплуатацию и техническое обслуживание.

При этом не решается вопрос снижения динамического фактора и вообще сокращения периода задержки воспламенения (τ_i), которое могло бы обеспечить более мягкий процесс сгорания и увеличение моторесурса дизеля.

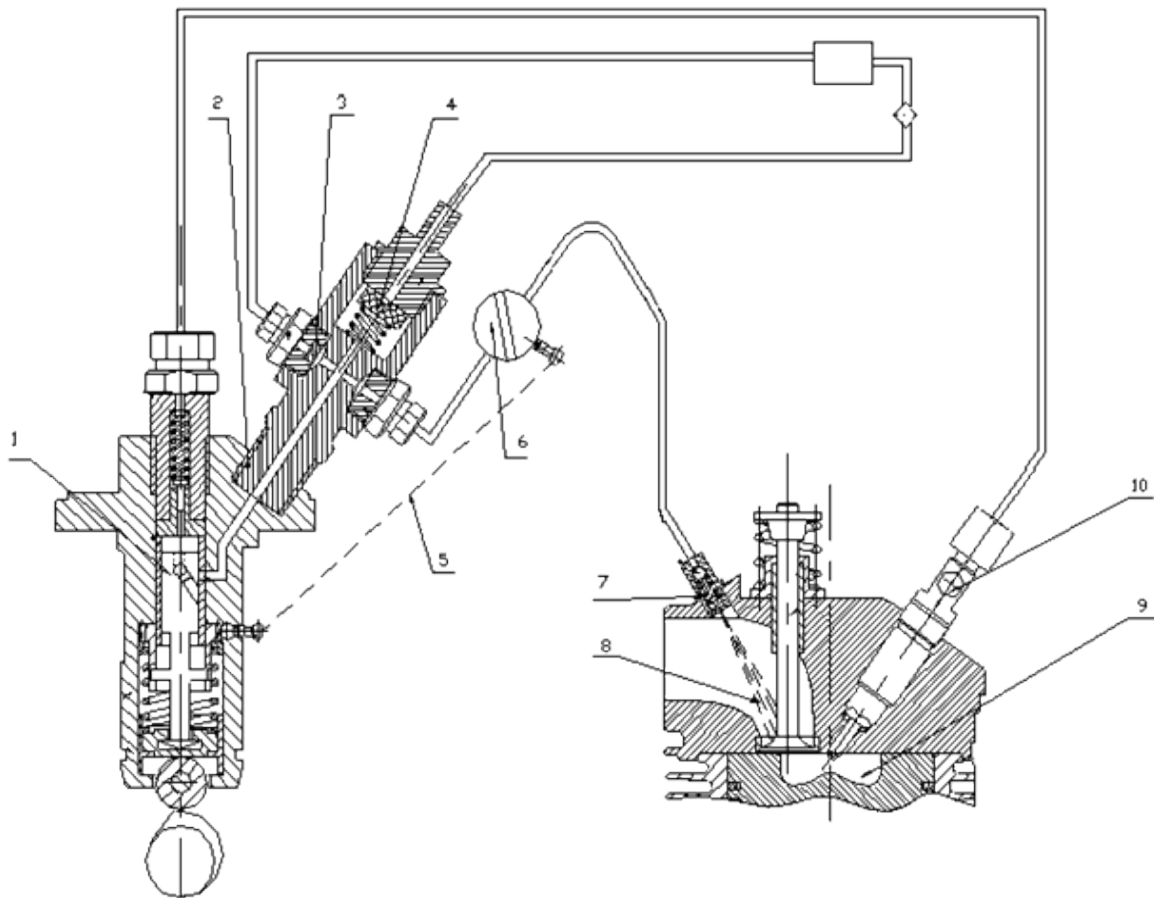


Рис. 11.3. Схема организации двухфазной топливоподачи дизеля МД-6:

1 – ТНВД; 2 – корпус формирователя импульса давления; 3 – плунжер;
4 – наполнительный клапан; 5 – тяга; 6 – золотниковый кран;
7 – дополнительная форсунка; 8 – впускной коллектор;
9 – камера сгорания; 10 – основная форсунка

Одним из способов сокращения τ_i для улучшения управления процесса сгорания при применении рапсового масла в качестве топлива для дизелей с непосредственным впрыскиванием является двухстадийное смесеобразование.

Нами была разработана система двухфазной топливоподачи, заключающаяся в том, что основная порция топлива от общей цикловой подачи подается через штатную систему топливоподающей аппаратуры непосредственно в камеру сгорания, а дополнительная порция топлива – через вспомогательную форсунку, установленную во впускном коллек-торе.

Для подачи дополнительной порции топлива можно использовать импульс давления, образующийся при отсечке топлива в штатной системе топливоподачи (рис. 11.3).

Таким образом, от того, насколько эффективно будут эти мероприятия снижать негативные свойства рапсового масла и насколько велики будут затраты на модернизацию дизеля, зависит экономическая целесообразность данного способа.

12. Работа дизеля на [спиртовых](#) топливах, получаемых из возобновляемых источников

Наиболее реальными альтернативными топливами, получаемыми из возобновляемых источников для дизелей, являются, в частности, [спирты](#) и их производные (изомеры) – эфиры, получаемые при воздействии неорганических кислот на соответствующие [спирты](#).

Подача метанола в дизель может производиться несколькими способами: топливо может впрыскиваться в чистом виде или в смеси с дизельным топливом непосредственно в цилиндры, подаваться во впускной трубопровод в жидкой фазе или в виде пара. Например, непосредственное впрыскивание [спирта](#) в камеру сгорания может осуществляться при помощи штатного ТНВД дизеля. Используется также непосредственная подача метанола в камеру сгорания в виде эмульсии с дизельным топливом. Эффективными являются системы с отдельным впрыскиванием метанола и запальной дозы дизельного топлива в цилиндры дизеля.

Следует отметить различия характеристик впрыскивания и распыливания дизельного топлива и метанола при их подаче в камеру сгорания штатной топливной системой дизеля, что оказывает заметное влияние на характер протекания последующих процессов смесеобразования и сгорания, что обусловлено различиями физико-химических свойств дизельного топлива и метанола.

12.1. Результаты экспериментальных исследований характеристик топливных струй [спиртовых](#) топлив

Исследования характеристик струй бензина, метанола, смеси 85% метанола и 15% бензина, а также биодизельного топлива (метилового эфира рапсового масла) при их впрыскивании в камеру с противодавлением, соответствующим плотности воздуха от 3,6 до 59,0 кг/м³ показали, что длины струй распыливаемого метанола, а также смеси метанола и бензина (рис. 12.1, б, в), оказались большими, чем у бензина (рис. 12.1, а), но меньшими, чем у биодизельного топлива (см. рис. 12.1, г).

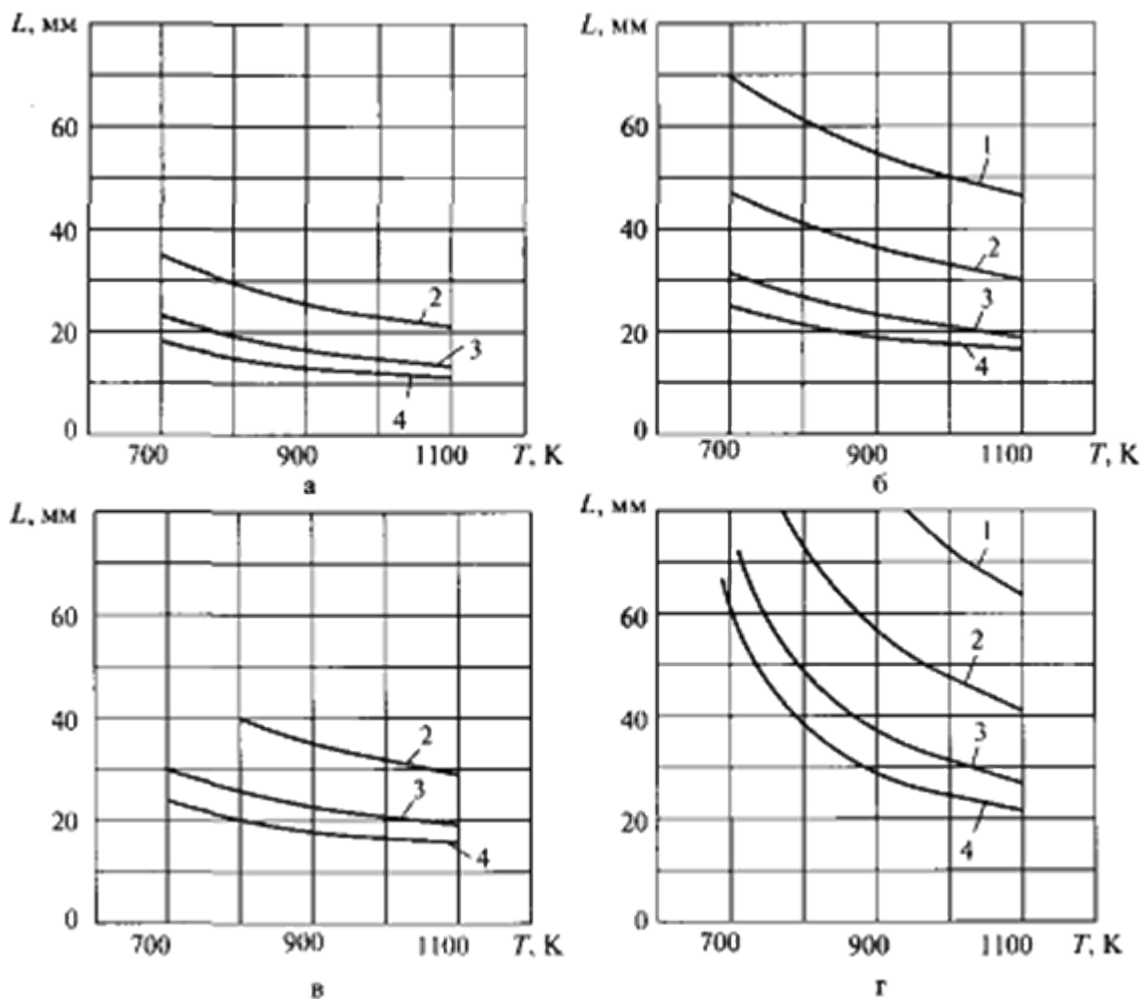


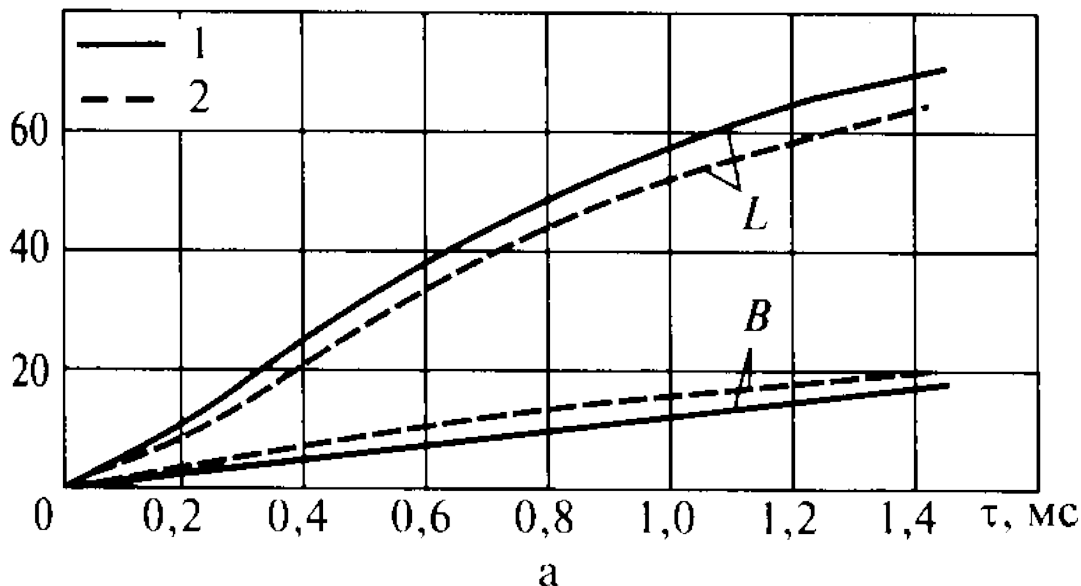
Рис. 12.1 Экспериментальные зависимости длины струи L распыливаемого топлива от его температуры T для бензина (а), метанола (б), смеси 15% бензина и 85% метанола (в) и метилового эфира рапсового масла (г) при впрыскивании в среду с противодавлением: 1. – 7,3; 2 – 14,8; 3 – 30,0; 4 – 45,0 кг/м³

Это обусловлено в первую очередь тем, что метанол имеет плотность ($\rho_T = 792$ кг/м³), промежуточную между плотностью бензина ($\rho_T = 720 - 750$ кг/м³) и биодизельного топлива ($\rho_T = 820 - 850$ кг/м³). Приведенные данные по длине струй распыливаемых топлив могут быть использованы при выборе формы камеры сгорания дизеля, работающего на [спиртовых](#) топливах.

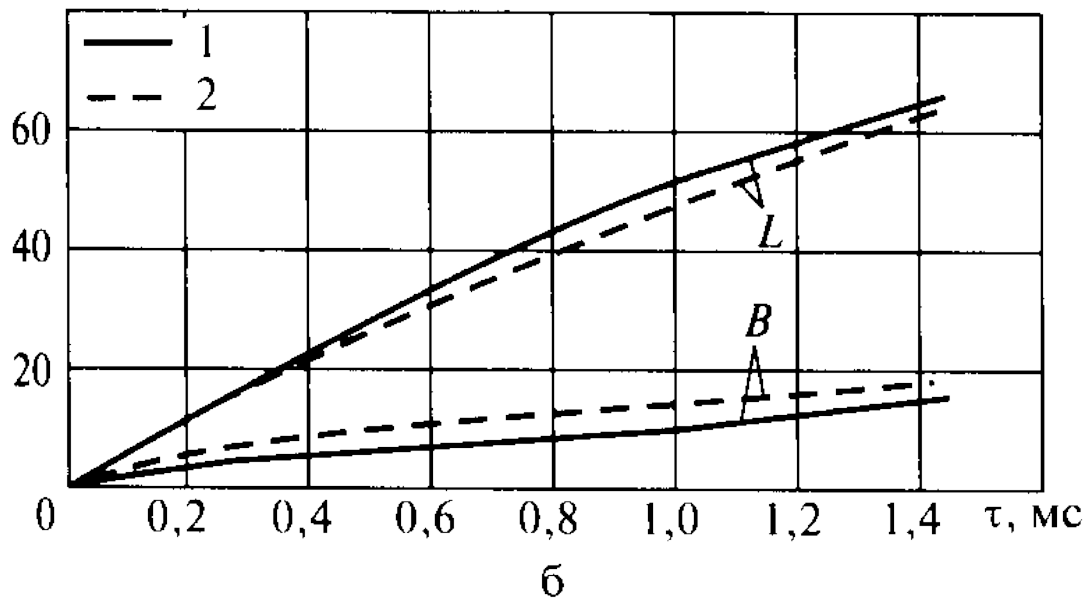
Сравнение характеристик впрыскивания дизельного топлива и метанола были проведены при экспериментальных исследованиях системы топливоподачи дизеля типа ЗИЛ-645, включающей ТНВД фирмы Motorpal (Чехия) размерности А (модель 8PVA), нагнетательный топливопровод длиной $L_T = 500$ мм при внутреннем диаметре $d_T = 1,6$ мм и форсунку ЗИЛ-645 с опытным распылителем. При этом входные кромки двух распыливающих отверстий распылителя расположены на запирающем конусе седла иглы форсунки, а распыливающие отверстия выполнены с различной длиной и одним и тем же диаметром $d = 0,455$ мм. Эквивалентное проходное сечение распылителя в сборе с иглой составляло $\mu f = 0,184$ мм² при максимальном подъеме иглы $Y_{i \max} = 0,24$ мм. При безмоторных испытаниях, проведенных по методике МАДИ (ГТУ), изучалась динамика топливных струй при впрыскивании топлив в замкнутый объем с различным противодавлением. Исследовалось два скоростных режима с частотой вращения кулачкового вала ТНВД $n_{тн} = 1400$ и 1000 мин⁻¹ при цикловой подаче топлива g_d соответственно 48 и 46 мг. Испытания проводились на дизельном топливе ДЛ с плотностью $\rho_T = 828$ кг/м³ и кинематической вязкостью $\nu_T = 3,3$ мм²/с и на метаноле. Результаты безмоторных исследований динамики топливных струй дизельного топлива и метанола при их подаче в камеру с противодавлением 2,0 и 1,0 МПа приведены на рис. 12.2 – 12.4.

Как следует из представленных экспериментальных данных, длина L и ширина B струй распыливаемого метанола несколько меньше, чем у дизельного топлива. В частности, сравнение характеристик на рис. 12.2, соответствующих $n_{тн} = 1400 \text{ мин}^{-1}$, $p_{ц} = 2,0 \text{ МПа}$ и $l_0/d_0 = 3,34$, показывает, что различие параметров струй дизельного топлива и метанола отмечается в широком диапазоне времени от 0,4 до 1,2 мс и достигает 10–12%. Меньшая дальность струй метанола объясняется его меньшей плотностью, большими сжимаемостью и испаряемостью и более выраженными кавитационными явлениями в канале распыливающего отверстия, которые влияют на характер распыливания топлива.

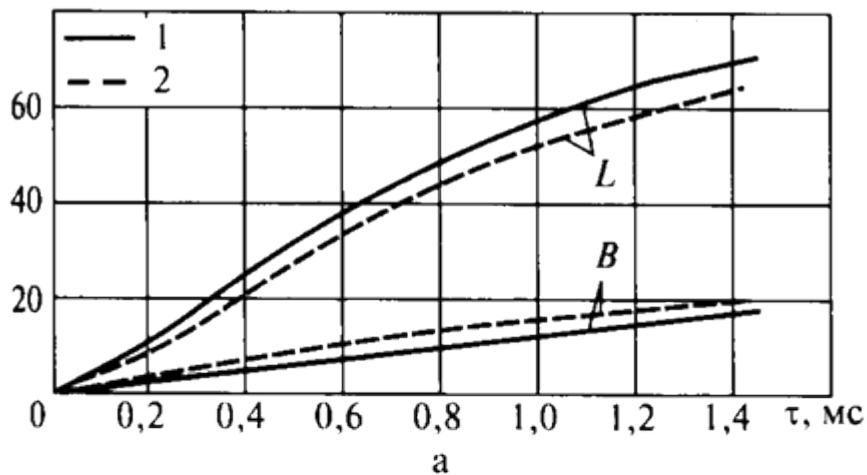
$L, B, \text{ мм}$



$L, B, \text{ мм}$

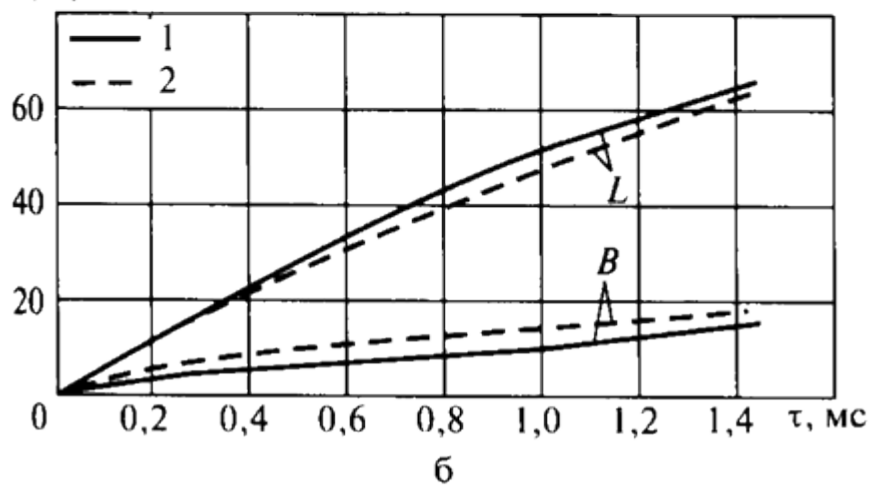


$L, B, \text{мм}$



а

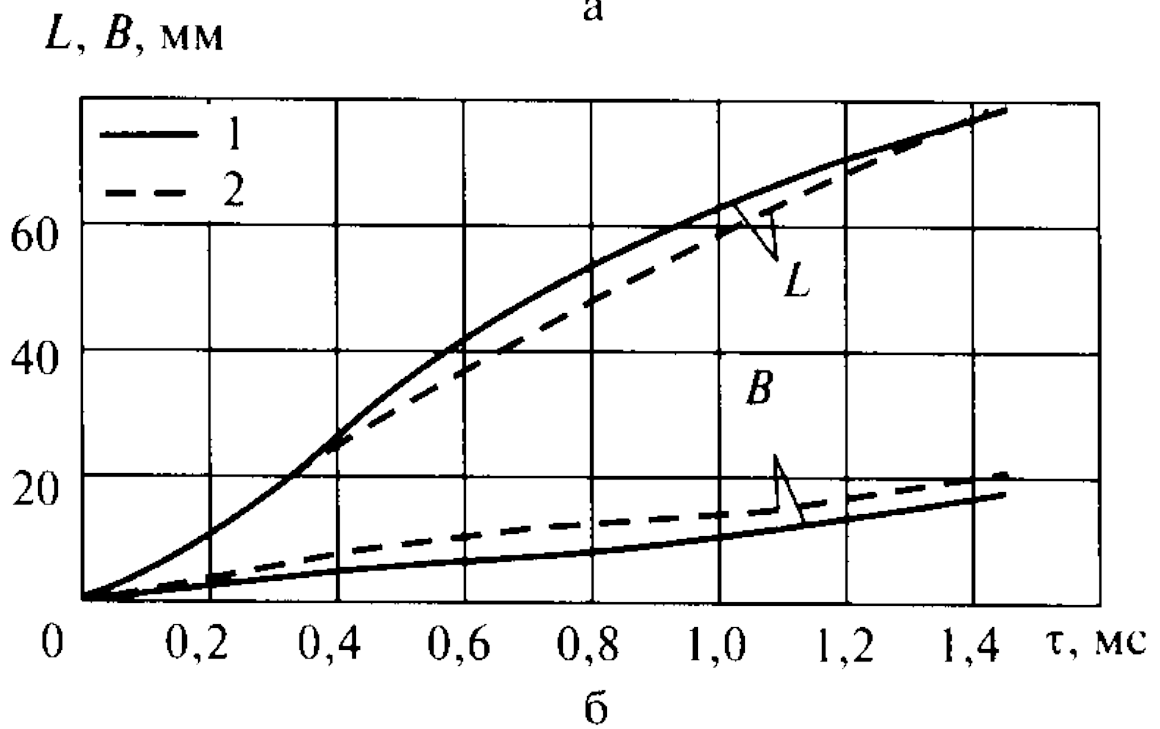
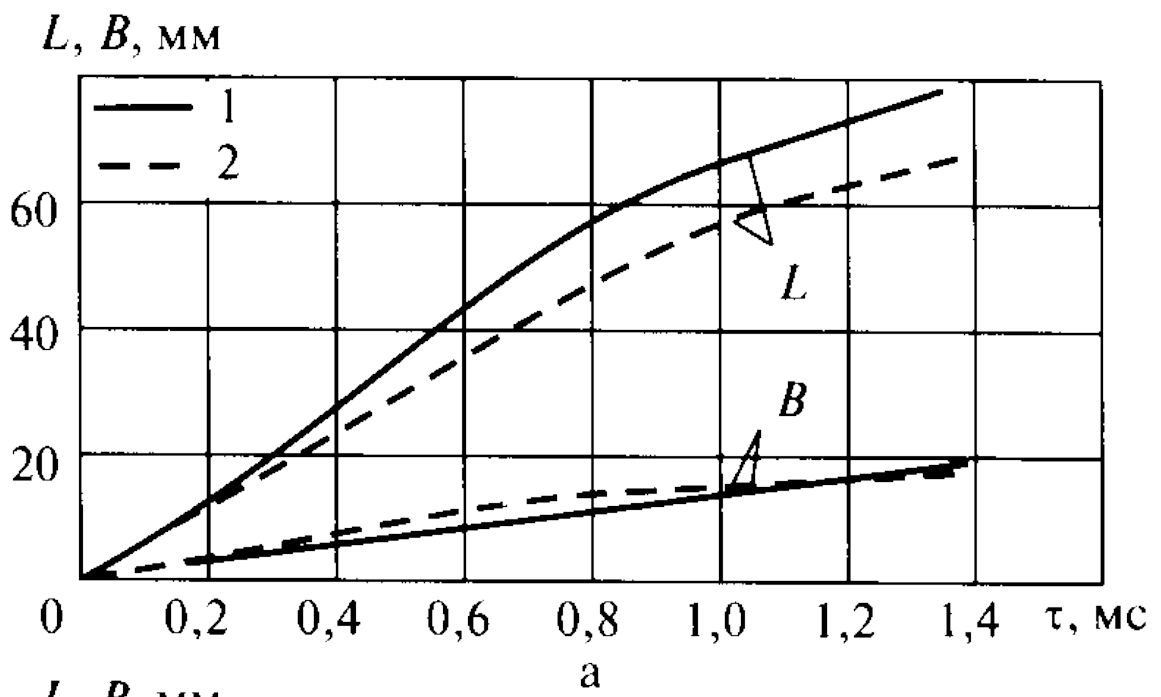
$L, B, \text{мм}$



б

Рис. 12.2. Характеристика топливных факелов для распылителей с отношением:

$1 - l_p/d_p = 3,34; 2 - l_p/d_p = 1,41$, при распыливании дизельного топлива (а) и метанола (б) при $n_{тн} = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и противодавлении $p_{ц} = 2,0 \text{ МПа}$



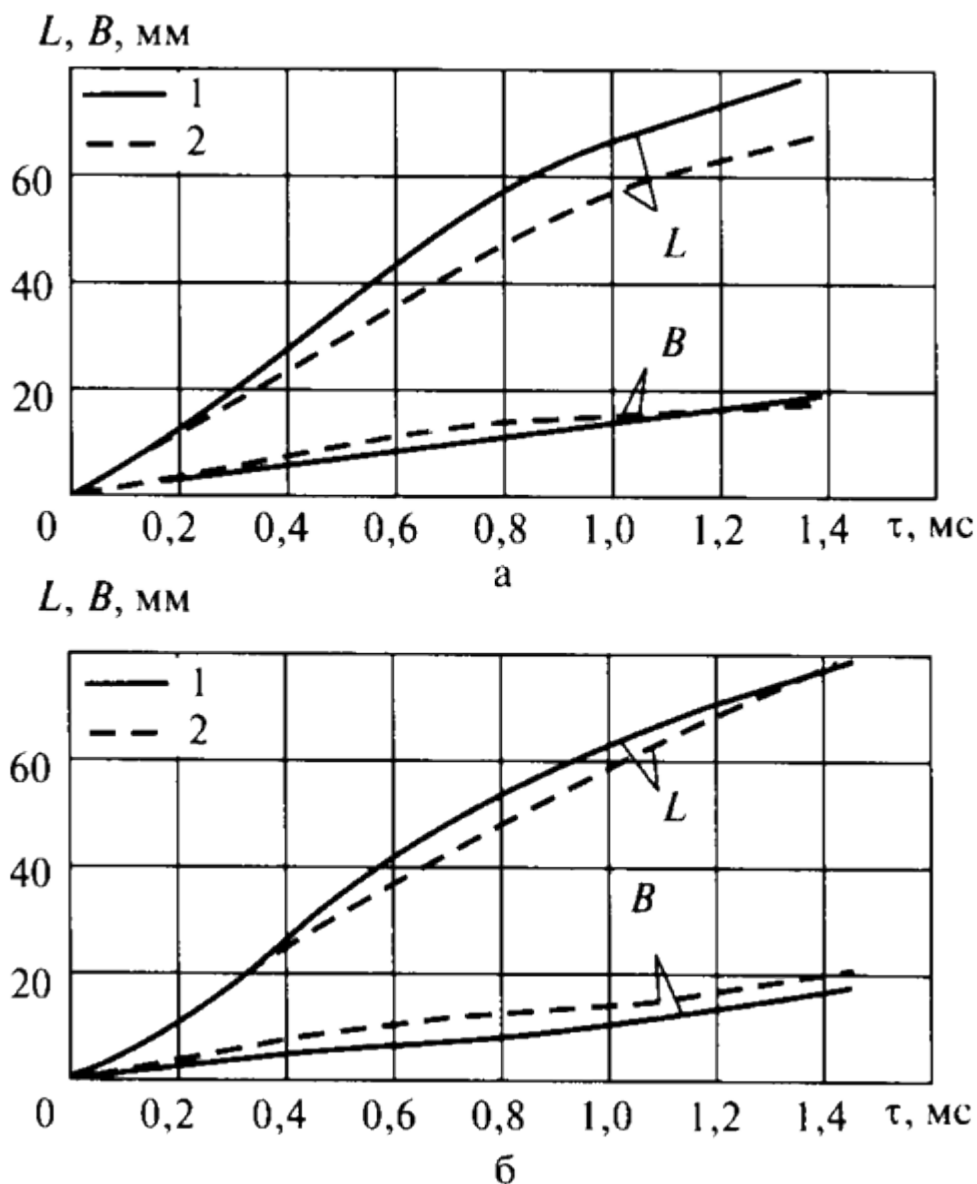


Рис. 12.3. Характеристика топливных факелов для распылителей с отношением:

$1 - l_b/d_b = 3,34$; $2 - l_b/d_b = 1,41$, при распыливании дизельного топлива (а) и метанола (б) при $n_{тн} = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и противодавлении $p_d = 1,0 \text{ МПа}$

Сравнение геометрических характеристик струй распыливаемого топлива на рис. 12.2–12.4 показывает их меньшую зависимость от режима работы аппаратуры при работе на метаноле. В частности, при $p_d = 2,0 \text{ МПа}$ и $l_b/d_b = 3,34$ и снижении частоты вращения $n_{тн}$ вала ТНВД с 1400 до 1000 мин^{-1} уменьшение длины струи в момент времени $\tau = 1 \text{ мс}$ для дизельного топлива составило 7 мм (с 57 до 50 мм, см. рис. 12.2, а и 12.4, а), а для метанола – только 1 мм (с 51 до 50 мм, см. рис. 12.2, б и 12.4, б). Такое протекание характеристики дальности должно быть учтено при согласовании струй [спиртового](#) топлива с формой камеры сгорания и режимом работы дизеля.

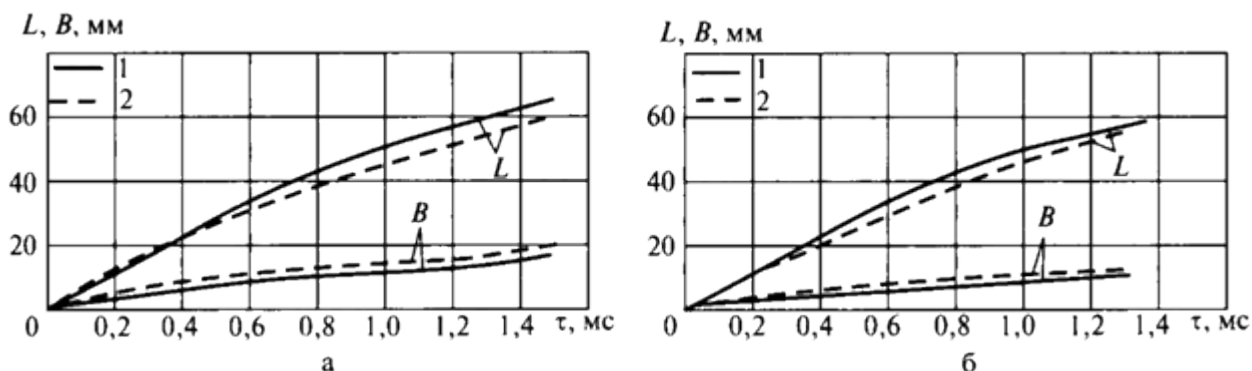


Рис. 12.4. Характеристика топливных факелов для распылителей с отношением:

1 – $l_b/d_b = 3,34$; 2 – $l_b/d_b = 1,41$, при распыливании дизельного топлива (а) и метанола (б) при $n_{тн} = 1000 \text{ мин}^{-1}$ и противодавлении $p_d = 2,0 \text{ МПа}$

В то же время следует отметить несколько большую зависимость характеристик струй распыливаемого топлива от противодавления при впрыскивании метанола. Так, на режиме с $n_{тн} = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $l_b/d_b = 3,34$ уменьшение противодавления p_d с 2,0 до 1,0 МПа в момент времени $\tau = 1 \text{ мс}$ длина струи дизельного топлива увеличивается на 10 мм (с 57 до 67 мм, см. рис. 12.2, а и 12.3, а).

Длина струи метанола – на 13 мм (с 50 до 63 мм, см. рис.12.2, б и 12.3, б). Это можно отнести к положительным качествам **спиртовых** топлив, позволяющим обеспечить более полный охват камеры сгорания струями топлива на нефорсированных режимах работы дизеля.

Приведенные на рис. 12.2–12.4 данные показывают также, что при работе на метаноле влияние отношения l_b/d_b на формирование геометрических параметров топливных струй менее выражено, чем при работе на дизельном топливе. Это является положительным качеством **спиртовых** топлив и объясняется их лучшей испаряемостью.

12.2. Исследования работы дизеля при раздельной подаче **спиртового** и **дизельного** топлива отдельной топливоподающей аппаратурой

Отмеченные особенности процесса распыливания метанола оказывают заметное влияние на экономические и экологические показатели дизеля, работающего на этом нетрадиционном топливе. Об этом свидетельствуют, в частности, результаты экспериментальных исследований, проведенных в Кировском сельскохозяйственном институте. В этих исследованиях по переводу дизеля воздушного охлаждения Д-21А1 (2С10,5/12) трактора Т-25А на метанол использована система топливоподачи, схема которой приведена на рис. 12.5. В этой схеме топливоподачи дизельный двигатель работает одновременно на двух видах топлива (альтернативном и стандартном), т.е. становится двухтопливным. Различие физических свойств стандартного и альтернативного топлив вынуждают применять двойную систему топливоподачи, содержащую две автономные топливоподающие системы. Метанол из бака 11 (рис. 12.5) через топливопровод 10 поступает к ТНВД 8, который через топливопровод 6 подает **спирт** к форсунке 5. Такая же топливоподающая система, содержащая бак 12, ТНВД 2, топливопроводы 13, 3 и форсунку 4, использована для подачи запальной дозы дизельного топлива. Вначале в камеру сгорания через форсунку 4 впрыскивается дизельное топливо. После его воспламенения в факел распыленного дизельного топлива через форсунку 5 впрыскивается метанол. При этом мощность дизеля регулируется изменением подачи метанола, а подача дизельного топлива постоянна и на скоростном режиме с $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и полной нагрузке (при $p_e = 0,69 \text{ МПа}$) составляет 1 кг/ч или около 10% общей подачи топлива. Такая организация рабочего процесса обеспечивает надежное воспламенение метанола в камере сгорания дизеля.

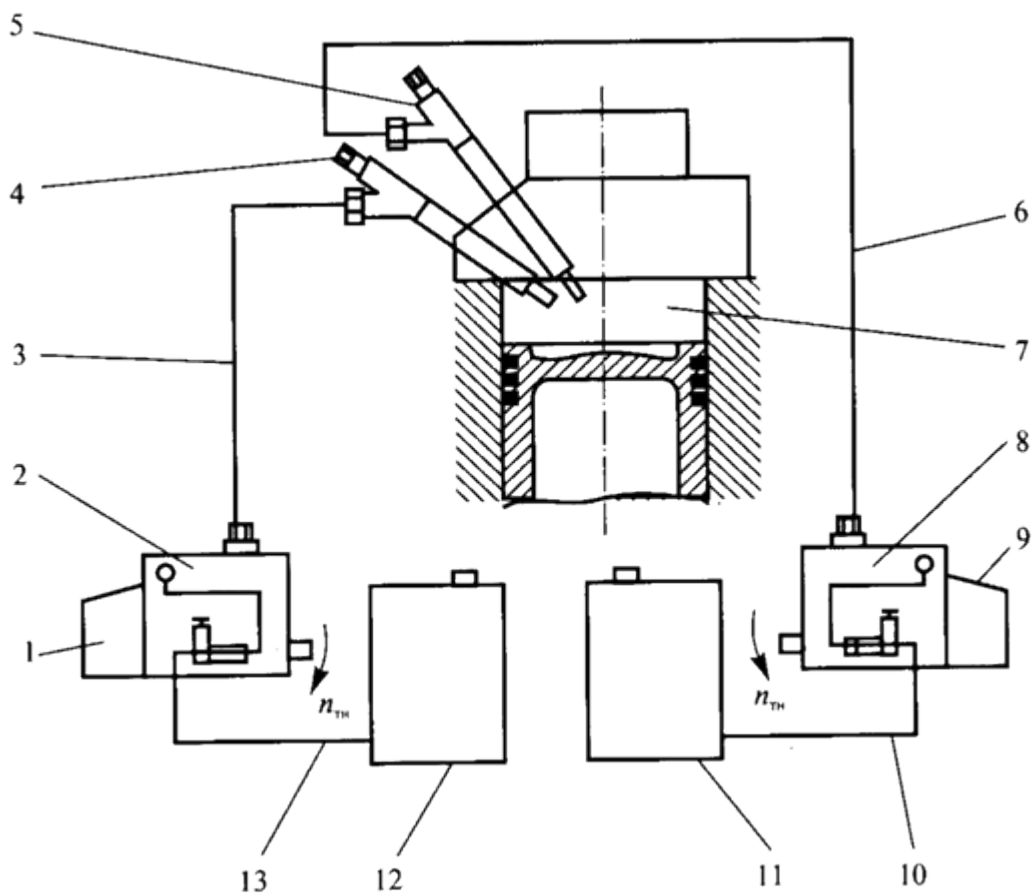


Рис. 12.5. Система подачи метанола и запальной порции дизельного топлива в камеру сгорания дизеля:

1, 9 – автоматические регуляторы; 2, 8 – ТНВД; 3, 6 – топливопроводы высокого давления; 4, 5 – форсунки; 7 – камера сгорания;

10, 13 – топливопроводы низкого давления; 11, 12 – баки с дизельным топливом и метанолом

Результаты исследований дизеля Д-21А1 с описанной системой топливоподачи представлены на рис. 12.6. Следует отметить значительно меньшие концентрации в отработавших газах оксидов азота NO_x при работе дизеля на метаноле. В широком диапазоне нагрузочных режимов содержание NO_x в ОГ снижается в 3–4 раза, что объясняется существенно меньшими скоростями тепловыделения и нарастания давления в дизеле, работающем с данной системой топливоподачи.

Для сгорания метанола характерно и существенное снижение дымности ОГ, равное 40–50% на режимах с полной нагрузкой. Кроме указанных выше причин это обусловлено также меньшим содержанием в метаноле углерода и большим содержанием кислорода.

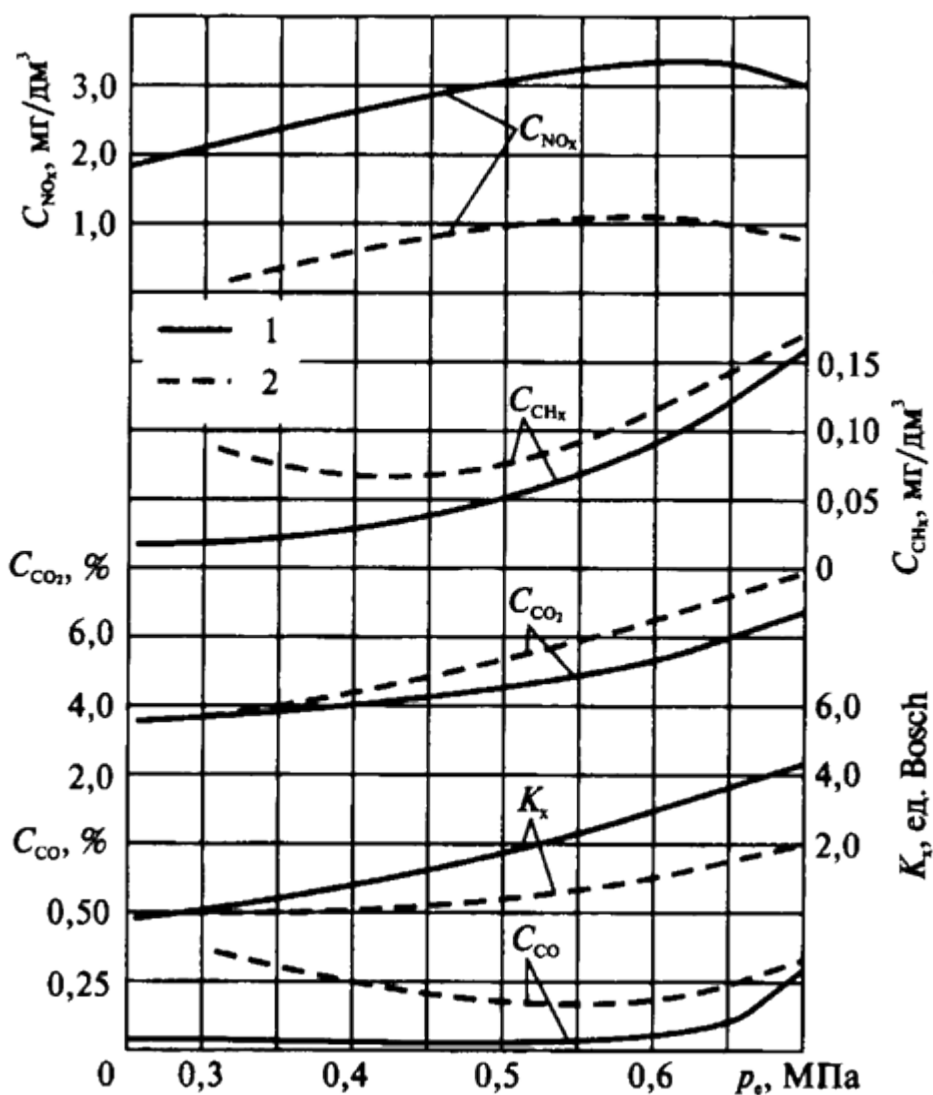


Рис. 12.6. Содержание вредных веществ CO , CH_x , NO_x , диоксида углерода CO_2 и дымности K_x в зависимости от нагрузки дизеля Д-21А при работе на дизельном топливе (1) и на метаноле (2) с запальной дозой дизельного топлива при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

В то же время следует отметить, что при работе дизеля на метаноле на режимах с неполной нагрузкой наблюдается некоторое увеличение эмиссии других токсичных компонентов – углеводородов CH_x и монооксида углерода CO . Однако в количественном отношении увеличение концентраций CH_x и CO незначительно. Повышается и содержание в ОГ углекислого газа CO_2 и альдегидов. Отмечается также увеличение удельного эффективного расхода g_e спиртового топлива. На режиме наилучшей экономичности переход с дизельного топлива на метанол сопровождается повышением g_e с 240 до 470 г/кВтч, что связано с низкой теплотой сгорания метанола (19670 против 42500 кДж/кг у дизельного топлива «Л»).

12.3. Работа дизеля на эмульсиях дизельного топлива и метанола

Возможна подача метанола в дизель в виде эмульсии с дизельным топливом штатной системой топливоподачи. Однако создание стабильных однородных смесей метанола и дизельного топлива затруднено из-за их разных физических свойств. Поэтому необходимо использование поверхностно-активных веществ (стабилизаторов), наиболее эффективным из которых является сукцинимид. При исследованиях дизеля Д-21А1, проведенных в Кировском сельскохозяйственном институте, сукцинимид добавлялся в метанолотопливную эмиссию (МТЭ) в количестве 1% по массе, что обеспечивало

стабильность эмульсии от 34 до 7 ч при содержании метанола в МТЭ соответственно от 5 до 40% по массе. Работа дизеля на таких эмульсиях сопровождалась улучшением его экологических показателей.

Из данных, представленных на рис. 12.7, следует, что при работе исследуемого дизеля Д-21А1 на МТЭ содержание оксидов азота в ОГ уменьшилось почти в 2 раза. Это связано со снижением локальных и средней температур процесса сгорания из-за сильного охлаждения топливовоздушной смеси при испарении метанола, что подтверждается снижением температуры ОГ при сжигании МТЭ. Так, перевод исследуемого дизеля с дизельного топлива на МТЭ на режиме $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и $p_e = 0,6 \text{ МПа}$ сопровождается снижением температуры ОГ с 450 до 380 °С. В результате на указанном режиме содержание NO_x в ОГ составило 0,036% при работе на дизельном топливе и 0,017–0,022% – при работе на МТЭ.

