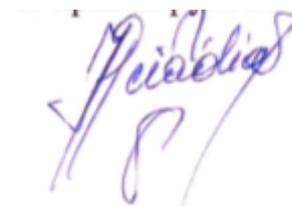


Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Волгоградский государственный технический
университет»

На правах рукописи



КАДИАТА ЧИБАНДА ЭМЕРИ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ
ПАЛЬМОВОГО МАСЛА МОБИЛЬНЫМИ ТРАНСПОРТНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность: 05.20.01 - Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Научный руководитель:
доктор технических наук , профессор
Федянов Евгений Алексеевич

Волгоград, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	13
1.1 История исследований и применения альтернативных биотоплив на транспорте	13
1.2 Направление и состояние развития производства альтернативного топлива для автомобильных двигателей	18
1.3 Общие требования к топливам. Соответствие смесевых топлив стандартам для дизельных топлив	23
1.4 Требования к системам впрыскивания дизельных двигателей.	29
1.5 Повышение эффективности использования альтернативных топлив для дизельных двигателей	30
1.5.1 Виды альтернативных топлив для дизельных двигателей и особенности их применения	30
1.5.2 Влияние чистых растительных масел на двигатель	34
1.5.3 Влияние алкиловых эфиров на показатели дизельных двигателей	35
1.6 Анализ возможности использования растительных масел, включая пальмовое, как альтернативного топлива для дизельных двигателей	37
1.7 Экологические проблемы при использовании пальмового масла в качестве топлива для дизельных двигателей.	41
1.8 Производственные, экономические и социальные предпосылки использования пальмового масла в качестве топлива для дизельных двигателей	43
Выводы и задачи исследований	50
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА	52
2.1 Планирование и организация экспериментального определения	53

физических характеристик (стабильность, плотность, поверхностное натяжение, вязкость, цетановое число, коэффициент сжимаемости) дизельных топлив с различным содержанием пальмового масла.

2.2	Методика приготовления топливных смесей из пальмового масла и дизельного топлива	54
2.3	Стабильность дизельного топлива с добавлением пальмового масла	55
2.4	Методика определения плотности дизельного топлива с добавлением пальмового масла	56
2.5	Методика определения поверхностного натяжения дизельного топлива с добавлением пальмового масла	57
2.6	Определение вязкости дизельного топлива с добавлением ПМ	59
2.7	Определение цетанового числа дизельного топлива с добавлением пальмового масла	61
2.8	Определение коэффициента сжимаемости дизельного топлива с добавлением ПМ	63
2.8.1	Методика определения коэффициента сжимаемости	65
2.8.2	Анализ результатов	75
	Выводы	76
3	ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ РЕГУЛИРОВОК ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВПРЫСКИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ВПРЫСК»	77
3.1	Методика исследования влияния состава топливной смеси на показатели процесса впрыскивания топлива в дизельный двигатель	78
3.2	Оценка влияния состава смеси дизельного топлива и пальмового масла на показатели процесса впрыскивания топлива в дизельном двигателе	90

Выводы	108
4 РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ	110
4.1 Эффективные характеристики дизеля	110
4.2 Экологические показатели	113
4.3 Анализ результатов расчетов показателей дизеля при работе на дизельном топливе с добавлением ПМ	115
Выводы	117
5 МЕТОДИКА СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ Д-144 НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ 4D56T АВТОМОБИЛЯ MITSUBISHI PAJERO В ПРОЦЕССЕ ПЭИ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА	118
5.1 Планирование и организация стендовых испытаний дизельного двигателя при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ	119
5.2 Выбор топливных смесей с добавлением пальмового масла для проведения стендовых испытаний	124
5.3 Методика исследования и определение параметров свежего заряда	125
5.4 Методика исследования и определение эффективных показателей дизеля	129
5.5 Анализ и оценка результатов испытания дизельных топлив с добавлением ПМ на автотракторном двигателе	133
5.6 Методика исследования и оценка дымности отработавших газов	137
5.7 Методика оценки уровня токсичности отработавших газов на стенде	140

5.8 Производственно-эксплуатационные испытания	146
5.8.1 Методика производственно-эксплуатационных испытаний	147
5.8.2 Результаты определения эффективных показателей и их анализ	152
5.8.3 Определение экологических показателей отработавших газов	153
5.8.4 Результаты определения и анализ экологических показателей отработавших газов	155
5.9 Обработка результатов и погрешности измерений	158
Выводы	160
6 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА	162
Выводы	166
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	202
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	204
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	206

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВТ – альтернативные виды топлива

АПК – агропромышленный комплекс

ВАК – Высшая аттестационная комиссия

ГК – газовый конденсат

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ДР Конго – Демократическая республика Конго

ДТ – нефтяное дизельное топливо

ЕС – Европейский союз

КМ – кукурузное масло

КС – камера сгорания

КПД – коэффициент полезного действия

МГАУ – Московский государственный аграрный университет

МГТУ – Московский государственный технический университет

МГУ – Московский государственный университет

МТА – машинно-тракторный агрегат

МЭ – метиловый эфир

МЭРМ – метиловые эфиры растительных масел

ОГ – отработавшие газы

ПК – программный комплекс

ОМ – оливковое масло

ПМ – пальмовое масло

ПМ10, ПМ20, ПМ30, ПМ40, ПМ50, ПМ60 – топливная смесь с 10% объемных

пальмового масла и 90% объемных нефтяного дизельного топлива; 20%

пальмового масла и 80% объемных нефтяного дизельного топлива; 30%

пальмового масла и 70% объемных нефтяного дизельного топлива; 40%

пальмового масла и 60% объемных нефтяного дизельного топлива; 50%

пальмового масла и 50% объемных нефтяного дизельного топлива; 60%

пальмового масла и 40% объемных нефтяного дизельного топлива, соответственно

ПЭИ – производственно-эксплуатационные испытания

РГАТУ – Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева

РУДН – Российский университет дружбы народов

СМТ – синтетическое моторное топливо

ТНВД – топливный насос высокого давления

ТС – транспортное средство

УОВ – угол опережения впрыскивания

АМ – арахисовое масло

ЦЧ – цетановое число

ЭПМ – эфир подсолнечного масла

ЭРМ – эфир рапсового масла

ЭЭРМ – этиловые эфиры растительных масел

СН_х – суммарные несгоревшие углеводороды

СНЕ – Национальная энергетическая комиссия ДР Конго

FAO – Food and Agriculture organisation («Продовольственная и сельскохозяйственная организация», ООН)

NO_х – суммарные оксиды азота

РВ – пальмовое масло в международной классификации

РВ10 – топливная смесь, содержащая 10% пальмового масла и 90% нефтяного дизельного топлива по международной классификации

РВJB5 – топливная смесь, содержащая 5% пальмового масла, 5% масла ятрофы и 90% нефтяного дизельного топлива по международной классификации

PM – твердые частицы

SCOPUS – библиографическая и реферативная база статей, опубликованных в научных изданиях

SO_х – суммарные оксиды серы

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время сохраняется устойчивая тенденция расширения топливной базы для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин за счет использования альтернативных топлив, включая топлива растительного происхождения. Это связано с ростом числа эксплуатируемых машин, относительно высокой ценой на нефтяные топлива и нестабильностью нефтяного рынка. Особенно актуальным является расширение топливной базы сельскохозяйственной техники для стран, которые не обладают запасами нефти, но где развиты производство и переработка сельскохозяйственной продукции. К таким странам, в частности, относится Демократическая Республика Конго.

Африка заинтересована в использовании в качестве биотоплива пальмового масла, мировое производство которого превосходит производство других растительных масел. В африканском регионе культура масличной пальмы широко распространена, природно-климатические условия земледельческих районов благоприятны для ее выращивания, трудовые ресурсы для поддержания посевных площадей обеспечены.

Перевод и адаптация дизельных двигателей мобильных транспортно-технологических машин сельскохозяйственного производства на питание смесями нефтяного дизельного топлива (ДТ) с пальмовым маслом (ПМ) требует знания особенностей работы и эксплуатации дизелей на таких топливах. В частности необходимо знать, в какой мере переход на смесевые топлива влияет на показатели дизеля и как это влияние зависит от величины добавки ПМ, требуют ли изменения регулировки топливной аппаратуры, как долго сохраняются смесевые топлива без расслоения их компонентов и как влияет на сохранение свойств смесевых топлив их температура.

Существенное влияние на процесс впрыскивания и смесеобразования оказывают гидродинамические процессы в системе подачи топлива, зависящие от физических свойств топлива. Изменение физических характеристик топлива при переходе к альтернативным видам топлива следует учитывать при выборе

регулировок топливной аппаратуры дизельного двигателя. Одна из важнейших физических характеристик топлива – коэффициент сжимаемости.

На конец, необходимо знать как и в какой мере применение смесевых топлив отражается на экологических характеристиках транспортно-технологических машин.

Целью исследования является определение влияния добавок ПМ на показатели работы дизельных двигателей и необходимости изменения регулировок топливной аппаратуры при эксплуатации дизельных двигателей сельскохозяйственных машин на смесевых дизельных топливах с добавлением ПМ.

Степень научной разработанности темы.

Проблемой использования растительных масел как топлива для дизелей в России занимаются в МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН, МГУ, МГАУ имени В.П. Горячкина, РГАТУ; работают в этом направлении: Борычев С.Н., Бышов Н.В., Гайворонский А.И., Данилов И.К., Девянин С.Н., Лебедев А.Т., Марков В.А., Пуков Р.В., Симдянкин А.А., Успенский И.А., Шемякин А.В. и др. Использование ПМ в основном рассматривалось зарубежными учеными, которые работают в: Codeart (Belgium), Centre for energy science (Malaysia), University of King Abdelaziz (Saudi Arabia), University of Queensland (Australia), University of Songkla (Thailand) и др. Исследования проводятся в различных лабораториях Франции, Германии, Швеции, Канады и других стран. Большая часть результатов исследований по использованию в дизелях ПМ связана с токсичностью и эффективностью работы дизелей. Однако не были изучены гидродинамические процессы в топливной системе с учетом сжимаемости смесевого топлива при использовании ПМ, и их влияние на рабочий процесс дизеля. Рекомендации по применению ПМ в качестве топлива для дизелей носят, в основном, эмпирический характер.

Объект исследования – дизельный двигатель Д-144, оснащенный топливной аппаратурой непосредственного действия с механическим

управлением. Вид топлив – нефтяное дизельное и дизельное с добавлением пальмового масла.

Предмет исследования – физические свойства дизельного топлива с добавлением ПМ, показатели рабочего процесса дизеля, характеристики процесса подачи топлива, эффективные показатели дизеля.