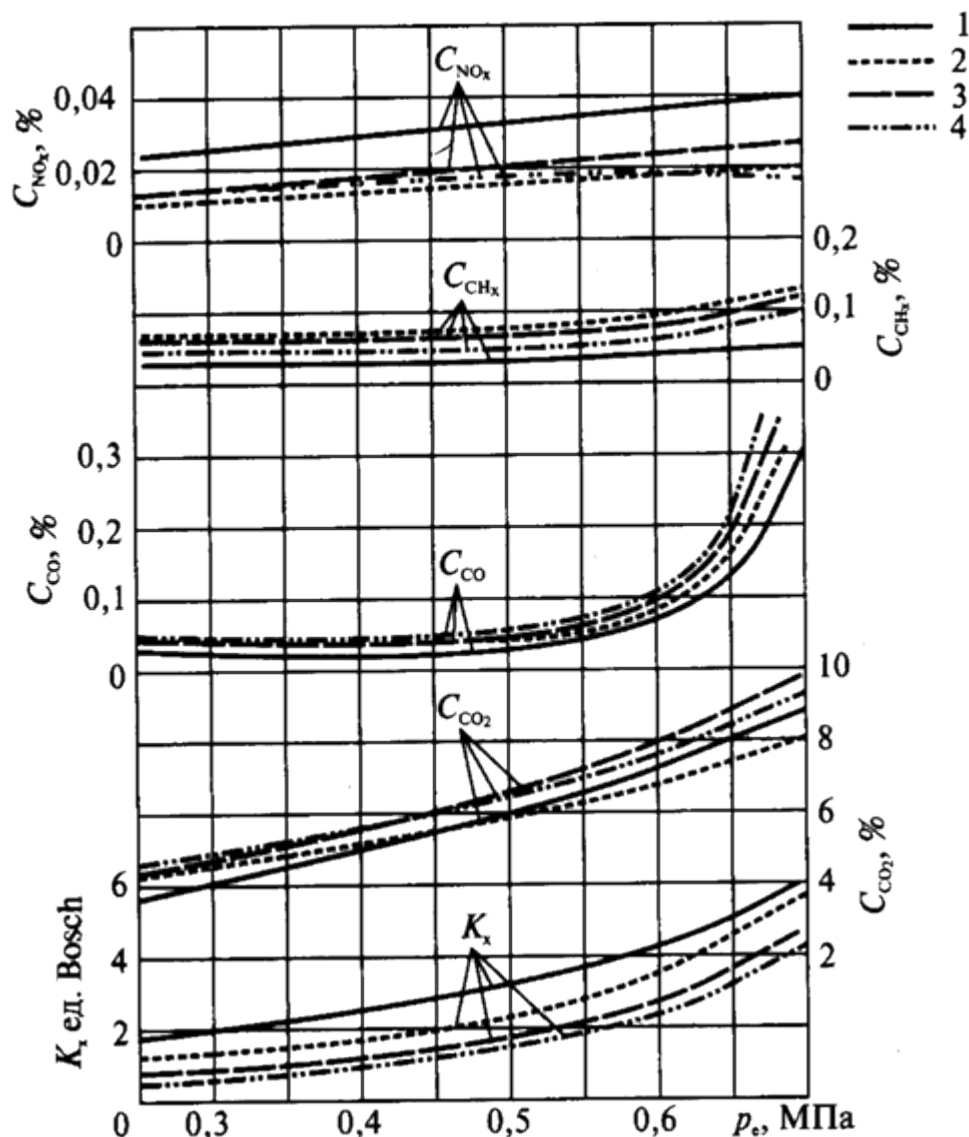


Рис. 12.7. Содержание вредных веществ CO , CH_x , NO_x , диоксида углерода CO_2 и дымности K_x в зависимости от нагрузки дизеля Д-21А1 при работе на дизельном топливе (1) и на метанолотопливной эмульсии с содержанием метанола 10% (2), 20% (3), 30% (4) при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$

При работе дизеля Д-21А1 на МТЭ содержание сажи в ОГ (дымность K_x) также снижается, так как спирты обладают меньшей склонностью к дымлению из-за наличия в их молекулах значительного количества атомов кислорода. Значительное снижение дымности ОГ отмечается практически на всех нагрузочных режимах работы дизеля (рис. 12.8).

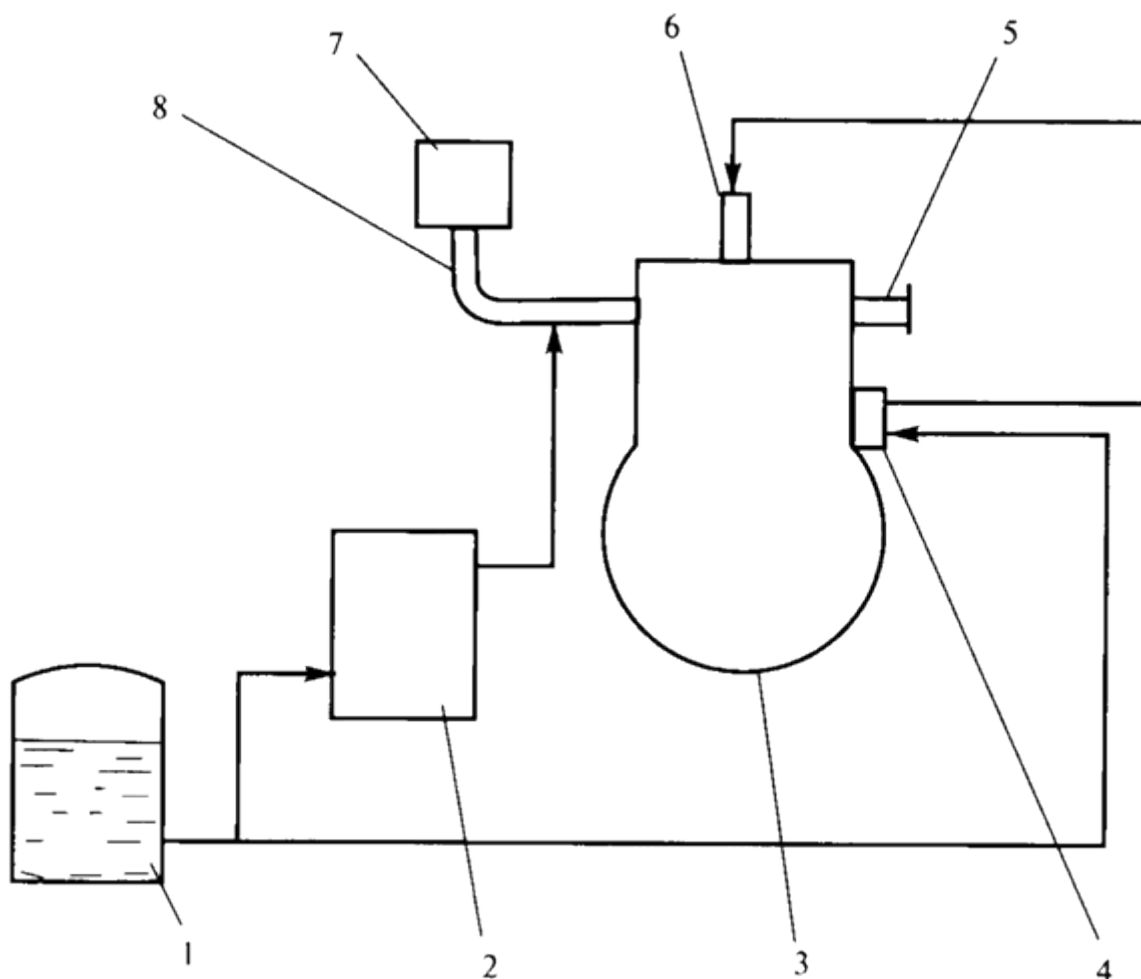


Рис. 12.8. Система топливоподдачи дизеля, работающего на метаноле с подачей запальной порции диметилового эфира:

1 – бак с метанолом; 2 – каталитический реактор для получения деметилового эфира; 3 – дизель; 4 – ТНВД; 5 – выпускной трубопровод; 6 – форсунка; 7 – воздухоочиститель; 8 – впускной трубопровод

Содержание в ОГ исследуемого дизеля Д-21А1, работающего на МТЭ, других токсичных компонентов незначительно отличается от аналогичных показателей при работе на дизельном топливе (см. рис. 12.7). Таким образом, применение МТЭ в дизелях значительно снижает суммарную токсичность их ОГ, не требует значительных конструктивных изменений и является одним из перспективных методов улучшения экологических показателей дизелей.

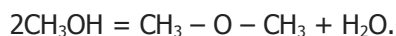
Отмеченные выше тенденции изменения экономических и экологических показателей при переводе двигателя на метанол отмечены и в ряде исследований дизелей, имеющих систему воспламенения метаноловоздушной смеси свечей зажигания. Такая организация процесса воспламенения метанола использована фирмой Detroit Diesel в дизеле 6V-92ТА (6ЧН 12,3/12,7) городского автобуса, оснащенный штатной системой топливоподдачи DDEC с насос-форсунками с электронным управлением и системой воспламенения со свечами зажигания.

При исследовании дизеля 6V-92ТА, работающего на метаноле, получено снижение выбросов с ОГ оксидов азота NO_x в два раза при одновременном уменьшении эффективного КПД дизеля на 5–7% по сравнению с работой на дизельном топливе. Одновременно отмечалось некоторое увеличение выбросов продуктов неполного сгорания топлива – монооксида углерода CO и углеводородов CH_x . В то же время показаны возможности снижения эмиссии этих токсичных компонентов. Одним из значимых факторов, влияющих на выбросы CO и CH_x с ОГ, является число распыливающих отверстий форсунки. Отмечено

противоположное их влияние на удельные выбросы оксида углерода и несгоревших углеводородов. Так, при увеличении числа распыливающих отверстий выбросы CO возрастают, а эмиссия CH_x убывает. Таким образом, для достижения наилучших экологических показателей дизеля необходима оптимизация этого конструктивного параметра.

12.4. Применение диметилэфира для воспламенения метанола-воздушной смеси в дизеле

Проблема воспламенения метанола-воздушной смеси в цилиндрах дизеля может быть также решена путем подачи в цилиндры двигателя некоторого количества [диметилового эфира](#), получаемого из метанола непосредственно на борту транспортного средства. С этой точки зрения определенный интерес представляет двойная система топливоподачи автомобильного дизеля ACME ADN-37 ($\epsilon = 19$, $V_h = 0,337 \text{ дм}^3$, $N_e = 4 \text{ кВт}$ при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$), работающего на метаноле с подачей в камеру сгорания запальной дозы [диметилового эфира](#), который получают из метанола в небольшом реакторе, установленном непосредственно на автомобиле. Система топливоподачи (рис. 12.8) включает каталитический реактор 2, в котором [диметиловый эфир \(ДМЭ\)](#) получают из метанола, используемого для работы дизеля. При этом основная доза метанола подается из бака 1 в дизель 3 от ТНВД 5, нагнетающего топливо в форсунку 6. Другая часть метанола направляется в реактор 2, в котором [ДМЭ](#) получают путем обезвоживания метанола в среде кислотного катализатора по формуле



Полученный таким образом диметилэфир подается во впускной трубопровод 8 после воздухоочистителя 7. Такая система топливоподачи не требует наличия на автомобиле двух топливных баков, что является ее большим преимуществом по сравнению с рассмотренной выше (см. рис. 12.5) системой подачи запальной дозы дизельного топлива.

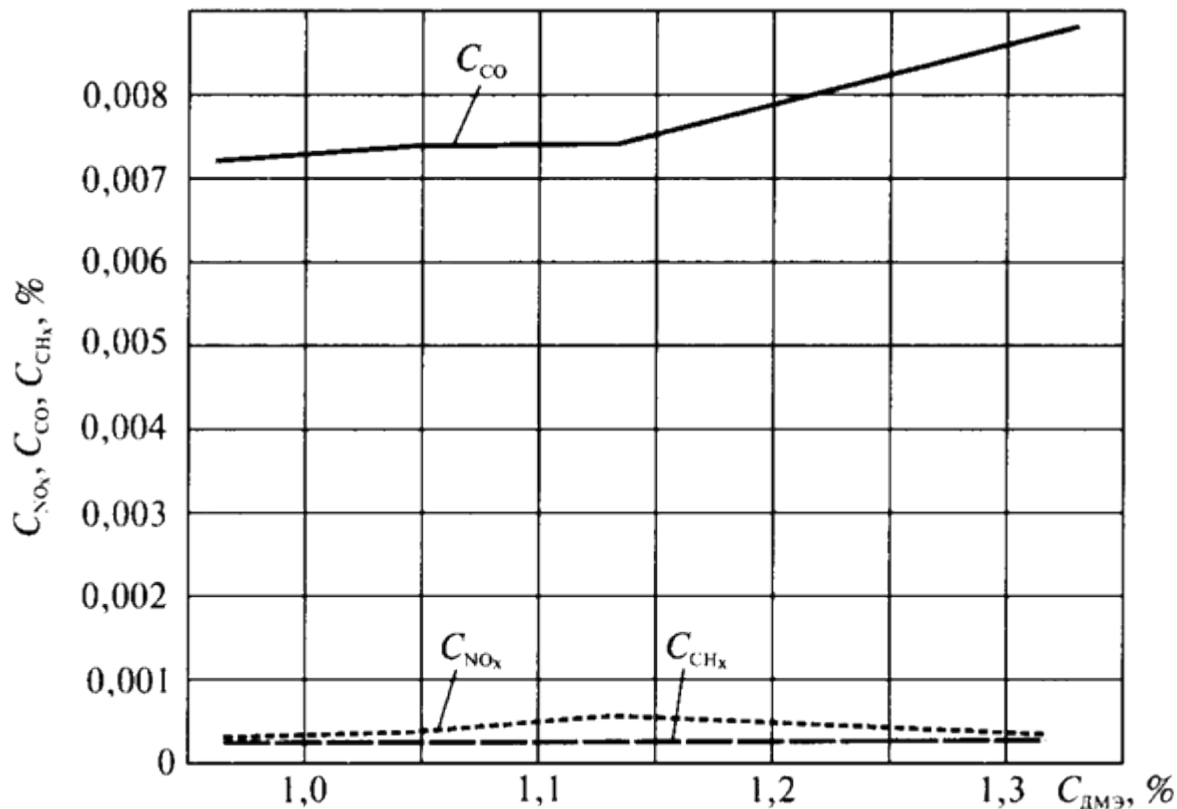


Рис. 12.9. Содержание вредных веществ CO, CH_x и NO_x в зависимости от концентрации [диметилового эфира](#) в воздушном заряде дизеля ACME AND-37

Некоторые результаты исследований указанного дизеля приведены на рис. 12.9. При испытаниях концентрация диметилэфира в воздухе, подаваемом в цилиндры, изменялась от 0,95 до 1,32%. Поскольку диметилэфир характеризуется хорошей воспламеняемостью в камере сгорания дизеля, его работа на эфирметаноловой смеси отличается мягким процессом сгорания. Так, отмечены снижение максимальной скорости нарастания давления на 30–50% по сравнению с работой на дизельном топливе, а также снижение максимальных температур сгорания. В результате значительно уменьшилась концентрация в **ОГ** оксидов азота. При этом дополнительное снижение содержания NO_x в **ОГ** может быть достигнуто при целенаправленном изменении угла начала воспламенения метанолового топлива путем регулирования количества диметилэфира во впускаемом воздухе. При переводе дизеля на диметилэфир-метаноловую смесь резко снижается или вообще отсутствует эмиссия сажевых частиц.

В то же время концентрация монооксида углерода в **ОГ** увеличивается в среднем на 30–40%. Выявлено и небольшое повышение эмиссии несгоревших углеводородов. Рост эмиссии CH_x и CO при работе дизеля на эфир-метаноловой смеси обусловлен увеличением количества несгоревших паров горючей смеси, присутствующих в застойных зонах цилиндра. Такое увеличение выбросов CO и CH_x не является критическим, поскольку эти компоненты могут быть легко окислены с помощью каталитического нейтрализатора.

Спирты - органические соединения, характеризующиеся присутствием в их молекуле одной или нескольких гидроксильных групп OH .

12.5. Подача метанола во впускной трубопровод дизеля

Снижение эмиссий оксидов азота и сажи отмечается и при подаче метанола во впускной трубопровод дизеля. В этом случае к параметрам впрыскивания метанола предъявляются менее жесткие требования, чем при подаче метанола непосредственно в цилиндры. Так, при исследовании четырехтактного дизеля DT-24368 (6ЧН 10,9/12,7) фирмы Navistar International (неразделенная камера сгорания, $\varepsilon = 16,3$, $iV_h = 7,14 \text{ дм}^3$, $N_e = 125 \text{ кВт}$ при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$), работающего на метаноле и этаноле, **спиртовое** топливо впрыскивалось во впускной коллектор с помощью топливного насоса распределительного типа и форсунки с электронным управлением модели E-10 фирмы Bendix под давлением около 10 МПа.

Дизельное топливо подавалось в камеру сгорания штатной системой топливоподачи. Доля **спиртового** топлива (этанола и метанола) варьировалась в пределах 0–80% полной цикловой подачи топлива. Испытания дизеля показали возможность снижения эмиссии оксидов азота в 5–6 раз при увеличении доли **спиртового** топлива в общей подаче от 0 до 80%.

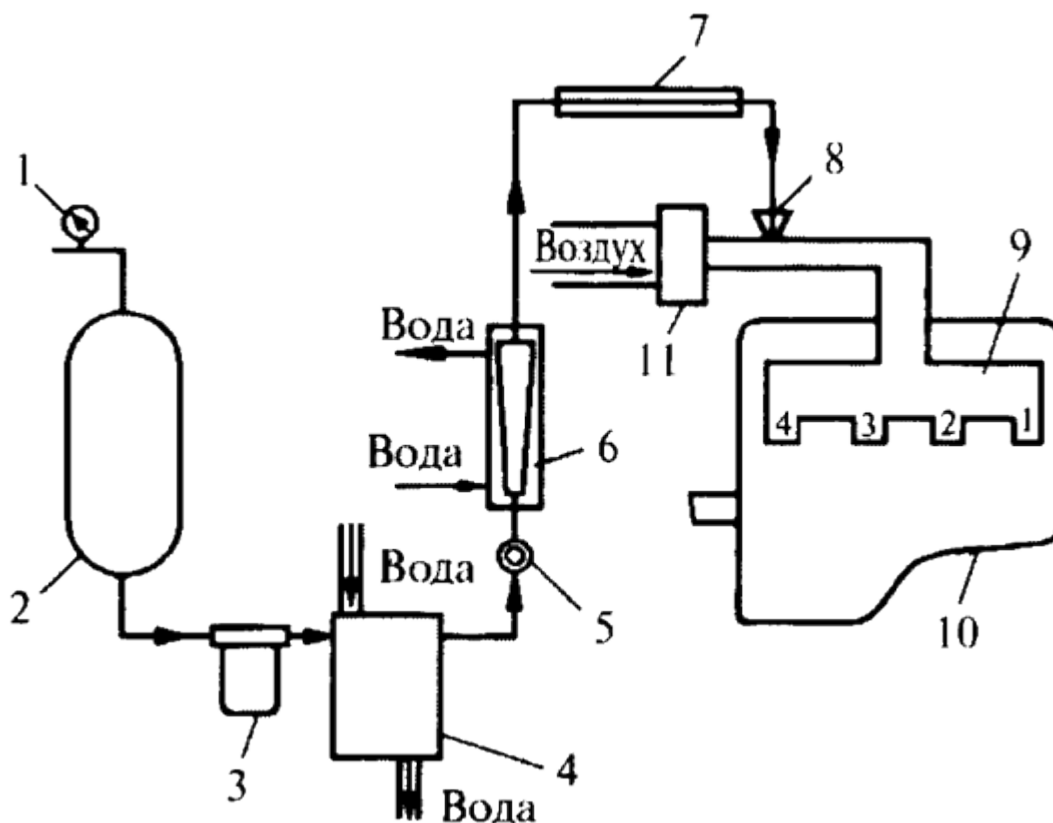


Рис. 12.10. Схема экспериментальной установки для исследования подачи этанола во впускную систему дизеля:

1 – воздушный манометр; 2 – бак для спиртового топлива; 3 – фильтр; 4 – холодильник; 5 – вентиль; 6 – ротаметр; 7 – подогреватель; 8 – распылитель спиртового топлива; 9 – впускной коллектор; 10 – двигатель; 11 – турбокомпрессор.

В университете штата Висконсин (Мэдисон, США) создана экспериментальная установка (рис. 12.10) и проведены испытания дизеля с подачей парообразного этанола во впускную систему. Исследовался четырехтактный четырехцилиндровый дизель с рабочим объемом $V_h = 8,259$ л с турбонаддувом и многоплунжерным ТНВД фирмы R. Bosch, впрыскивающим дизельное топливо в цилиндры дизеля. Одновременно из бака 2 во впускной коллектор 9 через распылитель 8 подавался этанол, поступающий в цилиндры в паровой фазе. Таким образом, двигатель работал на двух видах топлива.

Результаты экспериментальных исследований, полученные на режимах с частотой вращения коленчатого вала

$n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 12.11), свидетельствуют о значительной зависимости показателей эффективности работы двигателя от соотношения впрыскиваемого в камеру сгорания дизельного топлива и подаваемого во впускной коллектор этанола. Так, на режимах с высокими нагрузками термический КПД η_t несколько возрастал с увеличением доли парообразного этанола в общей подаче топлива в дизель. На режимах с малыми нагрузками, напротив, термический КПД уменьшался с увеличением процентной подачи спирта. Аналогичные зависимости наблюдались на всех исследованных скоростных режимах, а также при добавках спирта различной крепости.

Подача этанола во впускной коллектор дизеля проводилась для замещения части дизельного топлива спиртом. При этом экономия дизельного топлива (снижение его удельного эффективного расхода g_e) на режимах с полной нагрузкой достигала 50% (кривая 1 на рис. 12.11).

При экспериментальных исследованиях дизеля установлено также, что на режимах с высокой нагрузкой при добавлении этанола во впускной коллектор показатели динамики цикла (период задержки воспламенения) τ_i , максимальное давление сгорания p_z и интенсивность повышения давления при сгорании $dp/d\phi$ несколько возрастали. При снижении нагрузки период задержки воспламенения τ_i увеличивался, но

из-за смещения воспламенения за ВМТ (на такт расширения) величины p_z и $dp/d\varphi$ уменьшались. На режимах с полной нагрузкой добавление 50% этанола приводило к росту τ_i на 35%, что связано с низкими цетановыми числами [спиртов](#). Однако, несмотря на повышение величины $dp/d\varphi$, детонационного сгорания не наблюдалось: двигатель нормально работал при добавках этанола до 55%.

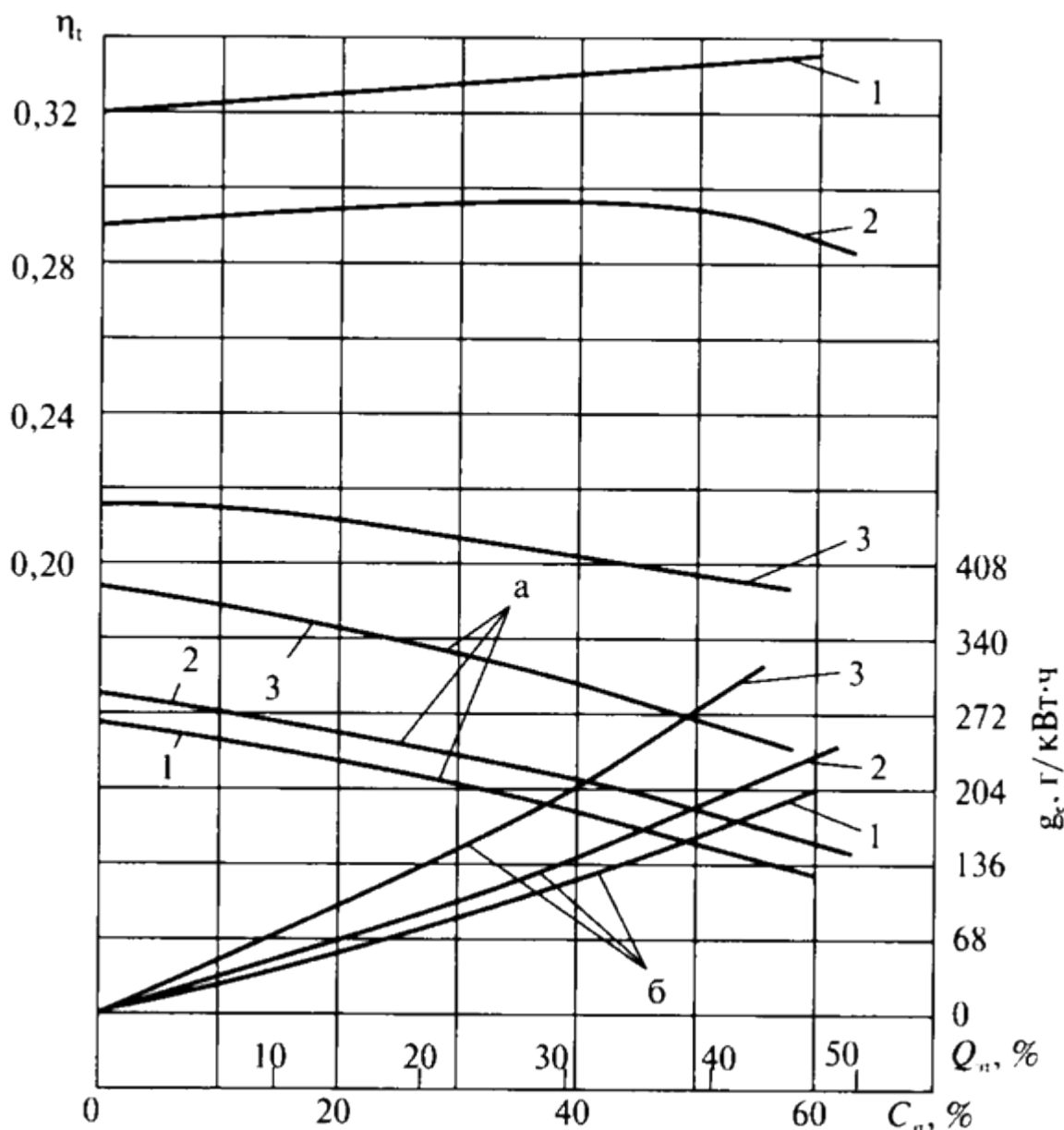


Рис. 12.11. Зависимость термического КПД η_t и удельного эффективного расхода g_e дизельного топлива (а) и этанола (б) от его относительной подачи во впускной коллектор $C_{ст}$

(относительной энергии выделяемой этанолом $Q_{ст}$) при частоте вращения $n = 2100$

мин⁻¹

и

нагрузке:

1 – 84,7...96,9 кВт; 2 – 55,7...56,6 кВт; 3 – 27,6...28,0 кВт

Дымность, замеренная по методике фирмы R. Bosch,

с увеличением подачи этанола уменьшалась. При этом содержание оксидов азота в [ОГ](#) также уменьшалось, что связано с охлаждением рабочей смеси при испарении [спиртового](#) топлива. Количество несгоревших углеводородов, напротив, возрастало, что объясняется их присутствием во впускном воздухе и гашением пламени в пристеночной области из-за пониженного температурного уровня деталей [КС](#). Другой причиной повышенного содержания несгоревших углеводородов в [ОГ](#) является попадание части испарившегося [спирта](#) в выпускную систему во время периода одновременного открытия впускного и выпускного клапанов.

Отмеченное при испытаниях увеличенное содержание кислорода в [ОГ](#) может быть связано с повышенным содержанием кислорода в топливе, уже подготовленном к воспламенению.

Недостатком рассмотренной организации работы дизеля на дизельном топливе и этаноле (рис. 12.10) является наличие двух отдельных систем подачи указанных топлив. Необходимость использования в двухтопливном дизеле двух форсунок существенно усложняет его конструкцию, требует размещения дополнительных элементов на двигателе.

Спирты - органические соединения, характеризующиеся присутствием в их молекуле одной или нескольких гидроксильных групп ОН.

12.6. Подача метанола и дизельного топлива через единую топливopодательную аппаратуру дизеля

Японская фирма Isuzu разработала систему подачи дизельного топлива и этанола в неразделенную камеру сгорания дизеля легкового автомобиля, в которой оба эти топлива впрыскиваются в цилиндр одной форсункой (рис. 12.12). При такой схеме процесса топливоподачи воспламенение этанола происходит от запальной дозы дизельного топлива. Система топливоподачи работает следующим образом. Дизельное топливо подается к форсунке 9 от ТНВД 1 через нагнетательный клапан 2, топливопровод 12 и воздействует на запорную иглу 10 форсунки, поднимая ее. При посадке нагнетательного клапана на седло происходит отсечка топлива, а разгружающий поясок клапана создает отсасывающий эффект и вызывает разрежение в полости нагнетания. Это разрежение открывает клапан 8, и [спирт](#) из емкости 3 по магистрали 4 подкачиваемым насосом 5 через фильтр 7 подается в канал 11 форсунки 9. [Спиртовое](#) топливо находится под избыточным давлением в магистрали между насосом 5 и клапаном 8, определяемым перепускным клапаном в магистрали 6. Смешение топлив происходит в канале 11 форсунки 9, поэтому ТНВД защищен от работы на маловязком [спиртовом](#) топливе. В рассмотренной системе нагнетательный клапан выполнен с развитым разгрузочным пояском для создания больших разрежений, обеспечивающих увеличенную подачу [спирта](#) через форсунку 9. Разработчики описанной системы топливоподачи утверждают, что она позволяет осуществить подачу любого жидкого альтернативного топлива, включая растительные масла.

Проведенные экспериментальные исследования представленной на рис. 12.13 системы топливоподачи показали, что доля этанола в смесевом топливе в значительной степени зависит от режима работы дизеля и изменяется в основном, в диапазоне $C_{\text{эт}} = 25\text{--}50\%$ (рис. 12.13, а, б). При этом следует отметить недостаток этой системы, заключающийся в том, что доля [спирта](#) в смесевом топливе не регулируется и увеличивается со снижением скоростного режима работы дизеля. В то же время для повышения качества рабочего процесса дизеля доля [спиртового](#) топлива с ростом частоты вращения должна возрастать. Управление составом смесевоего топлива в представленной системе может быть достигнуто путем установки элементов управления расходом [спирта](#) через клапан 8 (см. рис. 12.12).

По результатам испытаний отмечено значительное снижение дымности [ОГ](#) при переводе двигателя с дизельного на [смесевое топливо](#). На режимах с полной нагрузкой (при $p_c = 0,7 - 0,8$ МПа) дымность [ОГ](#) снизилась в два раза, что объясняется улучшением качества процесса смесеобразования при работе на смеси дизельного и [спиртового](#) топлив, а также содержанием в молекулах [спиртового](#) топлива значительного количества кислорода.

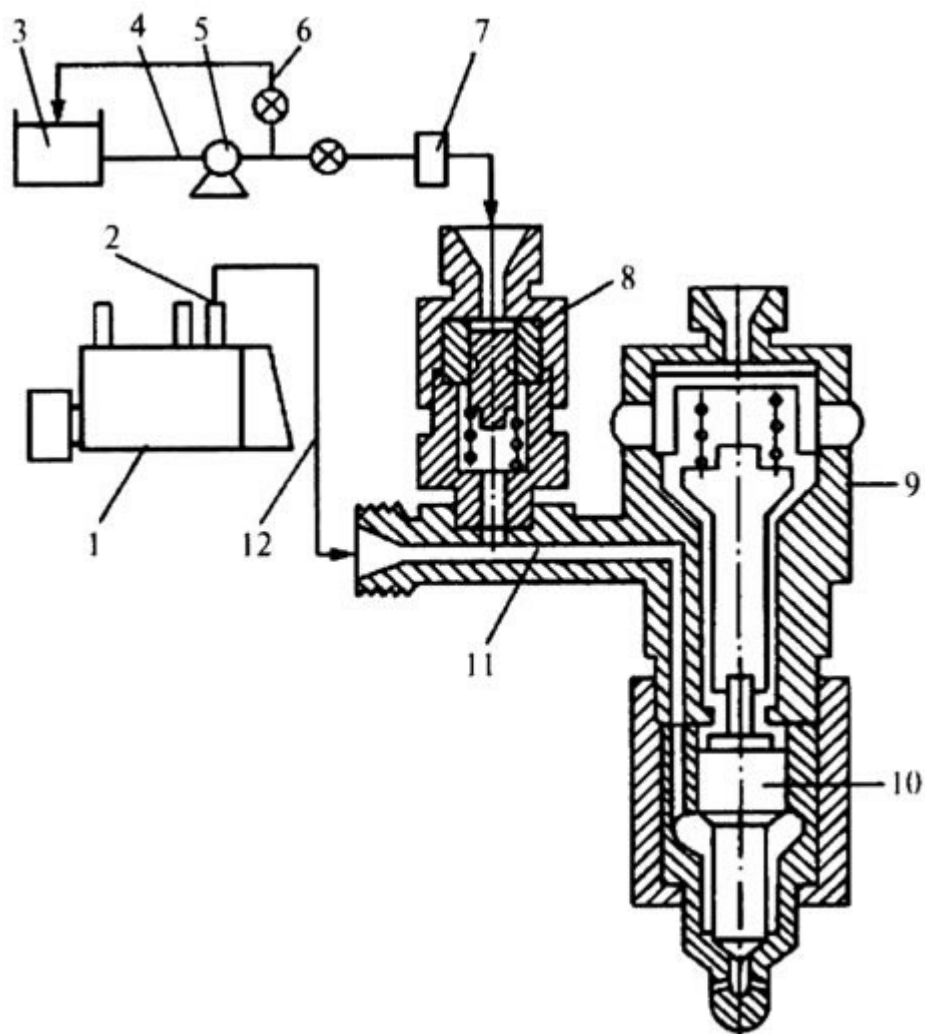


Рис. 12.12. Система подачи [спиртового](#) и дизельного топлива в дизель автомобиля фирмы Isuzu:

1 – ТНВД; 2 – нагнетательный клапан; 3 – бак со [спиртовым](#) топливом; 4, 6 – магистрали; 5 – подкачивающий насос; 7 – фильтр; 8 – клапан; 9 – форсунка; 10 – запорная игла; 11 – канал; 12 – топливопровод.

Анализ экспериментальных данных показал, что на режимах с частотой вращения $n = 2100$ мин¹ выделившаяся при сгорании смесового топлива энергия $Q_{\text{выд}}$ несколько ниже энергии, получаемой при сгорании дизельного топлива (рис. 12.13, б), а на режимах с $n = 1000$ мин¹, наоборот, сжигание смесового топлива приводит к выделению большей энергии (см. рис. 12.13, а). Это, по-видимому, объясняется недостаточно высоким качеством процесса смесеобразования в двигателе, работающем на дизельном топливе на режимах с пониженной частотой вращения (при $n = 1000$ мин¹), и значительным улучшением качества этого процесса при переводе двигателя на [смесовое топливо](#) за счет взрывоподобного испарения [спирта](#) из струй распыливаемого топлива в условиях высоких температур в камере сгорания и, как следствие, дополнительной турбулизации этих струй.

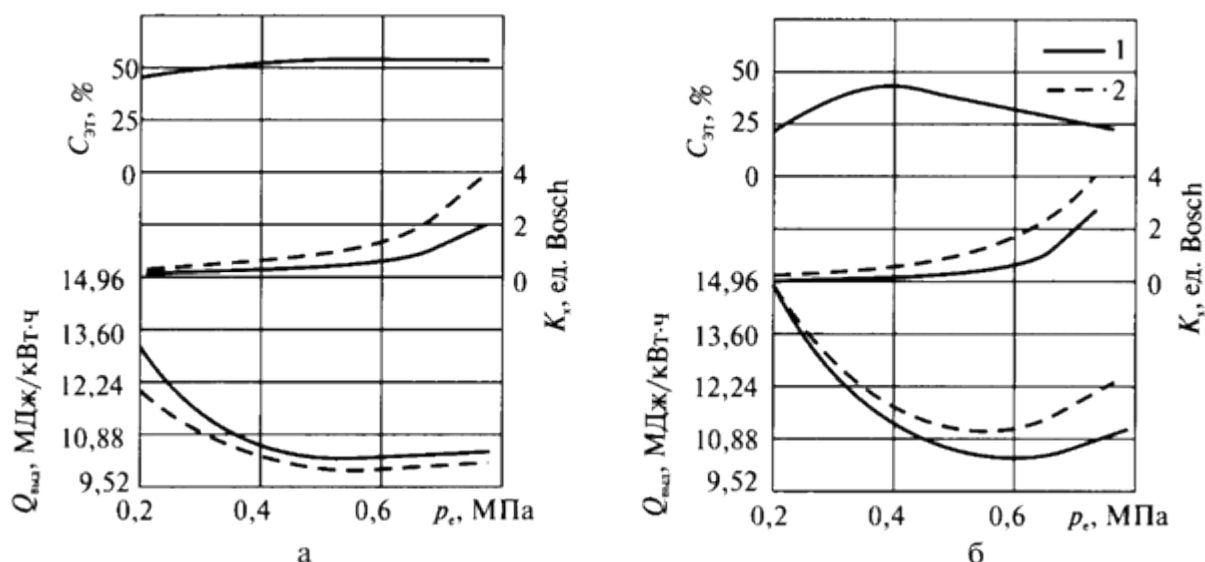


Рис. 12.13. Объемное содержание этанола $C_{\text{этр}}$, дымности отработавших газов K_x и выделившейся теплоты $Q_{\text{выд}}$ в зависимости от нагрузки при:
а – $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; **б** – $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$;
1 – [смесевое топливо](#); **2** – дизельное топливо

Подача этанола и дизельного топлива в камеру сгорания дизеля через одну форсунку осуществляется и топливной системой, разработанной в МАДИ (ГТУ). Эта система в начале впрыскивания обеспечивает преимущественную подачу дизельного топлива (до 80%), а окончание подачи смесевое топлива в камеру сгорания происходит с преимущественным содержанием этанола (до 60%). Испытания дизеля

Д-120

(2Ч 10,5/12), укомплектованного этой топливной системой, подтвердили ее эффективность при улучшении показателей токсичности [ОГ](#). В частности, на режиме максимального крутящего момента дымность [ОГ](#) снизилась в 1,5 – 2 раза по сравнению с работой на чистом дизельном топливе.

В заключение следует отметить, что широкое применение [спиртов](#) в качестве моторных топлив для дизелей сдерживается тем обстоятельством, что по ряду физико-химических свойств они существенно уступают дизельным топливам. Основным недостатком [спиртов](#) является плохая воспламеняемость в цилиндрах дизелей, что требует использования различных мероприятий для их принудительного воспламенения. Этот недостаток усугубляется высокой испаряемостью [спиртов](#) и, как следствие, переохлаждением [спирт](#)овоздушной смеси. В частности, теплота испарения метанола в 4,4 раза больше теплоты испарения дизельного топлива (соответственно 1115 и 250 кДж/кг) при низкой температуре кипения, что обуславливает чрезмерное охлаждение воздушного заряда при испарении [спирта](#) и при низких цетановых числах и высоких температурах самовоспламенения [спиртов](#) приводит к их плохому воспламенению в [КС](#) дизеля. Меньшие значения низшей теплоты сгорания по сравнению с дизельным топливом (соответственно 19670 и 42500 кДж/кг) приводят к необходимости корректирования цикловой подачи топлива для сохранения мощностных показателей дизеля.

Таким образом, применение [спиртов](#) в дизелях в чистом виде требует конструктивных изменений двигателя. С целью улучшения воспламенения [спиртов](#) используются двухтопливные системы питания, которые наряду с подачей [спирта](#) обеспечивают подачу запальной дозы дизельного топлива. Подача смесей [спирта](#) с дизельным топливом с помощью традиционной аппаратуры затруднена из-за плохой смешиваемости этих видов топлива. Следует отметить, что этанол смешивается с дизельным топливом ограниченно, т.е. не образует стабильных смесей, а метанол вообще их не образует. Получение таких смесей возможно лишь при добавлении различных стабилизаторов.

Плохие смазывающие свойства и высокая гигроскопичность [спиртов](#) оказывают отрицательное воздействие на прецизионные пары ТНВД и форсунок. Возникающие проблемы с организацией смазки деталей двигателя вызваны коагуляцией присадок моторного масла при попадании в него [спиртовых](#) топлив

и значительным ухудшением смазывающих свойств моторных масел. [Спирты](#) коррозионно активны и агрессивны по отношению к цветным металлам (в частности, к алюминиевым сплавам), резинам, тефлону, лакокрасочным покрытиям и другим конструкционным материалам, так как являются кислородсодержащими соединениями. Это обстоятельство требует подбора материалов, совместимых со [спиртовыми](#) топливами. Следует отметить и повышенную токсичность [спиртов](#). В частности, токсичность паров метанола в воздухе в 3 раза превышает токсичность паров бензина той же концентрации. Однако с учетом уменьшения запасов нефти, удорожания нефтепродуктов и возможности использования возобновляемых сырьевых ресурсов при производстве [спиртов](#) их следует рассматривать в качестве одного из перспективных энергоносителей.

Указанных недостатков [спиртов](#) отчасти лишены высшие [спирты](#) (бутанол, деканол и др.), а также производные [спиртов](#) (изомеры) – эфиры, получаемые при воздействии неорганических кислот на соответствующие [спирты](#). В настоящее время эфиры рассматриваются как перспективные топлива для дизелей, имеющие сравнительно высокое цетановое число и практически не образующие при сгорании сажи.

Перспективное топливо для дизелей, имеющее сравнительно высокое цетановое число и практически не образующее сажи и оксида углерода при сгорании

13. Применение в дизелях топлив на основе эфиров, получаемых из возобновляемых источников

[Эфиры](#), свойства которых приведены в табл. 13.1, используются в качестве запального топлива в двухтопливных двигателях, работающих на топливах с низкими цетановыми числами. Примером такого использования эфиров является описанный выше рабочий процесс дизеля АСМ Е АDН-37, в котором воспламенение метанола осуществляется от запальной дозы [диметилового эфира](#).

Таблица 13.1

Физические и химические свойства эфиров

Показатель	Диметиловый эфир	Этиловый эфир	Изоамиловый эфир	Соевый метил эфир	Трипропилен гликоль метил эфир
Формула	C_2H_6O	$C_4H_{10}O$	$C_{10}H_{22}O$	–	$C_{10}H_{22}O_4$
Молекулярная масса	46,07	74,12	158,3	–	206,3
Плотность при 20 °С, кг/м ³	668	712	777	886,7	971
Вязкость кин. 20 °С, мм ² /с	0,22	–	–	–	–
Цетановое число	> 55	> 125	–	49	70
Температура плавления, °С	138,5	–	75	–	–
Температура кипения, °С	23,7	34,6	173,2	–	–
Температура перегонки, °С: начало, окончание	–	–	–	325,0 390,0	230,5 249,0
Температура	235	–	250	–	–

самовоспламенения, °С					
Теплота сгоран. ^{низш} кДж/кг	28800	33870	40946	–	–

окончание табл. 13.1

Показатель	Диметиловый эфир	Этиловый эфир	Изоамиловый эфир	Соевый метил эфир	Трипропилен гликоль метил эфир
Количество воздуха L_0 , кг/кг	9,0	11,2	13,1	–	9,1
Теплота испарения, кДж/кг	412	–	–	–	–
Давление насыщенных паров при 0,1 МПа и 20 °С, кПа	530,9	110	–	–	–
Теплоемкость при 0,1 МПа и 20 °С, кДж/кг*град	1,43	–	–	–	–

13.1. Работа дизелей на смесевых топливах содержащих эфиры

Другой пример подобного применения эфиров – дизель типа L60 (14Н 7,5/6,2), работающий на смесях дизельного топлива и этанола, а в качестве добавок, улучшающих воспламенение смесевых топлив (сокращающих [период задержки воспламенения](#)), использованы нормальный деканол и [Изоамиловый эфир](#), имеющие температуру самовоспламенения $t_{св}$ соответственно 288 и 250 °С. Одноцилиндровый четырехтактный дизель с турбонаддувом и непосредственным впрыскиванием топлива имеет степень сжатия $\varepsilon = 20$ и систему охлаждения наддувочного воздуха. [Смесевое топливо](#) подается в камеру сгорания штатной топливной системой с форсунками, имеющими давление начала подъема иглы $p_0 = 20$ МПа, и распылителями, выполненными с четырьмя распиливающими отверстиями диаметром $d_0 = 0,2$ мм. Дизель исследовался на режимах с частотой вращения коленчатого вала $n = 3000$ мин⁻¹ и различными нагрузками.

Поскольку исследуемые основные смесевые топлива (смеси дизельного топлива и этанола в объемных пропорциях 70:30 и 60:40) содержали значительное количество этанола, отличающегося высокой теплотой испарения – 870 кДж/кг против 250 кДж/кг у дизельного топлива, при экспериментальных исследованиях были отмечены чрезмерное охлаждение рабочей смеси за счет испарения этанола и увеличение периода задержки воспламенения τ . При этом зафиксировано увеличение жесткости сгорания исследуемых смесевых топлив. Для сокращения τ в основное [смесевое топливо](#) добавлялось 10% смесей, содержащих легковоспламеняющиеся компоненты: нормальный деканол и [Изоамиловый эфир](#). Результаты экспериментальных исследований дизеля L60, работающего на указанных смесевых топливах, приведены на рис. 13.1.

Добавление указанных легкокипящих компонентов в смесевые топлива приводило к их более «мягкому» сгоранию с приемлемыми показателями динамики процесса сгорания и топливной

экономичности. Отмеченное при испытаниях увеличение удельного эффективного расхода топлива g_e по сравнению с работой на чистом дизельном топливе (см. рис. 13.1, а) отчасти обусловлено невысокой теплотой сгорания входящего в смесевое топливо этанола – 26 780 кДж/кг, против 42 715 кДж/кг у дизельного топлива.

Это подтверждается тем обстоятельством, что наибольшая величина g_e получена при испытаниях дизеля на смесевом топливе, содержащем наибольшее количество этанола – на смеси 60% дизельного топлива и 40% этанола, в которую добавлена смесь 7,5% изоамилового эфира и 2,5% нормального деканола (кривая б на рис. 13.1, а). Наименьший же расход смесевых топлив имел место при подаче в цилиндры дизеля смесевых топлив, включающего 70% дизельного топлива и 30% этанола с добавлением 7,5% изоамилового эфира и 2,5% нормального деканола (кривая 5 на рис. 13.1, а).

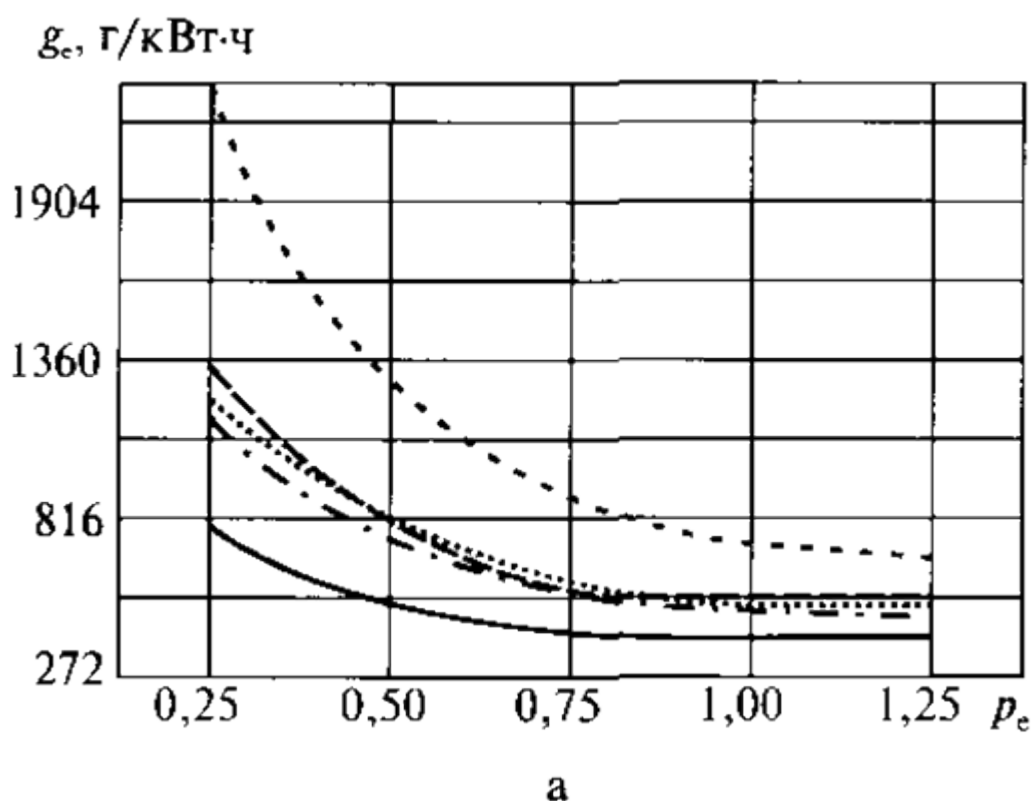
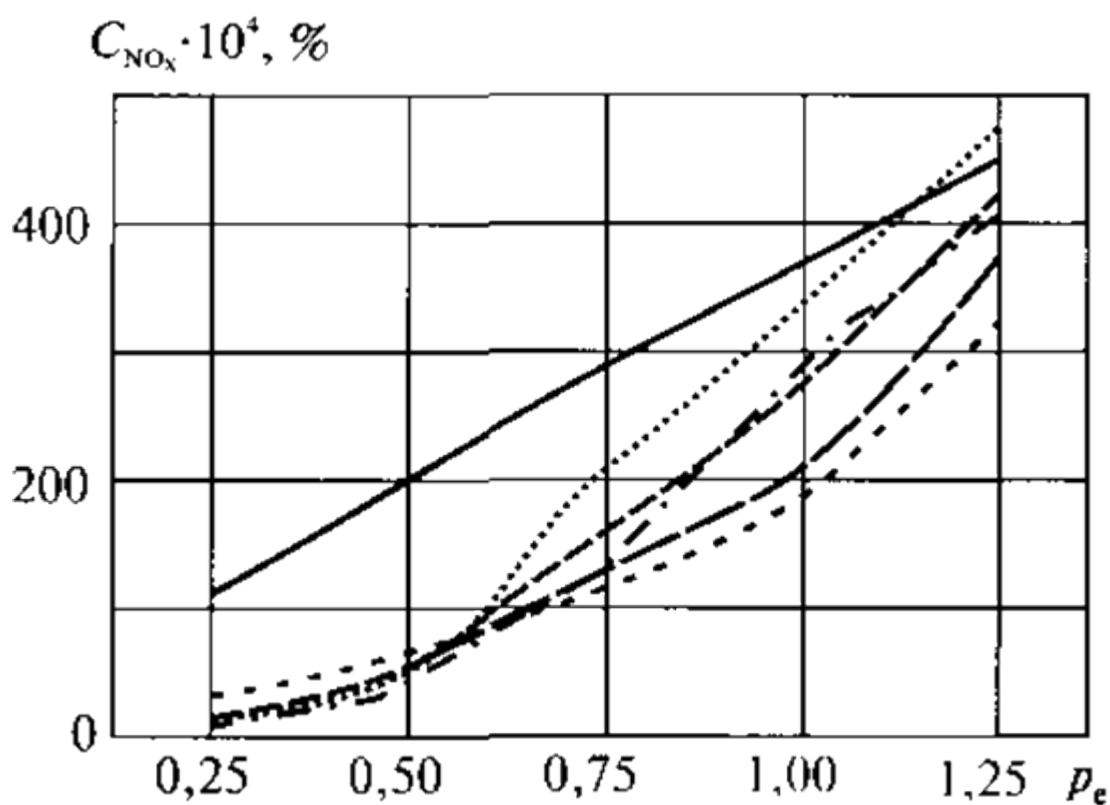


Рис. 13.1. Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e (а), объемного содержания в отработавших газах оксидов азота C_{No} (б) и дымности ОГ K_x (в) от нагрузки на дизель L60 (относительного среднего эффективного давления p_e) при его работе на скоростном режиме $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ на различных топливах:

1 – дизельное топливо; 2 – смесь 70% дизельного топлива (ДТ) + 30% этанола (ЭТ) с добавкой 10% нормального деканола (НД); 3 – смесь 70% ДТ + 30% ЭТ с добавкой 7,5% НД + 2,5% изоамилового эфира (ИЭ);

4 – смесь 70% ДТ + 30% ЭТ с добавкой 5,0% НД + 5,0% ИЭ; 5 – смесь 70% ДТ + 30% ЭТ с добавкой 2,5% НД + 7,5% ИЭ; 6 – смесь 60% ДТ + 40% ЭТ с добавкой 2,5% НД + 7,5% ИЭ



б

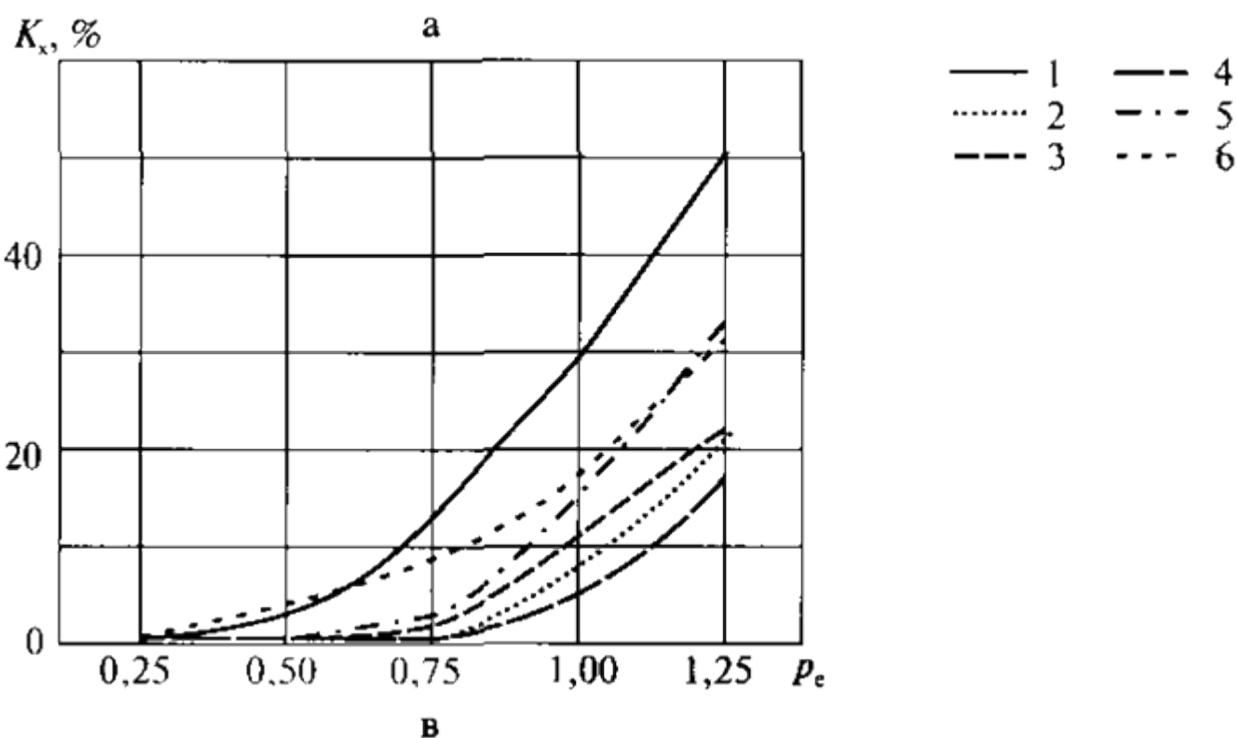


Рис. 13.1. (продолжение)

В то же время работа дизеля на исследуемых смесевых топливах сопровождается значительным улучшением показателей токсичности [ОГ](#) по сравнению с его работой на чистом дизельном топливе. Уменьшение содержания в [ОГ](#) оксидов азота при использовании смесевых топлив (рис. 13.1, б) обусловлено снижением температур их сгорания за счет охлаждения рабочей смеси испаряющимися [спирт](#)овыми компонентами и эфиром, а также улучшением процесса смесеобразования и выравниванием значений максимальной температуры сгорания по объему камеры сгорания. На большинстве исследованных

нагрузочных режимов наименьшее содержание NO_x в ОГ имело место при работе дизеля на смеси 60% дизельного топлива и 40% этанола с добавлением 7,5% изоамилового эфира и 2,5% нормального деканола (кривая 6 на рис. 13.1, б).

Значительное снижение дымности ОГ при переводе двигателя с дизельного топлива на смесевые (рис.13.1, в) объясняется улучшением качества процесса смесеобразования, выравниванием концентраций кислорода по объему камеры сгорания и значительным содержанием кислорода в спиртовых компонентах смесевоего топлива и эфире. На режимах со средними и высокими нагрузками (при $p_e > 75\%$) наименьшая дымность ОГ получена при работе дизеля на смеси 70% дизельного топлива и 30% этанола с добавлением 5% изоамилового эфира и 5% нормального деканола (кривая 4 на рис. 13.1, в).

В целом проведенные исследования подтвердили эффективность добавления легковоспламеняющихся эфиров в смесевые топлива для улучшения показателей динамики процесса сгорания топлив, имеющих низкие цетановые числа, а также улучшения показателей токсичности ОГ дизелей, работающих на таких топливах.

Следует отметить, что эфиры используются и в качестве самостоятельных топлив для дизелей.
Применение таких

топлив становится актуальным в связи с расширением производства сложных эфиров растительных масел, которые уже применяются в Европе в качестве моторных топлив и рассматриваются как один из наиболее вероятных типов топлива для дизелей в России. Эти топлива вырабатываются из возобновляемых сырьевых ресурсов – растительных масел (рапсового, соевого, арахисового и др.), имеют приемлемые значения цетанового числа и по своим физико-химическим свойствам приближаются к стандартным дизельным топливам (табл. 13.1).

Вместе с тем, как правило, эти топлива характеризуются некоторыми отличиями физико-химических свойств, в частности, повышенной по сравнению с дизельными топливами плотностью. Это приводит к некоторому увеличению длины струй L при распыливании сложных эфиров в камере сгорания дизеля штатными форсунками. Так, при распыливании метилового эфира рапсового масла, уже используемого в ряде стран Европы в качестве топлива для дизелей (топливо Biodiesel), длина струй этого топлива может в 1,5 – 1,6 раза превышать длину струй распыливаемого дизельного топлива. Отмечены отклонения и ряда других параметров процессов впрыскивания и распыливания топлива, смесеобразования и сгорания при использовании сложных эфиров растительных масел в качестве топлив для дизелей. Поэтому необходимо корректирование процесса топливоподдачи. Другой путь достижения необходимых показателей работы дизелей, работающих на этих топливах, – перевод на смесевые топлива и оптимизация содержания в них сложных эфиров.

Рассмотрим результаты исследования шестицилиндрового дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива при работе на смесях дизельного топлива со сложными эфирами растительного происхождения – соевым метилэфиром и трипропилен гликоль метил эфиром. Дизель с турбонаддувом имеет рабочий объем $iV_h = 7,961$ л, степень сжатия $\varepsilon = 18$, номинальная мощность $N_e = 191$ кВт при $n = 2700$ мин⁻¹. На рис. 13.2 представлены результаты исследований этого дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла.

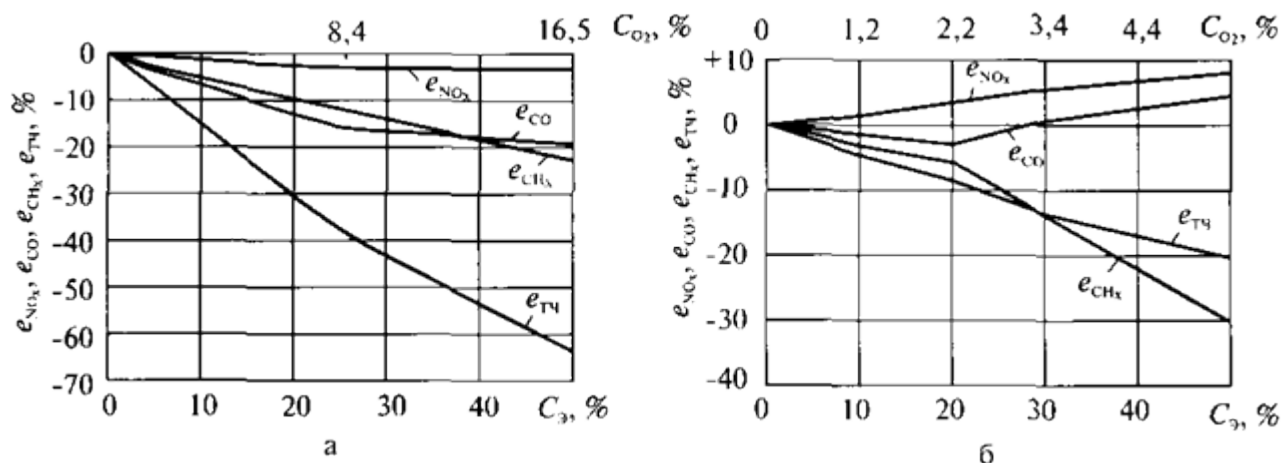


Рис. 13.2. Зависимость относительных удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO} , монооксида углерода e_{CO} , несгоревших углеводородов e_{CH} , дисперсных частиц $e_{ТЧ}$ с ОГ дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива в соответствии с 13-ступенчатым циклом испытаний на смесях дизельного топлива с трипропилен гликольметил эфиром (а) и соевым метил эфиром (б) от объемного содержания эфиров в смеси топлива C_3

При работе дизеля на смесях базового дизельного топлива с трипропилен гликоль метилэфиром отмечено монотонное снижение выбросов всех нормируемых токсичных компонентов ОГ с увеличением содержания эфира в смеси топлива, причем максимальное снижение этих выбросов получено при $C_3 = 50$ об.% и составило для оксидов азота $e_{NO} = -3\%$, для монооксида углерода $e_{CO} = -19\%$, несгоревших углеводородов $e_{CH} = -22\%$, для дисперсных частиц

$e_{ТЧ} = -63\%$. Такое улучшение показателей токсичности объясняется высоким цетановым числом трипропиленгликоль метилэфира ($ЦЧ = 70$), большим содержанием кислорода в его молекуле $C_Q = 31\%$ и сравнительно низкими температурами выкипания этого топлива $230,5 - 249,0$ °С (табл. 13.1).

Несколько худшие физико-химические свойства имел второй исследуемый эфир – соевый метилэфир: $ЦЧ = 49$, $C_Q = 10,8\%$, температуры выкипания $325,0 - 390,0$ °С (табл. 13.1). Поэтому при росте содержания этого эфира C_3 в смеси топлива от 0 до 50% улучшение показателей токсичности ОГ было не столь значительным (рис. 13.2, б): уменьшение эмиссии дисперсных частиц составило $e_{ТЧ} = -20\%$, а несгоревших углеводородов $e_{CH} = -30\%$. При этом выбросы оксидов азота и монооксида углерода возросли: $e_{NO} = +8\%$, $e_{CO} = +4\%$.

13.2. Работа дизелей на диметиловом эфире

В последние годы все большее внимание исследователей привлекает использование диметилового эфира (ДМЭ) в качестве топлива для дизелей. Проведены всесторонние исследования физико-химических свойств ДМЭ, безмоторные исследования систем подачи ДМЭ в дизель, экспериментальные исследования дизелей, работающих на диметиловом эфире и его смесях с другими топливами (дизельным, этанолом, метанолом).

диметиловый эфир может быть получен из любого углеводородного сырья (в том числе из биомассы), но пока основным сырьем для производства ДМЭ в России является природный газ. ДМЭ (CH_3OCH_3) – простейший эфир, при нормальных атмосферных условиях находится в газообразном состоянии, но сжижается уже при давлении 0,5 МПа. Эфир имеет сравнительно высокое цетановое число ($ЦЧ > 55$), но отличается от стандартных дизельных топлив низкой вязкостью. Поэтому при его впрыскивании в камеру сгорания дизеля с помощью штатной системы топливоподачи необходимо предусмотреть смазку плунжерных пар ТНВД. ДМЭ не токсичен и не загрязняет окружающую среду. Из-за большой доли кислорода (около 35%) в молекуле ДМЭ при его сгорании практически не образуются сажа,

монооксид углерода и другие продукты неполного сгорания. По этой же причине это топливо имеет низкую теплоту сгорания, что приводит к пониженным температурам в **КС** дизеля и, как следствие, к низкому выбросу оксидов азота. Но при этом наблюдается снижение мощности дизеля. Поэтому для получения необходимых мощностных показателей необходимо предусмотреть корректирование топливоподачи.

Идея применения **ДМЭ** в качестве топлива для дизелей, данные о возможности его крупномасштабного производства и первые результаты использования в дизелях опубликованы фирмами АМОСО и Navistar (США), Haldor Topsoe (Дания) и AVL (Австрия) в 1995 г. на конгрессе SAE в Детройте (США). Уже первые испытания **ДМЭ** в качестве топлива для дизелей свидетельствовали о том, что **ДМЭ** представляет собой многообещающее альтернативное топливо, как в техническом, так и в коммерческом отношении благодаря экономически эффективной технологии его производства.

Как отмечено, исследованию работы дизелей на **ДМЭ** посвящено достаточно большое количество публикаций. Одно из характерных исследований состояло в испытаниях четырехтактного одноцилиндрового дизеля без наддува с непосредственным впрыскиванием топлива, диаметром цилиндра $D = 92$ мм и ходом поршня $S = 96$ мм (рабочий объем $V_h = 0,632$ л), мощностью $N_e = 15,6$ кВт при номинальной частоте вращения $n = 2600$ мин⁻¹. В процессе испытаний было отмечено, что при работе дизеля на **ДМЭ** процесс образования гомогенной горючей смеси протекает относительно медленно и процесс тепловыделения растянут во времени, это и является причиной достаточно больших выбросов оксидов азота при сгорании **ДМЭ**. Для увеличения турбулентности рабочей смеси с целью сокращения высокотемпературного периода сгорания и соответственно уменьшения образования оксидов азота NO_x двигатель был оборудован вспомогательным топливным насосом высокого давления с независимым управлением, подающим дизельное топливо вспомогательной форсункой в турбулентную камеру. При этом продукты сгорания дизельного топлива поступали из турбулентной в основную камеру сгорания, создавая сильную турбулентность рабочей смеси. Объем турбулентной камеры составил 10% объема основной камеры сгорания.

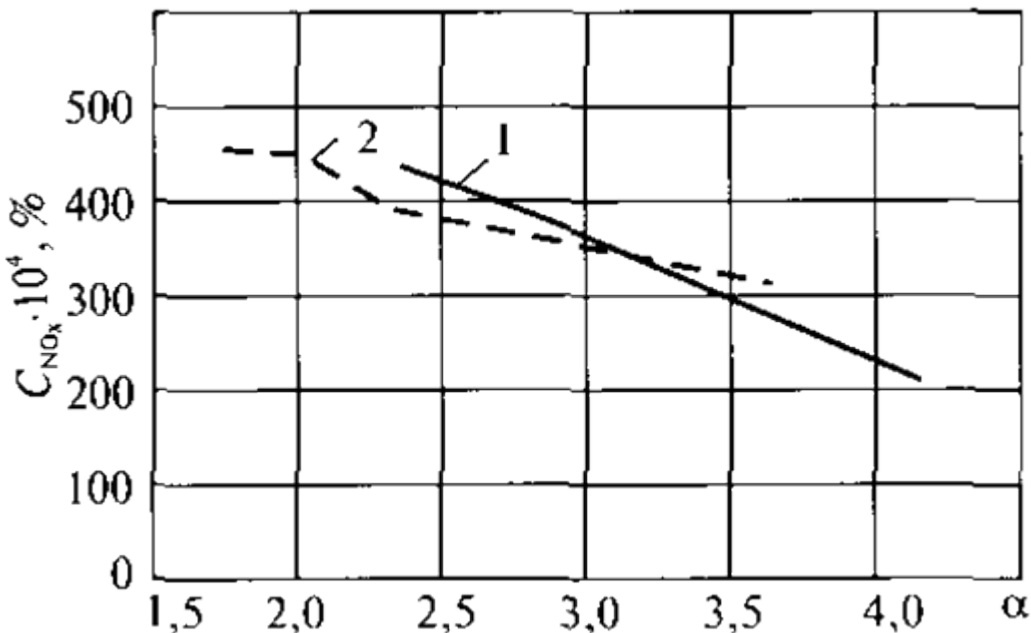


Рис. 13.3. Зависимость концентрации оксидов азота в **ОГ от коэффициента избытка воздуха при $n = 960$ мин⁻¹:**

1 – при работе двигателя с добавками эфира; 2 – на чистом дизельном топливе.

При экспериментальных исследованиях измерялось текущее давление в цилиндре. Полученные результаты испытаний двигателя, работающего с добавками эфира и на чистом дизельном топливе, показаны на рис. 13.3, на котором можно отметить очень близкие уровни содержания NO_x в **ОГ** при работе дизеля на указанных топливах.

На режимах с высокой частотой вращения процессы впрыскивания, распыливания и смесеобразования в дизелях интенсифицируются, в этом случае при их работе на ДМЭ отмечаются заметно меньшие концентрации NO_x в ОГ, чем в случае использования дизельного топлива.

Это подтверждается экспериментальными данными, полученными в НАМИ на одноцилиндровом дизеле типа КамАЗ-740 (1 ЧН 12/12), представленными на рис.13.4. При испытаниях дизеля на различных нагрузочных режимах при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ отмечено, что разница между концентрациями C_{NO} при использовании дизельного топлива и ДМЭ увеличивается с ростом нагрузки. На режиме с полной нагрузкой перевод дизеля с дизельного топлива на ДМЭ сопровождался снижением C_{NO} в 2,5 раза. Следует отметить значительные концентрации в ОГ монооксида углерода C_{CO} и несгоревших углеводородов C_{CH} и практически полное отсутствие дымности ОГ при работе дизеля на ДМЭ.

Проведенные экспериментальные исследования дизеля Д-245.12 с разработанной в НИИД системой топливоподачи показали следующее. При переводе дизеля с дизельного топлива на ДМЭ и работе на режимах с высокой нагрузкой ($M_e = 50\text{--}100\%$) содержание в ОГ оксидов азота сократилось в 2–3 раза. На режиме максимального крутящего момента выброс несгоревших углеводородов CH_x снизился на 20–70%, однако на режимах малых нагрузок концентрации CH_x в ОГ превышали их уровень, полученный при использовании дизельного топлива, и достигали величин $C_{\text{CH}} = 0,2\text{--}0,3\%$. Содержание в ОГ монооксида углерода при работе на ДМЭ на всех режимах превышало соответствующие величины при работе на дизельном топливе и достигало величины $C_{\text{CO}} = 0,1\%$. В то же время на всех режимах, включая режимы пуска и холостого хода, двигатель на ДМЭ работал устойчиво при практически бездымном выхлопе (0% по шкале Хартриджа). При работе на дизельном топливе наблюдался типичный для дизелей уровень дымности ОГ, достигающий на режимах с полной нагрузкой величины $K_x = 17\text{--}28\%$.

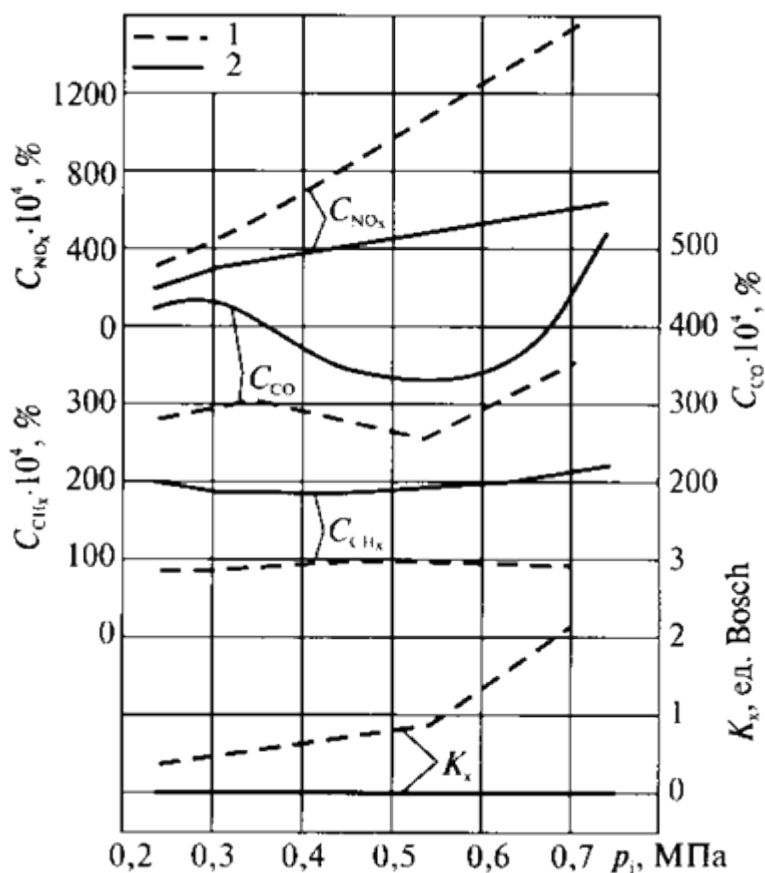


Рис. 13.4. Зависимость от нагрузки (среднего индикаторного давления) объемного содержания в ОГ оксидов азота C_{NO} , монооксида углерода C_{CO} , несгоревших углеводородов C_{CH} , дисперсных частиц C_{CH} в дизеля 1 ЧН 12/12 при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$

на различных топливах:

1 – дизельное топливо; 2 – ДМЭ

Проведены экспериментальные исследования дизеля Д-245.12С на дизельном топливе и ДМЭ при использовании разработанной в НАМИ (при участии МАДИ) системы питания на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла по Правилам ЕЭК ООН № 49. Результаты этих исследований, приведенные в табл. 13.2, свидетельствуют о том, что при переходе на питание ДМЭ и установке на автомобиль ЗИЛ-5301 «Бычок» окислительного каталитического нейтрализатора возможно выполнение норм EURO-3 по всем нормируемым токсичным компонентам ОГ исследуемого дизеля.

Таблица 13.2

Удельные выбросы токсичных веществ с ОГ дизеля Д-245.12С при его работе на дизельном топливе и ДМЭ на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла

Вариант	Удельные выбросы токсичных компонентов, г/кВтч			
	NO _x	СО	СН	дисперсн. частицы
Дизельное топливо	6,89	1,732	0,910	0,147
Диметиловый эфир	4,10	2,852	1,272	0,072
диметиловый эфир + окислительный нейтрализатор	4,10	0,886	0,382	0,070

Таким образом, применение ДМЭ в качестве моторного топлива позволяет значительно уменьшить эмиссию с ОГ дизелей двух наиболее значимых токсичных компонентов – оксидов азота и сажи. Поэтому в настоящее время ДМЭ рассматривается как перспективное топливо для дизелей транспортного назначения и дизелей различных стационарных установок.

13.3. Работа дизеля на метиловом эфире рапсового масла

Непосредственное использование [растительных масел](#) в дизелях не всегда возможно из-за различий физико-химических свойств растительных жиров и нефтяных топлив. Недостатками этого вида топлива по сравнению с дизельными являются их более высокая вязкость, плохие низкотемпературные свойства, низкое цетановое число, высокая температура воспламенения, повышенная коксуемость. Кроме того, из-за наличия в маслах кислородсодержащих соединений их теплотворная способность на 7–10% меньше, чем у дизельных топлив. Поэтому растительные масла обычно используют в качестве топлива только после рафинирования или в смеси с дизельным или [спиртовым](#) топливом. Но наиболее перспективно использование в качестве топлива не самих [растительных масел](#), а эфиров (в частности, метилового и этилового эфиров), получаемых из отходов производства масел.

К таким топливам в первую очередь относится [метиловый эфир рапсового масла](#). В Германии такое топливо Biodiesel выпускают 12 централизованных и 80 нецентрализованных заводов. Производством этого вида топлива занимаются 8 немецких фирм, оно отпускается более чем на 800 заправочных станциях. Стоимость производства одного литра биотоплива (без стоимости сырья) приблизительно равна 0,15 – 0,20 немецких марок. В Австрии [Биодизельное топливо](#) уже сейчас составляет 3% общего рынка дизельного топлива при его производстве до 30 тыс. т/год. В Бельгии эти мощности составляют 400 тыс. т/год, в

Германии – 203 тыс. т/год, в Италии – 441 тыс. т/год, во Франции – 370 тыс. т/год. США являются ведущей страной, производящей соевое масло. Там планируется на 20% заменить обычное дизельное топливо биодизельным и использовать его на морских судах, городских автобусах и грузовых автомобилях.

Исследования серийного автомобильного дизеля, работающего на сложном метилэфире рапсового масла, проведены фирмой Volkswagen (Германия). Четырехцилиндровый вихрекамерный дизель без наддува размерности

S/D = 8,64/7,65 мощностью 40 кВт последовательно работал на дизельном топливе с пределами выкипания 176–348 °С, плотностью 821 кг/м³, цетановым числом 52 и на метиловом эфире с температурами выкипания 302 – 386 °С. Исследования показали, что при работе дизеля на стенде по тесту ECE и его переводе с дизельного топлива на эфир рапсового масла выбросы монооксида углерода снижаются с 4,5 до 3,57 г/тест, углеводородов – с 0,82 до 0,37 г/тест, а выбросы оксидов азота возрастают с 2,56 до 3,01 г/тест (рис. 13.5).

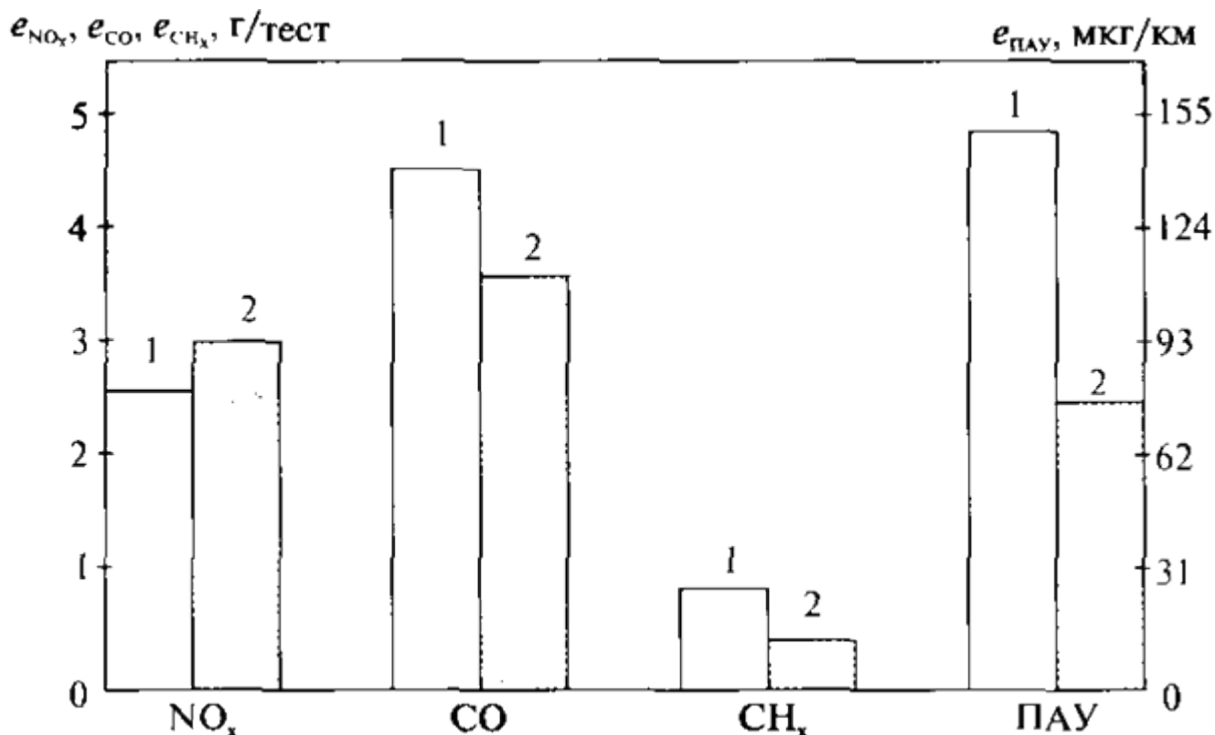


Рис. 13.5. Диаграмма уменьшения выбросов оксидов азота e_{NO_x} , монооксида углерода e_{CO} , углеводородов e_{CH_x} и ПАУ с $ОГ$ дизеля фирмы Volkswagen при его работе на дизельном топливе (1) и сложном метил эфире рапсового масла (2)

При исследованиях этого дизеля на эфире отмечено и снижение дымности $ОГ$. На режимах с полной нагрузкой дымность $ОГ$ снижается на 2 ед. по шкале Bosch во всем диапазоне скоростных режимов работы дизеля, а на частичных нагрузках – на 0,5–1,0 ед. по сравнению с работой на дизельном топливе. Снижается при этом и эмиссия полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Так, в исследуемом дизеле, работающем на режимах принятого в США цикла FTP 75 на эфире рапсового масла, эмиссия ПАУ в 2 раза меньше, чем при работе на дизельном топливе.

Отмечено также увеличение расхода метилэфира на 12% по сравнению с расходом дизельного топлива, что связано с меньшей теплотворной способностью эфира (37,8 против 42,5 МДж/кг у дизельного топлива). При работе на эфире увеличивается и эмиссия альдегидов. В целом дизель, работающий на эфире рапсового масла, отличается низкой суммарной токсичностью $ОГ$.

Основа производства моторных топлив. Непосредственное использование растительных масел в дизелях затруднено из-за различий физико-химических свойств растительных жиров и нефтяных топлив. Недостатками топлив этого вида по сравнению с дизельными являются их более высокая вязкость (в 2...10 раз), плохие низкотемпературные свойства, низкое цетановое число, высокая температура воспламенения, повышенная коксуемость

14. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ДИЗЕЛЯХ

Представленный выше анализ физико-химических свойств [растительных масел](#) свидетельствует о возможности применения большинства из них для питания дизельных двигателей. Повышенная вязкость [растительных масел](#) не является препятствием для их применения в дизельных двигателях, поскольку разработан ряд мероприятий, позволяющих эксплуатировать эти двигатели на тяжелых нефтяных топливах. К работе на растительных маслах в большей степени приспособлены дизели с разделенными и полуразделенными камерами сгорания (типа ЦНИДИ)

Проведены многочисленные исследования дизелей, работающих на растительных маслах и топливах на их основе. Наиболее перспективны в качестве моторных топлив следующие растительные масла: соевое, рапсовое, горчичное, подсолнечное, арахисовое, пальмовое (кокосовое), оливковое, кукурузное, хлопковое. Для получения топлив с требуемыми физико-химическими свойствами применяются биотоплива, получаемые с использованием рафинадов перечисленных [растительных масел](#), их эфиры, смеси [растительных масел](#) с дизельными топливами.

Интерес к растительным маслам возрос в связи с топливно-энергетическим кризисом, быстрым ростом цен на нефть и нефтепродукты, обостряющимися экологическими проблемами. Поэтому возобновились широкомасштабные исследования по применению альтернативных топлив в двигателях транспортных средств различного класса: легковых и грузовых автомобилей, двигателях сельскохозяйственного назначения и др.

14.1 Исследования работы дизеля на биотопливах на основе арахисового и подсолнечного масел

Исследования характеристик дизелей автотракторного назначения, работающих на растительных маслах и их смесях с дизельным топливом, проведены фирмой John Deere (США). Испытания проводились на одноцилиндровом дизеле размерности S/D = 12,1/11,6 без наддува со степенью сжатия $\varepsilon = 17,2$. В качестве топлива использовались нерафинированные, не очищенные от смол подсолнечное и арахисовое масла, а также их смеси со стандартным дизельным топливом в пропорции 50% масла плюс 50% дизельного топлива. При испытаниях не применялись присадки, улучшающие моторные качества [растительных масел](#) (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Физико-химические свойства исследуемых топлив

Физико-химические свойства	Топливо				
	дизельное	подсолнечное масло (ПМ)	арахисовое масло (АМ)	смесь 50% ДТ + 50% ПМ	смесь 50% ДТ + 50% АМ
Плотность при 15 °С, кг/м ³	832,4	923,3	917,3	878,7	877,7

Вязкость кинематическая, мм ² /с при: 20 °С; 40 °С и 100°С	4,10	78,3	78,0	—	—
	2,60	12,8	12,3	7,05	9,27
	1,10	8,75	9,36	3,00	4,87
Содержание, масс. %: углерода, водорода и кислорода	86,6	78,3	78,0	82,3	82,1
	13,4	12,8	12,3	13,0	12,8
	0	8,75	9,36	4,60	4,91
Соотношение атомов O/C	0,00	0,084	0,090	0,044	0,047
Соотношение атомов H/C	1,84	1,94	1,88	1,89	1,86
Теплота сгорания, кДж/кг: низшая, высшая	42967	36981	37023	39310	39829
	45776	39686	39638	42573	42558
Цетановое число	50,8	33,4	36,6	—	—
Температура помутнения, °С	-17,8	-6,7	3,3	—	—

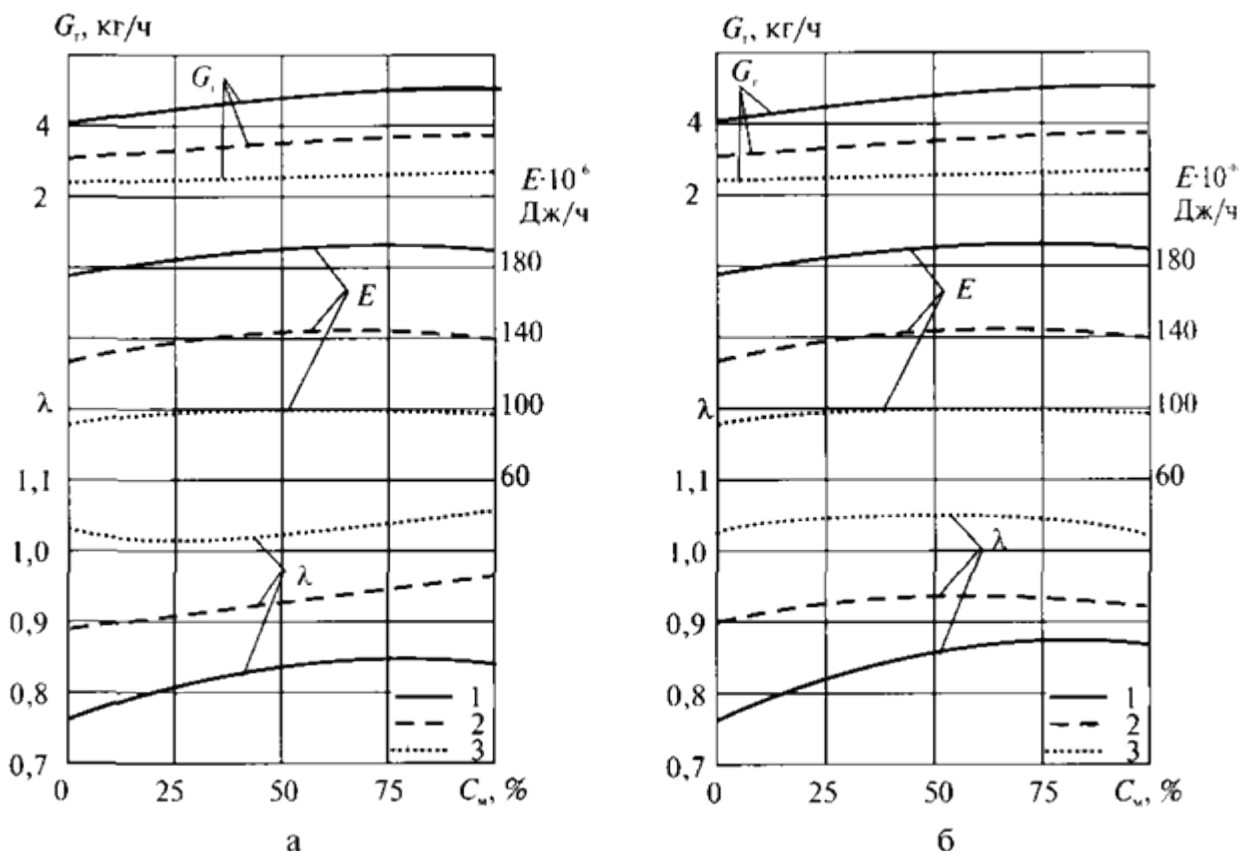


Рис. 14.1. Зависимость часового расхода топлива G_r , отношения подачи топлива к подаче

воздуха λ и количества выделившейся при сгорании топлива энергии E от содержания в смесевом биотопливе растительного масла C_m при работе дизеля на смесях дизельного топлива с подсолнечным (а) и арахисовым (б) маслами на режимах с полной подачей топлива и частотами вращения коленчатого вала:

$$1 - n = 2200 \text{ мин}^{-1}; 2 - n = 1500 \text{ мин}^{-1}; 3 - n = 1000 \text{ мин}^{-1}$$

Испытания двигателя с указанными топливами проведены на различных скоростных и нагрузочных режимах. При этом регулировки топливного насоса высокого давления (положение упора максимальной подачи топлива, настройка угла опережения впрыскивания) не изменялись. Некоторые результаты испытаний приведены на рис. 14.1 и 14.2.

Полученные при испытаниях данные свидетельствуют о том, что различия в свойствах дизельного топлива и исследуемых [растительных масел](#) оказывают заметное влияние на основные показатели дизеля. Высокая вязкость [растительных масел](#) приводит к снижению утечек топлива через зазоры плунжерной пары ТНВД, что вызывает увеличение объемной цикловой подачи [растительных масел](#).

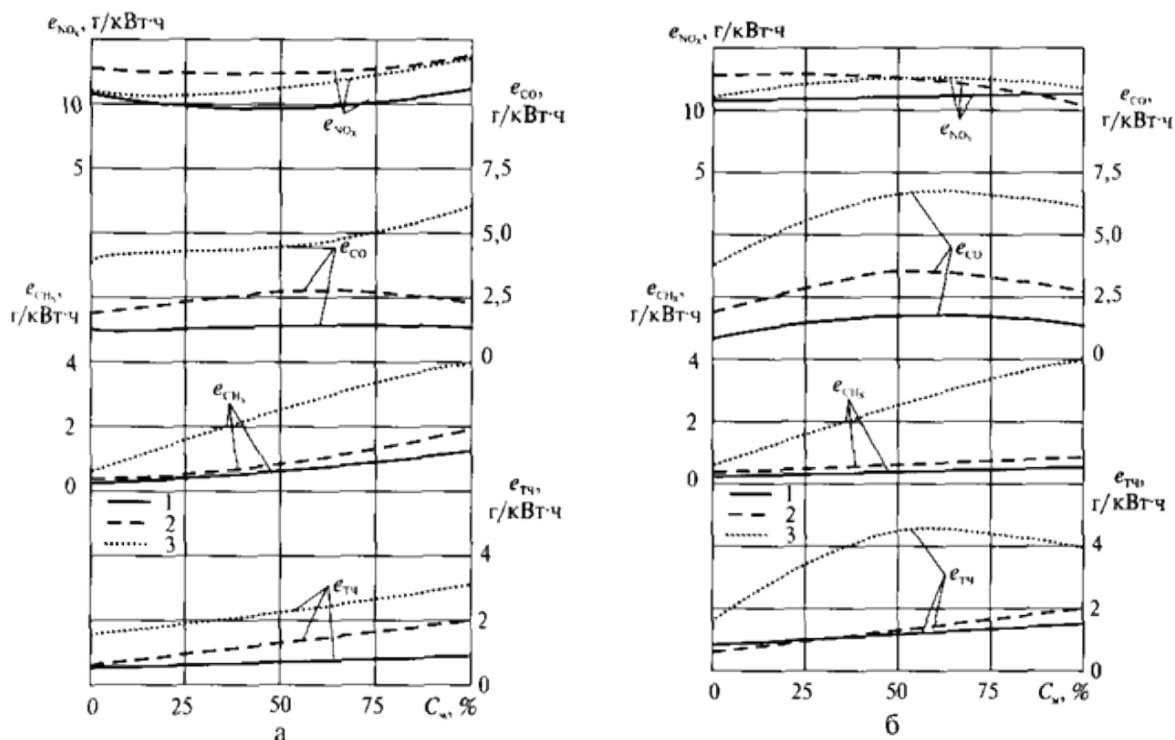


Рис. 14.2. Зависимость удельных массовых выбросов оксидов азота e_{NO} , монооксида углерода e_{CO} , несгоревших углеводородов $e_{УН}$ дисперсных частиц $e_{ТЧ}$ от содержания в смесевом биотопливе растительного масла C_m при работе дизеля на смесях дизельного топлива с подсолнечным (а) и арахисовым (б) маслами на режимах с полной подачей топлива и частотами вращения коленчатого вала:

$$1 - n = 2200 \text{ мин}^{-1}; 2 - n = 1500 \text{ мин}^{-1}; 3 - n = 1000 \text{ мин}^{-1}$$

Их повышенная плотность при неизменной регулировке ТНВД приводит к росту массовой цикловой подачи топлива. В результате при работе дизеля на растительных маслах отмечено увеличение часового расхода топлива G_T до 20% (рис. 14.1). Таким образом, при работе двигателя на растительных маслах происходит обогащение рабочей смеси, т.е. наблюдается увеличение отношения подачи топлива к подаче воздуха λ . Поэтому мощность двигателя (количество выделившейся энергии E) возрастает до 6%. Такое увеличение мощности двигателя, не пропорциональное увеличению подачи топлива, объясняется меньшей теплотворной способностью [растительных масел](#) по сравнению с дизельным топливом, вызванной наличием в составе [растительных масел](#) атомов кислорода. Увеличенная подача топлива при работе на растительных маслах в значительной мере компенсировалась их меньшей теплотворной способностью. В итоге при работе дизеля на режимах с полной нагрузкой эффективная мощность двигателя незначительно

отличалась при использовании всех испытуемых видов топлива. Это относится и к режимам со средней нагрузкой.