Методология и методы исследования:

- экспериментальное определение коэффициента сжимаемости дизельного топлива с добавлением ПМ,
- математическое моделирование процесса подачи топлива в топливной системе и рабочих процессов в цилиндре дизеля,
- экспериментальное определение эффективных показателей дизеля.

Научная новизна.

1. Определены значения коэффициента сжимаемости ДТ с различными по величине добавками ПМ и впервые получена зависимость значения коэффициента сжимаемости от величины добавки ПМ.
2. Доказано, что в смесях с ДТ ПМ остается в капельно-жидком состоянии при температуре, ниже температуры застывания ПМ.
3. Установлено, что при использовании смесевых топлив с содержанием ПМ по объему до 30% изменения регулировок топливоподающей аппаратуры не требуется.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлено, что характеристики процесса подачи (активный ход плунжера, массовая цикловая подача, давление впрыскивания) дизельного топлива с добавлением ПМ от 10% до 30% по объему изменяются в сравнении с чистым ДТ незначительно: активный ход плунжера на номинальном режиме 2000 мин^{-1} меняется в пределах от 0,68% до 1,86%.
2. Определена зависимость эффективных показателей дизельного двигателя при его эксплуатации на ДТ с добавкой ПМ от содержания ПМ в смеси.

3. Полученные величины коэффициента сжимаемости дизельного топлива с добавками ПМ могут быть использованы при моделировании процесса подачи в топливных системах дизелей.

Практическая значимость работы.

1. Определено снижение мощности в зависимости от величины добавки ПМ.

2. Установлено, что дополнительных настроек топливной аппаратуры непосредственного действия при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ до 30% по объему не требуется.

3. Установлено влияние величины добавки ПМ на дымность отработавших газов дизеля.

Положения, выносимые на защиту.

1. Эксплуатационные свойства дизельного топлива с добавлением ПМ, в том числе, время хранения без расслоения.
2. Влияние добавок ПМ в дизельное топливо на требуемые регулировки топливной аппаратуры.
3. Влияние добавок ПМ на дымность отработавших газов при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ.
4. Влияние добавок ПМ на токсичность отработавших газов, при эксплуатации машин с дизельными двигателями.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методик моделирования процесса подачи топлива и рабочего процесса дизельного двигателя, а также соразмерностью полученных результатов моделирования и экспериментального исследования.

Вклад автора в решение поставленных задач состоит в непосредственном участии в экспериментальных исследованиях, подготовке исходных данных для математического моделирования процесса подачи топлива и рабочего процесса дизельного двигателя, обработке результатов исследований.

Реализация результатов исследований.

Результаты диссертационной работы предложены к внедрению в Национальную энергетическую комиссию (CNE) Демократической республики Конго.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертационной работы и ее результаты обсуждены и одобрены на следующих мероприятиях:

– на научно-практических конференциях Национальной энергетической комиссии (CNE) ДР Конго (2014 г.);

– The 102nd International Scientific and Technical Conference «Intelligent Systems of Driver Assistance: Development, Research, Certification» (г. Нижний Новгород, 18-19 апреля 2018 г.);

– Международной научно-практической конференции (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);

– XIV Международной научно-технической. конференции, посвященной 95-летию юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Ф.Н. (1923-1996) (г. Саратов, 2018 г.);

– 57-й Научной конференции, Волгоградский государственный технический университет (г. Волгоград, 4 – 6 февраля 2020 г.).

Публикации.

Основные положения и результаты исследований опубликованы в 9-ти печатных работах, в том числе 4-х статьях в изданиях ВАК, одна статья – в SCOPUS. Общий объем публикаций составляет 4,06 печ. л., из которых 2,84 печ. л. принадлежит лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературных источников и приложений. Список литературы содержит 240 наименований, из которых 31 зарубежное. Работа изложена на 210 страницах, содержит 62 рисунка, 39 таблиц и 3 приложения.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 История исследований и применения альтернативных биотоплив на транспорте

Можно предполагать, что в ближайшие десятилетия дизельные двигатели останутся основным типом силовых установок для сельскохозяйственных машин. Дизельный двигатель более экономичен, чем бензиновый. Экономия нефтяного сырья при замене бензиновых двигателей дизельными может достичь 50%. В мировой структуре парка ДВС сельскохозяйственного назначения дизели составляют около половины [74, 75, 107, 112, 125, 183, 184].

Наибольшую долю дизельные транспортные средства занимают в продажах таких компаний как Volkswagen, Volvo (80%), BMW (81%), Daimler (71%), Renault и Peugeot (более 50%) [33].

Впервые возврат к топливу, альтернативному бензину, произошел в 1973 г., когда несколько арабских государств приостановили свои поставки нефти западным странам и Японии. Бензин резко подскочил в цене и быстро достиг отметки, превышающую докризисную в пять раз. С тех пор поиск топлива, которое освободит мир от нефтяной зависимости, не прекращается. Цены на бензин продолжают расти [205], не наблюдается никаких реальных предпосылок, что они упадут. Поэтому постоянно ведутся исследования различных видов биологического топлива, преимущественно спиртов и биодизелей.

К сожалению, дизельные двигатели являются и основным источником выбросов токсичных веществ в атмосферу. Доля автомобильного транспорта с дизелями в выбросе вредных веществ составляет в США – 60,0%, в Великобритании – 35,5%, во Франции – 32%, в Китае – 65%, в Африке – 2%, но в больших городах Африки эти цифры достигают 20-30% [33, 37, 65, 196, 197].

Особенно тяжелая экологическая обстановка складывается в густонаселенных регионах мира, где повышение концентрации токсичных выбросов в атмосферу привело к глобальному изменению климата и климатическим аномалиям.

В период 1985-1995 гг. был отмечен ряд инициатив по сокращению загрязняющих выбросов с единицы (г/км) транспортных средств. За 20 лет было зафиксировано повышение уровня выбросов на 20-30%. С 2000 г. появляются новые проблемы. Это, в частности, парниковый эффект, который связан с выбросами в атмосферу CO_2 при сжигании ископаемых видов топлива (нефть, газ, уголь) [33, 82, 167, 186, 187, 206, 207].

Попытки использования альтернативного топлива растительного происхождения в транспортных дизелях предпринимаются в разных странах уже давно [39, 172, 229]. Из сообщений в газете «Бельгийский Конго» (1932 г.) известно, что при бельгийской колонизации территории Демократической республики Конго в 1908 г. несколько инженеров и техников первыми начали использовать ПМ как топливо, при строительстве магистральной дороги, соединяющей север страны с рекой Нил, поскольку стройка находилась очень далеко от порта. [214].

В Индии на транспорте и в сельскохозяйственной технике уже давно применяют смесь метилового эфира ПМ с ДТ, в основном в дизельных двигателях с непосредственным впрыском. Результаты являются перспективными [125, 228].

Из научного журнала «Грузовик» (№4, 2009 г.) известно, что в 2006 г. в Италии успешные испытания прошел локомотив, работающий на подсолнечном масле. Дизель тепловоза был специально доработан для использования этого экологически чистого биотоплива. «Подсолнечный» поезд с пассажирскими вагонами совершил первую поездку длиной 25 км. [109].

В ноябре 2005 г. первый в мире катер, использующий в качестве топлива подсолнечное масло, спущен на воду озера Комо, расположенного в предгорьях Альп на севере Италии. Катер был оборудован двигателем, работающим как на ДТ, так и на техническом подсолнечном масле. Двигатель легко перестраивается с одного топлива на другое. [107].

Концерн «Стирол» (Украина) начал производить биодизельное топливо из подсолнечного масла для заправки собственного автотранспорта и

тепловозов. При этом общая протяженность внутренних железнодорожных путей на территории концерна составляет более 30 км. В отличие от «зеленых» поездов, работающих в Великобритании, Швеции и Японии (там такие проекты рассматриваются в качестве экспериментальных), тепловозы, используемые в концерне «Стирол» с применением биодизельного топлива, эксплуатировались в обычном производственном режиме [107].

В 2005 г. в Клайпедском университете (Литва) начали проводить испытания серийно выпускаемого высокооборотного дизеля воздушного охлаждения F2L511(2410/10,5), используя в качестве топлива рапсовый метиловый эфир (РМЭ), промышленное производство которого освоено на литовском заводе «Рапсойл». По результатам испытаний сделано заключение о практической возможности конвертации данного дизеля для работы на РМЭ и его смесях со стандартным дизельным топливом. Установлено, что при этом энергетическая эффективность двигателя остается практически неизменной, а выброс вредных продуктов неполного сгорания топлива сокращается [171].

Для маркировки биодизельных топлив и их смесей с чистым ДТ в зарубежной технической литературе приняты условные обозначения, состоящие из букв и цифр. Например, В0 – буквы и цифры обозначают чистое дизельное топливо, РВ10 – обозначает смесь – 10% пальмового масла и 90% чистого ДТ, РВJB5 – обозначает смесь топлива состоящего из 5% пальмового биодизеля, 5% яatroфого биодизеля и 90% чистого ДТ.

В 1987г. Супорн (Suporn), Малайзия, [224, 233] нашел, что использование 100% рафинированного ПМ в дизельном двигателе марки Kubota модель KNA 58 дает надежные результаты по выходной мощности вала и лучшую эмиссию, чем при использовании смеси 70% рафинированного ПМ с 25% ДТ, которое имеет преимущество только в удельном расходе топлива.

Гумпон П. и Тироат А. (Gumpon P., Teerawat A) [234] в 2003 г. в лаборатории университета Принца Сонгкла в Тайланде проводили сравнительные испытания двух дизельных двигателей Kubota ET80

(одноцилиндровый с разделенным смесеобразованием, максимальная мощность 5,88 кВт при 2200 мин⁻¹) с использованием ДТ и рафинированного ПМ в течение более 2000 часов непрерывной работы. Анализ результатов показал, что удельный расход топлива первого двигателя, работавшего на ДТ, был на 14,2-19,0% меньше, чем второго двигателя, работавшего на рафинированном ПМ, дымность отработавших газов примерно одинакова, износ компрессионных колец был выше у второго двигателя, работавшего на рафинированном ПМ.

Бартелеми Циех (Barthelemy Thieux) [213] в 2004 г. анализировал возможность применения ПМ в качестве альтернативного топлива для дизеля в африканском регионе, где урожай пальмовых плодов умеренный. При сравнении дизелей, работавших на ДТ и ПМ, учитывались показатели мощности, крутящего момента, удельного расхода топлива, надежности, эмиссии ОГ, а также экономические аспекты эксплуатации самого двигателя порегиону. При сравнительном анализе результатов испытаний было отмечено, что при работе дизеля на ПМ заметны в основном большие отложения на компрессионных кольцах и впускных клапанах, эмиссия выбросов снизилась, а стоимость ПМ оказалась также ниже стоимости ДТ на 60%. Также было отмечено, что использование растительных масел в качестве топлива для дизелей позволит уменьшить энергетическую зависимость стран, не производящих ДТ. Это обстоятельство указывает путь развития будущего энергетики в странах – производителях растительных масел.