В связи с тем, что исследуемые топлива отличаются массовой теплотой сгорания, удельный эффективный расход топлива g_e не в полной мере отражает эффективность рабочего процесса сгорания испытуемых топлив. В этом случае более информативным параметром является эффективный КПД двигателя η_e . На исследованных рабочих режимах значения эффективного КПД изменялись незначительно. Однако отмечена тенденция некоторого уменьшения η_e при увеличении содержания [растительных масел](#) в смесевых топливах.

Незначительное ухудшение качества рабочего процесса при работе дизеля на растительных маслах объясняется пониженным тепловыделением и его задержкой, вызванной более низким цетановым числом [растительных масел](#) и увеличенным периодом задержки их воспламенения. Следствием этого является увеличение температуры [ОГ](#) при работе двигателя на растительных маслах, причем при повышении содержания [растительных масел](#) в смесевом топливе закономерности повышения температуры [ОГ](#) и снижения эффективного КПД совпадают.

Свойства применяемых топлив определяют и выбросы токсичных веществ с [ОГ](#). Тенденция изменения этих выбросов близка к тенденции увеличения температуры [ОГ](#). Максимальный выброс токсичных веществ наблюдается на режимах с максимальной подачей топлива, на которых соотношение подач топлива и воздуха максимально.

При работе дизеля на растительных маслах и их смесях с дизельным топливом выбросы оксидов азота NO_x незначительно отличаются от их выбросов при работе на дизельном топливе (см. рис. 14.2).

На номинальном скоростном режиме с полной подачей топлива и частотой вращения $n = 2200$ мин¹ выбросы продуктов неполного сгорания топлива: монооксида углерода CO , несгоревших углеводородов CH и дисперсных частиц ТЧ (дымности [ОГ](#)) – также сравнительно слабо изменяются при росте содержания исследуемых [растительных масел](#) C_m в смесевом биотопливе. Однако при работе дизеля на растительных маслах на режимах с максимальной подачей топлива и снижении частоты вращения коленчатого вала до $n = 1500$ и 1000 мин¹ становится заметным рост выбросов CO , CH и дисперсных частиц при увеличении концентрации [растительных масел](#) C_m в смесевом биотопливе. Это вызвано, главным образом, увеличением отношения подач топлива и воздуха λ с ростом C_m на указанных режимах. Для достижения наилучших показателей токсичности [ОГ](#) необходимо корректирование топливоподачи при работе дизеля на растительных маслах.

В течение проведенных исследований двигателя John Deere отмечено, что после нескольких часов его работы на растительных маслах на топливном фильтре образуются смолистые отложения, что объясняется недостаточной очисткой [растительных масел](#) при производстве. Наибольшие смолистые отложения на топливном фильтре отмечены при эксплуатации дизеля на подсолнечном масле и его смеси с дизельным топливом. Подогрев подсолнечного масла до 70–90 °С перед подачей в топливную систему значительно снизил эти отложения. Смолистые отложения наблюдались и на распылителе форсунки со стороны, обращенной к камере сгорания. Максимальные отложения на распылителе имели место при эксплуатации дизельного двигателя на арахисовом масле и его смеси с дизельным топливом. Работа на арахисовом масле сопровождалась меньшими отложениями смолистых веществ на распылителе форсунки.

этерификации жирных кислот рапсового масла с метиловым спиртом при температуре 80 — 90 °С в присутствии катализатора — гидроксида калия

14.2. Работа дизеля на биотопливах на основе рапсового масла

В последние годы в ряде европейских стран возрос интерес к топливам, получаемым на основе рапсового масла. В странах Западной Европы в качестве топлива для дизельных двигателей широко применяется [метиловый эфир рапсового масла](#), физико-химические свойства которого очень близки к свойствам стандартного дизельного топлива. Однако [метиловый эфир рапсового масла](#) является химически активной жидкостью, поэтому при его использовании в качестве самостоятельного топлива или как добавки к дизельному топливу топливные баки, топливопроводы и другие элементы конструкции, контактирующие с эфиром, должны иметь стойкое покрытие. Другим недостатком метилового эфира рапсового масла является невысокая экологичность при производстве этого вида топлива.

При решении локальных энергетических проблем, например, снабжения биотопливом средних и крупных фермерских хозяйств, более предпочтительно использование рапсового масла, производимого непосредственно в этих хозяйствах, имеющего меньшую стоимость и отличающегося высокими экологическими качествами. Однако при работе дизеля на рапсовом масле возникает ряд проблем.

В частности, при работе дизелей на чистом рапсовом масле через 100–200 ч работы может наблюдаться повышенное количество углеродистых отложений на поверхностях деталей, образующих камеру сгорания, и закоксуывание сопловых отверстий распылителей форсунок. Это объясняется тем, что [рапсовое масло](#) имеет повышенное содержание смолистых веществ и характеризуется повышенной по сравнению с дизельным топливом коксуемостью (0,4% у рапсового масла против 0,2% у дизельного топлива; табл. 14.2).

Таблица 14.2

Физико-химические свойства топлив на основе рапсового масла

Физико-химические свойства	Топлива					
	ДТ	РМ	80 об. % ДТ 20 об. % РМ	60 об. % ДТ 40 об. % РМ	40 об. % ДТ 60 об. % РМ	МЭ РМ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	916	848	865	882	877
Вязкость кинем. 20 °С, мм ² /с	3,8	75	9	19	30	8
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	—	—	—	30,7
Теплота сгор. низшая, кДж/кг	42500	37300	41500	40400	39400	37800
Цетановос число	45	36	—	—	—	48

Температура самовоспламенен., °С	250	318	–	–	–	230
Температура помутнения, °С	–25	–9	–	–	–	–13
Температура застывания, °С	–35	–20	–	–	–	–21
Количество воздуха L_0 , кг/кг	14,3	12,6	13,9	13,5	13,1	12,5
Содержание, масс. %: С Н О	87,0 12,6 0,4	78,0 10,0 12,0	–	–	–	77,5 12,0 10,5
Содержание серы, масс., %	0,20	0,002	–	–	–	0,002
Коксуемость остатка, масс. %	0,2	0,4	–	–	–	0,3

Еще одной проблемой, возникающей при работе дизеля на рапсовом масле, является его повышенная вязкость. Вязкостно-температурные характеристики, представленные на рис.14.3, свидетельствуют о том, что при нормальной тем-пературе $t = 20\text{ °C}$ вязкость рапсового масла на порядок выше, чем у стандартного дизельного топлива ($\nu_T = 75\text{ мм}^2/\text{с}$ у рапсового масла и $\nu_T = 3,8\text{ мм}^2/\text{с}$ у дизельного топлива; см. табл. 14.2). При повышении температуры вязкость рап-сового масла быстро снижается; при $t = 40\text{ °C}$ его вязкость уменьшается вдвое до $\nu_T = 36\text{ мм}^2/\text{с}$, а при $t = 70\text{ °C}$ – до $\nu_T = 17,5\text{ мм}^2/\text{с}$.

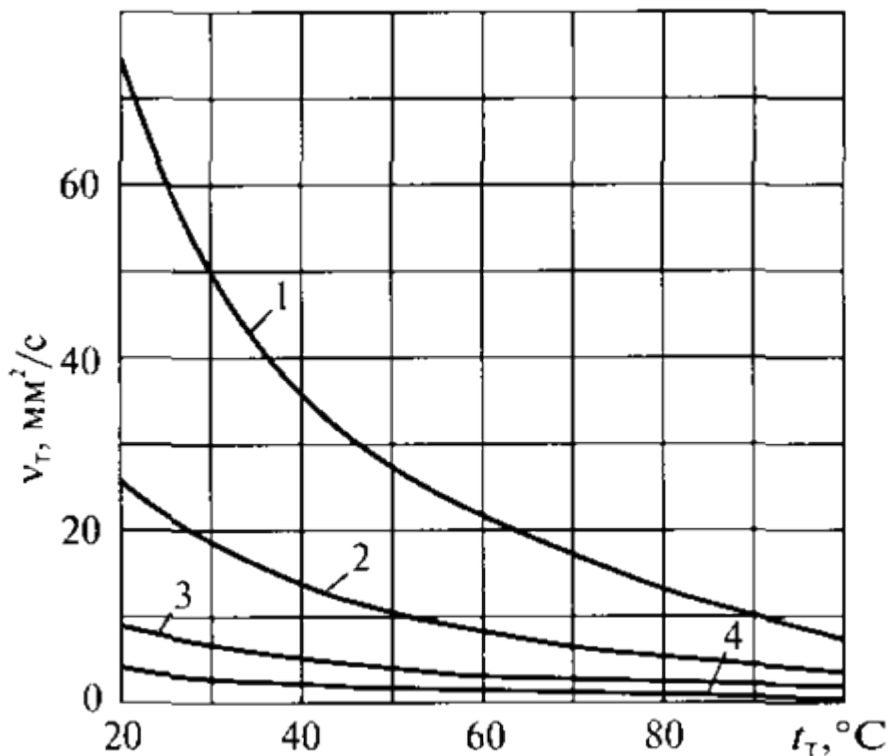


Рис. 14.3. Вязкостно-температурные характеристики рапсового масла (1), смесей дизельного топлива и рапсового масла в соотношении 50:50 (2) и 80:20 (3), дизельного топлива «3» (4)

Существенно меньшей вязкостью обладают смеси рапсового масла и дизельного топлива. Вязкость смеси, содержащей 80 об.% дизельного топлива и 20 об.% рапсового масла при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\nu_T = 9\text{ мм}^2/\text{с}$, а при температуре $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$, характерной для условий систем топливо-поддачи дизелей, снижается до $\nu_T = 5\text{ мм}^2/\text{с}$, что соизмеримо с вязкостью чистого дизельного топлива (в соответствии с ГОСТ 305-82 вязкость летнего дизельного топлива составляет $\nu_T = 3\text{--}6\text{ мм}^2/\text{с}$).

Поскольку [рапсовое масло](#) по своим физико-химическим свойствам отличается от стандартных дизельных топлив, целесообразно применять смесевое биотопливо, представляющее собой смесь дизельного топлива и рапсового масла. Эти компоненты хорошо смешиваются, а смеси имеют приемлемые свойства, позволяющие использовать их в дизеле без внесения изменений в его конструкцию (см. табл. 14.2).

Для оценки экономических и экологических показателей дизеля, работающего на дизельном топливе и смесевом биотопливе, содержащем 80 об. % дизельного топлива и 20 об.% рапсового масла, проведены испытания дизеля Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5) Минского моторного завода. Дизель оснащен турбокомпрессором ТКР-6, ТНВД фирмы Motorpal (Чехия) модели PP4M с диаметром плунжеров $d_{пл} = 10\text{ мм}$, их ходом $h_{пл} = 10\text{ мм}$. Распылитель имеет пять распыливающих отверстий диаметром $d = 0,34\text{ мм}$ и суммарную эффективную площадь распылителя в сборе $\mu f = 0,25\text{ мм}^2$. Дизель исследовался на режимах внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого испытательного цикла Правил 49 ЕЭК ООН.

Испытания дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики показали заметное увеличение часового расхода топлива G_T при использовании смеси дизельного топлива и рапсового масла. При работе на таком смесевом биотопливе в исследуемом диапазоне частот вращения расход топлива G_T увеличился в среднем на 1,5–2,0 кг/ч по сравнению с работой на дизельном топливе (рис. 14.4). В результате эффективный крутящий момент двигателя M_e возрос на 40–50 Нм на режимах с низкой частотой вращения ($n = 1000\text{--}1300\text{ мин}^{-1}$) и на 10–20 Нм на режимах с высокой частотой вращения ($n = 2000\text{--}2400\text{ мин}^{-1}$). Соответственно увеличилась и эффективная мощность двигателя N_e .

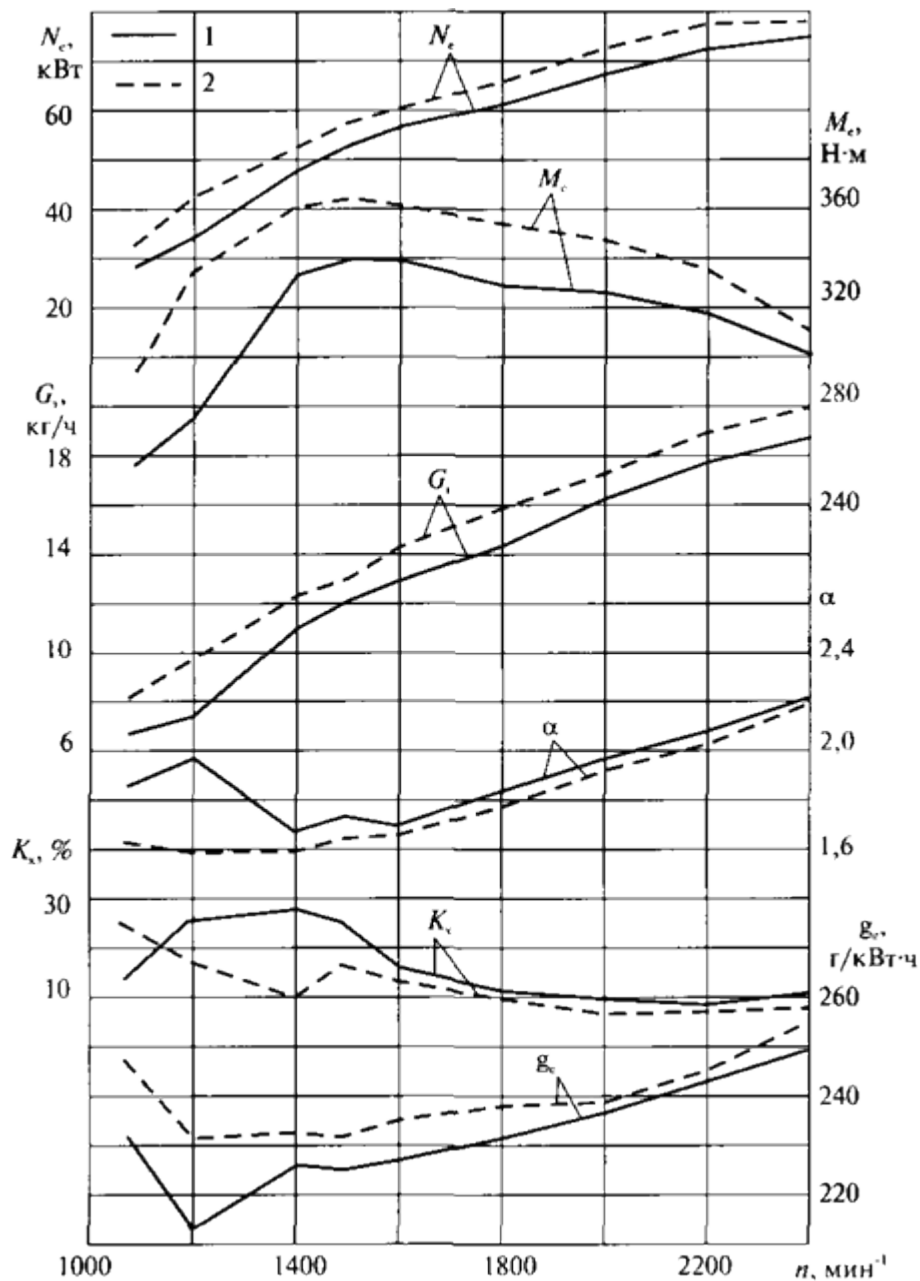


Рис. 14.4. Зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , расхода топлива G_r , коэффициента избытка воздуха α , дымности K_x и удельного эффективного расхода топлива g_e от частоты вращения n коленчатого вала дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики при использовании дизельного топлива (1) и смесового биотоплива (2)

Несмотря на значительное увеличение часового расхода топлива G_r при работе на смесовом биотопливе, коэффициент избытка воздуха снизился незначительно, особенно на режимах со средними и высокими частотами вращения.

Это объясняется меньшим количеством воздуха L_o , необходимого для сгорания 1 кг биотоплива (см. табл. 14.2). Удельный эффективный расход биотоплива g_e на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500$ мин⁻¹ увеличился с 225,8 до 231,8 г/кВт·ч, а на режиме максимальной мощности при $n = 2400$ мин⁻¹ — с 249,0 до 255,1 г/кВт·ч по сравнению с работой на дизельном топливе. Такое увеличение расхода биотоплива объясняется его меньшей

теплотворной способностью H_u (соответственно 42500 и 41500 кДж/кг у дизельного топлива и его смеси с рапсовым маслом; см. табл. 14.2).

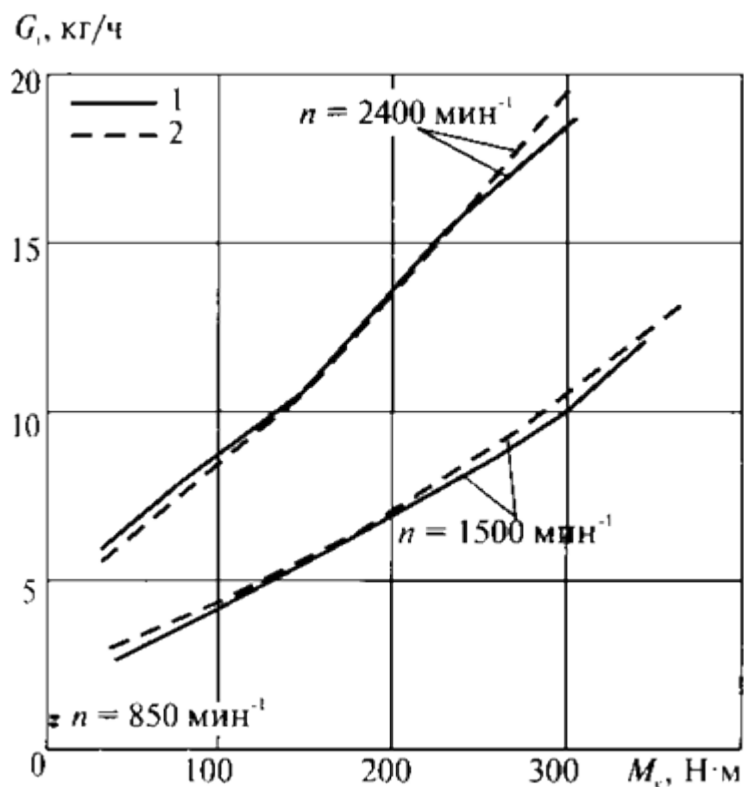


Рис. 14.5. Зависимость часового расхода топлива G_T от частоты вращения n и эффективного крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С при использовании дизельного топлива (1) и смесового биотоплива (2)

Рассчитанный по результатам экспериментальных исследований эффективный КПД двигателя оказался практически одинаков при использовании этих видов топлива: $\eta_e = 37,5\%$ – на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $\eta_e = 34,0\%$ – на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$. При этом на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ дымность сократилась с 25 до 16% по шкале Хартриджа, а на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ – с 11 до 8%.

Результаты экспериментальных исследований Д-245Л2С на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла представлены на рис. 14.5–14.8.

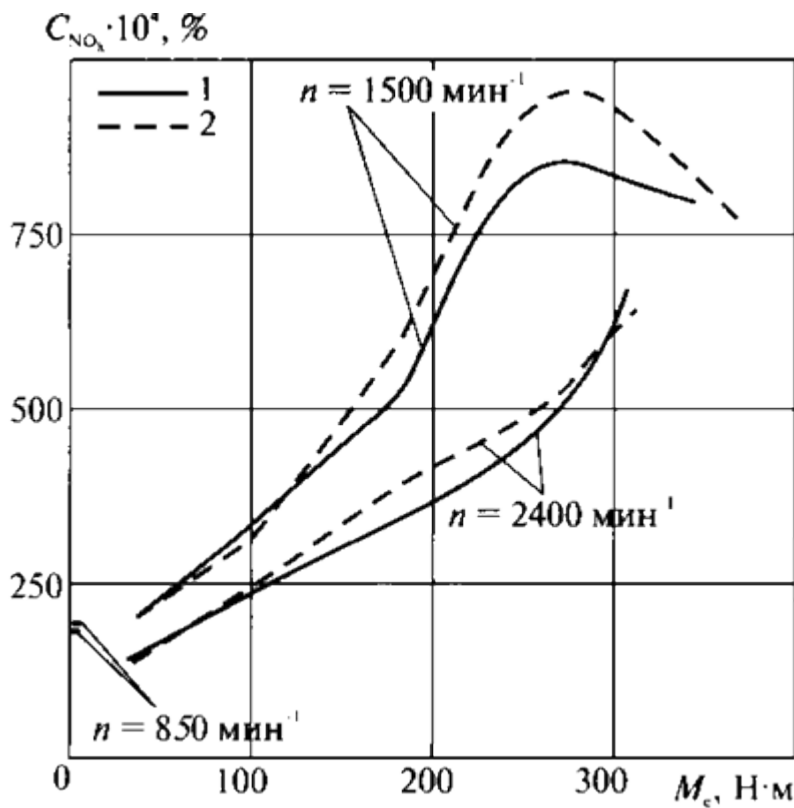


Рис. 14.6. Зависимость концентрации в ОГ оксидов азота C_{NO} от частоты вращения n и эффективного крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С при использовании дизельного топлива (1) и смесового биотоплива (2)

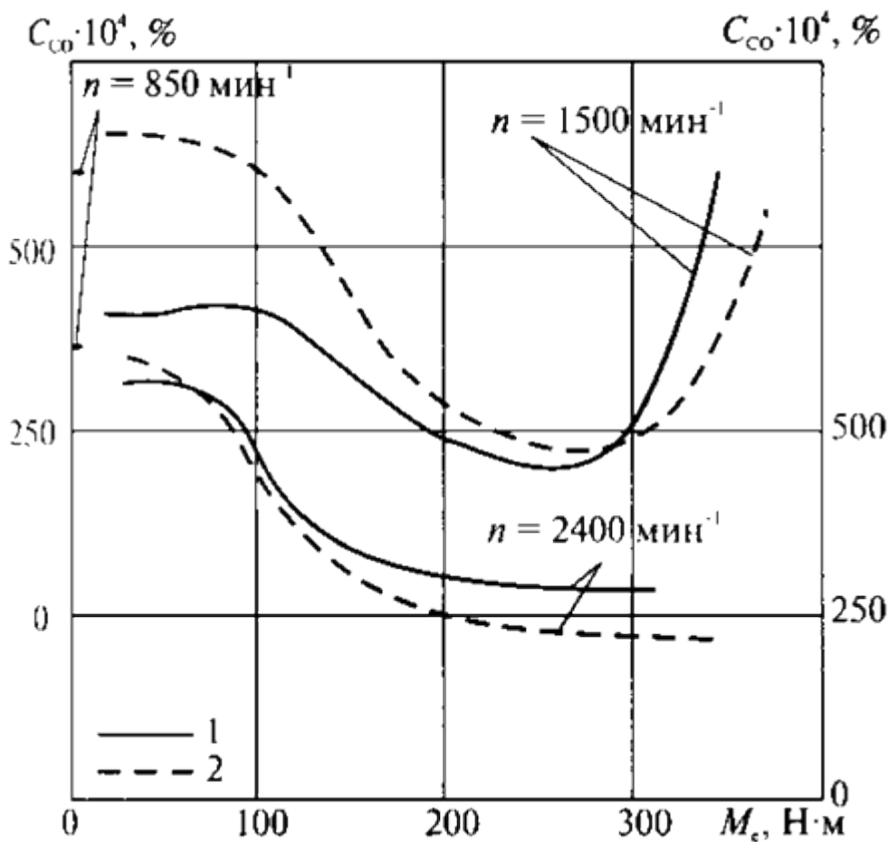


Рис. 14.7. Зависимость концентраций в ОГ оксида углерода C_{CO} от частоты вращения n и эффективного крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С при использовании дизельного топлива (1) и смесового биотоплива (2)

При переводе исследуемого двигателя с дизельного топлива на смесевое биотопливо, содержащее 80% дизельного топлива и 20% рапсового масла, наиболее значительное увеличение часового расхода топлива G_T отмечено на режимах с полной нагрузкой (рис. 14.5). На режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ G_T увеличился с 18,81 до 19,94 кг/ч, а на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ – с 12,10 до 13,24 кг/ч. На режимах с неполной нагрузкой рост G_T при переходе на биотопливо оказался менее значительным, расходы топлива на режиме холостого хода при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ оказались соизмеримыми.

Тип применяемого топлива оказывает влияние и на концентрацию в ОГ оксидов азота C_{NO} (см. рис. 14.6). Если на режимах с малыми нагрузками ($M_e = 30\text{--}150 \text{ Нм}$) и с полной нагрузкой переход с дизельного топлива на смесевое биотопливо не сопровождается значительным изменением значений C_{NO} , то на режимах со средними нагрузками отмечен заметный рост содержания NO_x в ОГ. Так, на режиме с $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $M_e = 260\text{--}275 \text{ Нм}$ концентрация NO_x с ОГ возросла с $850 \cdot 10^{-4}$ до $955 \cdot 10^{-4}\%$. На режиме холостого хода при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ содержание NO_x в ОГ было примерно одинаково при использовании обоих топлив.

Заметно влияние типа применяемого топлива и на содержание в ОГ монооксида углерода C_{CO} (рис. 14.7). Наибольшее увеличение концентрации C_{CO} в ОГ при переводе дизеля на биотопливо отмечено на режиме холостого хода при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ и на режиме с минимальной нагрузкой ($M_e = 38\text{--}39 \text{ Нм}$) при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$.

На этих режимах такой рост содержания CO в ОГ оказался равным примерно $\Delta C_{CO} = 250 \cdot 10^{-4}\%$ (в 1,6 раза). На режиме холостого хода при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ переход с дизельного на смесевое топливо привел к увеличению C_{CO} с $365 \cdot 10^{-4}$ до $6000 \cdot 10^{-4}\%$. На режимах с высокими нагрузками ($M_e > 280 \text{ Нм}$) при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и низкими нагрузками ($M_e < 70 \text{ Нм}$) при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ более высокие концентрации C_{CO} отмечены при работе на дизельном топливе.

Тип применяемого топлива оказывает наибольшее влияние на концентрацию в ОГ несгоревших углеводородов C_{CH} (рис. 14.8). Особенно заметно это влияние на режиме холостого хода при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ и на всех нагрузочных режимах при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$. На указанных режимах перевод двигателя с дизельного топлива на смесевое биотопливо сопровождается снижением C_{CH} в 1,5–2,0 раза. В частности, на режиме холостого хода при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ C_{CH} снизилась с $520 \cdot 10^{-4}$ до $310 \cdot 10^{-4} \%$.

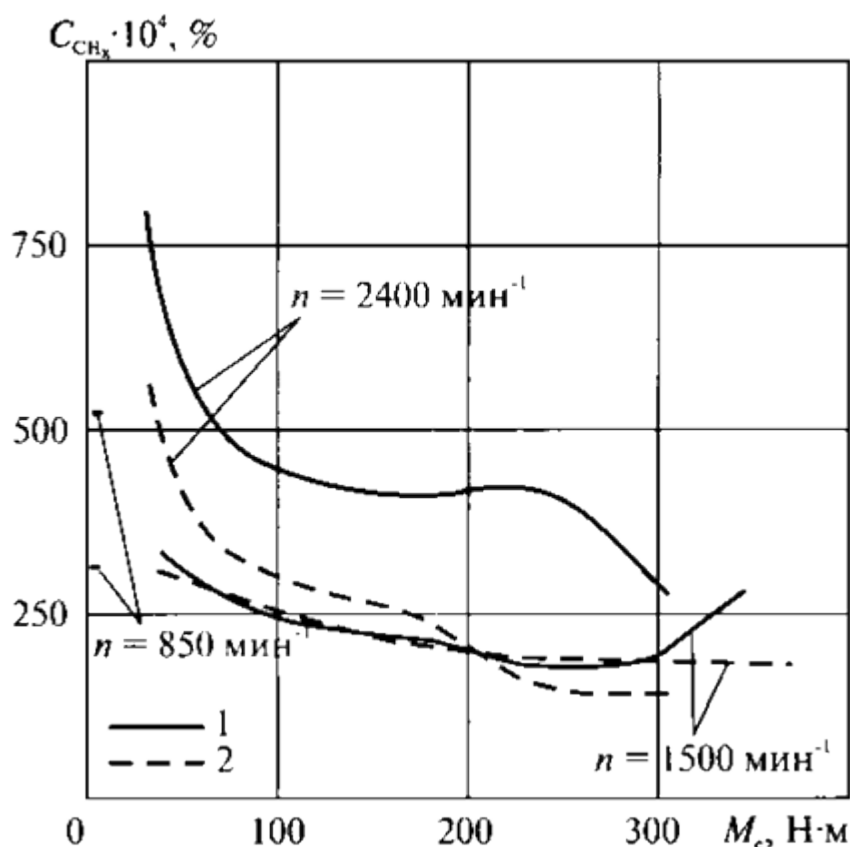


Рис. 14.8. Зависимость объемной концентрации углеводородов $C_{\text{снот}}$ от частоты вращения n и крутящего момента M_e дизеля Д-245.12С при использовании дизельного топлива (1) и смешанного биотоплива (2)

По приведенным на рис. 14.6–14.8 характеристикам содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов

(соответственно C_{NO} , C_{CO} , C_{CH}) рассчитаны их интегральные удельные массовые выбросы для исследуемого дизеля Д-245.12С малотоннажного автомобиля ЗИЛ-5301 «Бычок», работающего на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла. Результаты этих расчетов представлены в табл. 14.3.

Приведенные в табл. 14.3 данные подтверждают возможность заметного улучшения экологических показателей дизеля Д-245.12С при его переводе с дизельного топлива на смешанное биотопливо, содержащее 80% дизельного топлива и 20% рапсового масла.

Таблица 14.3

Показатели дизеля Д-245.12С, работающего на смешанном биотопливе

Показатели дизеля	Концентрация рапсового масла в смешанном биотопливе, об.%			
	0	20	40	60
Удельн. эффективн. расход топлива на режиме макс. мощности g_e^{Nmax} г/кВт·ч	249,0	255,1	258,1	265,1
Эффективный КПД дизеля на режиме максимальной мощности η_e^{Nmax}	0,340	0,340	0,345	0,345
Удельн. эффективн. расход топлива	225,8	231,8	239,8	243,1

на реж. макс. крут. момента g_e^{Mmax} , г/кВт×ч				
Эффективный КПД дизеля на режиме максимального крутящего момента η_e^{Mmax}	0,375	0,374	0,372	0,376
Дымность ОГ на режиме максимальной мощности K_X^{Nmax} , %	11,0	8,0	7,0	8,0
Дымность ОГ на режиме максимальной мощности K_X^{Mmax} , %	25,0	16,5	13,0	11,0
Интегральный удельный выброс оксидов азота e_{NOx} , г/кВт×ч	7,442	7,159	7,031	6,597
Интегральный удельный выброс монооксида углерода e_{CO} , г/кВт×ч	3,482	3,814	3,880	3,772
Интегральный удельный выброс углеводородов e_{CH} , г/кВт×ч	1,519	0,965	0,949	1,075

Так, при работе дизеля на смесевом биотопливе на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла удельный массовый выброс легких углеводородов e_{CH} снизился с 1,519 до 0,965 г/кВт×ч, т.е. на 36,5%; выброс оксидов азота e_{NO} – с 7,442 до 7,159 г/кВт×ч, т.е. на 3,8%; выброс монооксида углерода e_{CO} , напротив, вырос с 3,482 до 3,814 г/кВт×ч, т.е. на 9,5% по сравнению с работой на стандартном дизельном топливе. Рост эмиссии CO при работе на смесевом биотопливе отчасти связан с некоторым увеличением часового расхода этого топлива (на 6–10%) и с соответствующим увеличением мощности дизеля. В частности, при переводе двигателя на смесевое биотопливо на режиме максимального крутящего момента при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ эффективная мощность дизеля N_e увеличилась с 53,6 до 57,1 кВт, а на режиме максимальной мощности при $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ – с 75,5 до 78,2 кВт. Коэф-фициент избытка воздуха α остался при этом практически неизменным (соответственно 1,7 и 2,2 на указанных режимах), что объясняется меньшим количеством воздуха, необходимым для сгорания 1 кг топлива (соответственно 14,3 и 13,9 кг/кг у дизельного топлива и его смеси с рапсовым маслом; см. табл. 14.3).

В процессе проведенных экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С на смесевом биотопливе, длившихся около 100 ч, коксование форсунок не отмечено.

При проведении экспериментальных исследований был отмечен затрудненный пуск двигателя при его работе на смеси 40% дизельного топлива и 60% рапсового масла в зимний период. Для облегчения пуска двигателя в этих условиях был использован подогрев смесевое биотоплива во время пуска двигателя. При дальнейшей работе двигателя подогрев топлива не потребовался.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С показал возможность оптимизации состава смесевое биотоплива с учетом минимизации расхода топлива, выбросов токсичных компонентов **ОГ** и преимущественных режимов работы транспортного дизеля. Использование смесевых биотоплив на базе рапсового масла позволит не только обеспечить замещение нефтяных топлив топливом растительного происхождения и улучшить экологические показатели дизеля, но и решить ряд социальных проблем. С агрономической точки зрения рапс является желательной культурой для улучшения севооборота, он улучшает структуру и плодородие почвы.

15. РАБОТА ДВИГАТЕЛЯ НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ

15.1. Причины падения мощности двигателей при их переводе с жидкого топлива на [генераторный газ](#)

Газовые двигатели, устанавливаемые на [газогенераторных](#) автомобилях и тракторах, работают на генераторном газе, получаемом в результате процесса газификации твердых топлив. [Генераторный газ](#) представляет собой механическую смесь нескольких газов, каждый из которых обладает различными физико-химическими свойствами и различно влияет на работу двигателя. Состав [генераторного газа](#) колеблется в широких пределах и зависит от вида и качества топлива, а также от условий газификации.

Газовые двигатели изготовляют на базе жидкостно-топливных двигателей – карбюраторных и с воспламенением от сжатия. Наиболее часто газовые двигатели работают по циклу с посторонним воспламенением горючей смеси и внешним смесеобразованием.

При переводе жидкостно-топливных двигателей на генераторный газ происходит уменьшение их мощности. Основными причинами, вызывающими уменьшение мощности двигателей при переоборудовании их с жидкого топлива на газ, являются следующие:

- более низкая теплота сгорания газо-воздушной горючей смеси по сравнению со смесями жидких моторных топлив с воздухом;
- более низкий термический КПД газовых двигателей по сравнению с двигателями с воспламенением от сжатия;
- уменьшение коэффициента молекулярного изменения;
- уменьшение коэффициента наполнения двигателя;
- малая скорость сгорания газо-воздушной смеси по сравнению с горючей смесью из жидкого топлива и воздуха;
- уменьшение механического КПД двигателя.

Более низкая теплота сгорания газо-воздушной горючей смеси по сравнению, например, с бензо-воздушной является основной причиной потери мощности двигателя при переводе его с бензина на [генераторный газ](#). Если теплота сгорания 1 м^3 бензо-воздушной смеси (при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$) равна $3560\text{--}3770 \text{ кДж/м}^3$, то 1 м^3 газо-воздушной – только $2300\text{--}2500 \text{ кДж/м}^3$. В двигателях с воспламенением от сжатия при $\alpha = 1,4\text{--}1,5$ теплота сгорания горючей смеси составляет около $2500\text{--}2700 \text{ кДж/м}^3$. Следовательно, теплота сгорания газо-воздушной смеси при $\alpha = 1$ незначительно меньше теплоты сгорания смеси дизельного топлива и воздуха при $\alpha = 1,4\text{--}1,5$. В данном случае основной причиной потери мощности при переоборудовании двигателя с воспламенением от сжатия в газовый является уменьшение термического КПД двигателя в связи с меньшей степенью сжатия последнего.

Уменьшение коэффициента молекулярного изменения при работе на генераторном газе является следствием особенностей химических свойств горючей смеси. При сгорании жидких топлив происходит увеличение объема продуктов сгорания по сравнению с первоначальным объемом горючей смеси (теоретический коэффициент молекулярного изменения $\mu_0 = 1,05\text{--}1,06$ при $\alpha = 1$), тогда как при сгорании [генераторного газа](#) происходит уменьшение объема продуктов сгорания ($\mu_0 = 0,93\text{--}0,95$).

Уменьшение коэффициента наполнения двигателя происходит вследствие понижения давления всасывания в результате увеличения сопротивлений при просасывании газа через агрегаты [газогенераторной](#) установки, а также вследствие увеличения температуры газо-воздушной смеси, поступающей в двигатель.

Малая скорость распространения пламени при сгорании газозвушной смеси по сравнению с рабочей смесью жидкого топлива и воздуха объясняется физико-химическими свойствами газа и большим содержанием в нем инертных газов, особенно двуокиси углерода.

Уменьшение механического КПД двигателя происходит вследствие того, что затрата мощности на трение при переводе двигателей на [генераторный газ](#) остается почти такой же, как и у жидкотопливных двигателей, а индикаторная мощность двигателей уменьшается.

15.2. Особенности процесса сгорания [генераторного газа](#)

[Генераторный газ](#) состоит из следующих компонентов: CO, H₂, CH₄, CO₂, O₂ и N₂. Горючими газами из этих компонентов являются CO, H₂ и CH₄. Содержание тяжелых угле-водородов C_nH_m в генераторном газе весьма незначительно, и поэтому их при расчетах не учитывают.

Состав сухого [генераторного газа](#) характеризуется количеством отдельных компонентов в объемных процентах.

В действительных условиях [генераторный газ](#) всегда содержит водяные пары. Количество водяных паров зависит от вида и качества твердого топлива, методов получения газа и способов его охлаждения и очистки. Содержание влаги в газе определяется массой воды в граммах на 1 м³ сухого газа.

Если известен состав сухого газа (CO, H₂ и т.д.) и содержание в нем влаги f , то содержание отдельных компонентов во влажном газе определяют умножением величины каждого компонента сухого газа на коэффициент $(0,804 - f) / 0,804$.

Необходимое количество воздуха для сгорания 1 моля (или 1 м³) газообразного топлива определяют по формуле

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left[0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 + \left(n + \frac{m}{4}\right)\text{C}_n\text{H}_m - \text{O}_2 \right]$$

моль воздуха/моль газа (или м³ воздуха/м³ газа). (15.1)

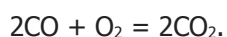
Теоретически необходимое количество воздуха является недостаточным для обеспечения полного сгорания газа, так как в действительных условиях работы двигателя не удастся идеально перемешать газ с воздухом. В этом случае часть газа вследствие малого промежутка времени, отводимого на процесс сгорания, не вступит в реакцию с кислородом воздуха и в несгоревшем виде будет удалена из цилиндра двигателя вместе с отработавшими газами.

Для лучшего сгорания газа в цилиндры двигателя вводят избыточное количество воздуха, которое обеспечивает полное сгорание газа. Как известно, отношение действительного количества воздуха L к теоретически необходимому L_0 называется коэффициентом избытка воздуха α и для газовых двигателей составляет $\alpha = 1,1-1,25$.

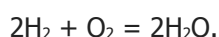
Следовательно, объем M_1 горючей смеси до начала сгорания состоит из газа и воздуха

$$M_1 = 1 + \alpha L_0.$$

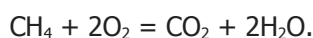
Реакция сгорания окиси углерода происходит по уравнению



Реакция сгорания водорода происходит по уравнению



Реакция сгорания метана происходит по уравнению



Следовательно, продукты полного сгорания газа будут состоять из CO₂, H₂O, избыточного O₂ и N₂, поступающего с газом и воздухом. Количество отдельных компонентов продуктов сгорания [генераторного газа](#) будет

$$M_{\text{CO}_2} = \text{CO} + \text{CH}_4,$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2 + 2\text{CH}_4,$$

$$M_{\text{O}_2} = 0,21 (\alpha - 1) L_0,$$

$$M_{\text{N}_2} = 0,79 \alpha L_0 + \text{N}_2.$$

Объем продуктов сгорания можно выразить как сумму объемов отдельных компонентов:

$$M_2 = M_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} \text{ или}$$

$$M_2 = \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + 3\text{CH}_4 + \text{N}_2 + \alpha L_0 - 0,21 L_0.$$

Так как

$$\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 1,$$

$$M_2 = 1 - \alpha L_0 - [0,5 (\text{CO} - \text{H}_2)].$$

Изменение объема при сгорании [генераторного газа](#)

$$\Delta M = M_2 - M_1 = -[0,5(\text{CO} - \text{H}_2)].$$

Относительное изменение объема при сгорании рабочей смеси характеризуется так называемым теоретическим коэффициентом молекулярного изменения μ_0 , который представляет собой отношение количества кмоль продуктов сгорания к количеству кмоль горючей смеси до сгорания:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} = 1 - \frac{\Delta M}{M_1}. \quad (15.2)$$

Для [генераторного газа](#) $\mu_0 < 1$, так как величина ΔM отрицательная; при сгорании жидких топлив $\mu_0 > 1$.

Теплота сгорания горючей смеси определится по формуле

$$Q_{\text{см}} = \frac{Q_{\text{H}}^r}{1 + \alpha L_0}, \quad (15.3)$$

где Q_{H} – низшая теплота сгорания газа, кДж/м³.

15.3. Способы повышения мощности двигателя при работе на генераторном газе

Эффективная мощность газового четырехтактного двигателя, приведенная к нормальным условиям, может быть определена по формуле

$$N_{\varepsilon} = \text{const} \cdot \frac{Q_{\text{H}}^r}{1 + \alpha L_0} \cdot iV_h \cdot n \cdot \eta_v \cdot \eta_{\varepsilon}, \quad (15.4)$$

где Q_{H} – низшая теплота сгорания сухого [генераторного газа](#) при нормальных условиях, кДж/м³; iV_h – рабочий объем цилиндров двигателя, м³; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; η_v – коэффициент наполнения; η_{ε} – эффективный КПД двигателя.

Разберем каждый из параметров, от которых зависит эффективная мощность двигателя.

15.3.1. Теплота сгорания горючей смеси

Теплота сгорания горючей смеси, как это следует из формулы (15.3), зависит от теплоты сгорания газа и коэффициента избытка воздуха. На рис. 15.1 показана теплота сгорания газо-воздушной смеси для CO, H₂ и CH₄ в зависимости от содержания горючего газа в газозоудушной смеси при $\alpha = 1,15$.

Из приведенных кривых видно, что в случае содержания горючей части газа до 55% общей его массы наиболее выгодной составляющей газа по теплоте сгорания горючей смеси является метан.

Однако в генераторном газе при обычной температуре в камере газификации количество метана не превышает 4%. Поэтому в отношении теплоты сгорания газа, а следовательно, и эффективности работы двигателя наиболее желателен

такой газ, в котором содержится наибольшее количество CO и H₂.

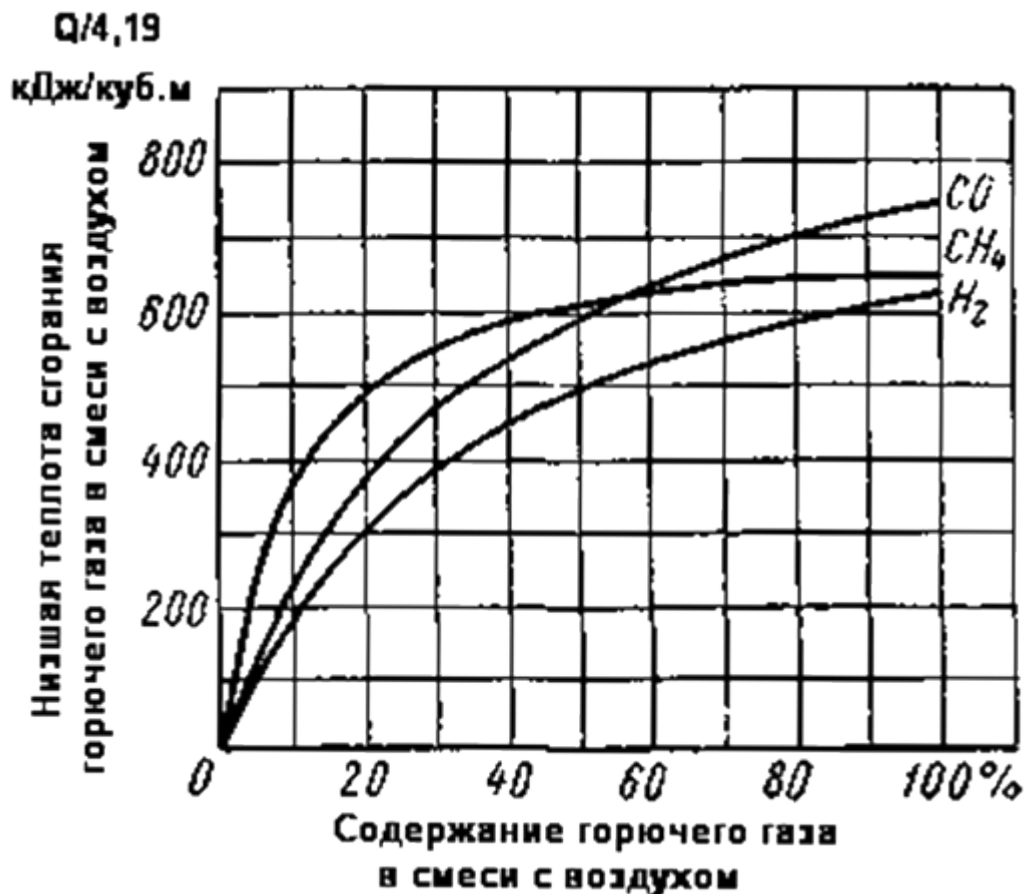


Рис. 15.1. Теплота сгорания горючего газа (CO, H₂ и CH₄) в смеси с воздухом в зависимости от содержания горючего газа в смеси

[Генераторный газ](#), поступающий в двигатель, содержит и водяные пары, количество которых зависит от температуры газа, поступающего в смеситель. Для увеличения теплоты сгорания газа необходимо стремиться к улучшению процесса газификации топлива в [газогенераторе](#) с целью получения большего содержания горючих компонентов газа. Кроме того, газ должен быть максимально охлажден в агрегатах [газогенераторной](#) установки.

Одним из методов повышения теплоты сгорания газа является присадка жидких топлив. Жидкое топливо или вводят в камеру газификации, в которой оно проходит процесс [пиролиза](#), после чего продукты [пиролиза](#) вместе с генераторным газом поступают в цилиндры двигателя, или жидкое топливо вводят непосредственно в цилиндры двигателя. В первом случае можно употреблять тяжелые фракции жидкого топлива, во втором – светлые жидкие топлива (бензин, керосин, [спирт](#)). Однако при этом методе повышения мощности газовых двигателей требуется значительная присадка жидкого топлива. Так, по опытам НАМИ, для повышения мощности газового двигателя на 10% необходимо обеспечить присадку 160–239 г/кВт·ч тяжелых нефтепродуктов в камеру газификации [газогенератора](#), работающего на древесных чурках. Для двигателей, работающих преимущественно с большой нагрузкой, такой метод повышения мощности является неприемлемым.

15.3.2. Рабочий объем цилиндров двигателя и частота вращения

мощность газового двигателя повышается при увеличении рабочего объема цилиндров, однако это не всегда можно сделать. Кроме того, данный метод повышения мощности значительно усложняет переоборудование жидкотопливных двигателей в газовые.

При увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя также можно повысить его мощность, если двигатель имеет запас мощности по внешней характеристике. При увеличении частоты работы двигателя резко возрастает механическая напряженность деталей кривошипно-шатунной группы. Эта напряженность является следствием сил, развивающихся в цилиндрах двигателя при сгорании рабочей смеси, и сил инерции деталей кривошипно-шатунной группы. Очевидно, что сохранение механической напряженности деталей этой группы при увеличении скорости вращения коленчатого вала двигателей возможно в том случае, если у газовых двигателей давление p_z в конце сгорания рабочей смеси, а также «жесткость» работы $dp/d\phi$ будут значительно меньше, чем у жидкотопливных.

Этому условию соответствует переоборудование двигателей с воспламенением от сжатия, так как для них давление p_z колеблется в пределах 4,5–8,0 МПа, в то время как для газовых двигателей при степени сжатия $\varepsilon = 7$ –8,5 значение p_z не превышает 3,0–4,0 МПа. Кроме того, газовые двигатели работают менее «жестко», чем жидкотопливные: для газовых двигателей максимальная скорость нарастания давления $dp/d\phi$ колеблется в пределах 0,09–0,14, а для жидкотопливных – 0,15–0,20 МПа на 1° поворота коленчатого вала.

15.3.3. Коэффициент наполнения двигателей

Коэффициент наполнения газовых двигателей, отнесенный к условиям окружающей среды, имеет меньшие значения, чем у жидкотопливных двигателей. Это объясняется дополнительными сопротивлениями [газогенераторной](#) установки прохождению газа в двигатель и повышенной температурой газа, по сравнению с окружающей средой.

Коэффициент наполнения равен

$$\eta_v = \frac{\varepsilon \cdot p_a - p_r}{(\varepsilon - 1) \cdot p_o} \cdot \frac{T_o}{T_o + \Delta T}, \quad (15.5)$$

где p_a – давление в конце впуска, кПа; p_r – давление остаточных газов, кПа; p_o – давление окружающей среды, кПа; T_o – температура окружающей среды, К; ΔT – температура подогрева свежего заряда, К.

Наибольшее влияние на коэффициент наполнения имеют давление в конце впуска и степень подогрева газо-воздушной смеси. Для газового двигателя величина p_a зависит не только от сопротивления системы впуска, но также и от сопротивлений [газогенераторной](#) установки. На рис. 15.2 изображена кривая зависимости мощности [газогенераторного](#) двигателя Д 2Г от разрежения во впускном трубопроводе (топливо – древесный уголь). Из кривой видно, что при увеличении разрежения от 800 до 1200 мм вод. ст. эффективная мощность снижается на 4 кВт, т.е. на каждые 100 мм вод. ст. увеличения разрежения мощность снижается на 1 кВт. При дальнейшем увеличении разрежения (более 1200 мм вод. ст.) снижение мощности несколько замедляется. В среднем на каждые 100 мм вод. ст. увеличения разрежения мощность двигателя уменьшается на 0,75 кВт.

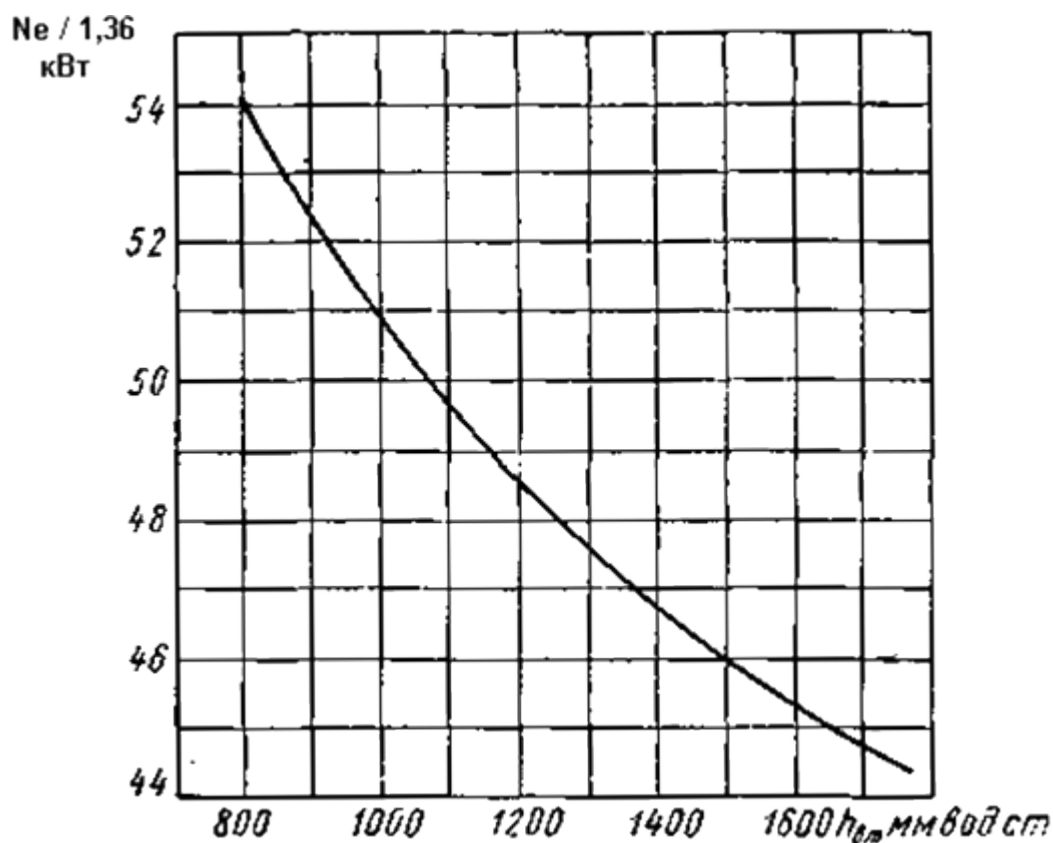


Рис. 15.2. Зависимость мощности N_e газоподогревателя Д 2Г от разрежения h_{em} во впускном трубопроводе

Для получения более высоких значений коэффициента наполнения надо стремиться к уменьшению аэродинамических сопротивлений газоподогревательной установки и системы впуска; в частности, придать трубопроводам лучшие аэродинамические формы, увеличить их сечение, сделать повороты более плавными, а стенки трубопроводов – более гладкими.

В карбюраторных двигателях приходится ограничивать увеличение сечения трубопроводов, чтобы скорость смеси в них на рабочих режимах не была слишком мала, так как с уменьшением скорости горючей смеси уменьшается количество топлива, двигающегося в потоке воздуха в виде пара и капель, и увеличивается количество топлива, текущего по стенкам трубопроводов в виде пленки. Кроме того, в конструкциях трубопроводов часто предусматривают специальные элементы, способствующие срыву и разбрызгиванию жидкой пленки топлива.

В газовых двигателях подобные ограничения не ставятся, поэтому должны быть приняты все возможные меры к созданию впускных систем газовых двигателей с минимальными аэродинамическими сопротивлениями.

Температура горючей смеси, поступающей в цилиндры двигателя значительно влияет на величину коэффициента наполнения, так как при повышении температуры горючей смеси увеличивается ее удельный объем. Зависимость мощности газоподогревателя Д 2Г от температуры газо-воздушной смеси во впускном трубопроводе показана на рис. 15.3, из которого видно, что при увеличении температуры газо-воздушной смеси во впускном трубопроводе на 10 °С мощность двигателя уменьшается на 1,5 кВт. Следовательно, при проектировании газоподогревательной установки необходимо стремиться к тому, чтобы температура перед смесителем была минимальной и не превышала более чем на 10– 15 °С температуру окружающей среды. Подогрев поступающей в цилиндры горючей смеси происходит главным образом в результате соприкосновения ее с горячими поверхностями камеры сгорания двигателя, цилиндра, каналов головки блока и впускного трубопровода (особенно в случае обогрева последнего). При уменьшении температуры этих поверхностей коэффициент наполнения

заметно повышается. Так, согласно данным проф. В.И. Кирсанова, при уменьшении температуры стенок цилиндров от 300 до 200° коэффициент наполнения η_v увеличивается на 10%.



Рис. 15.3. Зависимость мощности N_e газового двигателя Д 2Г от температуры t газо-воздушной смеси в трубопроводе

При создании конструкции системы впуска газового двигателя нужно стремиться к минимальному подогреву смеси. Для достижения указанной цели недостаточно изготовить впускной и выпускной трубопроводы разобщенными, как это сделано у двигателя Д 2Г. При оставлении разобщенных трубопроводов на одной стороне двигателя подогрев смеси остается значительным. Так, на двигателе Д 2Г разность температур газо-воздушной смеси после смесителя и во впускном трубопроводе перед входом смеси в каналы головки блока составляет примерно 26 °С. Для уменьшения подогрева необходимо впускной и выпускной трубопроводы устанавливать на противоположных сторонах двигателя.

Рассмотрим зависимость коэффициента наполнения двигателя от фаз газораспределения.

При поступлении горючей смеси в цилиндр давление ее понижается вследствие потери давления на создание скорости смеси и преодоление аэродинамических сопротивлений трубопроводов и клапана. Падение давления горючей смеси во время впуска в течение первой половины хода поршня обычно бывает значительно больше, чем в конце хода. Это происходит вследствие недостаточного подъема клапана, инерции массы горючей смеси в трубопроводе и ускоряющегося движения поршня; скорость поступления горючей смеси в цилиндр во время впуска в течение первой половины хода поршня в связи с этим получается чрезмерно большой. При резком уменьшении скорости смеси в цилиндре к концу хода поршня происходит дополнительный нагрев смеси, что ухудшает наполнение.

Увеличение коэффициента наполнения может быть достигнуто путем обеспечения большего проходного сечения клапана в начале такта впуска. Увеличивая подъем впускного клапана к моменту прихода поршня в ВМТ, т.е. увеличивая опережение открытия впускного клапана или скорость его подъема, можно уменьшить падение давления в начале такта впуска и увеличить коэффициент наполнения.

Однако слишком раннее открытие впускного клапана может привести к тому, что часть отработавших газов будет выталкиваться в конце такта выпуска во впускную систему, а в начале такта впуска вновь засасываться в цилиндр. Поэтому угол опережения открытия впускного клапана надо подбирать с учетом этих явлений.

На показатели работы двигателя в значительной степени влияет изменение момента закрытия впускного клапана. Характер кривой коэффициента наполнения в зависимости от числа оборотов коленчатого вала в основном определяется выбором момента закрытия впускного клапана.

При рассмотрении вопроса о влиянии фаз распределения на наполнение двигателей необходимо иметь в виду, что кроме общепринятого определения фаз по углам поворота кривошипа, представляющего один элемент – время, следует учитывать и второй – сечение. Чем больше диаметр клапана, полнее профиль кулачка, больше подъем клапана, тем выше будет коэффициент наполнения при одинаковых углах открытия и закрытия клапанов. Поэтому правильнее определять фазы не по углам поворота кривошипа, а

по произведениям времени открытия клапана на площадь клапанной щели (время – сечение клапанов) соответствующим этим фазам.

На коэффициент наполнения влияет также и отношение p_r / p_0 , которое в значительной степени зависит от момента закрытия выпускного клапана. При слишком раннем закрытии клапана увеличивается давление остаточных газов, а следовательно увеличивается отношение p_r / p_0 и ухудшается коэффициент наполнения.

15.3.4. Эффективный коэффициент полезного действия

Эффективный КПД определяется как произведение трех коэффициентов полезного действия: термического – η_t , относительного – η_o и механического – η_m :

$$\eta_e = \eta_t \cdot \eta_o \cdot \eta_m. \quad (15.6)$$

Термический КПД для цикла «быстрого» сгорания (подвод теплоты вблизи ВМТ) зависит от степени сжатия ε и показателя адиабаты k и определяется по известной из термодинамики формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (15.7)$$

Степень сжатия двигателей внутреннего сгорания с принудительным зажиганием топливо-воздушной смеси ограничивается температурой воспламенения и склонностью топлива к детонации. Температура воспламенения различных топлив (при атмосферном давлении) следующая:

керосин.....	270 °С
дизельное топливо.....	360 °С
бензин.....	410 °С
водород.....	530 °С
окись углерода.....	610 °С
метан.....	645 °С

Температура воспламенения [генераторного газа](#) значительно выше, чем бензино-воздушной смеси. Повышение температуры воспламенения [генераторного газа](#) обусловлено присутствием в нем инертных газов (CO_2 и N_2). [Генераторный газ](#) обладает высокими антидетонационными качествами; октановое число его колеблется в пределах 110 – 120. Антидетонационные качества [генераторного газа](#) в основном зависят от содержания в нем водорода. Чем меньше водорода в генераторном газе, тем выше антидетонационные качества газа. Современные транспортные [газогенераторы](#) не обеспечивают получения стабильного состава газа; содержание отдельных его компонентов в процессе выжигания топлива в бункере изменяется, поэтому целесообразно устанавливать степень сжатия ближе к нижнему пределу, допускаемому генераторным газом. В настоящее время для газовых двигателей применяют степень сжатия в пределах 7 – 9. Однако, как показывают экспериментальные работы, степень сжатия может быть повышена до 12; при этом [генераторный газ](#) должен содержать не более 15% водорода.

Относительный КПД η_d характеризует совершенство действительного рабочего цикла двигателя в отношении приближения его к идеальному

$$\eta_{\text{д}} = \frac{\eta_i}{\eta_t} \quad (15.8)$$

Относительный КПД оценивает качество сгорания и тепловые потери в стенки камеры сгорания – главные факторы, вызывающие потери в тепловом процессе газового двигателя.

Нормальная (ламинарная) скорость распространения фронта пламени для различных газов зависит от содержания их в смеси (рис. 15.4). Из кривых видно, что из всех составляющих [генераторного газа](#) водород имеет максимальную скорость $v_{\text{н}}$ распространения пламени. При комнатной температуре для водорода $v_{\text{н}} = 267$ см/сек; для метана и окиси углерода эта скорость в 6 – 7 раз меньше.

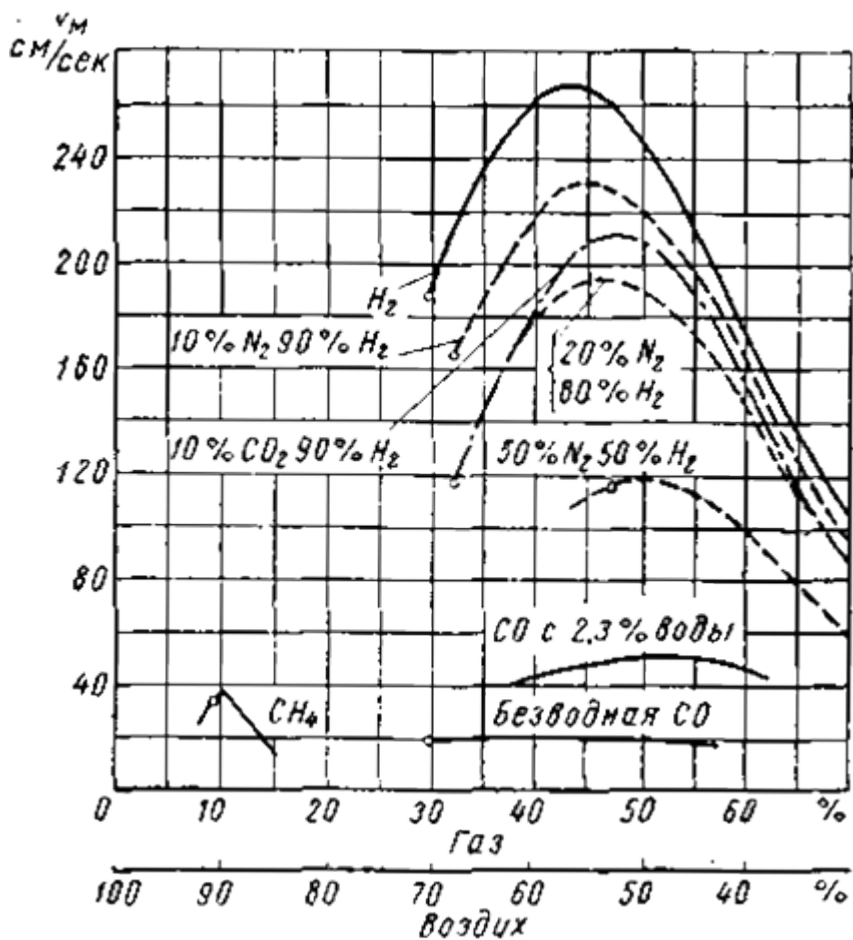


Рис.15.4. Нормальная скорость $v_{\text{н}}$ распространения фронта пламени для различных газов в зависимости от содержания примеси азота, двуоксида углерода и паров воды

Из приведенных кривых видно, что скорость распространения фронта пламени зависит от содержания газов в смеси, а также от примеси инертных газов. С повышением температуры скорость распространения фронта пламени увеличивается, а с повышением давления – понижается.

Влияние инертных газов на скорость $v_{\text{н}}$ распространения фронта пламени характеризуется следующей зависимостью

$$v_i = v_0 \left(1 - \frac{\text{N}_2 + 1,67\text{CO}_2}{100} \right), \quad (15.9)$$

где v_0 – максимальная скорость распространения пламени газа, не содержащего CO_2 и N_2 , м/сек; CO_2 и N_2 – содержание двуокиси углерода и азота в газе, %.

Скорость распространения фронта пламени [генераторного газа](#) (нагретого до температуры 400–450 °С) в бомбе составляет 1–2 м/сек. Распространение фронта пламени в цилиндре двигателя происходит значительно быстрее, чем при горении такого же заряда в бомбе. Скорость распространения пламени в цилиндре колеблется от 12 до 15 м/сек и зависит от числа оборотов вала (скорость распространения фронта пламени возрастает с увеличением турбулентности заряда). При этом в цилиндре двигателя происходит большее раздробление фронта пламени.

Скорость распространения фронта пламени газо-воздушной смеси как в бомбе, так и в цилиндрах двигателя меньше, чем у рабочих смесей жидких топлив. Следствием этого являются повышенные тепловые потери газовых двигателей во время процессов сгорания и расширения. Для уменьшения этих потерь увеличивают степень сжатия и стремятся создать для газовых двигателей компактные камеры сжатия, а также установить на этих двигателях оптимальный угол опережения зажигания.

Зависимость мощности газового двигателя Г-58 от угла φ опережения зажигания приведена на рис. 15.5 (топливо – газ из древесного угля).

Оптимальный угол опережения зажигания при работе на газе из древесного угля составляет 30°ПКВ до ВМТ, а при работе на газе из [торфобрикетов](#) 33°ПКВ до ВМТ.

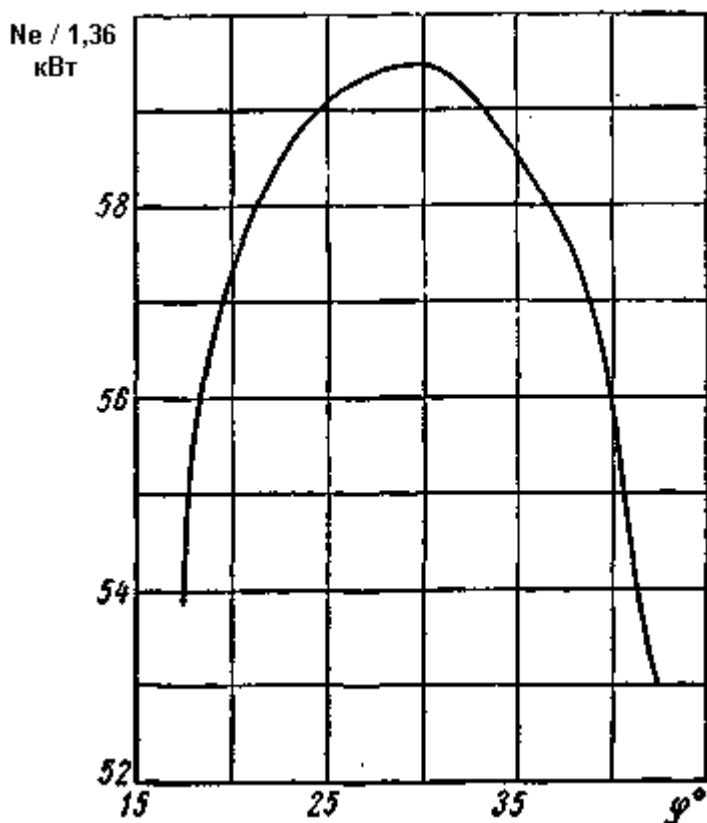


Рис. 15.5. Зависимость мощности N газового двигателя Г-58 от угла опережения зажигания

Углы опережения зажигания являются наиболее выгодными для нормального скоростного режима работы двигателя Г-58 ($n = 1400 \text{ мин}^{-1}$). Увеличение оптимального угла опережения зажигания при работе двигателя на газе из [торфобрикетов](#) объясняется пониженным содержанием водорода и меньшей теплотой сгорания этого газа по сравнению с газом из древесного угля.

Влияние величины зазоров s между электродами свечей зажигания на мощность газового двигателя Г-58 приведено на рис. 15.6. При зазорах между электродами 0,6 мм свечи работали неудовлетворительно. При

малых зазорах (0,2– 0,3 мм) происходит быстрое загрязнение свечей и затрудняется пуск двигателя. Поэтому указанный зазор устанавливают в зависимости от степени сжатия в пределах 0,4–0,5 мм.

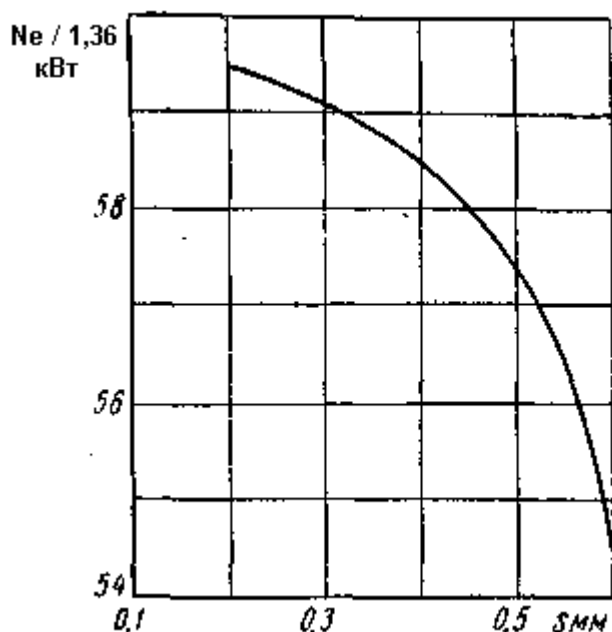


Рис. 15.6. Зависимость мощности N_e газоподвижителя Г-58 от зазора s между электродами свечей

Механический КПД представляет собой отношение эффективной мощности к индикаторной. Следовательно, для его увеличения необходимо стремиться к уменьшению мощности N_m , расходуемой на трение.

15.4. Конструкции отечественных газогенераторных двигателей

В период значительного интереса к газогенераторным двигателям у нас в стране было создано большое количество их модификаций. Так, при переводе тракторных двигателей на генераторный газ обычно ставились следующие условия:

1. сохранение основных конструктивных параметров двигателя;
2. обеспечение заданной мощности газоподвижителя без применения наддува;
3. максимальное использование узлов и деталей двигателя;
4. обеспечение надежного и легкого пуска двигателя.

Таблица 15.1

Среднее эффективное давление в тракторных двигателях на генераторном газе из разных твердых топлив

Трактор	Двигатель	Топливо	Диаметр цилиндра, мм	Ход поршня, мм	Рабочий объем, л	Частота вращения, мин-1	Степень сжатия	Сред.эфф. давлен, МПа
ЧТЗ СГ-65	МГ-17	Березовые чурки	155	205	15,5	870	7,8	0,43
ХТЗ-Т2Г	Д2Г	То же	125	152	7,46	1250	8,5	0,43
Г58-У	СХТЗ-1Г	»	115	152	6,32	1050	6,5	0,48

ГБ-58	Г-58	»	125	152	7,46	1400	8,5	0,45
ГБ-58	Г-58	торфобрикет	125	152	7,46	1400	8,5	0,45
ГБ-58	Г-58	Антрацит 13 x 25 мм	125	152	7,46	1400	8,5	0,44
ГБ-58	Г-58	Полукокк 10 x 40 мм	125	152	7,46	1400	8,5	0,47
ГБ-58	Г-58	Древесный уголь	125	152	7,46	1400	8,5	0,48
КТ-12	ЗИС-21А	Березовые чурки	101,6	114,3	5,55	1800	7.0	0,33

Если перевести карбюраторный двигатель на [генераторный газ](#) без каких-либо переделок, только установив смеситель вместо карбюратора, то потеря мощности этого двигателя будет составлять 40–50%. Поэтому для увеличения мощности двигателя при переводе его с жидкого топлива на [генераторный газ](#) вводят ряд изменений, а именно: увеличивают степень сжатия, устраняют подогрев горючей смеси, увеличивают проходные сечения для горючей смеси и др. При переводе двигателя с воспламенением от сжатия на [генераторный газ](#) уменьшают степень сжатия.

В табл. 15.1 приведены данные о среднем эффективном давлении в тракторных газовых двигателях на газе из разных твердых топлив.

16. Перспективный рабочий процесс ДВС с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия при работе на топливах, получаемых из возобновляемых источников

Рабочий процесс, реализуемый в поршневых двигателях внутреннего сгорания при [самовоспламенении гомогенной смеси от сжатия](#) (англ. [HCCI](#)), привлекает пристальное внимание ведущих компаний по производству автомобилей и двигателей. Причиной является высокий КПД – на уровне или даже выше дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива – и предельно низкие концентрации сажи и оксидов азота в отработавших газах.

Основная роль в характере протекания тепловыделения при реализации этого процесса принадлежит кинетике химических реакций, которая определяется химическим составом топлива. С начала исследований [HCCI](#)-процесса было показано, что при определенных условиях организовать такой процесс можно практически на любом жидком или газообразном топливе. Однако на практике возникает проблема фазирования начала сгорания при изменении режимных параметров и внешних условий. Одним из способов управления началом сгорания является изменение состава двухкомпонентного топлива, составляющими которого с успехом могут быть топлива, получаемые из возобновляемых источников.

16.1. Общая характеристика процесса с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия

На рис. 16.1 приведены результаты визуализации процесса сгорания, полученные на двигателе с прозрачным поршнем в компании Daimler Chrysler, в традиционном двигателе с искровым зажиганием и двигателе с [HCCI](#)-про-цессом.

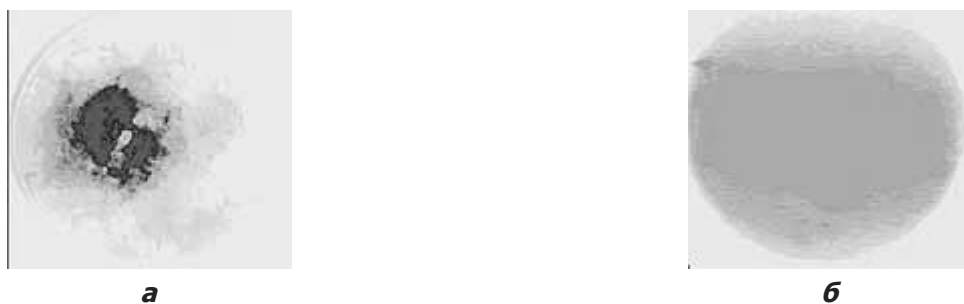


Рис.16.1. Термозональная высокоскоростная видеосъемка процесса горения рабочей смеси: а – в бензиновом двигателе с искровым зажиганием; **б** – в двигателе с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия. Более темными отображаются зоны с более высокой температурой

Видно, что в двигателе с искровым зажиганием имеются высокотемпературные зоны, в которых преимущественно и образуется оксид азота. При [НССИ](#)-процессе температурное поле более однородно, а уровень температуры ниже, что и объясняет концентрации NO_x в отработавших газах на уровне единиц, максимум десятков частей на миллион (ppm).

Следует отметить, что двигатели с самовоспламенением гомогенного заряда имеют качественное регулирование, работая при достаточно высоких значениях коэффициента избытка воздуха ($\alpha > 2$) для обеспечения ограничения по скорости нарастания давления и максимального давления цикла. Поэтому максимальные среднетермодинамические температуры в цилиндре лежат ниже минимальной температуры, при которой становится заметной скорость образования оксида азота ($\cong 2200 \text{ K}$). Это отличает [НССИ](#)-процесс от дизельного, при котором горение топлива происходит в области стехиометрических значений при температурах, значительно превышающих среднетермодинамическую.

Высокий КПД [НССИ](#)-процесса объясняется меньшим временем протекания процесса тепловыделения по сравнению, как с дизелями, так и с двигателями с искровым зажиганием, а горение гомогенной смеси при $\alpha > 2$ не приводит к образованию сажи.

В то же время [НССИ](#)-процесс имеет особенности, которые, видимо, стоит рассматривать как недостатки, и от успешного их преодоления зависит, станут ли двигатели этого класса доминировать на потребительском рынке. Первая та-кая особенность – это «неуправляемый процесс сгорания». В [НССИ](#)-двигателях объемное сгорание топливовоздушной смеси, по сути, аналогично сгоранию [квазигомогенной](#) смеси в первой стадии сгорания в дизеле, определяющей динамические нагрузки на кривошипно шатунный механизм и уровень шума. Вторая особенность – это управление моментом самовоспламенения смеси, для чего могут использоваться: управление цетановым числом топлива (применение смесового топлива, состоящего из двух компонентов с различной склонностью к самовоспламенению), подогрев заряда на впуске, изменение степени сжатия и др.

16.2. Методика определения закона управления составом топлива двигателя с самовоспламенением гомогенного заряда

В связи с тем, что в настоящее время не выработаны генеральные направления управления рабочим процессом в [НССИ](#)-двигателях, представляется целесообразным провести анализ расчетно-теоретической методики определения закона управления составом топлива на основе математической модели двигателя с самовоспламенением гомогенного заряда.

В анализируемых результатах используется модель [НССИ](#)-процесса поршневого двигателя, в которой развитие процесса горения рассматривается как протекание бимолекулярной реакции окисления топлива, характеризующейся эффективной энергией активации и экспоненциальной зависимостью скорости реакции от температуры, которая, в свою очередь, зависит как от количества выгоревшего топлива, так и

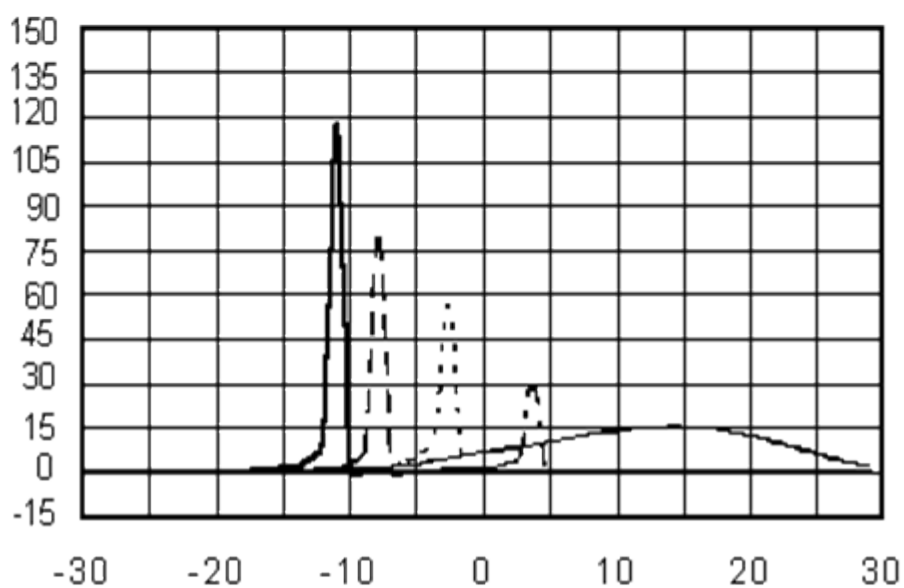
от затрат энергии на изменение внутренней энергии смеси и продуктов сгорания, совершаемой работы и тепловых потерь.

Для настройки модели использовались данные экспериментальных исследований, проведенных в Ибаракском университете (Япония) под руководством доктора Чена.

Для исследований использовался дизель Yanmar 14 9,2/9,6, конвертированный для работы по [HCCI](#)-процессу. В качестве топлива использовалась газообразная смесь природного газа (ПГ) и диметил эфира (ДМЭ). На рис. 16.2, а приведены экспериментальные индикаторные диаграммы. Обработка их дала результаты по протеканию среднетермодинамической температуры (рис. 16.3) и скорости тепловыделения (рис. 16.4) по углу поворота коленчатого вала.

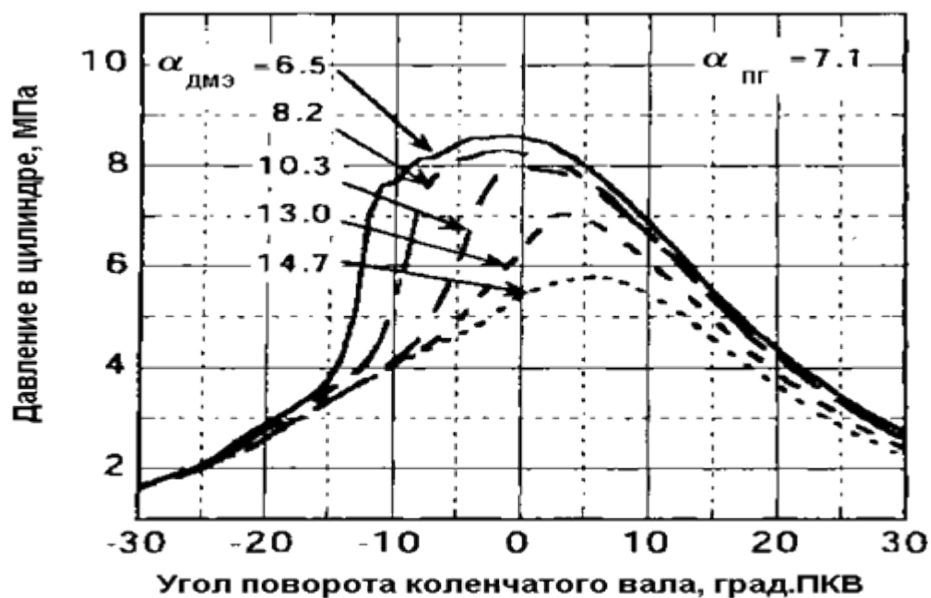


а

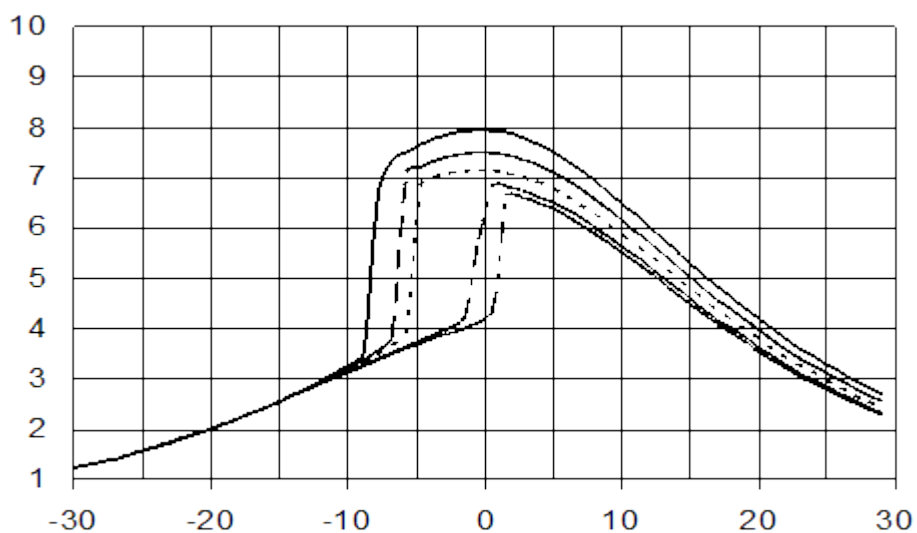


б

Рис. 16.2. Сравнение результатов обработки экспериментальных индикаторных диаграмм в функцию теплоиспользования (а) и результаты моделирования процесса тепловыделения (б) для аналогичных режимов работы ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия

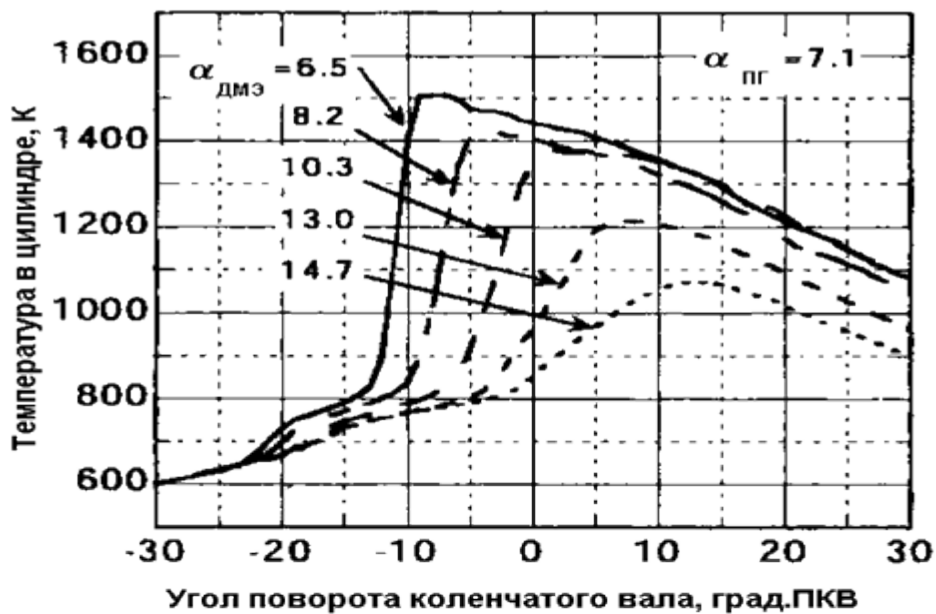


a

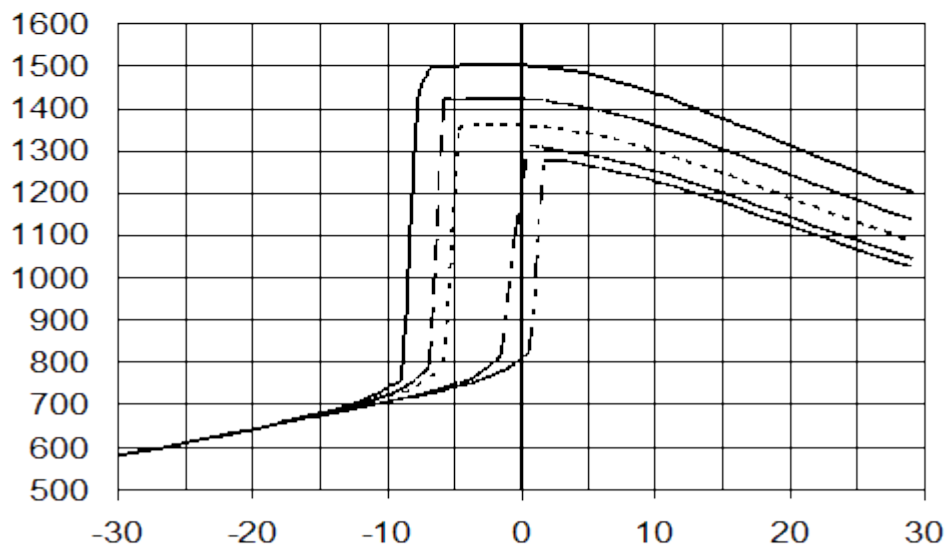


б

Рис. 16.3. Характер протекания давления в цилиндре, регистрируемый в ходе эксперимента (а) и полученный в результате моделирования процесса тепловыделения (б)



a



б

Рис. 16.4. Текущая термодинамическая температура в цилиндре двигателя, полученная при обработке экспериментальных индикаторных диаграмм (а) и в результате моделирования процесса тепловыделения (б)

В результате идентификации расчетной модели была установлена взаимосвязь эффективной энергии активации E_a с цетановым числом (ЦЧ) смесового топлива, что позволило провести расчеты для различных составов смесового топлива и условий организации процесса сгорания топлива в двигателе. Методика расчета состояла из следующих этапов:

- выбор условий работы двигателя: степени сжатия, нагрузочного режима, условий на впуске в двигатель;
- выбор локального коэффициента избытка воздуха по природному газу ($\alpha_{пг}$);
- проведение расчета рабочего цикла при различных значениях локального коэффициента избытка воздуха по ДМЭ ($\alpha_{дмэ}$).

При моделировании нагрузка двигателя оценивалась по суммарному коэффициенту избытка воздуха

$$\alpha_{\text{см}} = \frac{\alpha_{\text{ПГ}} \cdot \alpha_{\text{ДМЭ}}}{\alpha_{\text{ПГ}} + \alpha_{\text{ДМЭ}}}$$

Низшая теплота сгорания смесового топлива ($H_{u\text{см}}$), его цетановое число ($\text{ЦЧ}_{\text{см}}$) и масса воздуха ($l_{0\text{см}}$), теоретически необходимая для полного сгорания 1 кг смесового топлива, в зависимости от соответствующих индивидуальных показателей топлив (ПГ и ДМЭ) могут быть рассчитаны по следующим формулам

$$H_{u\text{см}} = \frac{\alpha_{\text{ПГ}} \cdot l_{0\text{ПГ}} \cdot H_{u\text{ДМЭ}} + \alpha_{\text{ДМЭ}} \cdot l_{0\text{ДМЭ}} \cdot H_{u\text{ПГ}}}{\alpha_{\text{ДМЭ}} \cdot l_{0\text{ДМЭ}} + \alpha_{\text{ПГ}} \cdot l_{0\text{ПГ}}};$$

$$\text{ЦЧ}_{\text{см}} = \frac{\alpha_{\text{ПГ}} \cdot l_{0\text{ПГ}} \cdot \text{ЦЧ}_{\text{ДМЭ}} + \alpha_{\text{ДМЭ}} \cdot l_{0\text{ДМЭ}} \cdot \text{ЦЧ}_{\text{ПГ}}}{\alpha_{\text{ДМЭ}} \cdot l_{0\text{ДМЭ}} + \alpha_{\text{ПГ}} \cdot l_{0\text{ПГ}}};$$

$$l_{0\text{см}} = \frac{l_{0\text{ДМЭ}} \cdot l_{0\text{ПГ}} (\alpha_{\text{ПГ}} + \alpha_{\text{ДМЭ}})}{\alpha_{\text{ДМЭ}} \cdot l_{0\text{ДМЭ}} + \alpha_{\text{ПГ}} \cdot l_{0\text{ПГ}}}$$

В результате исходные экспериментальные характеристики были получены моделированием [HCCI](#) процесса (рис. 16.2, б–16.4, б). Как видно, модель достаточно адекватно описывает результаты эксперимента, поэтому может в дальнейшем быть использована для анализа.

На рис. 16.5 приведены некоторые результаты моделирования рабочего процесса. В качестве оценочного показателя выбран индикаторный КПД.