Рашид М.М. и др. [230] в 2015 исследовали работу дизеля с применением биотоплива на основе ПМ (PB20), ятрофы (JB20) и метилового эфира морингового масла (MB20) по сравнению с ДТ. Анализ результатов также показал преимущества использования смеси с ПМ по всем показателям.

Калам и др. [218] в 2011 в своей работе проводили сравнительные исследования состава отработавших газов и эффективных показателей многоцилиндрового дизельного двигателя с отдельным смесеобразованием, работающего на смесевых биотопливах. Исследовались смеси пищевых отходов кокосового (CB5) и пальмового (PB5) масел с ДТ в соотношении 5% на

95% соответственно. При испытаниях в целях безопасности дизель работал при положении рычагов управления соответственно 85% полной нагрузки.

Снижение выбросов CO по сравнению с ДТ составило 7,3% для CB5 и 21% для PB5, снижение выбросов CH_x составило 23% для CB5 и 17% для PB5. Результаты измерений эмиссии NO_x оказались разнонаправленными. Это объясняется тем, что ПМ, содержащее 49% ненасыщенных жирных кислот, быстрее реагирует с N₂ и продуцирует больше NO_x благодаря большому количеству реакций.

Бенджумиза и др. (Benjumea et al) [74, 75, 125, 229] в 2009 г. в рамках испытаний дизельных двигателей, в которых применяются ПМ и их смеси как альтернативное топливо для дизельных двигателей, наблюдали за следующими важными параметрами сгорания: момент впрыска топлива, давление газа в цилиндре, тепловое выделение, температура сгорания, производительность горения. В результате были предложены следующие методы улучшения показателей топливоподачи: микроэмульсии, трансэтерификация, изменение конструкции двигателя и топливной системы с предложением соответствующих схем.

Ндаишимие и Тазероут (Ndayishimiye and Tazerout) [228] в 2011 г. проводили исследование показателей и оценку состава ОГ одноцилиндрового дизеля с неразделенной камерой сгорания при использовании смесей сырого ПМ и подогретого ПМ и смесей пальмового биодизеля и ДТ. При исследовании было обнаружено повышение удельного эффективного расхода топлива для всех тестируемых биотоплив по сравнению с чистым ДТ. Эффективный КПД двигателя несколько возрастал при использовании смесей сырого ПМ, но уменьшался при использовании всех других тестируемых биотоплив. Выбросы CO и CH_x наиболее значительно уменьшились (на 30-65%) для пальмового биодизеля, хотя выбросы NO_x возросли.

В 2012 г. Сонгидр. (Song et al.) [217] использовали чистое ПМ и 20% смесь пальмового биодизеля и ДТ (PB20) для определения выбросов NO_x исследования формирования сажи в 4 цилиндровом дизельном двигателе

средней мощности. В среднем, В100 имеет статистически же выбросы NO_x в качестве нефтяного дизельного топлива в то время как В20 имеет существенно более низкие выбросы оксида азота, чем любой из нефтяного ДТ или В100. Кроме того, по показателям дымности ОГ, концентрация дыма от В20 выше, чем для двух других видов топлива.

Несколько публикаций показывают, что использование смеси 5% растительного масла и 95% ДТ в транспортных дизелях уменьшает проблемы с образованием сажи (дымность ОГ). [72, 76, 233]

Спрос на топливо возрастает, истощение мировых запасов нефти увеличивается, что является ключевыми факторами, которые привели человечество в настоящее время к необходимости реконструкции топливно-энергетического комплекса путем более глубокой переработки нефти, применения энергосберегающих технологий, перехода на менее дорого-стоящие виды топлива и введение инициатив по сокращению выбросов.

1.2 Направление и состояние развития производства альтернативного топлива для автомобильных двигателей

Истощение ресурсов и связанный с этим рост цен на топлива, повышение уровня загрязнения атмосферы, вызванное использованием традиционных источников энергии, привели к необходимости использования нетрадиционных видов топлива для дизельных двигателей. Они были созданы для обеспечения экономического развития развитых стран и стран с развивающейся экономикой.

В последнее время основными направлениями по улучшению экологических показателей ДВС и экономии моторных топлив являются адаптация дизелей к работе на альтернативных топливах как возобновляемом энергоресурсе. Это также может помочь решить проблему изменения климата. Поэтому исследование свойств известных продуктов, которые имеют потенциалы для эксплуатации в автомобилях, а именно растительных масел и их смесей с ДТ, моделирование и исследование процессов топливоподачи должно

быть одним из основных источников улучшения мощностных, экономических и экологических показателей транспортного дизеля [185, 189, 190, 191, 192].

Экономический потенциал возобновляемых источников энергии в настоящее время оценивается в 20 млрд. тонн условного топлива в год, что в два раза превышает объем годовой добычи всех видов органического топлива [112, 118, 204]. Это обстоятельство указывает путь развития энергетики будущего, особенно региональной и локальной. Промышленность, сельское хозяйство, транспорт и другие отрасли в течение длительного периода развития были ориентированы на традиционные нефтяные топлива. Однако неисчерпаемость и экологическая чистота возобновляемых источников энергии заставляет по-новому рассматривать возможности их использования.

Наибольшие перспективы, особенно для развивающихся стран мира, имеют те альтернативные виды топлива, исходную основу сырья для которых составляют растительные масла и биогаз. Как сырье для моторного биодизельного топлива массового использования, растительные масла имеют наилучшие перспективы [135, 190, 191, 192, 232, 237].

Проблема создания АВТ обусловлена следующими глобальными соображениями:

- эти топлива, как правило, экологически безопасны, при горении обеспечивают меньше выбросов, загрязняющих воздух, способствующих глобальному потеплению;
- большинство АВТ производится из неисчерпаемых, возобновляемых ресурсов и запасов;
- использование АВТ позволяет любому государству повысить энергетическую независимость и безопасность;
- разработка АВТ имеет достаточно продолжительную историю.

На европейском континенте биодизельные топлива на основе растительных масел были применены на автомобилях сначала во Франции, Австрии, Германии (Renault, Volkswagen), затем и некоторыми фирмами в США – John Deere, Allis Chalmers, Caterpillar и др. В России МГТУ им. Н.Э. Баумана,

РУДН, МГУ активноработают в этом направлении для автомобильных рынков страны.

В соответствии с литературой [220, 222], в общей разбивке расходов по изготовлению биодизельного топлива 75% его стоимости составляет масличное сырье (см. рисунок 1.1). Это является его важным преимуществом. Например, в Демократической республике Конго стоимость масличного сырья из пальмы составляет 0,5-0,55 долларов США за литр. Следовательно, применение моторных топлив из указанного сырья в исходном виде или после специальной химической обработки, а также в смеси с дизельными топливами в ряде случаев будет экономически значительно более выгодным в странах, где пальмовое масло производится в избытке, а средняя цена одного литра дизельного топлива составляет около 1,5-2\$.

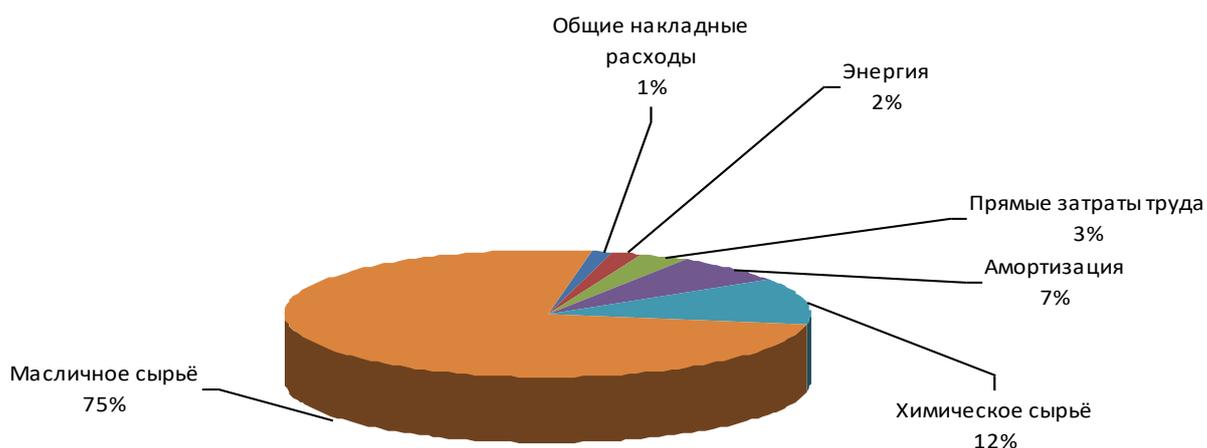


Рисунок 1.1 - Общая разбивка расходов по изготовлению биодизеля [114].

Растительные масла – это жиры семян или плодов различных растений, полученные прессованием или извлечением с помощью растворителей. Растительные масла состоят на 95-97% из триацилглицеринов – органических соединений, сложных полных эфиров глицерина, а также моно- и диацилглицеринов. Ацилглицерины, в свою очередь, содержат в своем составе молекулы различных жирных кислот, связанных 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

химической связи, 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 (C_{16} и C_{18}). Кроме того, в растительных маслах в небольшом количестве присутствуют жирные кислоты с нечетным числом атомов (C_{15} - 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 ($\rho=900-1000$ кг/м³) и вязкостью (60-100 мм²/с при 20⁰С и 30-40 мм²/с при 40⁰С) и сравнительно невысокой температурой самовоспламенения.

Жидкие растительные масла, в свою очередь, делятся на высыхающие (льняное, конопляное, тунговое), полувсыхающие (маковое, хлопковое, соевое, подсолнечное, рапсовое, пальмовое) 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 исключает их использование в бензиновых двигателях. Но они могут успешно применяться в качестве топлива для дизельных двигателей. Этому способствует сравнительно невысокая термическая стабильность растительных масел и приемлемая температура их самовоспламенения (280-320⁰С), ненамного превышающая температуру самовоспламенения дизельных топлив (230-300⁰С). При этом ЦЧ различных растительных масел изменяется в пределах от 33 до 50 единиц, что сопоставимо с ЦЧ дизельных топлив [33, 227].

Выбор сырья для производства определенного вида биодизельного топлива зависит прежде всего от наиболее распространенных масличных культур, произрастающих в данной местности; экономических, материальных и трудовых ресурсов для поддержания посевных площадей масличных культур и

природно-климатических условий сельскохозяйственных районов. Эти параметры влияют на возделывание каждого вида сырья.