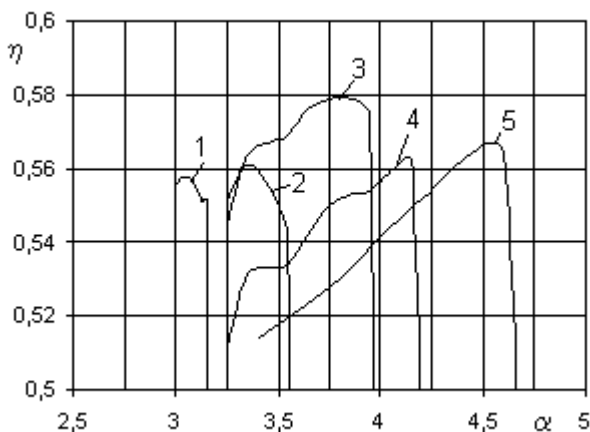


Рис. 16.5. Зависимость индикаторного КПД [HCCI](#) двигателя в зависимости от среднего (суммарного) коэффициента избытка воздуха, при температуре на впуске $T_a = 320 \text{ K}$; степени сжатия $\varepsilon = 17,7$ и индивидуальном коэффициенте избытка воздуха по [ДМЭ](#): 1 – $\alpha_{\text{ДМЭ}} = 4,0$; 2 – $\alpha_{\text{ДМЭ}} = 4,8$; 3 – $\alpha_{\text{ДМЭ}} = 5,5$; 4 – $\alpha_{\text{ДМЭ}} = 6,2$; 5 – $\alpha_{\text{ДМЭ}} = 7,1$

Из представленных графиков видно, что каждому значению суммарного (с учетом природного газа и [ДМЭ](#)) коэффициента избытка воздуха соответствует некоторое соотношение между компонентами смесового топлива, обеспечивающее максимальный индикаторный КПД процесса. Иными словами, на каждом нагрузочном режиме состав смесового топлива (его цетановое число) должен быть таков, чтобы

обеспечить самовоспламенение смеси в момент поворота коленчатого вала двигателя на угол, наивыгоднейший с позиций совершения в цикле максимальной работы.

Наивысший термодинамический КПД можно получить, осуществляя подвод тепла вблизи ВМТ цикла, следствием чего являются высокие значения максимального давления в цилиндре и скорости его нарастания. Поэтому, рассматривая возможность организации [HCCI](#)-процесса на базе какой-либо конкретной модели двигателя, следует ввести ограничения по максимальному давлению цикла, исходя из конструктивных особенностей используемого ДВС.

Обработав результаты моделирования, представленные на рис. 16.5 (проведя огибающую линию через максимальные значения индикаторного КПД), можно построить закон изменения состава смеси (цетанового числа смесевое топлива), обеспечивающий максимальную эффективность преобразования тепловой энергии в механическую во всем диапазоне изменения суммарного коэффициента избытка воздуха (нагрузки), который графически изображен на рис. 16.6.

Как известно, цетановое число, характеризующая склонность топлива к самовоспламенению от сжатия, не определяет химический состав топлива, т.е. одному и тому же цетановому числу соответствуют топлива различного химического состава. Поэтому требуемый закон изменения цетанового числа (рис. 16.6) может быть получен при применении топлив, состоящих из смеси других компонентов (в нашем случае различных биотоплив).

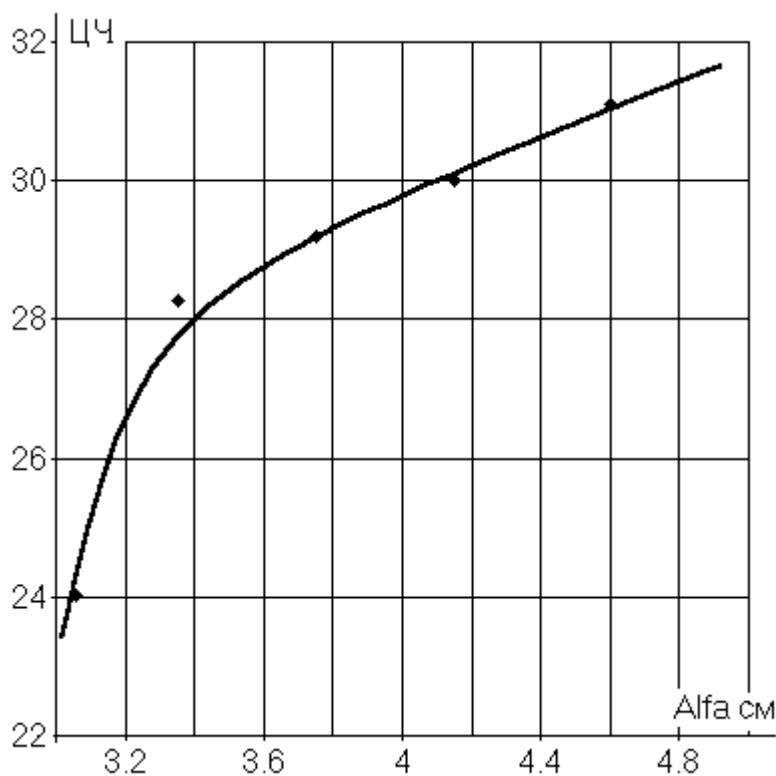


Рис. 16.6. Закон изменения цетанового числа смесевое топлива, обеспечивающий наивысший индикаторный КПД цикла при $T_a = 320$ К; $\varepsilon = 17,7$

Так, на рис. 16.7 приведены результаты расчета локальных коэффициентов избытка воздуха для четырех двухкомпонентных смесевых топлив в зависимости от степени нагрузки двигателя.

В качестве компонентов смесевое топлива в двигателе [HCCI](#)-процессом, могут применяться различные топлива, получаемые из возобновляемых источников, так как среди них есть как топлива с низким цетановым числом (низкоцетановый компонент смесевое топлива), например, [биогаз](#), метиловый и этиловый [спирт](#), [биоводород](#), так и топлива с высоким цетановым числом (высокоцетановый компонент смесевое топлива): диметиловый и этиловый эфиры, метил эфир рапсового масла и др.

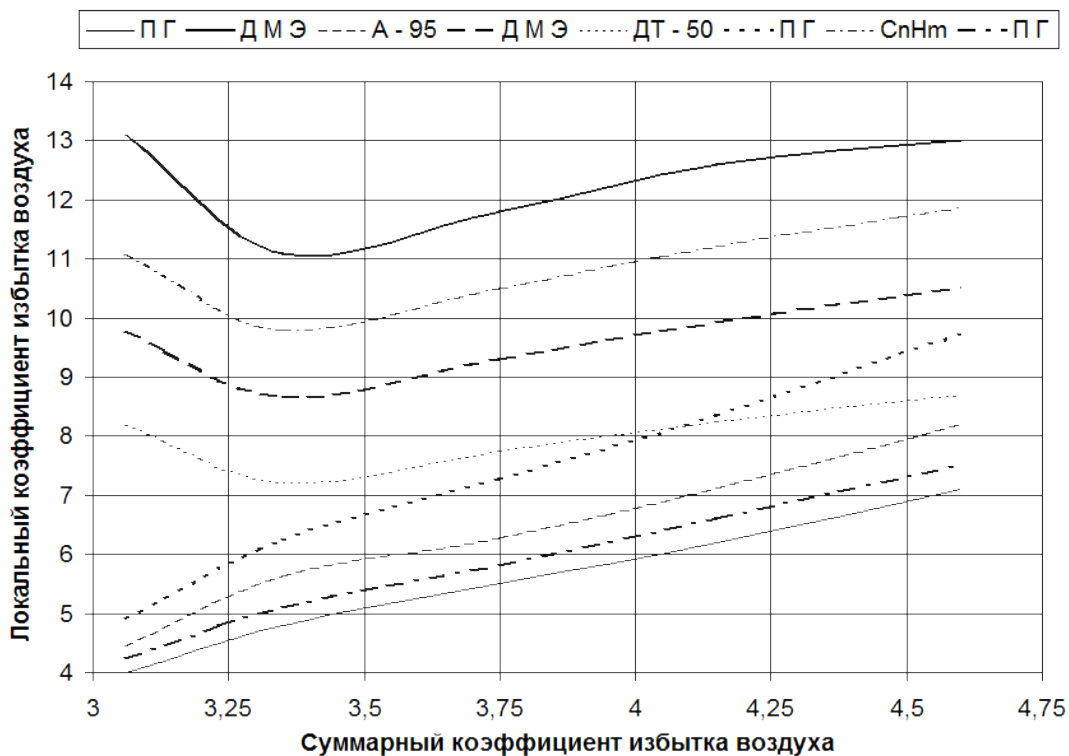


Рис. 16.7. Законы управления составом рабочей смеси, обеспечивающие наивысший индикаторный КПД для четырех смесевых топлив, состоящих из: 1 – ПГ и ДМЭ; 2 – А-95 и ДМЭ; 3 – ДТ и ПГ; 4 – ПГ и C_nH_{2n+2} ($n = 7...10$)

Для более точного управления эффективностью двигателя с НСЦИ-процессом с помощью двухкомпонентных топлив следует ввести обратную связь по началу воспламенения смеси в цилиндре.

16.3. О программном и адаптивном управлении рабочим процессом при применении различных альтернативных топлив

Рассмотренный выше способ управления можно отнести к программным. Суть его сводится к тому, что при известных параметрах компонентов смесевое топлива по известным соотношениям вычисляется состав топлива, обеспечивающий максимальный КПД двигателя на данном режиме работы. Если какой-либо параметр, не включенный в число учитываемых, но влияющий на характеристики процесса, изменится, то это может привести к отклонению от оптимального режима работы.

К таким параметрам можно отнести характеристики биотоплив. Действительно, например, состав [биогаза](#), а значит, и его цетановое число, низшая теплота сгорания и теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания единицы массы топлива, могут изменяться в достаточно широком диапазоне. Это можно отнести к большинству топлив, получаемых из возобновляемых источников. Поэтому для обеспечения высокой степени эффективности процесса необходимо программное управление дополнить адаптивным, которое за счет введения обратных связей позволяет корректировать базовые регулировочные таблицы.

При организации НСЦИ-процесса базовым параметром, по которому удобно корректировать состав смесевое топлива, может служить момент начала сгорания топлива, выражаемый в этом типе двигателей в достаточно резком повышении давления в цилиндре. Получение информации об изменении давления в цилиндре можно получить методом косвенного индицирования.

Среди известных методов косвенного индицирования можно выделить следующие: использование сигналов неравномерности вращения коленчатого вала для оценки индикаторных диаграмм цилиндров ДВС; определение давления путем установки тензодатчиков на уплотнительную прокладку

газового стыка; определение давления в цилиндре путем использования датчиков вибрации и установления соответствия между давлением в цилиндре и вибрацией стенок цилиндра.

Все названные способы косвенного индицирования носят пока скорее постановочный характер, они используются в виде отдельных экспериментальных проработок, имеющих ограниченную точность и достаточно узкую сферу использования, что позволяет исследователям предлагать и разрабатывать новые методы и средства диагностирования ДВС.

Так, фирмой Oprtrand (США) разработан способ диагностирования двигателей, основанный на применении тензодатчиков. Миниатюрные тензодатчики можно устанавливать в форсунку, свечу зажигания или накаливания. Датчик состоит из трех основных частей: чувствительного элемента, непосредственно подвергающегося давлению газов, гибкого соединительного проводника и оптоэлектронного модуля.

Анализ сил, действующих в остове двигателя, показывает, что наиболее полно давление в цилиндрах двигателя передается через крышку (или головку) шпилькам или болтам ее крепления к блоку. Предложенный метод индицирования заключается в том, что под гайку или болт крепления крышки (или головки) цилиндров помещают стальную шайбу с закрепленными на ней тензорезисторами. Выходной сигнал от тензорезистора через усилитель передается на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывается в ЭВМ.

Данный метод был опробован на ряде двигателей. Наиболее полное исследование было проведено в процессе стендовых испытаний двигателя ЗЧ17,5/24 (3NVD24). В ходе испытаний одновременно проводилось прямое индицирование с помощью электропневматического стробоскопического

индикатора МАИ-2А, диагностического комплекса К-748, а также методом косвенного индицирования. Все измерения проводились на пяти режимах работы двигателя: $N_e = 0; 0,25; 0,5; 0,75$ и $1,0 \cdot N_{e \text{ ном}}$. В данном случае индикаторные диаграммы, снятые с помощью индикатора МАИ-2А, рассматривались как эталонные, с которыми сравнивались диаграммы, снятые методами прямого и косвенного индицирования для оценки их точности. по указанной методике также испытывалась установка на базе двигателя 6ЧН12/14. Полученные диаграммы представлены на рис. 16.8.

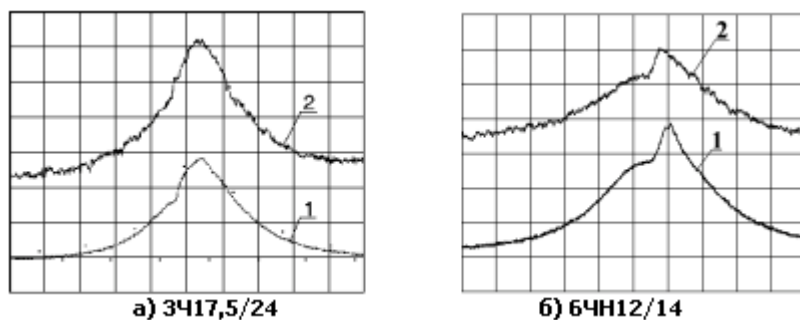


Рис. 16.8. Индикаторные диаграммы, полученные прямым (1) и косвенным (2) методами

Анализ результатов испытаний показал, что среднее индикаторное давление косвенного метода несколько занижено по сравнению с давлением прямого метода, но максимальное значение не превышает 5%, при этом значение среднего индикаторного давления p_i оказалось практически равным p_i , полученному при обработке индикаторных диаграмм, снятых с помощью индикатора МАИ-2А. Это дает основание утверждать, что значение p_i , полученное предлагаемым методом, более реально отражает действительную картину.

Кроме того, жесткость работы двигателя ($\partial P / \partial \varphi$), степень повышения давления $\lambda = P_2 / P_c$, а также значение максимального давления сгорания P_2 при измерении косвенным методом также занижены по сравнению с методом прямого индицирования, но расхождения не превышают 5%.

Более важным, с нашей точки зрения является то, что косвенный метод индицирования оказался наиболее точным при определении моментов самовоспламенения топлива и моментов достижения максимального давления сгорания относительно ВМТ. Это, по-видимому, связано с тем, что система блок – крышка – шпилька является максимально жесткой и, следовательно, изменение давления в цилиндре моментально воспринимается датчиком. Прямое индицирование дает задержку в нашем случае примерно на 1° поворота коленчатого вала, что вызвано дросселированием в индикаторном канале.

Таким образом, датчик обратной связи, построенный на основе обработки сигнала косвенного индицирования, может быть с успехом применен для адаптивного управления рабочим процессом [HCCI](#)-двигателя при его работе на топливах, получаемых из возобновляемых источников, отличающихся непостоянством своих физико-химических свойств. Его несомненными достоинствами являются простота реализации, т.е. метод практически не требует конструктивных переделок в двигателе, датчики отличаются долговечностью, а обработка сигнала может осуществляться бортовым компьютером, становящимся неотъемлемой принадлежностью любого современного ДВС.

17. Методика обработки ездового цикла для получения распределения режимов работы дизеля при оценке эффективности применения альтернативных топлив

К оценке эффективности использования альтернативных топлив, получаемых из возобновляемых источников ([полный жизненный цикл](#)), необходимо применять комплексные подходы. При прогнозировании затрат и получаемого экономического эффекта при замене традиционных моторных топлив альтернативными необходимо оценить расход топлива транспортным средством в процессе эксплуатации. Рассмотрим пример, как это можно сделать расчетным методом.

Общая продолжительность цикла - 1220 с
 Расстояние, проходимое за весь цикл испытаний, - 11, 007 км
 Максимальная скорость транспортного средства - 120 км/ч
 Средняя скорость транспортного средства - 33,6 км/ч (44,0 км/ч, без учета режимов холостого хода, который составляет 26,2%)

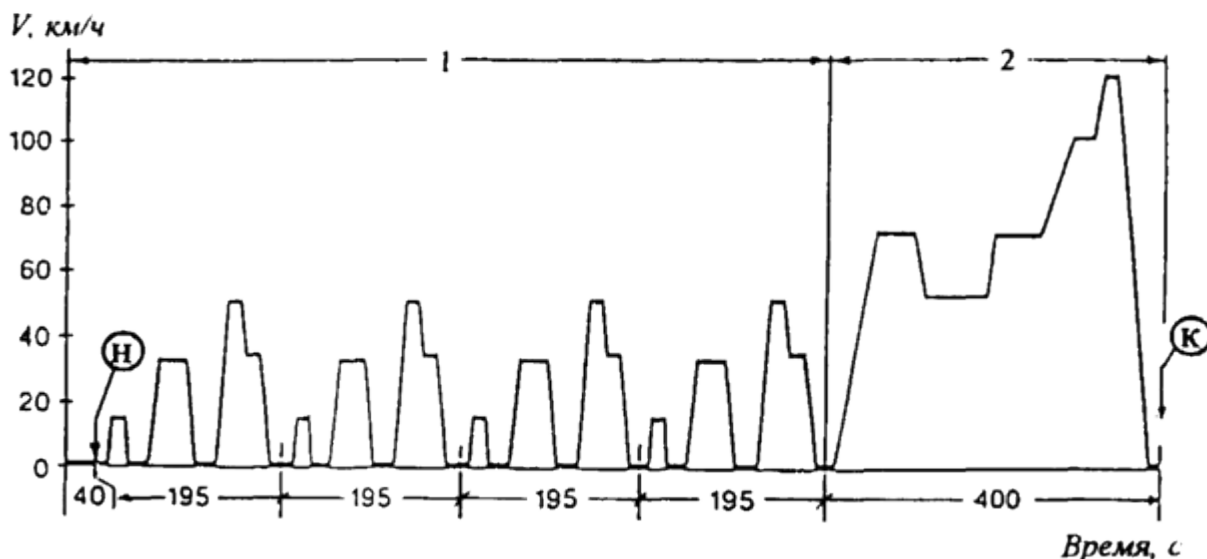


Рис. 17.1. Европейский цикл испытаний ECE+EUDC Driving Cycle

Существует большое число стандартов на испытания ДВС в составе транспортных средств, учитывающих специфику их движения. В качестве примера рассмотрим Европейский цикл проверки токсичности с полным моделированием движения автомобиля ECE+EUDC Driving Cycle, приведенный на рис. 17.1.

Цикл представляет собой график движения транспортного средства в функции времени. Для определения поля вероятностных режимов работы силовой установки транспортного средства требуется рассмотреть тяговый баланс авто-мобиля. Для конкретизации выводов и рекомендаций рассмотрим движение перспективного транспортного средства – 22-местного автобуса ЗИЛ-3250, на базе малотоннажного городского автомобиля ЗИЛ-5301, использующего в качестве топлива, допустим, биотопливо. В табл. 17.1 приведены характеристики автобуса.

Таблица 17.1

Характеристики городского автобуса ЗИЛ-3250

Параметры	Значение
Полная допустимая масса	6950 кг
Масса перевозимого груза	3000 кг
Максимальная скорость	95 км/ч
Время разгона до скорости 60 км/ч	29 с
КПП, с передаточными отношениями передач:	
первой	7,44
второй	4,10
третьей	2,29
четвертой	1,47
пятой	1,00
Передаточное отношение главной передачи	3,273
Статический диаметр колес	0,82 м
Двигатель Д245,12ММЗ, рабочим объемом цилиндров	4,75 л
Степень сжатия	15,1
Номинальная мощность	<u>80 кВт</u>
Частота вращения к/вала	2400мин ⁻¹
Максимальный крутящий момент	<u>350 Нм</u>
Частота вращения к/вала	1700мин ⁻¹

Известно, что на ровном участке сопротивление движению транспортного средства складывается из сопротивления качению, аэродинамического сопротивления и сопротивления, связанного с преодолением силы инерции.

Соппротивление качению при движении автомобиля по горизонтальной дороге равно

$$P_f = f \cdot G_T \quad (17.1)$$

где G_T – полный вес автомобиля, Н; $f = f_0 + k V_T^2$ – коэффициент сопротивления качению (коэффициенты для асфальтового покрытия дороги равны: $f_0 = 0,014$; $k = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^2/\text{км}$); V_T – скорость автомобиля, км/ч.

Аэродинамическое сопротивление движению равно

$$P_W = \frac{1}{2} c_x \rho F V^2, \quad (17.2)$$

где $c_x = 0,7$ – коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля (автобуса); $\rho = 1,24$ – плотность воздуха, кг/м³; $F = 5$ – лобовая площадь автобуса, м².

Усилие, требуемое для ускорения автобуса

$$P_j = \delta G_T \frac{J}{g}, \quad (17.3)$$

где $\delta = 1,05$ – коэффициент, учитывающий момент инерции вращающихся деталей двигателя, сцепления, коробки перемены передач и т.д.; J – ускорение автомобиля, м/с²; $g = 9,8$ – ускорение силы тяжести, м/с².

Суммарное сопротивление движению равно

$$P_c = P_f + P_W + P_j. \quad (17.4)$$

Мощность, требуемая для движения транспортного средства

$$N_c = 0,278 P_c V_T, \quad (17.5)$$

или мощность, требующаяся от двигателя

$$N_\varepsilon = \frac{N_c}{\eta_{TP}} = \frac{0,278 V_T}{\eta_{TP}} \left(\frac{1}{2} c_x \rho F V_T^2 + f G_T V_T + \delta G_T \frac{J}{g} \right), \quad (17.6)$$

где $\eta_{TP} = 0,9$ – механический КПД трансмиссии с главной одинарной передачей.

Частота вращения коленчатого вала двигателя для заданной скорости движения транспортного средства на k -й передаче равна

$$n = \frac{60 V_T i_k i_{гп}}{3,6 \pi D_k}, \quad (17.7)$$

где i_k – передаточное отношение i -й передачи в КПП; $i_{гп}$ – передаточное отношение главной передачи; D_k – диаметр колеса автомобиля, м.

Стратегия переключения передач состоит в том, что при разгоне переход на повышенную передачу осуществляется при достижении двигателем номинальной частоты вращения коленчатого вала. Текущая скорость V_T и ускорение j_T может быть определено обработкой ездового цикла.

Продолжительность режима в секундах определяется непосредственно из графика (рис. 17.1). Ускорение по участкам равно

$$J_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t_i}, \quad (17.8)$$

где V_{i+1} , V_i – скорость транспортного средства в конце и в начале участка движения с постоянным ускорением, соответственно, м/с; Δt_i – время движения на данном участке, с.

Путь, проходимый транспортным средством при движении на данном участке

$$L_i = \frac{V_{i+1} + V_i}{2} \Delta t_i. \quad (17.9)$$

Суммарный путь определяется как

$$L_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N L_i. \quad (17.10)$$

В табл. 17.2 приведены результаты обработки графика движения по 25 участкам с постоянным ускорением. Для получения поля вероятностных режимов работы дизеля была разработана программа вычисления с дискретностью 0,1 сек нагрузочно-скоростных режимов работы дизеля, установленном на транспортном средстве, испытываемом в соответствии с рассмотренным ездовым циклом.

Таблица 17.2

Режимы движения по ECE + EUDC циклу

№ точки	Диапазон скоростей, км/час	Время конца режима, с	Продолжительн. режима, с	Ускорение, м/с ²	Путь на режиме, м	Суммарный путь, м
1	0	48,7	48,7	0	0	0
2	0-16	54,8	6,1	0,728	13,6	13,6
3	16	64,0	9,2	0	40,9	54,5
4	16-0	70,1	6,1	- 0,728	13,6	68,1
5	0	88,3	18,2	0	0	68,1
6	0-32	103,6	15,3	0,581	68,1	136,2

7	32	124,8	21,2	0	678,4	814,6
8	32-0	140,1	15,3	- 0,581	68,1	882,7
9	0	161,4	21,3	0	0	882,7
10	0-50	182,7	21,3	0,653	148,0	1030,7
11	50	194,9	12,2	0	169,6	1200,3
12	50-36	207,1	12,2	- 0,320	145,8	1346,1
13	36	216,2	9,1	0	91,1	1437,2
14	36-0	228,4	12,2	- 0,820	61,1	1498,3
15	0	246,7	18,3	0	0	1498,3

Окончание табл. 17.2

№ точки	Диапазон скоростей, км/час	Время конца режима, с	Продолжительн. режима, с	Ускорение, м/с ²	Путь на режиме, м	Суммарный путь, м
Далее повторяются режимы со 2 по 15 три раза						
16	0	843,7	6,1	0	0	5993,2
17	0-70	883,2	39,5	0,492	384,3	6377,5
18	70	928,9	45,7	0	889,3	7266,8
19	70-50	941,1	12,2	- 0,453	203,5	7470,3
20	50	1011,2	70,1	0	978,4	8448,7
21	50-70	1023,4	12,2	0,453	203,5	8652,2
22	70	1075,1	51,7	0	1006,1	9658,3
23	70-90	1096,2	21,1	0,263	468,4	10126
24	90	1182,5	86,3	0	2157	12283
25	90-0	1200,0	17,5	-1,43	218,7	12502

Блок-схема программы приведена на рис. 17.2. В расчетной программе учитывается вероятность превышения мощностью, необходимой для движения по заданному графику, располагаемой мощности двигателя.

Иными словами, режим движения в этом случае корректируется с учетом протекания кривой крутящего момента дизеля по внешней скоростной характеристике. В качестве примера в табл. 17.3 и 17.4 приведены

результаты обработки при различной степени загрузки автобуса. На рис. 17.3 приведены соответствующие поверхности отклика.

Как видно из приведенных таблиц и графиков, загрузка двигателя Д-245 12ММЗ автобуса на базе ЗИЛ-5301 при его движении в соответствии с рассмотренным циклом далека от равномерности.

Начало цикла расчета

Проверка условия окончания расчета

Вычисление текущей скорости, ускорения, требуемой и располагаемой мощности

Проверка условий работы двигателя на холостом ходу

Вычисление требуемой частоты вращения к/вала дизеля

Выбор номера передачи коробки перемены передач

Расчет по внешней скоростной характеристике дизеля при превышении требуемой мощности располагаемой

Расчет пути транспортного средства

Выбор нагрузочно-скоростной зоны работы дизеля

Запись файла распределения режимов работы дизеля

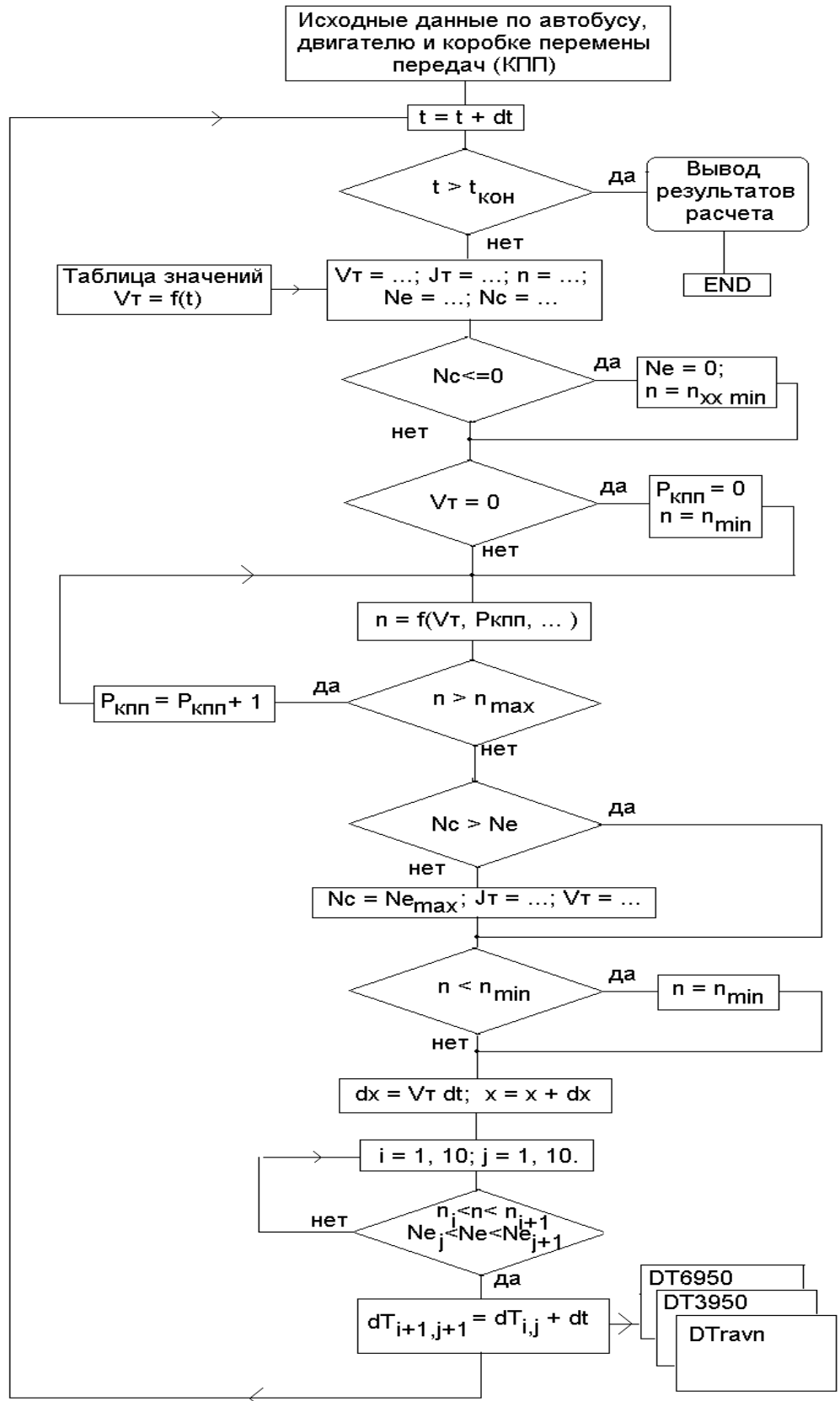


Рис. 17.2. Блок-схема программы СИКЛ

Таблица 17.3

Временная нагрузка дизеля Д-245 12ММЗ на полностью загруженном автомобиле ЗИЛ-5301 (общая масса 6950 кг)

Диапазон изменения мощности, кВт	Диапазон изменения частоты вращения коленчатого вала, мин ⁻¹									
	600-780	780-960	960-1140	1140-1320	1320-1500	1500-1680	1680-1860	1860-2040	2040-2220	2220-2400
0-8	387	20	18	24	29	63	6	5	4	3
8-16	0	4	6	42	5	4	86	1	0	0
16-24	0	0	0	0	5	3	116	6	6	4
24-32	0	0	0	0	7	7	6	3	1	2
32-40	0	0	0	0	2	0	2	5	7	91
40-48	0	0	0	0	10	6	2	0	0	3
48-56	0	0	0	0	1	28	2	2	1	0
56-64	0	0	0	0	0	0	36	13	50	2
64-72	0	0	0	0	0	0	0	27	18	0
72-80	0	0	0	0	0	0	0	0	5	15

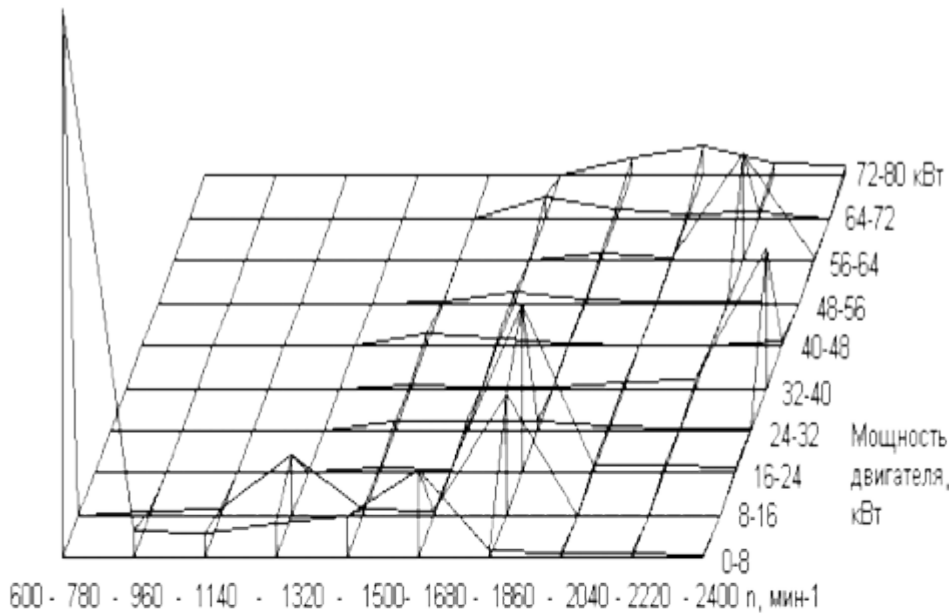
Таблица 17.4

Временная нагрузка дизеля Д-245 12ММЗ на порожнем автомобиле ЗИЛ-5301 (общая масса 3950 кг)

Диапазон изменения мощности, кВт	Диапазон изменения частоты вращения коленчатого вала, мин ⁻¹									
	600-780	780-960	960-1140	1140-1320	1320-1500	1500-1680	1680-1860	1860-2040	2040-2220	2220-2400
0-8	387	24	24	66	33	64	91	5	4	3
8-16	0	0	0	0	12	10	126	7	6	6
16-24	0	0	0	0	5	3	6	7	8	6
24-32	0	0	0	0	9	13	3	2	0	100
32-40	0	0	0	0	0	1	6	6	3	2
40-48	0	0	0	0	0	2	6	1	91	6
48-56	0	0	0	0	0	9	6	5	3	0

56-64	0	0	0	0	0	0	5	3	4	4
64-72	0	0	0	0	0	0	0	6	2	2
72-80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Загрузка двигателя Д-245 при движении с полной нагрузкой



Загрузка двигателя Д-245 при движении порожняком

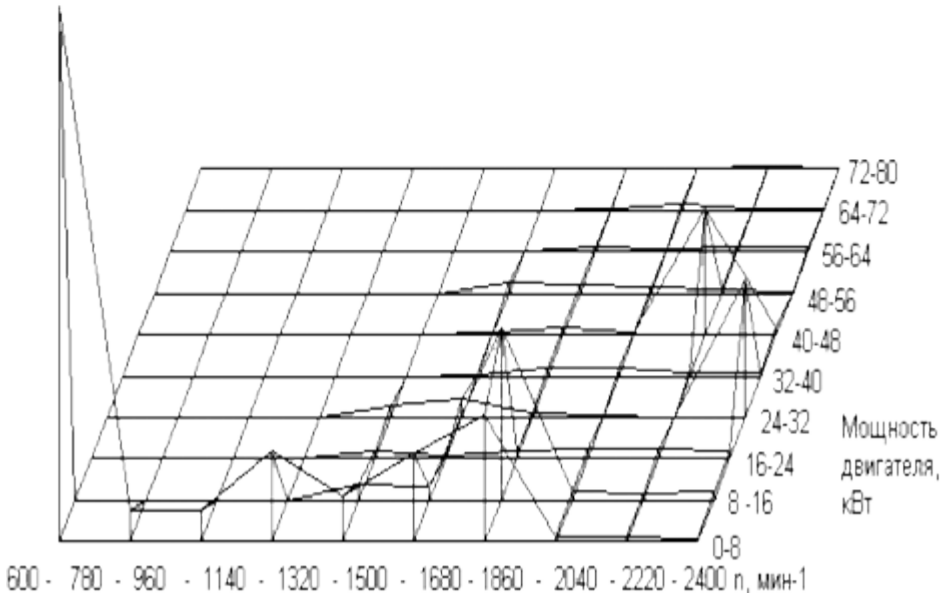


Рис. 17.3. Поверхности отклика визуализирующие распределение режимов работы дизеля Д-245.12 при различной загрузенности транспортного средства

Для проведения оптимизации регулировок дизеля предполагается использовать его характеристики, полученные при испытаниях в стендовых условиях на установившихся режимах работы. Правомерность такого подхода требует анализа характера нагружения дизеля при движении автобуса в соответствие с

ездовым циклом. На рис. 17.4 приведены расчетные параметры двигателя и автобуса на протяжении всего ездового цикла ECE+EUDC.

При проведении расчетов на экран монитора при расчете выводятся: V_T – текущая скорость автобуса, м/с; k – номер передачи (ноль – нейтраль); n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹; N_e – располагаемая мощность двигателя, соответствующая внешней скоростной характеристике, кВт; N_c – требуемая мощность, определяемая суммарным сопротивлением движению, кВт.

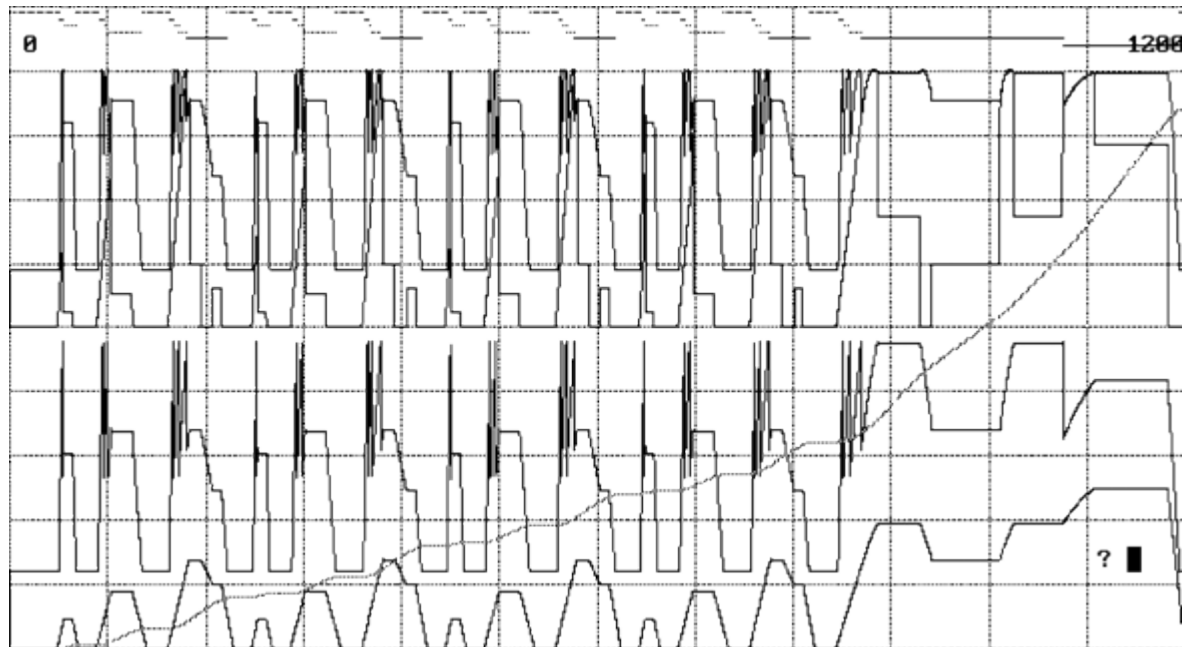


Рис.17.4. Пример работы программы СИКЛ

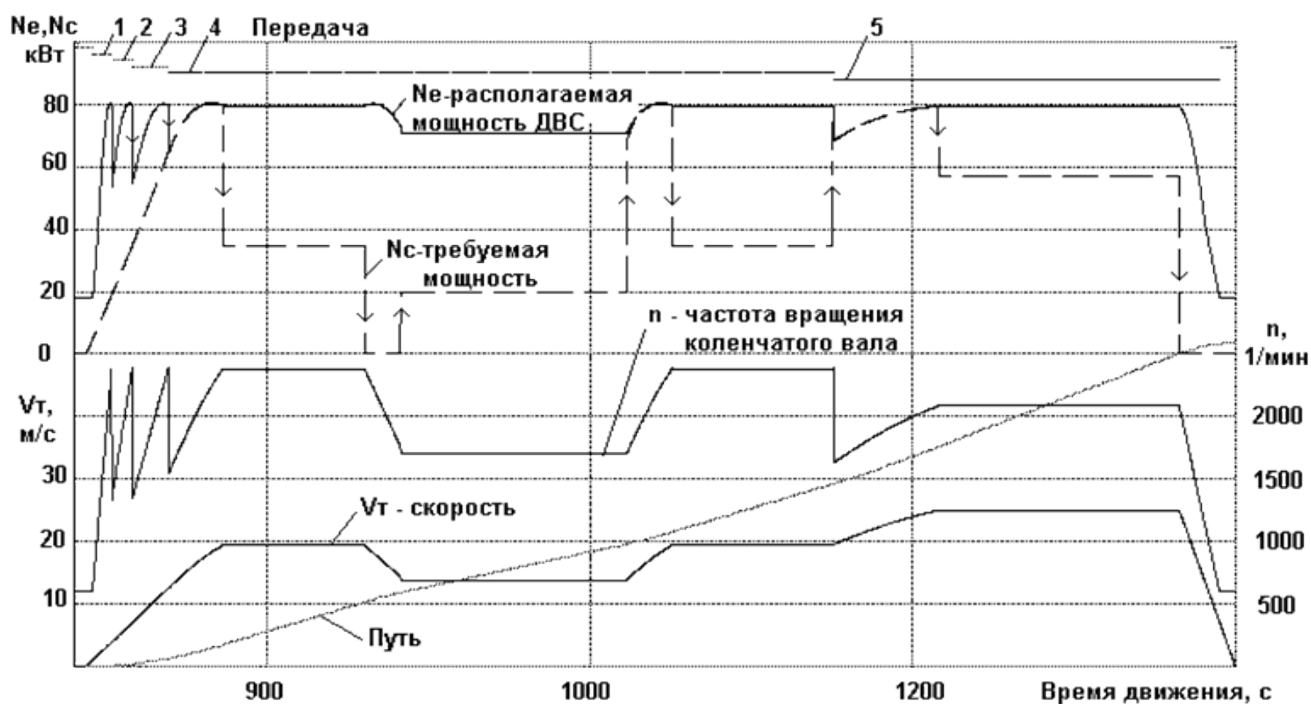


Рис. 17.5. Заключительная часть ездового цикла, частота вращения вала двигателя, требуемая и располагаемая мощность

На рис. 17.5 приведена заключительная часть цикла, для которой характерна наибольший диапазон изменения нагрузочно-скоростных режимов дизеля.

Участок разгона автобуса от нуля до 70 км/ч, продолжительностью $t_1 = 46$ с, характеризуется тем, что около 30% времени дизель работает по внешней скоростной характеристике.

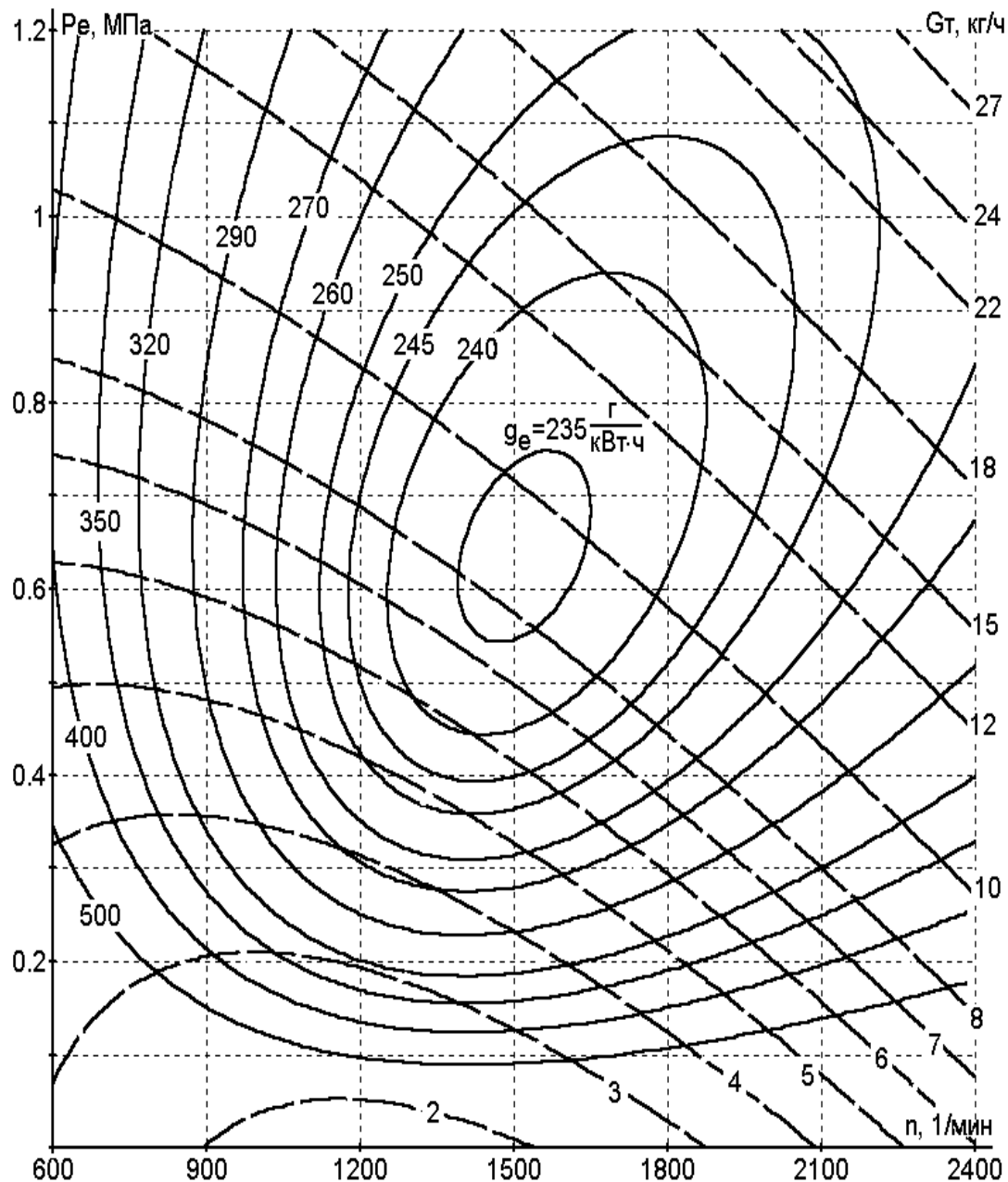


Рис. 17.6. Многопараметровая характеристика транспортного дизеля:

— удельный эффективный расход топлива, $г/(кВт \cdot ч)$;

----- часовой расход топлива, $кг/ч$

Для сравнения работы на традиционном и альтернативном видах топлива требуются данные стендовых испытаний дизеля при работе на этих видах топлива. Для примера на рис. 17.6 приведены данные стендовых испытаний дизеля, производства Минского моторного завода Д-245.12ММЗ. На многопараметровой характеристике транспортного дизеля 4ЧН 11/12,5, видна режимная область с минимальным расходом топлива.