По оценке FAO, к 2030 г. при повышении спроса на растительные масла в пищевой промышленности и энергетике их мировое потребление и производство будет в два раза больше, чем в 2000 г.. В течение последних лет наблюдается рост производства растительного масла. Значения среднегодовых приростов колеблются от 0,8 до 8,6%, а средний показатель прироста объемов производства с 2000 г. составляет 4,8% [219].

Мировое производство основных растительных масел показано на рисунке 1.2. Лидерами на мировом рынке производства дизельного биотоплива являются четыре вида растительного масла: пальмовое, соевое, рапсовое и подсолнечное. В странах Европы наиболее популярны в данном сегменте рапсовое и подсолнечное масла, в США – соевое масло, в странах с тропическим климатом – пальмовое масло.

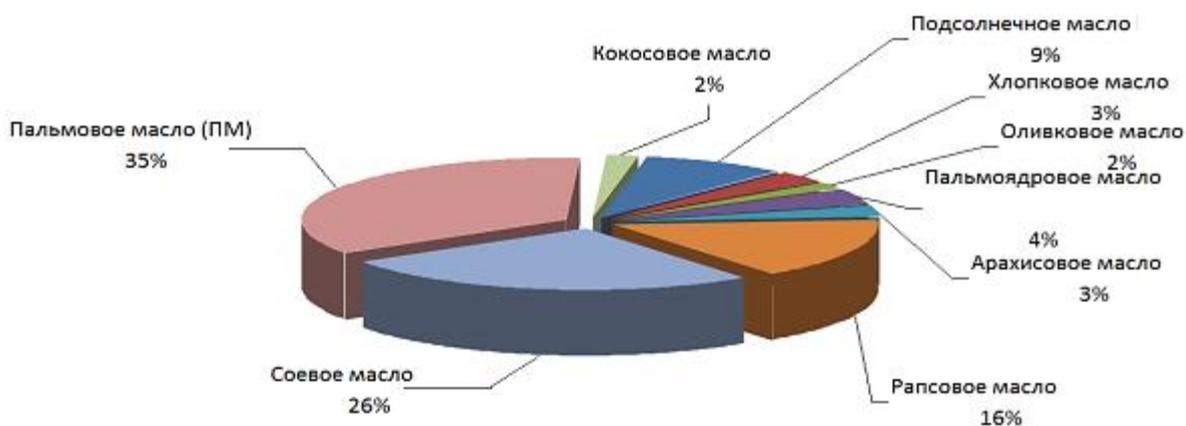


Рисунок 1.2 - Мировое производство основных растительных масел [219]

Сырье для биодизельного топлива можно разделить на четыре категории: пищевые масличные, непищевые масличные, отходы или использованные масла и животные жиры. Физический и химический анализ свойств пищевого и непищеворастительного масла как сырья являются очень важными для оценки их эффективности в будущем при производстве биодизельного топлива.

Источником растительных масел являются масличные растения, содержащие в различных своих частях растительные жиры. Жирные кислоты,

являющиеся основными компонентами биодизельного топлива, представляют собой высокомолекулярные кислородосодержащие соединения с углеводородным основанием. По своей химической структуре они схожи с углеводородами, входящими в состав нефтяного дизельного топлива.

Жирно-кислотный состав растительного масла как основы для конкретного биодизельного топлива зависит от сорта сельскохозяйственной культуры, места произрастания, способа извлечения масла и его очистки, при этом содержание в однотипных растительных маслах различных жирных кислот может изменяться в достаточно широких пределах.

1.3 Общие требования к топливам. Соответствие смесевых топлив стандартам для дизельных топлив

Применение нетрадиционных моторных топлив для сельскохозяйственных машин становится экономически перспективным для большинства стран мира, импортирующих нефтяные энергоносители. Моторные топлива, полученные из нетрадиционных видов сырья, называют альтернативными моторными топливами.

Альтернативные топлива могут быть жидкими и газообразными, которые по физико-химическим свойствам, в том числе, агрегатному состоянию, могут быть использованы в двигателях внутреннего сгорания.

Альтернативные топлива делят на три группы:

- газообразные;
- жидкие;
- твердые.

Жидкие виды топлива подразделяются на три вида – спиртовые, масляные и эфиры.

Процесс массового внедрения альтернативных видов топлива (АВТ) неизбежен, так как определяется объективными причинами ограниченности запасов нефти в мире и возрастающими требованиями к экологичности и эффективности использования энергоресурсов [134, 142, 148, 162, 182].

Наибольшие перспективы, особенно для России, имеют те АВТ, исходную основу которых составляет природный газ. Как моторное топливо массового использования, природный газ имеет наилучшие перспективы.

Кроме того, в России проводятся исследования рапсового масла и продуктов его переработки [32, 33, 34, 60]. В Приказе Минсельхоза России от 25.06.2007 года №3421 одним из приоритетных направлений развития аграрной науки и научнообеспечения АПК в области механизации, электрификации и автоматизации названа разработка оборудования, работающего на возобновляемых источниках энергии, в том числе, на биотопливе. Дополнительно Федеральным законом от 04.11.2014 г. №339-ФЗ внесены изменения в статью 14 Федерального закона от 23.11.2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» [2, 4, 5, 205].

Пригодность топлив для использования в дизельных двигателях определяется их эксплуатационными качествами, оценка их базируется на определении влияния физико-химических свойств топлив на мощностные показатели двигателя, динамику процесса сгорания, экономические и экологические характеристики [70, 83, 88]. Применение некоторых нетрадиционных топлив позволяет устранить и ряд недостатков, присущих нефтяным топливам.

К физико-химическим свойствам топлив относят: элементарный, фракционный и групповой углеродный составы, показатели воспламеняемости и самовоспламеняемости, теплотворная способность и низкотемпературные свойства, плотность и вязкость топлив.

Несмотря на их перспективное применение в дизелях, анализ данных и результаты перевода двигателя на эти топлива показывают, что различие их физико-химических свойств оказывают влияние на показатели работы дизелей. Смена одного топлива другим требует адаптивных мер по его дозировке для предотвращения чрезмерных изменений выходной мощности. Наиболее важными характеристиками топлива являются следующие: вязкость, точка (температура) кипения, смазывающая способность, плотность и точки

самовоспламенения [16, 17, 67, 70, 74, 125, 154, 210]. На двигателе и на системе впрыска топлива необходимо применять конструктивные меры, чтобы их характеристики были оптимально подобраны друг к другу.

Значительное влияние на показатели эффективности работы дизеля оказывают процессы топливоподачи (продолжительность подачи, давление впрыскивания, качественное распыление). Это касается двигателей с объемным и объемно-плёночным смесеобразованием [40, 46, 86, 104, 105, 139, 164].

Кроме того, АВТ разделяют на облегченные и утяжеленные. При работе двигателя на облегченных топливах, с меньшей вязкостью и большей сжимаемостью, уменьшается производительность топливоподающей аппаратуры, что приводит к заметному уменьшению мощности дизеля. Большая смешиваемость облегченных топлив увеличивает запаздывание и продолжительность подачи, а их худшая воспламеняемость в КС дизеля влечет за собой увеличение периода задержки воспламенения. Уменьшается давление впрыскивания облегченных топлив, что приводит к ухудшению параметров процесса смесеобразования и увеличению неравномерности подачи топлива по цилиндрам.

АВТ утяжеленной фракции и топлива из масел также имеют определенные недостатки. Главным условием повышения эффективности применения утяжеленных топлив в дизелях является совершенствование методов и средств обработки топлива в эксплуатационных условиях путем применения более совершенных сепараторов, фильтров, химических присадок к топливам и к смазочным маслам. Не менее важны совершенствование конструкции дизелей и систем их топливоподготовки.

АВТ биологического происхождения в отличие от нефтяных топлив содержат значительно меньше углерода и больше кислорода. В связи с этим у них меньше теплота сгорания и, следовательно, больше объемный расход в двигателях. Биотоплива являются перспективными для решения в ближайшее время ряда проблем, связанных с использованием нефтяных топлив. Прежде всего, они являются возобновляемыми и производятся на

сельскохозяйственных землях, имеющих в большинстве стран. Кроме того, они являются биоразлагаемыми. Помимо перечисленного биотоплива имеют ряд преимуществ при использовании в двигателе:

- они практически не содержат серы (0,001% по массе), что снижает выбросы оксидов SO_x в отработавших газах (ОГ);
- при их использовании уменьшаются выбросы сажи;
- при сжигании биодизеля выделяется такое же количество углекислого газа CO_2 , какое было поглощено растениями при их росте (круговорот углекислоты), т.е., уменьшается вклад машинного парка в глобальный парниковый эффект;
- они не содержат бензол и полиароматические канцерогенные компоненты;
- они способны дополнительно смазывать трущиеся детали двигателя, что может способствовать увеличению срока службы двигателя;

К недостаткам биодизеля следует отнести то, что он имеет низшую теплоту сгорания ниже (почти на 15%), чем низшая теплота сгорания нефтяного ДТ.

В отличие от нефтяного дизеля, биотоплива состоят из метиловых эфиров растительных масел (МЭРМ) или этиловых эфиров растительных масел (ЭЭРМ). Как уже отмечалось, эти алкиловые эфиры обладают свойствами, близкими к свойствам дизельного топлива, что делает их предпочтительными по сравнению с растительными маслами, и имеют дистилляционные интервалы от $320^{\circ}C$ до $350^{\circ}C$, располагая их на уровне самых тяжелых фракций дизельного топлива.

В таблице 1.1 показаны в сравнении физико-химические свойства нефтяного ДТ, МЭРМ, рапсового масла, ПМ [125, 195, 224, 233, 235, 239].

Линия масличного производства (также их называют «сеть биодизеля») – так называемая линия переработки растительных масел в моторные топлива, от поставки исходного растительного сырья до продажи готового биотоплива, часто превращают рапсовое масло в его метиловый эфир.

Таблица 1.1 - Сравнительные характеристики нефтяного дизельного топлива и различных видов биодизеля

	ДТ	ЭРМ	ЭАМ	ЭПМ	ЭСМ	ПМ	ОМ	ХМ	КМ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	916	917	923	924	918	914	919	1069
Вязкость кинематическая, мм ² /с									
20 °С	3,8	75,0	81,5	65,2	-	-	-	-	-
50 °С		36,0	36,5	30,7	32,0	-	-	-	-
100 °С		8,1	8,3	7,4	7,7	8,6	8,4	7,7	19,9
Цетановое число	45	36	37	33	50	40	-	-	-
Количество воздуха, для сгорания одного кг вещества, кг/кг	14,3	12,6	11,2	11,1	12,5	12,7	-	12,5	-
Теплота сгорания низшая, Н _о , МДж/кг	42,3	37,3	37,0	37,0	37,0	37,1	-	-	-
Температура самовоспламенения, °С	250	318	-	320	318	315	285	316	296
Температура застывания, °С	-35	-20	-	-16	-12	+30	-12	-18	-27
Массовое содержание серы, %	0.20	0,002	-	-	-	-	-	-	-
Массовое содержание, % С	87,0	78,0	78,0	77,6	77,5	76,6	-	77,1	-
Н	12,6	10,0	12,3	11,5	11,5	12,0	-	11,7	-
О	0,4	12,0	9,7	10,9	11,0	11,4	-	11,2	-
Кислотность, мг КОН / 100 мл топлива		4,66	-	2,14	0,03	0,17	5,90	0,23	0,19
Коксуемость 10 %-ного остатка, %, не более	0,2	0,40	-	0,51	0,44	-	0,20	0,23	-

Добавка пятипроцентной доли биодизеля может быть смешена с нефтяным дизельным топливом без изменения конструкции двигателя. Такая смесь (до 7% добавки биотоплива) уже доступна во Франции, Германии и Австрии. В этих странах представлены отдельные топливозаправочные станции, содержащие чистый биодизель, который могут использовать только транспортные средства, оснащенные адаптированными к биотопливу двигателями. В Бразилии, США, Швеции, Франции, Испании смесевые топлива на основе этанола и бензина уже активно используются, и автомобильный парк адаптирован к работе на смесевых топливах.

Для ограничения негативного воздействия автомобильных выбросов на среду обитания человека национальные стандарты нормируют их концентрации (ПДК) в рабочей зоне и атмосфере, а также их массовые выбросы. Законодательные ограничения во всем мире становятся все более строгими к экологичности топлива и технологиям двигателей внутреннего сгорания. Эти причины явились толчком к модернизации дизельных двигателей.

В таблице 1.2 представлены требования евростандартов к содержанию вредных веществ в отработавших газах дизелей.

Таблица 1.2 - Нормирование вредных выбросов автомобилей с дизельными двигателями

Стандарт	Год введения	Выбросы			
		NO _x	CO	C _x H _x	Частицы
ЕВРО – 0	1988	14,4	11,2	-	-
ЕВРО – I	1993	-	2720	-	140
ЕВРО – II	1996	-	1000	-	100
ЕВРО – III	1999	500	640	-	50
ЕВРО – IV	2005	250	500	-	25
Стандарт	Год введения	Выбросы			
		HC+NO _x	NO _x	Частицы	
ЕВРО – V	2009	230	180	5	
ЕВРО – VI	2014	170	80	5	

На дымность тракторных и комбайновых ДВС в России действует ГОСТ17.202-98 [12]. В рамках деятельности по присоединению России к ОЭСР основные требования к экологичности дизельных топлив запаздывают на

5-6 лет. Использование биодизеля в качестве моторного топлива регулируется в России по европейским стандартам [1, 3, 21, 56, 63, 80].

1.4 Требования к системам впрыскивания дизельных двигателей

Дизельные двигатели классифицируются по типу впрыска и камеры сгорания, которыми двигатели оснащаются. Существуют два основных типа организации рабочего процесса. Непосредственный впрыск, который подразумевает все процессы, протекающие в неразделенных КС. Форсунки распыливают топливо непосредственно в основную камеру цилиндра. Дизели с разделенными камерами сгорания. Форсунки распыливают топливо во вспомогательную камеру, где происходит смесеобразование и начало горения. А затем газы попадают в основную КС. Это связано с тем, что насос высокого давления должен в определенный момент и в течение определенного интервала времени вытеснять в направлении каждой форсунки точный объем топлива через гидравлическую систему, оснащенную напорным клапаном, штуцером и трубопроводом высокого давления. Чтобы сделать это, необходимо выполнить определенные условия:

- режим дозирования должен очень точно соответствовать потребностям двигателя в зависимости от нагрузки. Он должен быть строгоравен для каждого цилиндра двигателя, впрыск должен быть выполнен в очень точное время;
- впрыскивание должно происходить в течение очень короткого промежутка времени и без последующей утечки;
- точность обработки деталей насоса, включая поршни и цилиндры, должна быть очень высокой;
- мгновенное давление может достигать очень высокого значения, ≥ 100 МПа;
- количество топлива в цилиндре сильно изменяется в зависимости от типа двигателя.

Однако хорошее распыливание топлива остается ключевым шагом для достижения качественного сгорания, как в обычных дизельных двигателях, так

и в более сложных агрегатах. Характеристики используемого топлива (в первую очередь его ЦЧ, вязкость, поверхностное натяжение, температура парообразования, напряженность пари др.) значительно изменяют характеристики струи: угол распыливания и глубину проникновения, которые являются хорошими показателями интенсификации смесеобразования в предкамере. Изменения в физико-химических свойствах топлива приводят к изменению динамики смесеобразования и, соответственно, времени самовоспламенения.

Другие свойства топлив, такие как скорость распространения волны, важны, поскольку они оказывают непосредственное влияние на время, необходимое для установления давления в линии высокого давления, объема топлива, который должен циркулировать вдоль линии впрыска до сопла форсунки.

1.5 Повышение эффективности использования альтернативных топлив для дизельных двигателей

1.5.1 Виды альтернативных топлив для дизельных двигателей и особенности их применения

В настоящее время топливно-энергетические и экологические проблемы являются наиболее актуальными и глобальными. Они связаны с нехваткой и подорожанием ископаемых энергоресурсов. Именно исчерпание последних при условии их неэффективного использования и ухудшение качества окружающей среды являются важнейшими составляющими современного топливно-энергетического кризиса [69, 116, 151].

Перспективными АВТ являются для России, стран ЕС и США природный газ, синтетические моторные топлива (СМТ), в том числе спиртовые, водород, которые могут использоваться как основное топливо, так и в качестве высокоэффективных добавок к горючим смесям или необходимых компонентов при производстве СМТ.

Экономический анализ топливно-ресурсной проблемы позволяет прогнозировать необходимость эффективного потребления нефти. Например, для стран Европы, включая Российскую Федерацию, природный газ имеет относительно низкую энергетическую стоимость (примерно в 2 раза ниже стоимости современных бензинов). Исходя из оценки имеющихся запасов и стоимости природного газа, его следует рассматривать на ближайшие десятилетия как наиболее перспективное топливо для автомобильного транспорта, особенно эксплуатируемого в крупных городах [47, 48, 54, 69].

Удельная стоимость производства СМТ по традиционным технологиям пока выше энергетической стоимости природного газа. В более чем 60 странах мира на природном газе работает примерно 10 млн. автомобилей. Мировым лидером является Аргентина (более 1 млн. автомобилей на природном газе). Ежегодное потребление природного газа таким количеством машин требует повышения его запасов в этих странах (при современном уровне потребления). По оценкам, природного газа хватит примерно на 60 лет [47].

Особенность газообразных топлив, таких как, диметиловый эфир, природный и нефтяной попутный газы, биогазы, водород, аммиак, ацетилен и т.д. заключается в том, что они находятся в одном агрегатном состоянии с окислителем – воздухом. Это облегчает организацию процесса смесеобразования, позволяет получить гомогенную топливовоздушную смесь, обеспечить ее полное сгорание, высокие экономические и экологические показатели двигателя, но при переводе дизельных двигателей на газообразные топлива, в их конструкцию, как правило, необходимо внести конструктивные изменения.

Наибольшее распространение в качестве газового топлива на транспорте получил сжиженный нефтяной газ. Пропан-бутановые смеси широко применяются на легковых и грузовых автомобилях, оснащенных бензиновыми двигателями, использование этого вида топлива в дизелях сдерживается плохим самовоспламенением в цилиндрах двигателя [47, 151].

Свойства диметилового эфира, как моторного топлива, отличаются от свойств ДТ. С учетом более низкой плотности и теплотворной способности для сохранения мощности дизеля, необходимо увеличить в 1,7-1,9 раза объемную цикловую подачу эфира. Для повышения эффективности использования этого типа топлива в двигателе появляется необходимость корректирования процесса топливоподачи, как по увеличению цикловой порции, так и по моменту начала подачи – углу опережения впрыскивания (УОВ). Для эффективной работы дизеля на эфире необходимо заново проводить оптимизацию рабочего процесса. Но и в этом случае создание универсального двухтопливного дизеля на базе существующих технических решений все же остается проблематичным.

Последние 10-15 лет изучались возможности применения этанола и метанола в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания. Положительным качеством этих топлив является возможность их получения из любого углеводородного сырья, в том числе из возобновляемых источников энергии (биомасса, отходы сельскохозяйственной деятельности и др.). Привлекает и наличие в составе этих веществ кислорода, что позволяет значительно улучшить показатели двигателей, работающих на этих альтернативных топливах.

На всех режимах УОВ спирта на 5-15° меньше УОВ дизельного топлива. На режимах полной нагрузки замена дизельного топлива метанолом или этанолом с корректированием характеристик топливоподачи не приводит к заметному изменению мощностных и экономических показателей. Для улучшения показателей дизеля с комбинированной системой топливоподачи используют две форсунки, установленные в головке цилиндров. Чтобы двигатель получил количество энергии, эквивалентное получаемой от дизельного топлива, количество подаваемого топлива для метилового спирта должно быть в 2,3 раза больше, а для этилового спирта – в 1,7 раза больше. Для предотвращения падения мощности двигателя из-за меньшей весовой подачи спирта, вызванной в основном его меньшей плотностью, корректируют топливоподачу.

Газовый конденсат (ГК) – это один из видов топлива широкого фракционного состава, пригодный для применения в дизелях. Конденсаты делят на две группы: легкие и тяжелые, что определяется месторождением топлива. Для повышения эффективности использования ГК требуется определение оптимального угла опережения подачи дизельного топлива, при обогащении всасываемого воздуха газовым конденсатом. ГК широкого фракционного состава, или конденсат, близкий к бензиновым фракциям, может быть использован в качестве ДТ с дополнительными регулировками топливной аппаратуры (по типу многотопливного двигателя). В результате исследований установлено, что перевод дизеля с ДТ на ГК среднего состава, максимальное давление впрыскивания снижается, продолжительность впрыскивания увеличивается. При сохранении неизменной цикловой подачи наблюдается запаздывание начала впрыскивания за счет большей сжимаемости ГК. Чтобы устранить эти недостатки необходимо изменять регулировки топливной аппаратуры и совершенствовать форсунки в зависимости от вида ГК.