Используя распределение времени работы t_{ij} в каждой нагрузочно-скоростной зоне (табл. 17.3 и 17.4) и часовой расход топлива G_{Tij} в соответствующей режимной точке (из графика на рис. 17.6) можно определить суммарный расход топлива за испытание при движении в соответствии с выбранным ездовым циклом

$$G_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{12} \frac{t_{ij}}{3600} G_{Tij} \quad . (17.11)$$

Таким образом, имея данные стендовых испытаний дизеля, проведенных на различных видах топлива, которые необходимо сопоставить в условиях реальной эксплуатации транспортного средства (в нашем случае традиционного дизельного топлива и альтернативного, получаемого из возобновляемых источников), можно получить численные оценки путевого расхода для каждого из этих топлив и сделать обоснованный вывод о их конкурентоспособности.

18. Методика приведения оценочных показателей к единому параметру

Применение альтернативных топлив, получаемых из возобновляемых источников, в дизелях служит задачам ресурсосбережения и охраны окружающей среды от загрязнений. Использование топлив такого типа требует оптимального управления рабочим процессом дизеля. Одновременное улучшение всех нормируемых показателей по токсичности и дымности при минимизации расхода топлива на различных режимах работы дизеля, как правило, невозможно, и требуется построить некоторую целевую функцию, учитывающую вклад каждого из параметров в топливо-экономическую и экологический уровень дизеля.

Изначально обеспечение оптимального управления ДВС по параметрам экономичности и эмиссии вредных веществ с [ОГ](#) подразумевает выбор методики многопараметровой оптимизации. Среди различных способов наиболее широкое применение имеет метод свертки. При этом обобщенный критерий оптимальности J_0 формируется в виде суммы

$$J_0 = \sum_{i=1}^k a_i J_i \quad , (18.1)$$

где J_i – частные критерии оптимальности; a_i – весовые коэффициенты.

В методе свертки наиболее сложным является выбор обоснованной методики вычисления весовых коэффициентов. Это связано прежде всего с тем, что до настоящего времени не создано единого критерия оценки мероприятий ведущих к улучшению экологических показателей ДВС и снижению удельного расхода топлива. Постоянно проводимые работы по снижению эмиссии вредных веществ с [ОГ](#) требуют на всех стадиях создания нового двигателя значительного увеличения финансовых затрат, так как простые решения в своем большинстве давно реализованы. Поэтому в современном двигателе, обеспечивающем пониженный уровень выбросов токсичных компонентов с [ОГ](#), увеличивается количество применяемых новых конструктивных решений. Как следствие, разработчик сталкивается с большими затратами на проведение расчетно-теоретических исследований и сопутствующих модельных экспериментов, возрастают усилия по преодолению технологических трудностей при изготовлении новых узлов и макетных образцов ДВС, существенно увеличиваются объемы и сложность моторных испытаний. В результате стоимость двигателя, в котором реализованы принципы снижения токсичности [ОГ](#) и который оборудован соответствующими системами и агрегатами, значительно увеличивается.

Эффект от снижения удельного расхода топлива может быть легко оценен, в силу того, что стоимость топлива известна. Удельные выбросы вредных веществ не имеют устоявшегося ценового эквивалента, поэтому задача многопараметровой оптимизации решается с определенной долей условности, определяемой методом формирования целевой функции.

Однако если предположить, что для каждого i -го вредного вещества, которое выбрасывается в атмосферу на данном нагрузочно-скоростном режиме работы ДВС в количестве $b_{\text{вв } i}$ г/кВт·ч, существует ценовой эквивалент $C_{\text{вв } i}$ с соответствующей размерностью, допустим, руб./г, то, зная удельный расход топлива b_e и его цену C_T , можно вычислить целевую функцию как

$$J_0^* = C_m b_e + \sum_{i=1}^K C_{\text{вв } i} b_{\text{вв } i} \rightarrow \min. \quad (18.2)$$

Данная целевая функция позволяет определить глобальную целевую функцию, учитывающую характер нагружения ДВС в реальных условиях эксплуатации. Так, если имеются данные режимометрирования в виде матрицы $P_{lm}(M\kappa_l, n_m)$, определяющей время работы на данном нагрузочном ($M\kappa_l$) и скоростном (n_m) режимах при выполнении цикла работ продолжительностью $T_{\text{ц}}$, то глобальная целевая функция определяется как

$$J_G = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M P_{lm} N e_{lm} J_{0lm} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M P_{lm} \frac{M\kappa_l n_m}{9550} J_{0lm}. \quad (18.3)$$

Глобальная функция имеет денежное выражение и позволяет проводить оптимизацию по единому критерию.

При отсутствии данных по характеру загрузки данного типа двигателя можно воспользоваться одним из испытательных циклов, например, как это было описано выше или воспользоваться стандартизованным для проведения аттестационных испытаний дизелей у нас в стране 13-ступенчатым или 8-ступенчатым циклами. В этом случае нормы выбросов определяются как удельные: г/кВт·ч. Методика обработки предусматривает определение оценочного показателя за испытательный цикл для j -го вредного вещества по зависимости

$$g_j = \frac{\sum_{i=1}^{13} G_j^i K_i}{\sum_{i=1}^{13} N_e^i K_i}, \quad (18.4)$$

где G_j^i – массовый выброс j -го вредного вещества, определяемый для i -го режима, характеризующегося часовым расходом топлива G_m^i , г/ч; N_e^i – эффективная мощность дизеля, развиваемая им на i -м режиме, кВт; K – фактор массы режима (относительное время работы на данном режиме).

Для вычисления частного критерия оптимальности по j -му вредному веществу при проведении испытаний по 13-ступенчатому циклу следует обработку получаемых данных вести следующим образом. На каждом режиме количество выбрасываемого j -го

вещества на 1 кг альтернативного топлива составит G_j^i / G_m^i . Отсюда частный критерий можно определить как

$$J_j^c = \sum_{i=1}^{13} \frac{G_j^i}{G_m^i} \quad (18.5)$$

Глобальный критерий определится как сумма стоимости единицы массы альтернативного топлива и суммы частных критериев по вредным веществам

$$J_G = C_m + \sum_{j=1}^k C_{\text{вв}j} \sum_{i=1}^{13} \frac{G_j^i}{G_m^i} = C_m + \sum_{j=1}^k C_{\text{вв}j} J_j^c \quad (18.6)$$

Характерно, что последние формулы могут быть использованы как основа для определения налога за загрязнение атмосферы конкретным типом дизеля. Действительно, частный критерий, определяемый по каждому нормируемому токсичному компоненту организацией, сертифицирующей двигатель, может стать паспортной характеристикой двигателя, определяющей суммарные расходы при его эксплуатации.

К сожалению, как было сказано выше, единого подхода к определению ценового эквивалента эмиссии вредных веществ с [ОГ ДВС](#) на настоящий момент времени не существует.

Обобщенный критерий оптимальности можно вычислить, основываясь на весовых коэффициентах, полученных на основе норм предельно допустимых концентраций ([ПДК](#)). [ПДК](#) токсичных компонентов в воздухе рабочей зоны определяются Государственным Стандартом РФ. ГОСТ дает определение [ПДК](#) вредных веществ в воздухе рабочей зоны как таких концентраций, которые при ежедневной работе в течение 8 часов или другой продолжительности, но не более 41 часа в неделю, в течение всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований, в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяются в соответствии с ГОСТ на 4 класса:

- 1 – чрезвычайно опасные;
- 2 – высокоопасные;
- 3 – умеренно опасные;
- 4 – малоопасные.

В табл. 18.1 приведены [ПДК](#) вредных веществ наиболее часто встречающихся в [ОГ ДВС](#) и при работе на альтернативных топливах, получаемых из возобновляемых источников.

Таблица 18.1

Предельно допустимые концентрации некоторых токсичных компонентов

Наименование	Химическая формула	Класс	П Д К	
			мг/м ³	ppm
Азота оксиды (в пересчете на NO ₂)	NO _x	2	5	2,6
Акролеин	C ₃ H ₄ O	2	0,2	0,0

				9
Аммиак	NH ₃	4	20	28
Сернистый ангидрид	SO ₂	3	10	3,8
Сероводород	H ₂ S	2	10	7,1
Оксид углерода	CO	4	20	17
Углеводороды алифатические C ₁ -C ₁₀ (в пересчете на углерод)	C _n H _{2n+2}	4	300	–
Формальдегид	CH ₂ O	2	0,5	0,4

Суть метода определения весовых коэффициентов сводится к тому, что чем большую опасность представляет химический компонент здоровью человека (ниже его ПДК), тем больше его весовой коэффициент в обобщенном критерии оптимальности

$$J_0 = \sum_{i=1}^k a_i J_i = \sum_{i=1}^k \frac{J_i}{[\text{ПДК}]_i}, \quad (18.7)$$

где, в качестве частных критериев оптимальности J_i выступают концентрации основных токсичных компонентов, содержащихся в ОГ.

Однако хотя предложенная методика и основана на минимизации негативного эффекта от воздействия ОГ ДВС на организм человека, существует некоторое рассогласование между нормами ПДК и нормами вредных выбросов ДВС. Действительно, несмотря на то, что разработчики документов, нормирующих уровни эмиссии вредных веществ с ОГ двигателей внутреннего сгорания, базируются на данных о биологическом воздействии вредных компонентов на окружающую среду и человека, оценки этого воздействия несколько различны. В качестве примера в табл. 18.2 приведены данные по ряду нормативных документов на удельные выбросы оксидов азота и углерода. Там же для сравнения приведены ПДК для этих веществ. Видно, что соотношение между уровнями допустимых удельных выбросов по NO_x и CO колеблется в очень широких пределах.

Следовательно, ориентируясь по ПДК на соотношение между оксидами азота и углерода 0,25, можно ошибиться в выборе приоритетов в 7 раз, если оптимизации подвергается двигатель, ориентированный для эксплуатации в регионах, где действуют Правила № 49 (Euro 2).

Таблица 18.2

Предельно допустимые нормы токсичности по NO_x и CO

Методика	Метод	Единица измерения	Норма NO _x	Норма CO	Отношение NO _x /CO
	a		ма	ма	ие

	ния				
ПДК (ГОСТ 12.1.005-86)	мг/м ³	5	20	0,25	
ГОСТ 17.2.2.01-84	г/кВт·ч	5	18,3	9,5	1,93
ECE №49.00 (1982)	г/кВт·ч	18,0	14,0	1,29	
ECE №49.02 (1996)	г/кВт·ч	7,0	4,0	1,75	
Станда рт США с 1994 г.	г/кВт·ч	5,4	20,8	0,26	
Экологи ч. тран-т РФ, 2000 г.	г/кВт·ч	5,0	4,9	1,02	

Как было сказано ранее, наибольшую сложность при данном методе оптимизации представляет выбор весовых коэффициентов, определяемый значимостью того или иного частного критерия. В обсуждаемой методике значимость частных критериев, характеризующих токсичность, определяется по соответствию исследуемого дизеля действующим нормам на токсичность. Для реализации такого принципа выбора весовых коэффициентов предлагается весовой коэффициент по расходу топлива принять равным единице, а весовые коэффициенты по оксидам азота, оксиду углерода и несгоревшим углеводородам определять в виде отношений действительной эмиссии токсичных компонентов [ОГ](#) к предельным величинам эмиссии, определяемым нормами на токсичность, т.е.

$$a_{NOx} = e_{NOx} / e_{NOx \text{ пр}}$$

$$a_{CO} = e_{CO} / e_{CO \text{ пр}}$$

$$a_{CnHm} = e_{CnHm} / e_{CnHm \text{ пр}} \quad (18.8)$$

При точном соответствии дизеля нормам на токсичность [ОГ](#) (при равенствах $e_{NOx} = e_{NOx \text{ пр}}$, $e_{CO} = e_{CO \text{ пр}}$, $e_{CnHm} = e_{CnHm \text{ пр}}$) весовые коэффициенты a_{NOx} , a_{CO} , a_{CnHm} также равны единице, и частные критерии J_{Gt} , J_{NOx} , J_{CO} , J_{CnHm} становятся равнозначными.

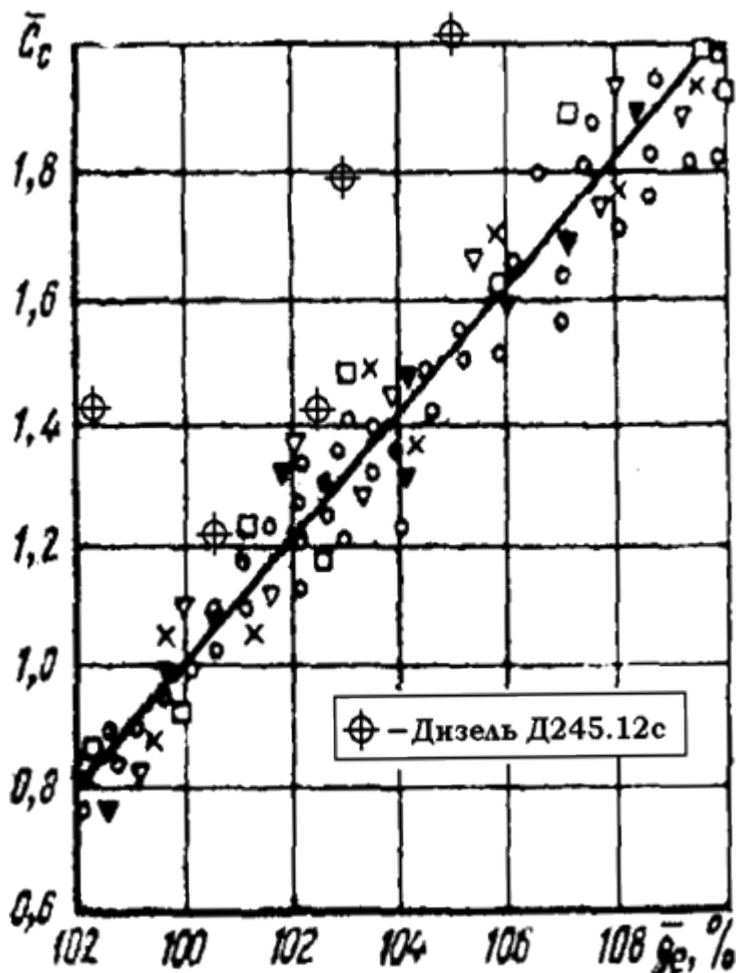


Рис. 18.1. Обобщенная зависимость концентрации в ОГ сажи от удельного эффективного расхода топлива для девяти типов отечественных дизелей

Оптимизация значений в рассматриваемой методике производится без учета содержания сажи в ОГ, потому, что при большинстве мероприятий по воздействию на рабочий процесс, дымность и расход топлива взаимосвязаны, и эмиссия сажи с ОГ может быть косвенно учтена через топливную экономичность.

На графике, приведенном на рис. 18.1, видна тесная корреляционная зависимость между расходом топлива и сажесодержанием в ОГ при изменении угла опережения впрыскивания топлива. Однако если такой взаимосвязи нет, то выбросы сажи надо рассматривать как отдельный токсичный компонент ОГ дизеля.

Вопросы для самопроверки

1. Современные тенденции ресурсосбережения и топливно-энергетической безопасности

1. Относится ли нефть к возобновляемым источникам энергии?
2. Относится ли природный газ к возобновляемым источникам энергии?
3. Какие виды топлив можно отнести к местным?
4. Входит ли в понятие энергоэффективности требования по развитию возобновляемых источников энергии?
5. Содержат ли предложения по повышению энергоэффективности повышение экологических требований к автомобильному транспорту?

2. Обоснование необходимости применения альтернативных топлив в энергетике

1. Является ли природный газ альтернативным моторным топливом?
2. Что подразумевается под круговоротом углерода в природе?
3. В чем причина «парникового» эффекта относительно Земли?
4. Может ли применение топлив, получаемых из возобновляемых источников снизить «парниковый» эффект Земли?
5. В чем заключается антропогенное действие «парниковых» газов?

3. Современное состояние и потенциальные возможности развития биоэнергетики в России

1. Каков прогнозируемый к 2040 году вклад биомассы в мировой энергетический баланс?
2. Что такое пеллеты?
3. Могут ли твердые бытовые отходы служить источником энергии?
4. Что является основным источником этанола?
5. Как можно получить биогаз?

4. физико-химические характеристики топлив, получаемых из возобновляемых источников

1. Может ли этанол использоваться в ДВС и каковы особенности его применения?
2. Может ли метанол использоваться в ДВС и каковы особенности его применения?
3. Могут ли эфиры служить топливом для ДВС, и каковы особенности их применения?
4. Можно ли использовать масличные культуры для производства моторного топлива?

5. Каковы преимущества топлив из возобновляемых источников с точки зрения экологии?

5. ПРОИЗВОДСТВО моторных топлив ПУТЕМ ГАЗОФИКАЦИИ

1. Что понимается под процессом газификации?
2. Какие источники могут быть использованы для процесса газификации?
3. Как устроен и работает газогенератор?
4. В чем различие между «воздушным» и «водяным» газогенераторными газами?
5. Положительный или отрицательный эффект от диссоциации при газификации?

6. Производство биоводорода с помощью МИКРООРГАНИЗМОВ

1. Имеются ли реальные перспективы получения водорода с помощью микроорганизмов?
2. Откуда берется энергия при производстве водорода с помощью микроорганизмов?
3. Можно ли получать водород с помощью фотосинтеза?
4. Можно ли получать водород брожением органической массы?
5. Расскажите о технологическом оборудовании для производства водорода с помощью бактерий и макроорганизмов.

7. Анализ эффективности применения в дизелях топлив из возобновляемых источников с учетом полного жизненного цикла

1. Что имеется в виду под «полным жизненным циклом» применения топлив из возобновляемых источников?
2. Учитываются ли экологические аспекты в «полном жизненном цикле»?
3. Учитываются ли затраты энергии при производстве топлива в «полном жизненном цикле»?
4. Связано ли с увеличением затрат энергии в «полном жизненном цикле» производство биодизельного топлива по сравнению с дизельным топливом?

8. оценка влияния физических показателей альтернативных топлив на характеристики впрыскивания и распыливания

1. Зависит ли, и если да, то как, от вязкости альтернативного топлива дальнобойность топливного факела?
2. Влияет ли, и если да, то как, поверхностное натяжение альтернативного топлива на мелкость распыливания топлива форсункой?

3. Зависит ли, и если да, то как, угол раскрытия топливного факела от плотности альтернативного топлива?

4. Зависит ли, и если да, то как, глубина проникновения топливного факела от плотности альтернативного топлива?

5. Как зависит время достижения факелом альтернативного топлива стенки камеры сгорания от характеристик альтернативного топлива?

9. Особенности протекания процесса смесеобразования и сгорания альтернативного топлива в дизеле

1. Чем характеризуется скорость кинетической и диффузионной стадий сгорания в дизеле?

2. Опишите конструкцию и принцип действия оптического датчика воспламенения.

3. Как изменяется период задержки воспламенения в зависимости от степени сжатия?

4. Как изменяется период задержки воспламенения в зависимости от угла опережения впрыскивания топлива?

5. Период задержки воспламенения больше у рапсового масла или дизельного топлива (при одинаковых условиях)?

10. ПРОБЛЕМЫ ВЫБРОСОВ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ДИЗЕЛЕ

1. Каковы ориентировочные концентрационные пределы горения (локальные коэффициенты избытка воздуха) квазигомогенных смесей в условиях дизеля?

2. Сажа в дизеле в камере сгорания образуется и выгорает или только образуется?

3. При подаче определенного количества топлива на впуск приводит к снижению выбросов сажи или к увеличению дымности отработавших газов?

4. Увеличивается или уменьшается количество продуктов неполного сгорания в отработавших газах дизеля при подаче части топлива на впуск?

5. В чем физико-химическая суть кинетической и диффузионной стадий сгорания в дизеле?

11. Методы адаптации дизелей для работы на топливах, получаемых на основе растительных масел

1. Существуют ли особенности конструкции дизелей работающих на чистом растительном масле?

2. Существенны ли различия в конструкции дизелей, работающих на стандартном дизельном топливе и метил эфире рапсового масла?

3. Какой метод улучшения показателей дизеля при работе на рапсовом масле вы можете предложить?

4. Увеличивается или уменьшается шумность работы дизеля при переводе на рапсовое масло, почему?

5. Какое топливо более склонно к коксованию: дизельное или рапсовое масло?

12. Работа дизеля на спиртовых топливах, получаемых из возобновляемых источников

1. Отличаются ли характеристики распыливания спиртовых топлив от стандартного дизельного, и если да, то как?

2. Расскажите как организован рабочий процесс с отдельной топливной аппаратурой для подачи спиртовых топлив в дизель.

3. Как организован процесс работы дизеля на эмульсиях дизельного топлива и метанола и каковы его характеристики?

4. Возможно ли применение диметил эфира для воспламенения метанола воздушной смеси в дизеле?

5. Преимущества и недостатки подачи метанола на впуск дизеля?

13. Применение в дизелях топлив на основе эфиров, получаемых из возобновляемых источников

1. Опишите особенности организации работы на смешанных топливах содержащих эфиры.

2. Опишите изменение показателей токсичности при работе дизеля на смешанных топливах по сравнению с его работой на чистом дизельном топливе.

3. Чем объясняется изменение дымности отработавших газов при работе дизеля на смешанных топливах содержащих эфиры?

4. Опишите особенности работы дизеля на диметил эфире.

5. Каковы особенности работы дизеля на метиловом эфире рапсового масла?

14. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ДИЗЕЛЯХ

1. Существенно ли изменится номинальная мощность дизеля при работе на смесях дизельного топлива с подсолнечным и арахисовым маслами?

2. Дизельное топливо или растительные масла более склонны к нагароотложению?

3. Вязкость дизельного топлива выше вязкости растительных масел?

4. Каковы пути снижения вязкости моторных топлив на основе рапсового и других растительных масел?

15. РАБОТА ДВИГАТЕЛЯ НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ

1. Как изменяется теплота сгорания газо-воздушной горючей смеси по сравнению с бензо-воздушной или дизельное топливо воздушной?

2. Как изменяется термический КПД газовых двигателей по сравнению с двигателями с воспламенением от сжатия?

3. Как меняется коэффициент молекулярного изменения газовых двигателей по сравнению с двигателями жидкого топлива?

4. Изменяется ли коэффициент наполнения двигателя при переводе с жидкого топлива на газ?

5. Сравните скорость сгорания газо-воздушной смеси по сравнению с горючей смесью из жидкого топлива и воздуха.

16. Перспективный рабочий процесс ДВС с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия при работе на топливах, получаемых из возобновляемых источников

1. КПД НСЦИ процесса выше или ниже, чем у двигателя с искровым зажиганием, почему?

2. Сравните выбросы сажи у дизеля и НСЦИ двигателя, есть разница, если да, то почему?

3. Сравните эмиссию оксидов азота у ДВС с традиционным рабочим процессом и НСЦИ двигателя, есть разница, если да, то почему?

4. Для чего применять в НСЦИ двигателе смесевые топлива?

5. В каком из ДВС наименьшая продолжительность сгорания: двигатель с самовоспламенением впрыскиваемого в камеру сгорания топлива, двигатель с гомогенным зарядом и принудительным зажиганием, двигатель с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия?

17. Методика обработки ездового цикла для получения распределения режимов работы дизеля при оценке эффективности применения альтернативных топлив

1. Для чего были созданы «ездовые циклы»?

2. Правильно ли утверждение, что транспортный дизель подавляющее время эксплуатации работает на режимах внешней скоростной характеристики, почему?

3. Какие типы сопротивления движению испытывает транспортное средство?

4. Зона наивысшего эффективного КПД у транспортного дизеля находится в области номинальной мощности, максимального крутящего момента или другой нагрузочно - скоростной области, почему?

5. Как, имея данные стендовых испытаний дизеля, проведенных на различных видах топлива, которые сопоставить расчетными методами их показатели для реальных условий эксплуатации транспортного средства?

18. Методика приведения оценочных показателей к единому параметру

1. Что такое метод свертки применительно к показателям токсичности двигателя?

2. Как вычислить обобщенный критерий оптимальности, основываясь на весовых коэффициентах, полученных на основе норм предельно допустимых концентраций?

3. Можно ли оценить эмиссию сажи, основываясь на удельном расходе топлива (для дизельного топлива, альтернативных топлив)?

4. Применение альтернативных топлив, получаемых из возобновляемых источников снимает проблему токсичности отработавших газов дизелей?

5. Оценивается ли при подсчете обобщенного критерия токсичности индивидуальная «вредность» каждого из нормируемых токсичных веществ?

Перечень вопросов итоговой аттестации

1. В каком из ДВС наименьшая продолжительность сгорания: двигатель с самовоспламенением впрыскиваемого в камеру сгорания топлива, двигатель с гомогенным зарядом и принудительным зажиганием, двигатель с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия?
2. В чем причина «парникового» эффекта Земли, каковы его последствия; в чем заключается антропогенное действие «парниковых» газов?
3. В чем различие между «воздушным», «водяным» и «смешанным» газогенераторными газами, получение и их характеристики?
4. В чем физико-химическая суть кинетической и диффузионной стадий сгорания альтернативного топлива в дизеле?
5. Влияет ли, и если да, то как, поверхностное натяжение альтернативного топлива на мелкость распыливания топлива форсункой?
6. Возможно ли применение диметил эфира для воспламенения метанола воздушной смеси в дизеле, для чего это надо и как это происходит?
7. Входит ли в понятие энергоэффективности требования по развитию возобновляемых источников энергии, повышение экологических требований к автомобильному транспорту, в чем они заключаются?
8. Дизельное топливо или растительные масла более склонны к нагароотложению, почему?
9. Для чего были созданы «ездовые циклы», какие типы сопротивления движению испытывает транспортное средство?
10. Для чего применять в НСЦИ двигателе смесевые топлива?
11. Зависит ли, и если да, то как, глубина проникновения топливного факела от плотности альтернативного топлива?
12. Зависит ли, и если да, то как, от вязкости альтернативного топлива дальнобойность топливного факела?
13. Зависит ли, и если да, то как, угол раскрытия топливного факела от плотности альтернативного топлива?
14. Изменяется ли коэффициент наполнения двигателя при переводе с жидкого топлива на газ?
15. Имеются ли реальные перспективы получения водорода с помощью микроорганизмов и откуда берется энергия при производстве водорода с помощью микроорганизмов?
16. Как вычислить обобщенный критерий оптимальности, основываясь на весовых коэффициентах, полученных на основе норм предельно допустимых концентраций вредных веществ?
17. Как зависит время достижения факелом альтернативного топлива стенки камеры сгорания от характеристик альтернативного топлива?
18. Как изменяется период задержки воспламенения альтернативных топлив в зависимости от степени сжатия и угла опережения впрыскивания топлива, почему?

19. Как изменяется теплота сгорания газо-воздушной горючей смеси по сравнению с бензо-воздушной или дизельное топливо воздушной?
20. Как изменяется термический КПД газовых двигателей по сравнению с двигателями с воспламенением от сжатия?
21. Как изменяются показатели рабочего процесса (скорость нарастания давления, период задержки воспламенения, КПД, токсичность, шумность и т.п.) дизеля при переводе на рапсовое масло, почему?
22. Как меняется коэффициент молекулярного изменения газовых двигателей по сравнению с двигателями жидкого топлива?
23. Как организован процесс работы дизеля на эмульсиях дизельного топлива и метанола и каковы его характеристики?
24. Как получают Биогаз, его характеристики, возможность применения как моторного топлива?
25. Как твердые бытовые отходы служить источником энергии, и как это может быть реализовано технологически?
26. Как устроен и работает транспортный газогенератор и каков эффект от диссоциации при газификации?
27. Как, имея данные стендовых испытаний дизеля, проведенных на различных видах топлива, которые сопоставить расчетными методами их показатели для реальных условий эксплуатации транспортного средства?
28. Какие виды топлив можно отнести к местным их преимущества и недостатки?
29. Какие методы улучшения показателей дизеля при работе на рапсовом масле вы можете предложить?
30. Каковы ориентировочные концентрационные пределы горения (локальные коэффициенты избытка воздуха) квазигомогенных смесей в условиях дизеля, как происходит сгорание в первой стадии?
31. Каковы особенности работы дизеля на метиловом эфире рапсового масла?
32. Каковы перспективы развития альтернативной энергетики и прогнозируемый к 2040 году вклад биомассы в мировой энергетический баланс?
33. Каковы преимущества топлив из возобновляемых источников с точки зрения экологии?
34. Каковы пути снижения вязкости моторных топлив на основе рапсового и других растительных масел?
35. Какое топливо более склонно к коксованию: дизельное или рапсовое масло, почему?
36. КПД НСЦИ процесса выше или ниже, чем у двигателя с искровым зажиганием, почему?
37. Могут ли эфиры служить топливом для ДВС, и каковы особенности их применения?
38. Может ли метанол использоваться в ДВС и каковы особенности его применения?
39. Может ли применение топлив, получаемых из возобновляемых источников снизить «парниковый» эффект Земли и если да, то за счет чего?
40. Может ли этанол использоваться в ДВС и каковы особенности его применения?
41. Можно ли использовать масленичные культуры для производства моторного топлива, каковы технологии получения моторного топлива?
42. Можно ли оценить эмиссию сажи, основываясь на удельном расходе топлива (для дизельного топлива, альтернативных топлив), как?
43. Можно ли получать водород с помощью фотосинтеза и какое должно быть технологическое оборудование для производства водорода?
44. Объясните феноменологический механизм образования сажи в камере сгорания дизеля?
45. Опишите изменение показателей токсичности при работе дизеля на смесевых топливах по сравнению с его работой на чистом дизельном топливе.
46. Опишите особенности организации работы на смесевых топливах содержащих эфиры.
47. Опишите особенности работы дизеля на диметил эфире.
48. Опишите преимущества и недостатки подачи метанола на впуск дизеля?

49. Опишите экспериментальную установку для исследования воспламеняемости альтернативных топлив и принцип ее действия.
50. Отличаются ли характеристики распыливания спиртовых топлив от стандартного дизельного, и если да, то как?
51. Относится ли нефть, уголь, торф, дрова и природный газ к возобновляемым источникам энергии?
52. Период задержки воспламенения больше у рапсового масла по сравнению с дизельным топливом (при одинаковых условиях), почему?
53. Подробно объясните, чем объясняется изменение дымности отработавших газов при работе дизеля на смесевых топливах содержащих эфиры?
54. Правильно ли утверждение, что транспортный дизель подавляющее время эксплуатации работает на режимах внешней скоростной характеристики, почему?
55. Применение альтернативных топлив, получаемых из возобновляемых источников снимает проблему токсичности отработавших газов дизелей?
56. Расскажите как организован рабочий процесс с отдельной топливной аппаратурой для подачи спиртовых топлив в дизель.
57. Расскажите, как влияет на показатели токсичности подача альтернативного топлива на впуск дизеля?
58. Связано ли с увеличением затрат энергии в «полном жизненном цикле» производство биодизельного топлива по сравнению с дизельным топливом, как оценить?
59. Сравните выбросы сажи у дизеля и HCCI двигателя, есть разница, если да, то почему?
60. Сравните скорость сгорания газо-воздушной смеси по сравнению с горючей смесью из жидкого топлива и воздуха.
61. Сравните эмиссию оксидов азота у ДВС с традиционным рабочим процессом и HCCI двигателя, есть разница, если да, то почему?
62. Существенно ли изменится номинальная мощность дизеля при работе на смесях дизельного топлива с подсолнечным и арахисовым маслами?
63. Существенны ли различия в конструкции дизелей, работающих на стандартном дизельном топливе и метил эфире рапсового масла, какие?
64. Существуют ли особенности конструкции дизелей работающих на чистом растительном масле, какие?
65. Учитываются ли экологические аспекты и затраты энергии в «полном жизненном цикле»?
66. Чем характеризуется скорость кинетической и диффузионной стадий сгорания в дизеле, опишите подробно эти стадии?
67. Что имеется в виду под «полным жизненным циклом» применения топлив из возобновляемых источников?
68. Что подразумевается под круговоротом углерода в природе?
69. Что понимается под процессом газификации и какие источники могут быть использованы для процесса газификации?
70. Что такое пеллеты, технология получения и применения?
71. Что является основным источником этанола и технологии его получения?

Описание заданий и примеры выполнения по практическим работам по курсу

«Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников»

Опыт применения газообразных топлив в ДВС столь же продолжителен, как и сама история развития двигателей внутреннего сгорания, а силу того, что первые поршневые двигатели работали именно на газообразном топливе, так называемом, светильном газе. Совершенствование конструкции систем питания поршневых двигателей, развитие технологии промышленного производства жидких нефтяных моторных топлив, удобство их транспортировки, заправки и хранения на транспортном средстве, послужили причиной, на достаточно длительный период, почти повсеместного применения в качестве моторного именно жидкого углеводородного топлива.

Следует отметить, что в нашей стране в период великой отечественной войны и после нее, получили достаточно широкое распространение газогенераторные автомобили и тракторы, что объясняется острым дефицитом жидких топлив для ДВС, связанным с выводом из строя значительной части нефтеперерабатывающих предприятий в военное время.

В настоящее время перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо в основном связан с экономическими факторами - ростом стоимости традиционных жидких моторных топлив и экологическими причинами - стремлением снизить негативное воздействие отработавших газов ДВС на окружающую среду.

В большинстве случаев в качестве газового альтернативного топлива используется сжатый природный (СПГ) и сжиженный нефтяной (ГСН) газы. Их состав достаточно стабилен и, в согласно ГОСТ, находится в пределах, в соответствии с табл. 1 и 2. Природный газ почти целиком состоит из метана, сжиженный — из пропана, бутана и незначительных количеств углеводородов с более высокой молекулярной массой. В этих газах негорючие вещества и кислород содержатся в малых количествах, чем объясняется их высокая удельная теплота сгорания.

Таблица 1

Состав сжатых (компримированных) газообразных топлив для газобаллонных автомобилей в соответствии с ГОСТ 27577—87, ТУ 51—16.6—83 марки А (Б)

Показатель	Значение
Компонентный объемный состав, %: метан CH_4	95±5 (90±5)
этан C_2H_6 , не более	4,0
пропан C_3H_8 , не более	1,5
бутан C_4H_{10} , не более	1,0
пентан C_5H_{12} , не более	0,3
диоксид углерода CO_2 , не более	1,0
кислород O_2 , не более	1,0
азот N_2 , не более	0...4 (4...7)
Объемная теплота сгорания, МДж/м ³	33,9 (33,7)

Таблица 2

Состав сжиженных газообразных топлив для автомобилей в соответствии с ГОСТ 20448—80, ГОСТ 27578—87 марки СПБТЗ (СПБТЛ) [БТ]

Показатель	Значение
Компонентный объемный состав, %	4,0 (6,0) [6,0]

не более	сумма метана CH_4 , этана C_2H_6 и этилена C_2H_4 ,	
	сумма пропана C_3H_8 и пропилена C_3H_6	75,0 (34,0)
не менее		[34,0]
не более		20,0 (60,0)
	сумма бутана C_4H_{10} и бутилена C_4H_8	[60,0]
не менее		
не более		

Однако газообразные топлива такого вида не могут быть признаны альтернативными на длительную перспективу. Их ресурсы — ограничены, а использование, не снимает проблему при их сжигании роста содержания диоксида углерода в атмосфере и связанного с ним парникового эффекта — причины глобального потепления на Земле.

Действительной альтернативой моторным топливам, получаемым из ископаемых источников, служат, топлива — продукты переработки возобновляемой органической растительной массы, при формировании которой за счет энергии солнца, происходит поглощение углекислого газа из атмосферы.

К таким газообразным топливам можно отнести: биоводород, биогаз — продукт биологических процессов, происходящих в биомассе и горючий газ, получаемый термической газификацией твердой возобновляемой органики. В этом случае состав газообразных топлив может колебаться в достаточно широких пределах, в зависимости от способа их получения и состава исходных веществ. В табл. 3 приводится состав некоторых искусственных горючих газов, получаемых из твердой органики. Как видно из таблицы 3 основными горючими компонентами газов являются: метан, оксид углерода и водород. Они также содержат негорючие компоненты: азот и диоксид углерода. Особенностью этих топлив является присутствие в их составе в связанном виде кислорода.

Таблица 3

Состав различных горючих газов [1, 2, 3]

Процесс аппарат	Состав газа, % (об.)				
	CO	H ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂
"Lurgi"*	20	39	30	10	-
"Winkler" **	30.. .50	35... 46	13.. .25	1... 2	-
"Koppers" -Totzek"*	55.. .66	21... 32	7... 12	0,1	-
"Texaco" *	55	33	11	0,1	-
"Siemens" ***	8... 9	4...6 ..6	3,5. 19	8... 5	50...5
"NASA"*	23, 6	21,6	1,2	н/д	51,2
НАТИ- АГ**	30.. .33	11... 15	2... 4	1,5. ..2	остал ьн.
ЦНИИАТ	24.. ..	8...1 ..	3... ..	0,5. ..	остал ..

-АГ2**	.30	5	6	..3	ьн.
Биогаз	-	до 0	20..	30..	менее
	,15	.55	.70	1	

*) — паро-кислородное дутьё; **) — мобильный газогенератор

Несмотря на то, что особенности горения простейших веществ: водорода, метана и оксида углерода изучены достаточно хорошо, представляет определенный интерес анализ сгорания их гомогенных смесей в условиях ДВС. Кажется достаточно естественным, что, присутствие балласта (негорючих компонентов в топливе) должно негативно сказаться на эффективности его применения в ДВС, однако количественные соотношения могут быть получены только путем теплотехнических расчетов.

Для создания модели двигателя внутреннего сгорания использована программа синтеза индикаторных диаграмм на основе пошагового решения уравнения баланса энергии, выделившейся при сгорании топлива и пошедшей на совершение работы, изменение внутренней энергии рабочего тела и теряемой в стенки. Закономерность выгорания топлива для различных топлив при их сжигании принята неизменной (близкой к синусоидальному закону скорости выгорания), что с достаточной для практики точностью соответствует действительной динамике выгорания гомогенных смесей в КС ДВС. К особенностям топлива с точки зрения эффективности применения его в поршневых двигателях с искровым зажиганием следует отнести:

1. турбулентную скорость распространения пламени в смеси с заданным топливно-воздушным соотношением;
2. удельную теплоту сгорания топлива;
3. количество воздуха, теоретически необходимого для сгорания 1 кг топлива;
4. концентрационные пределы горения воздушно топливной смеси;
5. склонность топлива к детонационному сгоранию в условиях ДВС.

В данной работе рассматриваются первые три пункта перечня, т. к. именно эти свойства, в основном, определяют теплофизические свойства альтернативных топлив, а не конкретные условия его применения в реальных конструкциях двигателей. Подразумевается горение нерасслоенных гомогенных топливо воздушных смесей.

Турбулентная скорость горения может быть вычислена по выражению [4]

$$v_T = \left(\frac{T_{ад}}{T_0} - 1 \right)^{0,75} w'^{0,75} v_H^{0,25},$$

где w' — средняя пульсационная скорость (м/с), характеризующая интенсивность турбулизации заряда (при неизменной конфигурации впускного тракта в первом приближении может быть принятой пропорциональной частоте вращения коленчатого вала двигателя);

v_H — ламинарная (нормальная) скорость распространения фронта пламени (м/с), являющейся характеристикой тепло-физических свойств смеси, которая может быть найдена, как аддитивная функция по табличным значениям нормальных скоростей горения индивидуальных веществ в воздухе (v_{Hi}), с учетом их объемных долей (H_2 , CH_4 , CO) в смеси и снижения скорости из-за наличия балласта [5] ($CO_2^{топ}$ и $N_2^{топ}$ объемные доли диоксида углерода и азота) в топливе

$$v_H = \frac{v_H^{H_2} \cdot H_2 + v_H^{CH_4} \cdot CH_4 + v_H^{CO} \cdot CO}{H_2 + CH_4 + CO} \cdot \left(1 - N_2^{топ} + 1,67 \cdot CO_2^{топ} \right)$$

T_0 — температура несгоревшей части смеси (К), определяемая при быстром сгорании топлива вблизи ВМТ, как температура политропического сжатия (степень сжатия ϵ) с показателем политропы n_1 свежего заряда с начальной температурой T_a :

$$T_0 = T_a \cdot \epsilon^{n_1 - 1}.$$

$T_{ад}$ — адиабатическая температура горения смеси (К), которая может быть вычислена из условия:

$$g_{т.ц.} \cdot H_U = U_{ад}(T_{ад}) - U_0.$$

Уравнение решается методом последовательных приближений, так как внутренняя энергия рабочего тела зависит от конечной температуры горения $T_{ад}$. Внутренняя энергия смеси при начальной температуре (кДж), равна

$$U_0 = u_T^{T_0} \cdot m_T + u_B^{T_0} \cdot m_B + u_{пс}^{T_0} \cdot m_{пс},$$

где $u_T, u_B, u_{пс}$ — удельная внутренняя энергия газообразного топлива при температуре T_0 , воздуха и продуктов сгорания (кДж/кг), соответственно;

$m_T, m_B, m_{пс}$ — масса (кг) газообразного топлива, воздуха и продуктов сгорания, соответственно, в начале процесса сгорания (доля выгоревшего топлива $x = 0$).

Внутренняя энергия смеси при адиабатической температуре горения (кДж), вычисляется аналогично, с учетом того, что доля выгоревшего топлива $x = 1$:

$$U_{ад} = u_T^{T_{ад}} \cdot m_T + u_B^{T_{ад}} \cdot m_B + u_{пс}^{T_{ад}} \cdot m_{пс}$$

Теплоемкость определяется, как

$$c_v = \frac{U_{ад} - U_0}{T_{ад} - T_0}$$

Удельная массовая внутренняя энергия газообразного топлива определяется для смеси газов с учетом их объемной доли ($H_2, CH_4, CO, CO_2^{топ}$ и $N_2^{топ}$), молекулярной массы m_i (кмоль/кг) и аппроксимирующих зависимостей для удельной мольной внутренней энергии u_i (кДж/кмоль), за исключением метана, для которого используется аппроксимация истинной изохорной массовой теплоемкости газообразного метана c_{vCH_4} [6] в интервале температур 300...1000К

$$u_T^T = CH_4 \cdot c_{vCH_4} \cdot T + H_2 \cdot \frac{u_{H_2}(T)}{\mu_{H_2}} + CO_2^{топ} \cdot \frac{u_{CO_2}(T)}{\mu_{CO_2}} + CO \cdot \frac{u_{CO}(T)}{\mu_{CO}} + N_2^{топ} \cdot \frac{u_{N_2}(T)}{\mu_{N_2}}$$

где

$$c_{vCH_4} = 1,40 - 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot T + 9,25 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 5,68 \cdot 10^{-8} \cdot T^3;$$

$$u_{H_2} = 0,001747 \cdot (T - 273)^2 + 19,69 \cdot (T - 273) + 59,45;$$

$$u_{CO_2} = 0,003848 \cdot (T - 273)^2 + 38,75 \cdot (T - 273) - 1320,8;$$

$$u_{CO} = 0,001704 \cdot (T - 273)^2 + 22,08 \cdot (T - 273) - 320,9;$$

$$u_{N_2} = 0,001725 \cdot (T - 273)^2 + 21,48 \cdot (T - 273) - 200,7.$$

Внутренняя энергия воздуха (кДж/кг) может быть вычислена по выражению

$$u_B = [0,001739 \cdot (T - 273)^2 + 21,93 \cdot (T - 273) - 289,1] / \mu_B,$$

где $\mu_B = 28,97$ кг/кмоль — кажущаяся молекулярная масса воздуха.

Внутренняя энергия продуктов сгорания смеси стехиометрического состава (кДж/кг), вычисляется с учетом объемных долей (H_2O , CO_2 , N_2), содержащихся в продуктах сгорания паров воды, диоксида углерода и азота

$$u_{\text{пс}}^T = H_2O \cdot \frac{u_{H_2O}(T)}{\mu_{H_2O}} + CO_2 \cdot \frac{u_{CO_2}(T)}{\mu_{CO_2}} + N_2 \cdot \frac{u_{N_2}(T)}{\mu_{N_2}},$$

где удельная мольная внутренняя энергия паров воды вычисляется по аппроксимирующей зависимости

$$u_{H_2O} = [0,005093 \cdot (T - 273)^2 + 25,41 \cdot (T - 273) - 289,7] / \mu_{H_2O},$$

где $\mu_{H_2O} = 18$ кг/кмоль — молекулярная масса воды.