Одной из возможностей, способных качественно изменить сложившуюся ситуацию в мировой транспортной энергетике, во многих странах мира считается переход к альтернативным топливам из растительного сырья. Работы по развитию такой альтернативной энергетики в настоящее время ведутся по разным направлениям в зависимости от страны. Ведущими мировыми автомобильными фирмами (Honda, Toyota, General Motors и др.) созданы и испытываются экспериментальные модели автомобилей на гибридных энергетических установках, в том числе, для биотоплив на основе растительного сырья и продуктов его переработки со спиртами, эфирами и другими альтернативными топливами, многокомпонентные смеси, водотопливные эмульсии, продукты утилизации отработанных смазочных материалов, топлива животного происхождения (животные жиры, рыбий жир, биогазы и другие). Альтернативное топливо на основе растительных масел может производиться более чем из 50 масличных культур [33, 34, 72, 74, 75, 115, 117, 125, 151]. Для его получения используются масла: подсолнечное, рапсовое, соевое, хлопковое, арахисовое, пальмовое и другие.

Выбор сельскохозяйственной культуры индивидуален для каждого региона и определяется соображениями доступности сырья для производства биодизеля, эффективности использования на автотранспорте, влияния на экономическое развитие стран. Это обстоятельство указывает путь развития энергетики будущего, особенно региональной и локальной.

1.5.2 Влияние чистых растительных масел на двигатель

Первоначально дизельные двигатели были разработаны для работы на арахисовом масле. Однако растительные масла имеют термофизические характеристики, которые не подходят для современных дизельных двигателей, имеющих в основном прямой впрыск. У растительных масел:

- высокая вязкость;
- высокая температура плавления;
- низкое ЦЧ;
- плохие физико-технические характеристики в холодном состоянии.

Эксперименты также показали снижение показателей работы дизельных двигателей из-за заметных отложений на форсунках, поршнях и других деталях двигателя при работе на растительных маслах. Поэтому для достижения нужных свойств необходима трансформация растительных масел.

Например, для современного дизельного двигателя непосредственное использование чистого рапсового масла приводит к следующим результатам:

- в два раза увеличивается эмиссия CO;
- выбросы суммарных углеводородов увеличиваются в 4 раза;
- выбросы суммарных оксидов азота NO_x сокращаются примерно на 25%, что обусловлено более низкой температурой сгорания;
- значительно (до 140%) увеличивается количество твердых частиц (ТЧ) в ОГ, альдегидов и кетонов – на 30-330%.

Вместе с тем использование предкамерного сгорания позволяет сократить выбросы, а также повысить эффективные показатели двигателя.

1.5.3 Влияние алкиловых эфиров на показатели дизельных двигателей

Алкиловые эфиры имеют характеристики, близкие к характеристикам ДТ (таблица 1.3). В случае метиловых эфиров их ЦЧ сравнимы с цетановыми числами нефтяных ДТ и соответствуют европейским и российским топливным стандартам.

Таблица 1.3 - Характеристики метиловых эфиров растительных масел [222]

Характеристика	МЭ рапсового масла	МЭ соевого масла	МЭ подсолнечного масла	МЭ пальмового масла	EN14214 спецификация
Цетановое число	50	48,1	49	54	≥ 51
Йодное число	111	133	134	45	≤ 120
Точка застывания, °С	-9	-3	-7	-13	

Цетановое число – это одномерное число, которое характеризует способность топлива быстро воспламеняться после достижения температуры самовоспламенения. Для обеспечения плавного хода горения в дизельном двигателе (умеренные тепловые и механические напряжения, модулируемый шум) требуется высокое ЦЧ.

Как правило, чем выше ЦЧ, тем лучше качество воспламенения топлива, и наоборот.

ЦЧ чистого топлива зависит от его структуры, ЦЧ смесового топлива зависит от характера компонентов смеси. ЦЧ увеличивается с длиной цепи молекулы топлива, а также с увеличением насыщенности молекулярной цепи.

Соединения, обнаруженные в биодизеле, такие как, метилпальмитат и метилстеарат, имеют высокое ЦЧ (85.9 и 101, соответственно) [226], в то время, как метилпальденат имеет очень низкое ЦЧ – 27,2. Сокращение выбросов NO_x связано с увеличением ЦЧ. Помимо высоких ЦЧ МЭРМ хорошо смешиваются с нефтяным дизельным топливом. Испытания на износ показали, что использование 2-5% объемных метилового эфира рапсового масла как добавки

к дизельному топливу значительно снижает износ металлических компонентов, непосредственно контактирующих с топливом.

Смесевое топливо, содержащее 5% объемных долей МЭРМ распределяется нормально, а добавка 30% объемных МЭРМ распределяется на определенных привязанных флотах.

Характеристики эфиров в холодном состоянии обычно приближаются к характеристикам дизельного топлива, но становятся более низкими в зимний период. Например, их более низкая теплотворная способность приводит к увеличению объемногорасхода МЭРМ по сравнению с ДТ для одного и того же пробега. Однако использование 5% МЭРМ в качестве добавки не требует изменений в конструкции двигателя. Исследования, проведенные [226], показали, что такой состав топливной смеси не влияет на характеристики сжигания и впрыскивания, на поведение тяги и на работу системы после их регулирования.

Несмотря на хорошую матрицу, согласованность продуктов и материалов, было отмечено увеличение расхода топлива в диапазоне 0,3%. Можно также отметить, что МЭРМ улучшает смазывающую способность десульфированных ДТ.

Также они положительно влияют на состав ОГ, выбросы твердых частиц (PM), несгоревших углеводородов и углекислого газа. В выбросах не содержатся оксиды серы и ароматические вещества. С другой стороны, более высокая температура горения способствует увеличению эмиссии оксидов азота. В целом, использование МЭРМ способствует сокращению выбросов парниковых газов. Но по сравнению с ЭЭРМ их влияние на окружающую среду значительно меньше. Испытания на реальных автомобильных двигателях Audi 80 Diesel с 4 цилиндрами, с непосредственным впрыском [235, 236] (2003 г.) показали это при анализе выбросов на содержание NO_x , CO, несгоревших углеводородов и PM, а также на разлагаемость в воде. Смесевое топливо, содержащее по 50% дизельного топлива и ЭЭРМ по сравнению со стандартным

ДТ показало сокращение выбросов на 1,2% для NO_x, 1,8% для CO, 18% для несгоревших углеводородов и 45% для PM.

Сложные метиловые эфиры жирных кислот имеют нестабильные характеристики при хранении. Как все масла и жиры, они медленно окисляются в присутствии кислорода воздуха. Состав топливных смесей изменяется непредсказуемым образом. Образующиеся при этом кислоты и коррозионные отложения могут повредить топливоподающий насос и систему впрыскивания двигателя. Поэтому стойкость биодизелей к окислению является важным критерием их качества и должна определяться на регулярной основе. Процесс окисления может быть отложен путем добавления антиоксидантов. Исследования, проведенные на различных смесях метиловых эфиров жирных кислот канадским институтом Imperial (2009), показали, что добавление таких веществ, как тетрабутилгидрохинон, смесь карболовой кислоты и стерических аминов, дает ограниченную возможность стабилизации смесевых топлив при хранении [51, 53]. Тем не менее, следует отметить перспективность МЭРМ и ЭЭРМ как заместителей дизельного топлива для автотракторных двигателей.

1.6 Анализ возможности использования растительных масел, включая пальмовое, как альтернативного топлива для дизельных двигателей

Для Африки и ряда стран, расположенных в тропической климатической зоне, перспективными видами альтернативных топлив являются растительные масла, особенно пальмовое [74, 75, 125]..

Особенность пальмового масла – это наличие в его составе достаточно большого количества кислорода (8–12%). Это приводит к некоторому снижению теплоты сгорания. Так, низшая теплота сгорания составляет 37,1 МДж/кг против 42-43 МДж/кг у дизельных топлив, практически не содержащих кислорода.

При работе на растительных маслах, а также на эфирах этих масел в чистом виде, так и на смеси с ДТ, есть необходимость адаптировать

топливоподающую аппаратуру и двигатель в целом к этому виду топлива. Значительное влияние на характеристики распыливания топлива оказывает коэффициент поверхностного натяжения. Растительные масла имеют поверхностное натяжение больше, чем у ДТ. При нормальных атмосферных условиях ($t=20^{\circ}\text{C}$, $P=0,1\text{МПа}$) коэффициент поверхностного натяжения ДТ равен $\sigma=27,1\text{ Мн/м}$, рапсового масла $\sigma=33,2\text{ Мн/м}$.

Указанные особенности физических свойств растительных масел и топлив на их основе (высокие плотность и вязкость) являются причиной увеличения их цикловой подачи и часового расхода по сравнению с ДТ.

Увеличение длины струи распыливаемых биотоплив усугубляется их худшей самовоспламеняемостью (увеличением периода задержки воспламенения).

Другой проблемой является ухудшение качества процесса смесеобразования. Это обусловлено параметрами физико-технических свойств масел, перечисленных выше. Эти же проблемы характерны и для пальмового масла как сырья для биодизеля. Для улучшения качества смесеобразования при работе на биотопливах предлагается использовать различные конструктивные изменения в системе впрыска дизельного двигателя [52, 147].

В принципе возможность использования альтернативных топлив в качестве ДТ известна давно. Трудность использования альтернативных топлив для дизелей связана с их различной плотностью. Это приводит к увеличению или к уменьшению периода задержки воспламенения. При увеличении задержки воспламенения увеличивается скорость нарастания давления («жесткость» работы дизеля). Существует много способов регулировки топливной аппаратуры при работе дизеля на нетрадиционных топливах. Прежде всего, увеличивают или уменьшают ход рейки и, соответственно, объемную цикловую подачу, обусловленную значением плотности и вязкости топлива, по сравнению с дизельным топливом. Кроме того, соответственно изменяется и угол опережения впрыскивания топлива. Это позволяет корректировать длину и ширину струи.

Для достижения наилучшей подачи биотоплива на основе растительных масел в КС и повышения ресурсов двигателя необходимо устранять недостатки растительных масел, обуславливающие вязкость.

Одним из путей является изменение показателя поверхностного натяжения масел, т.е., получение топлива со свойствами, полностью отличными от свойств исходного сырья в ходе химической переработки – переэтерификации [33, 44, 58, 107, 151, 165], или так называемое получение биодизельного топлива. Следует отметить, что технология производства биодизельного топлива из пальмового масла путем переэтерификации достаточно сложна и затратна. Необходимо специальное дорогостоящее оборудование, реагенты (метиловый спирт и щелочь) и высококвалифицированные кадры.

Вторым, более доступным и простым способом использования пальмового масла является разбавление его дизельным топливом. Смесевое дизельное топливо по физико-техническим показателям занимает промежуточное положение между растительным маслом, ДТ и МЭРМ [33, 34, 36, 64, 72, 74, 75, 78, 108, 125, 159, 212].

К факторам эффективности использования смесевых ДТ в АПК следует отнести:

- возобновляемость;
- экологичность (выбросы сокращаются: оксидов азота на 15-20%, сажи на 30-35%, оксидов углерода на 10-15%) [33, 113, 237];
- экономия ДТ;
- повышение смазочных свойств топлива;
- использование топлива без конструктивных изменений двигателя;
- повышение ресурса двигателя;
- поддержание аграрного сектора;
- использование и получение экономии при внутрихозяйственном способе производства.

Недостатками смесевых топлив являются:

- повышенная вязкость и коксуемость;
- засорение топливных фильтров;
- незначительная потеря мощности (до 10 %);
- повышенный удельный расход топлива (на 7-11 %);
- агрессивность по отношению к резиновым деталям;
- расслоение на исходные составляющие.

Таким образом, для широкого использования смесевых ДТ необходимо устранить существующие недостатки, сдерживающие его использование.

Несмотря на большой опыт конвертации дизелей для перевода на биотопливо общепризнано, что каждый новый тип двигателя, подвергаемый такой конвертации, должен быть испытан с целью проверки эффективных, экономических и экологических показателей и выявления возможных проблем.

Многие исследователи анализировали влияние физико-химических показателей биодизеля на параметры и эколого-эксплуатационные характеристики дизеля транспортных средств. По мнению экспертов, повышение по сравнению с ДТ плотности на 10% и кинематической вязкости в 1,5 раза способствует увеличению на 14% дальности топливного факела и возрастанию диаметра капель распыленного топлива, что может привести к ухудшению попадания биодизеля на стенки КС и гильзы цилиндра. Меньший коэффициент сжимаемости биодизеля обеспечивает увеличение угла опережения впрыскивания топлива и максимального давления в форсунке. Высокое ЦЧ способствует сокращению периода задержки воспламенения и менее жесткой работе дизеля. Повышенная температура вспышки в закрытом тигле (120°C и более) обеспечивает высокую пожаробезопасность. Семенов В.Г., 2007, ZiejwskietKaufman (1983), Elsbell(1983), показали, что биодизель может воспламеняться безопасно в течение короткого времени сгорания [237, 240].

Наличие в молекулах биодизельных топлив на основе растительных масел кислорода ($\approx 8-12\%$) позволяет интенсифицировать процесс сгорания и обеспечить более высокую температуру в цилиндре дизеля, что, с одной

стороны, способствует повышению индикаторного и эффективного КПД двигателя, а с другой – приводит к увеличению оксида азота NO_x в отработанных газах. Меньшая доля углерода (77%) в молекуле биодизеля приводит к уменьшению на 13–15% его низшей теплоты сгорания и повышению часового и удельного эффективного расхода топлива.

Для сохранения номинальных параметров двигателя при переводе на биодизель требуется регулировка топливной аппаратуры на увеличение цикловой подачи топлива. При эксплуатации дизелей на биодизельном топливе необходимо перед началом работы промыть фильтры грубой и тонкой очистки топлива. Из-за повышенной агрессивности последнего требуется сменить топливные шланги и прокладки на устойчивые к биотопливу, а также тщательно удалить попавшее на лакокрасочные покрытия топливо. В некоторых случаях требуется более частая смена моторного масла из-за возможного разжижения попадающим в него биодизелем.

При этом скорость формирования топливно-воздушной смеси определяется как тонкостью распыливания, так и интенсивностью его испарения и диффузии в сжатый воздух. Для достижения требуемого качества процесса смесеобразования топливо должно обладать заданным фракционным составом, это – один из важнейших показателей эксплуатационных свойств топлив для двигателей внутреннего сгорания.

1.7 Экологические проблемы при использовании пальмового масла в качестве топлива для дизельных двигателей

Дизельные двигатели играют существенную роль в загрязнении окружающей среды. В крупных городах они являются одним из главных источников токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Оценивая темпы развития мирового и регионального парка транспортных средств, следует отметить, что целесообразность использования нетрадиционных топлив в транспортных системах различных регионов мира становится очевидной.

В настоящее время в атмосферу ежегодно выбрасывается более 25 млн. тонн углекислого газа, а к 2020 году ежегодные выбросы CO_2 в атмосферу достигнут 35млн.тонн. Известно, что при повышении количества углекислого газа в атмосфере создается парниковый эффект, приводящий к так называемому тепловому загрязнению окружающей среды.

С точки зрения снижения парникового эффекта важным фактором является невозобновляемость запасов нефти, природного газа и других полезных ископаемых.

При использовании топлив из сырья растительного происхождения достигается кругооборот углекислого газа и кислорода в атмосфере, поскольку при сгорании топлив растительного происхождения выделяется примерно такое количество CO_2 , которое было потреблено из атмосферы растениями за период их жизни.

Использование биотоплив позволяет не толькообеспечить кругооборот углекислого газа и кислорода в атмосфере, но и уменьшить выбросы в атмосферу с ОГ двигателей внутреннего сгорания основных токсичных компонентов – монооксида углерода CO , несгоревших углеводородов C_nH_m и твердых частиц на величину до 50%.

Важный аспект использования биотоплив – возможность заметного улучшения экологических характеристик, как самих топлив, так и двигателей в которых они сжигаются.Применение биодизельного топлива позволяет снизить выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Для дизелей с вихревой камерой (предкамерой) и непосредственным впрыскиванием снижение CO составляет: CO – 12(10) %, C_nH_m – 35 (10) % РМ (твердые частицы) – 36 (24)%, сажа – 50 (52)%. Некоторое увеличение выбросов NO_x можно компенсировать уменьшением действительногоУОВ топлива, рециркуляцией отработавших газов, подачей воды на впуске [33, 147, 151, 156, 173, 180, 186, 187].

Возможно некоторое увеличение шума и дымности при холодном пуске, при пониженных температурах. Требуется применение депрессорных присадок. Необходимо контролировать содержание воды в биодизеле (из-за его большой

гигроскопичности), чтобы избежать опасности развития микроорганизмов, образования перекисей и коррозионного воздействия воды, в том числе и на элементы топливной аппаратуры.

Некоторые исследователи пишут, что биотоплива, предназначенные для использования в дизельных двигателях должны за минимальный период сформировать в КС топливно-воздушную смесь, обеспечивающую легкое воспламенение, плавное и достаточно полное сгорание с минимальным содержанием РМ, токсичных и канцерогенных веществ в ОГ.

Биодизели по характеристике имеют следующие свойства: биоразлагаемость, нетоксичность, они не загрязняют окружающую среду, имеют высокую точку вспышки и хорошо смешиваются с дизельными топливами, их характеристики, их характеристики соответствуют характеристикам нефтяного ДТ.

1.8 Производственные, экономические и социальные предпосылки использования пальмового масла в качестве топлива для дизельных двигателей

Спрос на нефть в мире продолжает увеличиваться, с этим связаны экологические проблемы. Между тем, на фоне истощения невозобновляемых природных энергоресурсов становится очень важным энергосбережение и применение альтернативных топлив. Это также актуально как с точки зрения соответствия дизелей современным экологическим требованиям, так и с точки зрения возможности для развития экономики стран-производителей альтернативных топлив, в т. ч. ПМ.

Из этого следует, что уже через несколько лет приоритетом для обеспечения энергоносителями станет моторное топливорастительного происхождения. ПМ является перспективным в качестве возобновляемого топлива среди растительных топлив, как по техническим, так и по экономическим причинам в условиях мирового рынка. В странах, где оно

находится в изобилии, оно послужит одним из катализаторов развития экономики.

Из четырех видов растительного масла (пальмовое, соевое, рапсовое, подсолнечное), которые конкурируют на мировом рынке как основа сырья для получения моторных топлив растительного происхождения, ПМ является наиболее перспективным и привлекательным. Его производство на протяжении последних 10 лет заметно увеличилось в сельскохозяйственном секторе. В перспективе возможно 12-кратное увеличение производства по сравнению с существующим [126, 130, 223].

Среди основных видов масел для получения дизельных моторных топлив ПМ несет в себе большое количество преимуществ – экологических и экономических: оно высоко-кислородсодержащее, имеет хорошие смазывающие свойства, его цена на рынке низкая, производство и выращивание культуры в тропических регионах достаточно легки.

Пальмовое масло является растительным маслом, получаемым из мясистой части плодов масличной пальмы. Масло из семян – плодов пальмы называется пальмоядровым маслом. Плод (пульпа) масличной пальмы содержит от 40% до 50% пальмового масла и 20% волокна. Ядро плода пальмы содержит около 63% масла. Процент содержания масла зависит от сорта масличной пальмы. Род деревьев *Elaeis* семейства пальмовые (*Arecaceae*), состоит из трех видов:

- 1) *Elaeis guineensis* Jacq – масличная пальма, или Африканская масличная пальма; родом из Африки, натурализована в странах Азии с тропическим климатом (Шри Ланка, Индия, Малайзия), а также на острове Мадагаскаре;
- 2) *Elaeis Oleifera cortes* – Американская масличная пальма – вид, произрастающий в Южной Америке;
- 3) их гибрид *Tenera* (Т), отличается высокой урожайностью.

Родом из Африки, масличная пальма выращивается в Малайзии (44%), Индонезии (36%), Таиланде и других странах Азии. В Африке растение культивируется в Нигерии (6%), Кот-д'Ивуаре, Камеруне – (1%), Бенине, Гане

(1%) и ДР Конго – (1%). В Центральной и Южной Америке – в Колумбии (2%), Аргентине, Бразилии, Эквадоре (1%) [74, 75, 227, 240].

В этих странах преобладают удовлетворительные погодно-климатические условия для возделывания масличных культур, в том числе масличной пальмы. Таким образом, в странах с благоприятным климатом, например, в Индонезии, Малайзии, Аргентине и Нигерии объем производства ПМ значительно выше уровня его потребления. Температура воздуха в этой зоне изменяется от 24°C до 28°C. Много дождей в год (1500-3000 мм), длинная дождливая погода не менее 3 месяцев.

В Малайзии и Индонезии, где условия выращивания масличной пальмы являются идеальными, Элаис гвиненсис может производить 10-35 т плодов с гектара. В некоторых тропических регионах Азии производительность зрелой масличной пальмы может достигать 45 тонн плодов с гектара в год. В тропических странах, где холоднее, по сравнению с другими странами, в Кении, например, урожайность масличной пальмы вида тенера (Tenera) более высокая, но этот вид производит очень мало плодов по сравнению с другими (4 т/га в год), однако хорошо адаптирован к местным климатическим условиям [37, 228].

Пальмовые деревья начинают плодоносить после 5-6 лет и продолжают давать плоды в течение последующих 20 лет. Количество получаемого из плодов масла составляет 3,0-4,5т/га, кроме этого дополнительно из ядер получают 0,45-3,0т/га масла.

Сбор ПМ на 1га почти в 10 раз выше, чем соевого. Большинство масличных культур являются однолетними, сбор урожая носит сезонный характер. Пальма плодоносит много лет, давая два урожая в год.