Текущие массы топлива, воздуха и продуктов сгорания вычисляются по следующим зависимостям

$$m_T = g_{\text{т.ц.}} \cdot (1 - x);$$

$$m_B = g_{\text{т.ц.}} \cdot [l_0 \cdot (\alpha - x) + \gamma \cdot l_0 \cdot (\alpha - 1)];$$

$$m_{\text{пс}} = g_{\text{т.ц.}} \cdot [x \cdot (l_0 + 1) + \gamma \cdot (l_0 + 1)],$$

где α — коэффициент избытка воздуха;

$g_{\text{т.ц.}}$ — цикловая подача топлива (кг), вычисляемая с учетом рабочего объема цилиндра V_h (m^3), коэффициента наполнения η_v , параметров рабочего тела на момент начала сжатия p_a (кПа) и T_a (к), низшей теплоты сгорания топлива H_U (кДж/кг) и объемной теплоты сгорания топлива воздушной смеси $Q_{U \text{ см}}$ (кДж/ m^3), как

$$g_{\text{т.ц.}} = Q_{U \text{ см}} \cdot \frac{p_a}{101,3} \cdot \frac{273}{T_a} \cdot \frac{V_h \eta_v}{H_U}.$$

Газовая постоянная газообразного топлива вычисляется с учетом газовых постоянных составляющих его компонентов: $R_{CO} = 0,2968$ кДж/(кг×К), $R_{H_2} = 4,1245$ кДж/(кг×К), $R_{CH_4} = 0,5181$ кДж/(кг×К), $R_{N_2} = 0,2968$ кДж/(кг×К), $R_{CO_2} = 0,1889$ кДж/(кг×К) и их долей в топливе

$$R_{\text{топ}} = \frac{1}{\frac{CO}{R_{CO}} + \frac{H_2}{R_{H_2}} + \frac{CH_4}{R_{CH_4}} + \frac{CO_2^{\text{топ}}}{R_{CO_2}} + \frac{N_2^{\text{топ}}}{R_{N_2}}}$$

Теоретически необходимый объем воздуха (m^3) для сгорания 1 m^3 газообразного топлива, горючими компонентами которого являются метан, оксид углерода и водород (задаются объемными долями), равен

$$V_0 = \frac{2 \cdot CH_4 + 0,5 \cdot (CO + H_2)}{0,208}.$$

Масса воздуха (кг), теоретически необходимая для сгорания 1 m^3 газообразного топлива при нормальных физических условиях (НФУ, при которых плотность воздуха $\rho_{B0} = 1,293$ кг/ m^3), может быть рассчитана, как

$$m_0 = V_0 \cdot \rho_{в0}.$$

В итоге, масса воздуха (кг), теоретически необходимая для сгорания 1 кг газообразного топлива, равна

$$l_0 = \frac{m_0}{\rho_{топ0}},$$

где плотность топлива $\rho_{топ0}$, с учетом плотностей при НФУ, входящих в топливо: оксида углерода $\rho_{CO0} = 1,250 \text{ кг/м}^3$, водорода $\rho_{H20} = 0,0899 \text{ кг/м}^3$, метана $\rho_{CH40} = 0,717 \text{ кг/м}^3$, диоксида углерода $\rho_{CO20} = 1,977 \text{ кг/м}^3$ и азота $\rho_{N20} = 1,250 \text{ кг/м}^3$, равна

$$\rho_{топ0} = CO \cdot \rho_{CO0} + H_2 \cdot \rho_{H20} + CH_4 \cdot \rho_{CH40} + CO_2^{топ} \cdot \rho_{CO20} + N_2^{топ} \cdot \rho_{N20}.$$

Тепловые эффекты рассматриваемых химических реакций приведены в табл.4.

Таким образом, низшая объемная (кДж/м³) удельная теплота сгорания газообразного топлива с учетом объемных долей, и тепловых эффектов реакций сгорания, содержащихся в топливе горючих компонентов H₂, CO, CH₄, равна

$$Q_u = 10890 \cdot H_2 + 12760 \cdot CO + 36130 \cdot CH_4,$$

Таблица 4

Тепловые эффекты химических реакций горения

Химическая реакция	Окисляемое вещество		Тепловой эффект реакции по окисляемому веществу		
	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Плотность при НФУ ρ , кг/м ³	кДж/кмоль [7]	кДж/кг	кДж/м ³ (НФУ)
CO + 1/2 O ₂ = CO ₂	28	1,25	28580 0	10 210	127 60
H ₂ + 1/2 O ₂ = H ₂ O _{пар}	2	0,0899 9	24220 0	12 1100	108 90
CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O _{пар}	16	0,717	80620 0	50 390	361 30

а с учетом плотности топлива $\rho_{топ0}$, массовая низшая теплота сгорания (кДж/кг) при нормальных физических условиях, составит

$$H_u = \frac{Q_u}{\rho_{топ0}}.$$

Низшая теплота сгорания топливовоздушной смеси (кДж/кг) будет равна

$$H_{u см} = \frac{H_u}{1 + \alpha \cdot l_0}$$

или зная плотность смеси $\rho_{см}$ можно вычислить теплоту сгорания на единицу объема (кДж/м³)

$$Q_{u см} = H_{u см} \cdot \rho_{см}.$$

Для топливо-воздушной смеси газовая постоянная будет равна

$$R_{см} = \sum g_i \cdot R_i = g_{топ} \cdot R_{топ} + g_{воз} \cdot R_{воз},$$

где $R_{\text{воз}} = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ – газовая постоянная воздуха;

$g_{\text{топ}}$ и $g_{\text{воз}}$ — массовые доли топлива и воздуха в смеси определяемые, как

$$g_{\text{топ}} = \frac{1}{\alpha \cdot l_0 + 1}; \quad g_{\text{воз}} = \frac{\alpha \cdot l_0}{\alpha \cdot l_0 + 1}.$$

Объемные доли топлива и воздуха в смеси, равны

$$r_{\text{топ}} = \frac{R_{\text{топ}}}{R_{\text{см}}} \cdot g_{\text{топ}}; \quad r_{\text{воз}} = \frac{R_{\text{воз}}}{R_{\text{см}}} \cdot g_{\text{воз}}.$$

Плотность смеси при НФУ будет равна

$$\rho_{\text{см}} = r_{\text{топ}} \cdot \rho_{\text{топ}0} + r_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}},$$

где $\rho_{\text{воз}} = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха при НФУ.

Зная средний путь, проходимый пламенем от свечи зажигания до стенки камеры сгорания, принятый для исследуемого двигателя $R_{\text{КС}} = 0,046 \text{ м}$, частоту вращения коленчатого вала n и скорость пламени $v_{\text{т}}$, можем рассчитать продолжительность основной фазы сгорания в градусах ПКВ, равную

$$\varphi_{\text{р}} = \frac{6 \cdot n \cdot R_{\text{КС}}}{v_{\text{т}}}.$$

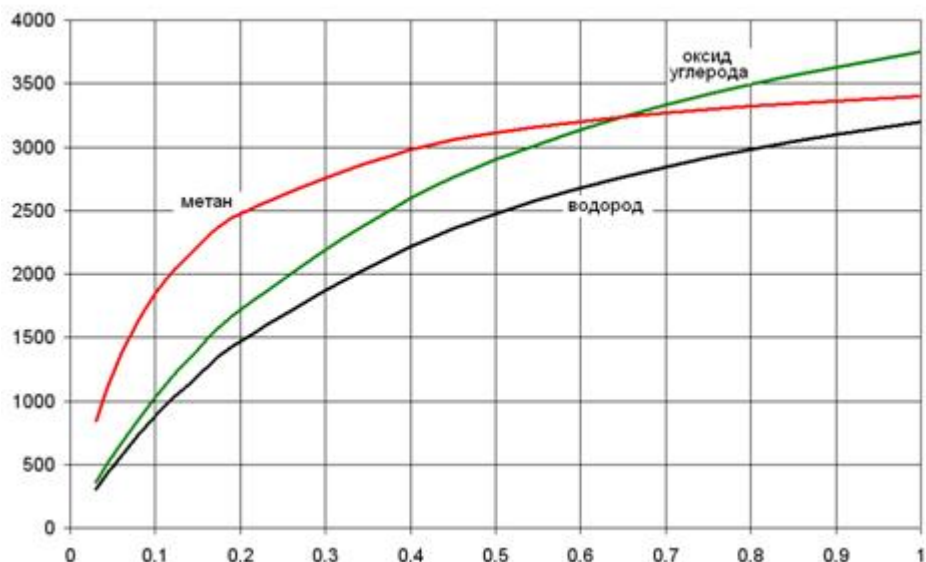
Продолжительность сгорания, выраженная в град. ПКВ влияет на термодинамический КПД цикла и, соответственно, на эффективность сгорания топлива в реальном двигателе.

На рис.1 приведены расчетные графики, показывающие, как влияет на удельное выделение теплоты при сгорании топливо воздушной стехиометрической смеси, содержание в топливе: метана, оксида углерода или водорода (предполагается, что топливо состоит из одного из указанных газов и азота).

Для сравнения, бензо-воздушная смесь стехиометрического состава имеет низшую объемную теплоту сгорания $Q_{\text{и бен}}$, около $3600 \text{ кДж}/\text{м}^3$ при НФУ.

Как видно из приведенных графиков, при 100 %-ном содержании в топливе горючего газа наибольший тепловой эффект, а значит и потенциальную цилиндковую мощность, дает оксид углерода (104 % от бензо-воздушной смеси), меньший метан (95 %) и самый низкий – по сравнению с бензином — водород (89 %). При замещении части горючего газа инертным разбавителем (азотом) метан ведет себя несколько отлично от оксида углерода и водорода. Так, при содержании горючего газа в топливе около 65 % удельный объемный тепловой эффект метана становится равен тепловыделению оксида углерода, а при дальнейшем снижении концентрации горючего компонента в топливе тепловой эффект метана становится больше. Так при 20 %-ном содержании горючего газа в топливе тепловой эффект при использовании метана выше по сравнению с оксидом углерода на 45 % и на 67 % по сравнению с водородом. Однако следует отметить, что при работе на бедных топливах ограничением может стать нижний концентрационный предел горения или недопустимо малая скорость распространения пламени.

Низшая
объемная теплота
сгорания
стехиометрической
топливовоздушной
смеси, кДж/м³



Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄)
в газообразном топливе (остальное — азот)

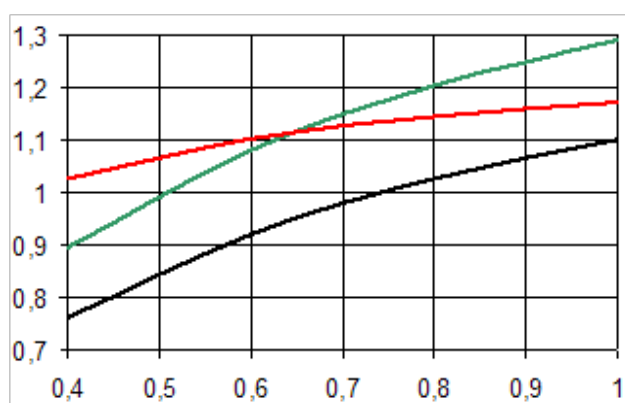
Рис.1. Влияние содержания горючего газа в топливе на низшую объемную теплоту сгорания смеси с воздухом стехиометрического состава

На рис.2 приведены аналогичные характеристики, применительно к четырехтактному двигателю с искровым зажиганием, $S/D = 9,2 / 8,6$ дм, со степенью сжатия 9,3, параметры которого использовались и в дальнейших расчетах по моделированию рабочего процесса.

Попытаемся объяснить различия в протекании кривых энергии, вносимой с топливом в камеру сгорания в цикле, для различных горючих газов. На количество теплоты, выделяющейся в цилиндре двигателя при сгорании рабочей смеси стехиометрического состава, при неизменных условиях на впуске, 100 %-ной полноте сгорания и постоянстве режимных параметров, влияют:

- объемная доля горючего газа в топливе;
- объемная доля горючего газа в топливо-воздушной смеси (см. рис.3);
- объемная теплота сгорания данного горючего газа (см. табл.4).

Количество
выделившейся
теплоты, кДж

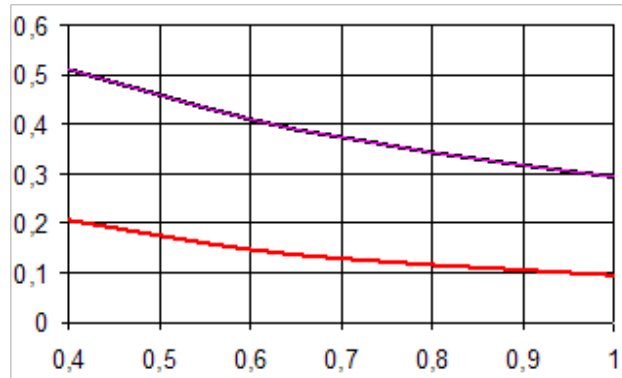


Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄)
в газообразном топливе (остальное — азот)

Рис.2. Количество теплоты, выделяющейся при сгорании топлива в цилиндре двигателя ($V_h = 0,575$ л, $a = 1,0$), в зависимости от объемной доли горючего газа в топливе для различных горючих газов:

1. — метана,
2. — оксида углерода,
3. —

Объемная
доля топлива в
топливо-воздушной
смеси

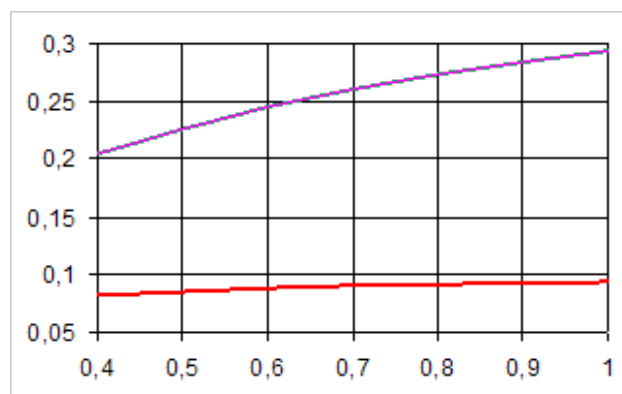


водорода
Рис.3.

Объемная доля
топлива в топливо-
воздушной смеси в
зависимости
от объемной доли
горючего газа в
топливе для
различных горючих
газов:

1. – метана, 2. –
оксида углерода, 3. –
водорода

Объемная
доля горючего газа в
топливо-воздушной
смеси



На

рис.4. Объемная доля
горючего газа в
топливо-воздушной
смеси в зависимости
от объемной доли
горючего газа в
топливе для
различных горючих
газов:

1. – метана, 2. –
оксида углерода, 3.
– водорода

Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄)
в газообразном топливе (остальное – азот)

Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄)
в газообразном топливе (остальное – азот)

Как видно из рис.3, при замещении горючего газа азотом, объемные доли топлива в топливо-воздушной смеси для водорода и оксида углерода равны и изменяются аналогично. Для метана эта величина меньше, причем при 100 %-ном содержании горючего газа она составляет около 33 % от доли H₂ и CO, а при 40 %-ном содержании, около 40 %.

Объемные доли горючего газа в топливо-воздушной смеси в зависимости от объемной доли горючего газа в топливе, вычисляемые, как

$$r_{\text{CH}_4} = r_{\text{топ}} \cdot \text{CH}_4; \quad r_{\text{H}_2} = r_{\text{топ}} \cdot \text{H}_2; \quad r_{\text{CO}} = r_{\text{топ}} \cdot \text{CO},$$

приводятся на рис.4. Из графиков видно, что по мере снижения концентрации горючего газа в топливе, его доля в стехиометрической смеси также падает, причем, если при уменьшении объемной доли горючего газа в топливе с 1 до 0,4 для водорода и оксида углерода, снижение их доли в смеси уменьшается примерно на 40 %, то для метана снижение составляет только около 12 %. Более интенсивное падение концентрации для водорода и оксида углерода и объясняет эффект большего тепловыделения для метана (рис.2) при низких концентрациях.

Так как плотность водорода и метана ниже плотности газа-разбавителя – азота, то по мере уменьшения количества горючего газа в топливе его плотность в этом случае возрастает (рис.5) и остается неизменной, если горючий газ – оксид углерода, плотность которого практически равна плотности азота.

Плотность
топлива, кг/м³

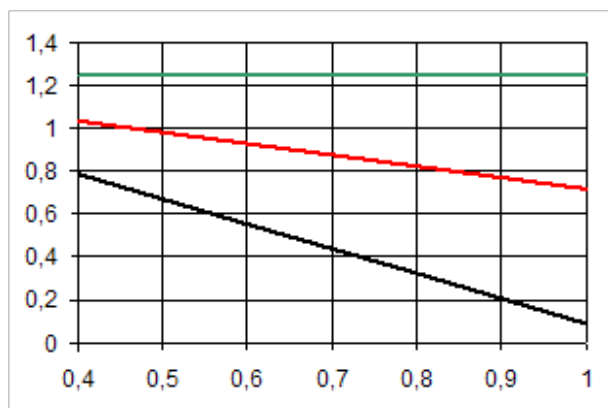


Рис.5.

Плотность топлива в зависимости от объемной доли горючего газа в топливе для различных горючих газов:
1. – метана, 2. – оксида углерода, 3. – водорода

Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄) в газообразном топливе (остальное – азот)

Теоретическое количество воздуха для сжигания 1 кг газообразного топлива, кг

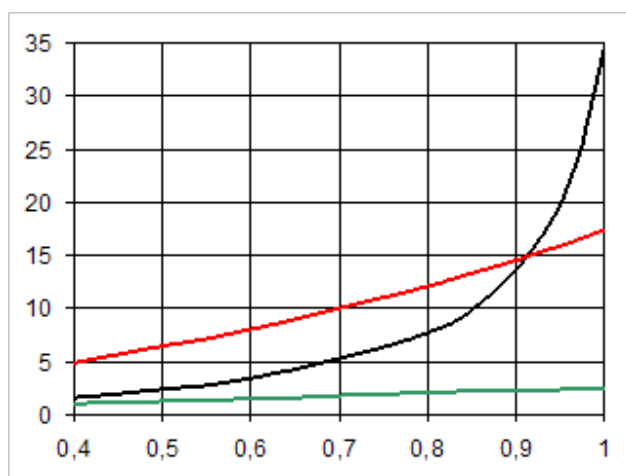


Рис.6

Теоретическое количество воздуха для сжигания 1 кг газообразного топлива в зависимости от объемной доли горючего газа в топливе для различных горючих газов:

Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄) в газообразном топливе (остальное – азот)

1. – метана, 2. – оксида углерода, 3. – водорода

Доли теплоты, пошедшие на совершение работы и изменение внутренней энергии

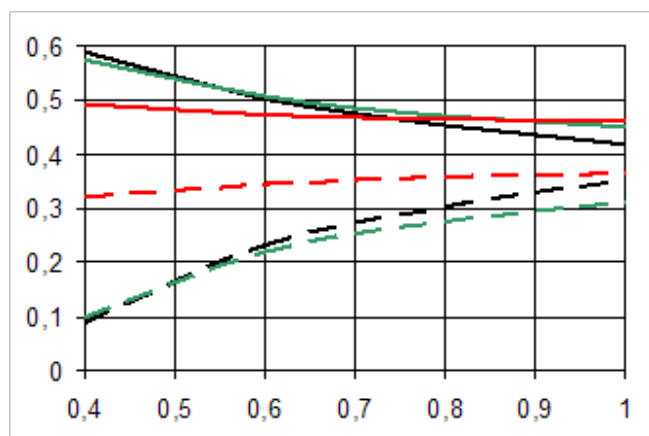


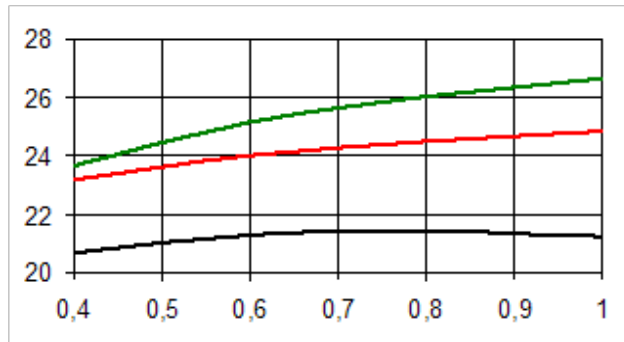
Рис.7. Доли

теплоты, пошедшие на совершение работы (сплошные линии) и изменение внутренней энергии (пунктирные линии), в зависимости от объемной доли горючего газа в топливе для различных горючих газов:

Объемная доля горючего газа (H₂, CO, CH₄) в газообразном топливе (остальное – азот)

1. – метана, 2. – оксида углерода, 3. – водорода

Индикаторная
цилиндровая мощность,
кВт

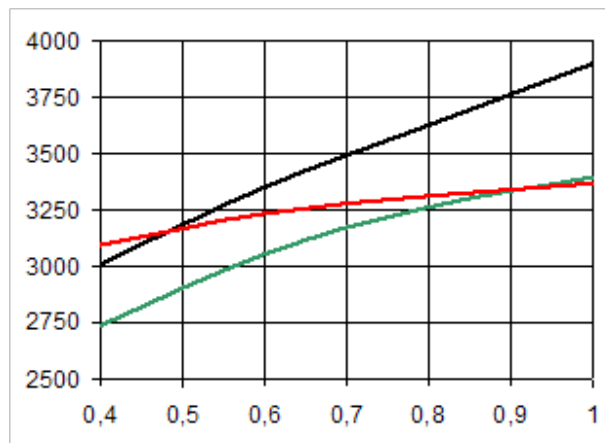


Объемная доля горючего газа (Н₂, СО, СН₄)
в газообразном топливе (остальное – азот)

Рис.8

Индикаторная
цилиндровая
мощность
двигателя
(полностью
открытая
дроссельная
заслонка, $n = 5000$
мин⁻¹, $a = 1,0$), в
зависимости от
объемной доли
горючего газа в
топливе для
различных
горючих газов: 1.
– метана, 2. –
оксида углерода,
3. – водорода

Адиабатическая
температура
горения топливо-воздушной
смеси, К

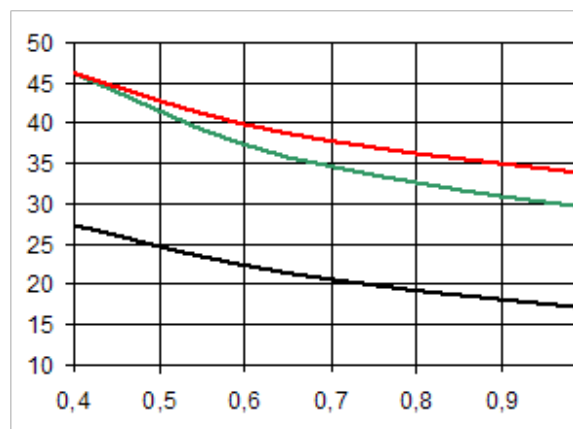


Объемная доля горючего газа (Н₂, СО, СН₄)
в газообразном топливе (остальное – азот)

Рис.9

Адиабатическая
температура
горения ($a = 1,0$),
в зависимости от
объемной доли
горючего газа в
топливе для
различных
горючих газов:
1. – метана, 2. –
оксида углерода,
3. – водорода

Продолжительнос
ть
сгорания, град.ПКВ



Объемная доля горючего газа (Н₂, СО, СН₄)
в газообразном топливе (остальное – азот)

Рис.1

Продолжительнос
ть
сгорания
топливо-
воздушной смеси
в цилиндре
двигателя (a
 $= 1,0$), в
зависимости от
объемной доли
горючего газа в
топливе для
различных
горючих газов:
1. – метана, 2. –

ЛИТЕРАТУРА

1. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов./ Г.А. Терентьев, В.М. Тюков, Ф.В. Смаль — М: Химия, 1989. — 272 с.
2. *Токарев Г.Г.* Газогенераторные автомобили. — М.: Машгиз, 1955. — 204 с.
3. Biogas plants in Europe. An updated databank. A. Pauss, E.- J. Nuns. Final report, commission of the European Communities, 1990, — 67 pp.
4. *Ильяшенко С.М., Талантов А.В.* Теория и расчет прямоточных камер сгорания. Под ред. М.М. Бондарюка — М.: Машиностроение, 1964. — С. 157.
5. *Артамонов М.Д., Юдушкин Н.Г.* Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет. — М.: Машгиз, 1955. — С. 211.
6. *Загорученко В.А., Журавлев А.М.* Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. — М.: Изд-во комитета стандартов, 1969. — С. 47.
7. *Линчевский В.П.* Топливо и его сжигание / под ред. Н.П. Чижевского и М.К. Гродзовского. — М.: Металургиздат, 1947. — С. 52.

Список обязательной литературы.

1. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов/ В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян и др.; Под ред. В. Н. Луканина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2005. — 479 с.: ил. С. — 285 — 310, 44 — 49, 64 — 67, 244 — 248. 359 — 360.
2. Шкаликова В. П., Патрахальцев Н. Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях: Монография. Изд. 2-е, доп. — М.: Изд-во РУДН, 1993. — 64 с.
3. Виноградов Л. В., Горбунов В. В., Патрахальцев Н. Н. Применение газовых топлив в двигателях внутреннего сгорания. — М.: ИРЦ Газпром, 1996. 187 с.
4. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания.: Учебник для вузов. /А. Э.Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц и др. — 2-е изд. перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. 536 с. — С. 335 — 342.

Список дополнительной литературы.

1. Лютко В., Луканин В. Н., Хачиян А. С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. — М.: МАДИ (ТУ), 2000. — 311 с.
2. Мамедова М. Д., Васильев Ю. Н. Транспортные двигатели на газе. — М.: Машиностроение, 1994. — 224 с.; ил.
3. Гайворонский А. И., Марков В. А., Илатовский Ю. В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. — М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. — 470 с. С. — 7 - 25, 70 — 131, 138 — 175, 182 — 210.
4. Ерохов В. И., Карунин А. Л. Газодизельные автомобили (конструкция, расчёт, эксплуатация). Учебное пособие. — М. — Граф — Пресс, 20065. — 560 с. С. — 61 — 100, 185 — 193, 199 — 230, 379 — 402,
5. Патрахальцев Н. Н., Виноградский В. Л. и Л. Ластра. Корректирование скоростных характеристик дизеля добавлением в топливо сжиженного нефтяного газа (статья). // Строительные и дорожные машины, 2002, № 4, с. 22 — 23.

6. Патрахальцев Н. Н., Виноградский В. Л., Пономарёв М. Н. Повышение динамических и экологических качеств дизеля при его регулировании изменением физико — химических свойств топлива (статья). // Вестник РУДН. 2003, № 1. С. — 22 — 26.
7. Патрахальцев Н. Н., Медведев Е. В., Казначевский В. Л. Возможности использования сжиженного нефтяного газа в качестве добавки к дизельному топливу. // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2004, № 1 (13). С. 5 — 7.
8. Патрахальцев Н. Н., Гусаков С. В., Медведев Е. В. Возможности организации газодизельного процесса с внутренним смесеобразованием на базе дизеля 8Ч13/14 (статья). // Двигателестроение, 2004, № 3. С. 10 — 12.
9. Патрахальцев Н. Н., Виноградский В. Л., Ластра Л. А. Повышение эксплуатационных свойств дизеля изменением физико — химических свойств топлива (статья). // Строительные и дорожные машины. 2004, № 12. С. 32 — 34
10. Патрахальцев Н. Н., Луис Антонио Ластра. Компенсация снижения эффективности работы дизеля в условиях высокогорья путём добавки СУГ к основному топливу (статья). // Автогазозаправочный комплекс и альтернативное топливо. 2004, № 6 (18). С. 17 — 20.
11. Патрахальцев Н. Н., Шкаликова В. П., Русинов А. Р. Расширение возможности использования природного газа для дизелей (статья). // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2005, № 1 (19). С. 38 — 42.
12. Патрахальцев Н. Н., Сеницын А. К., Бадеев А. А., Архипов А. Ф. Возможности форсирования дизеля изменением физико — химических свойств топлива (статья). // Строительные и дорожные машины. 2005, №. С. 33 — 35.
13. Патрахальцев Н. Н., Шкаликова В. П., Русинов А. Р. Принципы автоматического регулирования дизеля изменением физико — химических свойств топлива. (Статья). // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006, № 11. С. — 33 — 36.
14. Патрахальцев Н. Н., Казначевский В. Л., Бадеев А. А. Применение альтернативных топлив для регулирования рабочего процесса дизеля изменением физико — химических свойств топлива. (Статья). // АвтоГазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2006, № 2. С. 72 — 75.
15. Особенности применения в автотракторном дизеле утяжелённых топлив с добавкой лёгких синтетических парафиновых углеводородов./В. С. Азев., Г. Т. Газарян, А. Л. Лапидус и др. // Двигателестроение, 1990, № 6. С. 33 — 36, 24.
16. Патрахальцев Н. Н., Саде Юсеф Жебраэль. Использование отходов биохимических, химических, микробиологических производств в качестве альтернативных топлив для дизелей.//Двигателестроение, 1995. С. — 68 — 69.
17. Снижение дымности отработавших газов дизеля ЯМЗ-238 введением в топливо сжиженного нефтяного газа./Г. С. Корнилов, В. В. Курманов, В. В. Горбунов и др. // Двигателестроение, 1991, № 6. — С. 51 — 52.
18. Патрахальцев Н. Н., Л. В. Альвеар Санчес, Шкаликова В. П. О возможности расширения ресурса дизельных топлив и регулирования рабочего процесса дизеля изменением состава топлив. //ДВС, Харьков, вып. 48. — С. 73 — 79.
19. Патрахальцев Н. Н., Камышников О. В., Хосе Гальдос Гомез. Особенности работы дизеля в условиях высокогорья на сжиженном нефтяном газе. //Двигателестроение, 2006, № 3. — С. 36 — 39.
20. Патрахальцев Н. Н., Горбунов В. В., Гильермо Лира Качо. Сжиженный нефтяной газ для улучшения экологических качеств дизелей.// «Грузовик &...», 1999, № 12 (41). — С. 23 — 26.
21. Базаров Б. И. Энергоэкологическая эффективность альтернативных моторных топлив. // Автомобильная промышленность, 2006, № 6. С. 20 — 22.
22. Базаров Б. И. Расчёт и моделирование внешних скоростных характеристик ДВС на альтернативном топливе. // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2005, № 12. С. 20 — 23.

Коллекция ссылок на Интернет – ресурсы

1. Современные тенденции ресурсосбережения и топливно-энергетической безопасности
www.energystate.ru
www.politjournal.ru/index.php?action=Articles&dirid=36&tek=4905&
www.g8russia.ru/docs/11.html
2. Обоснование необходимости применения альтернативных топлив в энергетике
www.cogeneration.ru/art/alt_fuel/
www.alt-energy.ru
www.intersolar.ru/news/renewable/alt_fuel
3. Современное состояние и потенциальные возможности развития биоэнергетики в России
www.biomageco.com/?view=news&id=78
www.forestconfederation.ru/site.aspx?SECTIONID=323626&IID=344879
www.innovbusiness.ru/NewsAM/NewsAMShow.asp?ID=6364
www.leasinginfo.ru/news/print.html?new_id=2890
4. физико-химические характеристики топлив, получаемых из возобновляемых источников
www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st614-1.htm
www.nami.ru/alternative_fuel_r.html
www.fhp.bsu.by/_private/rus/razrabotki.files/biotoplivo.htm
5. ПРОИЗВОДСТВО моторных топлив ПУТЕМ ГАЗОФИКАЦИИ
www.edu-zone.net/show/167610.html
www.cbio.ru/modules/news/article.php?storyid=1131
www.energointop.narod.ru/1.htm
6. Производство биоводорода с помощью МИКРООРГАНИЗМОВ
<http://energetika.onet.ru/index.php?id=114>
www.cbio.ru/modules/news/article.php?storyid=2503
http://purec.pstu.ru/a_pr.html
7. Анализ эффективности применения в дизелях топлив из возобновляемых источников с учетом полного жизненного цикла
www.nami.ru/alternative_fuel_r.html
www.ntpo.com/invention/invention2/40.shtml
www.engine.aviaport.ru/issues/49/page32.html
8. оценка влияния физических показателей альтернативных топлив на характеристики впрыскивания и распыливания
www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st614-0.htm
www.semenovv.kharkiv.com/p_47.html
www.biodieselmach.com/ru/content.htm
9. Особенности протекания процесса смесеобразования и сгорания альтернативного топлива в дизеле
www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st614-0.htm
www.semenovv.kharkiv.com/p_34.html
10. ПРОБЛЕМЫ ВЫБРОСОВ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА

САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ДИЗЕЛЕ

www.icp.ac.ru/structure/departments/gor/labs/CL_physgor/dum/soot.html

www.edu.secna.ru/main/review/2006/n8/brava62.pdf

11. Методы адаптации дизелей для работы на топливах, получаемых на основе растительных масел

www.semenovv.kharkiv.com/p_46.html

www.nev-biotoplivo.narod.ru/biodizt.htm

12. Работа дизеля на спиртовых топливах, получаемых из возобновляемых источников

www.vc.secna.ru:8080/Books/Files/Vestn_2000_02/11/11.htm

www.bioethanol.ru/download_file.php?download_property_item

www.planetadisser.com/see/dis_249846.html

www.avtomash.ru/gur/2003/200308.htm

www.mashin.ru/jurnal/autorart.php?id=4&autid=00265

13. Применение в дизелях топлив на основе эфиров, получаемых из возобновляемых источников

www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st614-1.htm

www.novtex.ru/bjd/bgd05/annot11.htm

www.nami.ru/alternative_fuel_r.html

14. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ДИЗЕЛЯХ

www.icm.by/public/developments/p240/indexr.html

www.moto.kiev.ua/issue/advice/111747250405

[www.tek.ua/article0\\$t!1\\$pa!401\\$a!346351.htm](http://www.tek.ua/article0$t!1$pa!401$a!346351.htm)

15. РАБОТА ДВИГАТЕЛЯ НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ

www.gazodizel.com.ua

www.mknt.icsmir.ru/Gazodisel_avto_Zil.htm

www.gazogenerator.ru

16. Перспективный рабочий процесс ДВС с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия при работе на топливах, получаемых из возобновляемых источников

www.millioncars.ru/articles/?l=3&p=446&aid=2045

www.disserr.ru/contents/58119.html

17. Методика обработки ездового цикла для получения распределения режимов работы дизеля при оценке эффективности применения альтернативных топлив

www.aps-c.ru/publications/boost_cruise_rus.pdf

www.madi.ru/dvs/results/iok/iok.shtml

18. Методика приведения оценочных показателей к единому параметру

www.mdiesel.ru/Knwbase/12_2000/03/01.htm

www.profcomdiplom.ru/zakazready.aspx?id=8935

Перечень тем рефератов

1. адаптация дизелей для Работы на спиртовых топливах, получаемых из возобновляемых источников
2. адаптация дизелей для работы на топливах, получаемых на основе растительных масел
3. биоводород как топливо для ДВС и его получение из восполняемых источников
4. влияния показателей альтернативных топлив на характеристики впрыскивания и смесеобразования в дизелях
5. влияния показателей альтернативных топлив на характеристики сгорания и образования вредных веществ в дизелях
6. использование твердых отходов для генерации биогаза и его использование в дизельэлектростанциях
7. конструкция и принципы работы транспортных газогенераторных установок
8. моторные топлива, получаемые из растительной органики ПУТЕМ ГАЗОФИКАЦИИ
9. Обзор моторных топлив, получаемых из возобновляемых источников
10. образование токсичных веществ в дизелях при применении альтернативных видов топлив
11. организация работы дизеля на газогенераторном и биогазе
12. Особенности работы топливоподающей аппаратуры на альтернативных видах топлива
13. особенности рабочего процесса с самовоспламенением гомогенного заряда от сжатия и возможности применения альтернативных топлив
14. Оценка эффективности применения моторных топлив, получаемых из возобновляемых источников с учетом «полного жизненного цикла»
15. Перспективы применения альтернативных топлив, получаемых из возобновляемых источников в ДВС
16. Перспективы развития биоэнергетики и производства моторных топлив в России
17. ПРОБЛЕМЫ ВЫБРОСОВ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И сажи в дизеле и влияние на эти процессы применения альтернативных топлив
18. Проблемы и методы их решения при ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПЛИВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ДИЗЕЛЯХ
19. Работа дизелей на смесевых топливах на основе эфиров, получаемых из возобновляемых источников
20. Современные проблемы ресурсосбережения и охраны окружающей среды с позиций транспортной энергетики

Методические указания

для студента по работе с учебником, практическим занятиям и лабораторным работам по курсу «Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников»

В основу учебно-методического комплекса положены принципы, позволяющие студенту сократить время на освоение курса и улучшить качество знаний, полученных после его усвоения. Перед началом работы с учебно-методическим комплексом обучающийся должен понять, за счет чего это происходит, чтобы полней реализовать преимущества электронного учебника и других компонентов УМК.

- В основе УМК заложен принцип квантования, т.е. весь материал разбит на разделы, состоящие из модулей, ограниченных по объему и замкнутых по содержанию. Это позволяет работать с каждым из модулей самостоятельно, независимо от того, был ли изучен предыдущий Раздел или нет.
- Разделы учитывают принцип наглядности, т.е. модули содержат необходимый иллюстративный материал, облегчающей понимание и запоминание новых понятий, утверждений и методов.
- В учебно-методическом комплексе реализован принцип ветвления, т.е. каждый модуль связан гипертекстными ссылками с другими модулями так, чтобы у обучающегося есть выбор перехода в любой другой модуль. Принцип ветвления не исключает, а даже предполагает наличие рекомендуемых переходов, реализующих последовательное изучение предмета.
- Заложенный в учебно-методический комплекс принцип адаптивности позволяет адаптацию к нуждам конкретного пользователя в процессе учебы, позволять варьировать глубину и сложность изучаемого материала и его прикладную направленность в зависимости от задач, стоящих в данный момент перед студентом (подготовка к семинарским занятиям, рубежному контролю, написанию реферата, прохождения итоговой аттестации и т.п.).
- Принцип компьютерной поддержки позволяет на всех стадиях работы с учебно-методическим комплексом получить компьютерную поддержку, освобождающую студента от рутинной работы и позволяющую сосредоточиться на сути изучаемого в данный момент материала, рассмотреть большее количество примеров и решить больше задач. Причем компьютер не только выполняет громоздкие преобразования, разнообразные вычисления и графические построения, но и совершает математические операции любого уровня сложности, если они уже изучены ранее, а также проверяет полученные результаты на любом этапе, а не только на уровне ответа.

Описание балльно-рейтинговой системы

Общее описание системы контроля знаний

Текущая аттестация студентов – рубежный контроль производится в плановые часы занятий. Каждый студент индивидуально выполняет письменную работу – тест. Рубежный контроль проводится четыре раза в семестр (в сентябре, октябре, ноябре и декабре осеннего семестра и феврале, марте, апреле и мае весеннего семестра) с проставлением результатов с 20-го по последний день текущего месяца на сайте контроля текущей успеваемости студентов. После наступления нового месяца, проставленные баллы за предыдущий месяц, не могут быть исправлены. Баллы проставляются нарастающим итогом и в конце курса по их количеству определяется дальнейшее действия студента: согласие на автоматическое выставление оценки или участие в экзамене.

Общие правила выполнения контрольных заданий по курсу

Устанавливаются и доводятся до сведения студентов следующие условия начисления баллов по курсу и на рубежной аттестации:

- посещение лекций, практических занятий и лабораторных работ за 2 часа (пару) – 1 балл (всего максимум 17 – лекции, 9 – практические, 8 – лабораторные дают в сумме 35 баллов);
- защита лабораторных работ за 1 защищенную работу до 8 баллов (всего максимум студент за защиту 4-х лабораторных работ может получить в сумме 32 балла);

- рубежный контроль, каждый до 8 баллов (всего максимум студент на 4-х аттестациях может получить в сумме 32 балла)

Студент за время обучения в семестре может набрать до 100 баллов.

Шкала оценок, итоговые оценки
(методика выставления)

Сумма баллов, набранная студентом на аттестациях, позволяет получить оценку по итогам работы в семестре и не сдавать экзаменов, исходя из следующей шкалы (1-й и 2-й столбцы таблицы 1). Студенты, получившие оценки за экзамены по результатам работы в семестре, но претендующие на получение более высокой оценки, могут участвовать в сдаче экзаменов в сессию (см. 3, 4 и 5 столбцы таблицы 1).

Таблица 1

Сумма баллов, полученная за семестр на аттестациях	Автоматическая оценка за работу в семестре	Баллы, полученные на экзамене	Общая сумма баллов за работу в семестре и на экзамене	Итоговая оценка
91 – 100	5	–	91 – 100	5
76 – 90	4	0 – 25	76 – 100 более 100	45
56 – 75	3	0 – 25	56 – 85 86 – 100	34
35 – 55	нет, обязательная сдача экзамена	0 – 25	60 – 80	3
менее 35	нет	недопуск	менее 35	2

Таблица 2

Сумма баллов, полученная за семестр на аттестациях	Автоматическая оценка за работу в семестре	Баллы, полученные на зачете	Общая сумма баллов за работу в семестре и на зачете	Итоговая оценка
> 55	Зачет	–	> 55	Зачет
35 – 55	нет, обязательная сдача зачета	0 – 25	не менее 60	Зачет
менее 35	нет	–	менее 35	Незачет

Зачет можно получить по результатам работы в семестре (см. 1-й и 2-й столбцы таблицы 2) или приняв участие в зачетной сессии (см. 3, 4 и 5 столбцы таблицы 2).

Результаты проставляются в зачетные ведомости и книжки:

- зачеты – в день проведения зачета;
- экзамены – в день проведения экзамена при наличии штампа допуска к сессии.

Персональные данные автора



**Гусаков Сергей Валентинович,
д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой
теплотехники и тепловых
двигателей, инженерного
факультета РУДН**

Гусаков С.В. родился 17 апреля 1952 года в г. Курске. Базовое высшее образование получил в Московском автомеханическом институте (МАМИ) по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» (*диплом инженера - механика А-1 № 830253 от 15 июня 1975 года*). После окончания ВУЗа работал в должностях младшего, а затем, старшего научного сотрудника в Научно - исследовательской лаборатории токсичности двигателей (НИЛТД). В 1982 году в Московском автодорожном институте (МАДИ) после окончания очной аспирантуры защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.04.02 -тепловые двигатели (*диплом ТН № 060912 от 9 марта 1983 года*) на тему: «Исследование закономерностей формирования фронта диффузионного пламени и температурно-концентрационных полей в дизеле». После окончания аспирантуры Гусаков С.В. работал в должностях старшего научного сотрудника, а затем, заведующего лабораторией в московском филиале НИИ тракторных и комбайновых двигателей (ФНИКТД), в последствии, преобразованном в Центральный НИИ по моторостроению (ЦНИИМ), в дальнейшем, при объединении министерств, присоединенный к Научно-исследовательскому автотранспортному институту (НАМИ). С 1991 года Гусаков С.В. работает

в Научно-производственном предприятии «Агродизель» в должности заместителя директора по научно-исследовательской работе. Гусаков С.В. Являясь одним из руководителей договора о научно-техническом сотрудничестве между НПП «Агродизель» и РУДН, подписанным 1993 году, Гусаков С.В. принимал активное участие в совершенствовании научно-исследовательской и учебной базы кафедры комбинированных ДВС РУДН, а с 1994 года работает по совместительству в должности доцента на этой кафедре. Активно проводя научно-исследовательскую работу, Гусаков С.В. получает от Ученого Совета Университета право вести аспирантов. Под его руководством в 1997 г. защищает кандидатскую диссертацию Хеваге Читрал Амбаватте (Шри-Ланка) по двум специальностям: 11.00.11 - охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов и 05.04.02 - тепловые двигатели, а в следующем, 1998 году, также по двум специальностям, его аспирант Юшин А.Е.. С сентября 1999 г. Гусаков С.В. переходит на преподавательскую деятельность в РУДН на должность доцента в штат кафедры комбинированных ДВС (*приказ по РУДН № 1580/к от 1 сентября 1999 года*). В октябре 2000 года он избирается по конкурсу в занимаемой должности доцента, а в 2001 году получает ученое звание доцента (*аттестат ДЦ № 014046 от 19 декабря 2001 года*). В этот период под его руководством защищают диссертации: Кривяков С.В. (РФ, 2000 г.), Лодня В.А. (Беларусь, 2000 г.), Вальехо Мальдонадо Пабло Рамон (Эквадор, 2000 г.), Макаров А.П. (РФ, 2002 г.). В 2002 году Гусаков С.В. в МГТУ им. Н.Э. Баумана защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Разработка методов совершенствования процессов смесеобразования и сгорания в поршневых двигателях». С сентября 2003 года приказом по РУДН Гусаков С.В. зачислен, как прошедший по конкурсу, на должность профессора кафедры комбинированных ДВС РУДН, в 2004 году он получает звание профессора (*аттестат ПР № 011613 от 15.12.2004 г.*). В эти годы под его руководством успешно защитили кандидатские диссертации: Махмоуд Мохамед Эль-Гхобаши Эль-Хагар (Египет, 2004 г.), Дехивала Лиянаге Анджана Прияндака (Шри Ланка, 2004 г.), Абдель Мунем Музхер Хашем (Ирак, 2004 г.), Макаревский А.С. (РФ, 2007 г.). С 1 сентября 2007 года является заведующим кафедрой теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН.

Основным направлением научно-исследовательских работ Гусакова С.В. на протяжении всей его трудовой деятельности является исследование и совершенствование рабочих процессов в поршневых двигателях внутреннего сгорания, в основном, по топливно-экономическим и экологическим параметрам.

Гусаков С.В. выполнил большое количество научно-исследовательских работ, посвященных сокращению потребления моторного топлива нефтяного происхождения и эмиссии вредных веществ при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Он являлся ответственным исполнителем ряда важных научных направлений по созданию «Отраслевых методик расчета рабочего процесса дизеля», компонентов Отраслевой САПР «Дизель», совершенствованию рабочих процессов дизелей производства Алтайского и Минского моторных, а так же Челябинского и Владимирского тракторных заводов, осуществлял научное руководство работами в области альтернативных видов топлив: биогаза и рапсового масла. Научно-исследовательские хозяйственные работы с его участием выполнялись с Миннауки РФ, Липецким и Гомельским двигателестроительными заводами, Тульским машиностроительным заводом, Рыбинским конструкторским бюро по моторостроению, НПО «Технология», МНКП «Савиат», АО «ЭкоРос», АО «Дизель» и др. За одну из разработок - биогазовую модификацию силового агрегата с двигателем 1Д8М в 1993 году он был удостоен звания лауреата Всероссийского выставочного центра (ВВЦ). Под его руководством защитили диссертации 10 кандидатов технических наук. Научный стаж Гусакова С.В. 30 лет, он имеет более 80 научных трудов, учебно-методических работ и патентов РФ. Гусаков С.В. является членом экспертного совета при Московском энергетическом институте (МЭИ), член учебно-методической комиссии РУДН, член НТС инженерного факультета РУДН, член диссертационного совета К 212.203.12 в РУДН.

Профессор С.В. Гусаков является руководителем научной школы, в рамках которой путем математического моделирования и экспериментальными средствами исследуется характер протекания и методы управления физико-химическими процессами в поршневых двигателях: образованием рабочих смесей при внутреннем, внешнем и комбинированном смесеобразовании, процессами воспламенения, сгорания и образования вредных веществ при горении, как традиционных моторных топлив, так и альтернативных: рапсового масла, смесевых топлив, биогаза и др., с целью совершенствования энергетических, экономических и экологических параметров поршневых двигателей.