Средний урожай масличных пальм в Индонезии с гектара: – 3,2 тонны масла, 0,4 тонны ядрового масла и 0,42 тонны жмыха.

ПМ помогает развитию многих секторов сельского хозяйства и промышленности, защите лесов, в частности, путем сохранения лесов в речных районах и на крутых склонах, или путем установки боковых областей лесов высокой природоохранной ценности и биоразнообразия.

В состав ПМ входят одиннадцать жирных кислот, среди которых наиболее представительными являются пальмитиновая (в среднем на 40%), олеиновая (38%), линолевая (10%), стеариновая (4%), Температура воспламенения ПМ составляет 260-300⁰С, коксуемость – 1,3%, йодное число – 57, плотность при 21⁰С – 898 кг/м³, динамическая вязкость при 21⁰С – 88,6 спз, теплота сгорания – 39,54МДж/кг.

Но место происхождения может влиять на состав и свойства сырья. Это было замечено в одной из лабораторий США в 1932 г. [228], где были проанализированы два вида ПМ из разных регионов происхождения. Один – из Суматры (Индонезия), а другой – из Нигерии (Африка). Первый вид масла показал содержание 6% свободных жирных кислот, йодное число находилось между 10 и 18, плотность 913 кг/м³, содержание воды 1,7%. Второй вид (нигерийский) содержал 45% свободных жирных кислот и дополнительные компоненты по отношению к суматранскому образцу, глицериды, линоленовую и линолевою кислоты, йодное число оказалось между 126 и 134, плотность 905 кг/м³ и содержание воды 1,5%.

В тропических областях Африки, Южной Америки и Азии эти растения показывают хорошую урожайность, что позволяет местному населению возделывать культуру масличной пальмы, создавать корпорации и инвестировать в посевные площади, развивать сельскохозяйственное производство. При этом население получает поддержку государства.

Мировое производство ПМ на период 2010-2011 гг. составило 47,9 млн. т, при котором Индонезия производила 49%, Малайзия – 38%, Тайланд – 2,5%, Нигерия – 1,8%, Колумбия – 1,5%.

Мировое производство ПМ на период 2010-2011 гг. составило 47,9 млн. т, при котором Индонезия производила 49%, Малайзия – 38%, Тайланд – 2,5%, Нигерия – 1,8%, Колумбия – 1,5%.

Общее мировое производство пальмового масла в 2018-1919 годах оценивалось Министерством сельского хозяйства США в 73,9 млн тонн.

Прогнозируется, что это число возрастет до 75,7 млн тонн в 2019-20 годах [112].

Также ожидается рост спроса на ПМ для производства биодизеля – до 17,5 млн. тонн, и превысит уровень 2018 г. При этом объем использования ПМ в биодизельной промышленности Индонезии за год увеличится с 5,37 млн. тонн до 8,1 млн. тонн, в странах ЕС – с 4,05 до 4,1 млн. тонн, в Малайзии – с 1,09 до 1,32 млн. тонн [37, 208]

В структуре мирового потребления растительного масла ПМ доминирует на рынке промышленного масла как главное масличное сырье из тропических стран, также как рапсовое и подсолнечное масла доминируют на рынке масла в Европе, а соевое масло и животные жиры в США.

В прогнозах на 2035 г. ПМ рассматривается как наиболее перспективное сырье для развития биоэнергетики и вызывает интерес как высокоэнергетический компонент, который способен компенсировать спрос на основное сырье по производству биодизельного топлива в странах Евросоюза и в мире, когда рапсовое, соевое и подсолнечное масла будут в недостаточной степени удовлетворять спрос при производстве биодизельного топлива на мировом рынке в том числе и по сравнению цен на разные виды масла (см. таблицу 1.4).

Таблица 1.4. Сравнительная стоимость производства разных видов масла

Масло	Стоимость (доллар/т)	Страна/регион
Пальмовое	228	Малайзия
Соевое	400	США
Рапсовое	648	Канада
Рапсовое	900	Европа
Подсолнечное	435	Россия

С точки зрения экономики, ПМ является более выгодным для промышленности, так как требует меньше затрат энергии и труда для получения одной тонны масла, по сравнению с такими сельскохозяйственными культурами, как соя и рапс.

Во-первых, масличная пальма выращивается по коммерческим причинам – производства пищевого масла. Во-вторых, она является наиболее продуктивным источником технических растительных масел. Отличием извлечения от оливкового, кокосового является то, что ПМ извлекается как из мякоти плодов, так и из семян. Все масличные деревья дают более высокий урожай в относительно умеренном климате.

Для применения ПМ в качестве альтернативного топлива в чистом виде необходимо решение проблем, связанных с его прокачиваемостью по топливной системе и распыливанием, так как при температуре ниже 30⁰С оно теряет подвижность, поэтому целесообразно использование ПМ в смесях с дизельным топливом (ДТ) либо в виде сложных эфиров, получаемых при обработке этого масла этанолом или метанолом. Эти топлива имеют лучшие характеристики текучести и распыливания. Во время извлечения ПМ имеет тенденцию терять качество при свободном контакте жирной кислоты с воздухом в течение первых двух часов. Содержание олеиновой и линолевой кислоты определяет степень кислотности и его склонность к окислению.

Некоторые авторы исследований утверждают [136, 174, 217, 231], что использование ПМ в чистом виде в качестве топлива для дизелей повышает отложение кокса на распылителях форсунок и других деталях КС. Увеличению нагарообразования способствует повышенная коксуемость в КС.

Недостатком ПМ, используемого в качестве топлива для дизельных двигателей, является низкая температура застывания, обусловленная, главным образом, наличием в составе ненасыщенных жирных кислот.

Сложный состав ПМ является причиной различий его физико-химических свойств с физико-химическими свойствами ДТ. Отличия физических свойств ПМ и топлив на его основе от свойств стандартных ДТ оказывает влияние на протекание рабочих процессов дизельных двигателей. В первую очередь это относится к процессам топливоподачи и смесеобразования. Эти процессы, в значительной степени определяются такими

физическими свойствами топлива как плотность, вязкость, сжимаемость, поверхностное натяжение [32, 33, 74, 119, 125, 152].

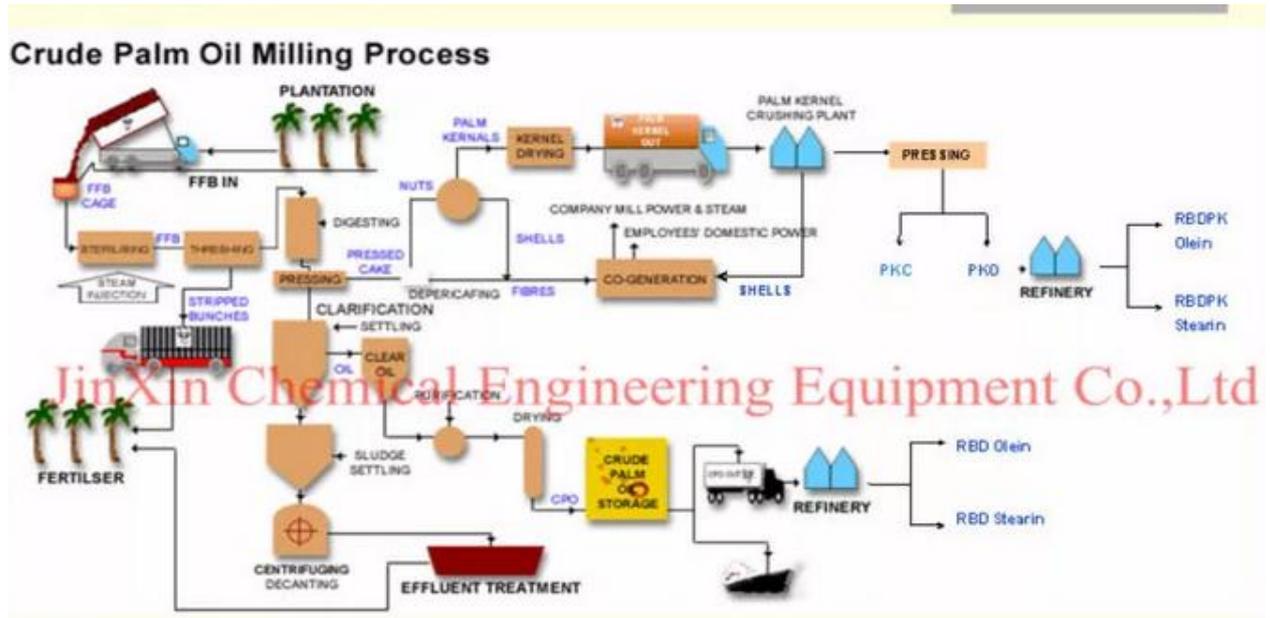


Рисунок 1.3 - Схема производства пальмового масла [223]

Главное преимущество ПМ как биодизельного топлива в том, что его, как и любое другое масло, можно смешивать с ДТ в любой пропорции и можно применять в дизелях без радикального изменения конструкции дизельного двигателя и инфраструктуры.

Что касается высокой вязкости ПМ, ее можно уменьшить физическими и химическими способами переработки: смешиванием, созданием микроэмульсии, пиролиза и трансэтерификации. Некоторые работы показывают, что смешивание 20-40% порции ПМ с ДТ дает хорошие результаты. Такое топливо влияет на ресурс двигателя в меньшей степени [32, 33, 36, 44, 73, 119, 120, 125, 141, 156, 157, 158, 201, 202]. В литературе описано много проведенных исследовательских работ, анализирующих производительность, воспламенение этого вида топлива (или смеси с ДТ) и эмиссию дизелей при использовании ПМ.

Все авторы работ по применению ПМ и его смесей с ДТ показали, что в исходном состоянии или в смесевом виде, ПМ в качестве моторного топлива позволяет уменьшить эмиссию PM, CH, CO, CO₂ из-за высокого значения ЦЧи большого содержания кислорода в нем. К недостаткам использования ПМ в качестве моторного топлива следует отнести плохое качество распыливания,

обнаружение отложений на компрессионных кольцах и впускных клапанах и их повышенный износ, что связано с физико-химическими характеристиками ПМ. Эти недостатки можно устранить путем применения водотопливных эмульсий, трансэтерификации ПМ, некоторых изменений в конструкции топливоподающей аппаратуры. Заметна также потеря мощности, увеличение удельного эффективного расхода топлива по сравнению с дизелем из-за низкой теплоты сгорания ПМ, а также увеличение выбросов NO_x из-за содержания в ПМ 10-12% кислорода (по массе) и более раннего и интенсивного воспламенения из-за высокого ЦЧ по сравнению с ДТ.

Выводы и задачи исследований

Проведенный анализ имеющихся на сегодняшний день исследований смесевых топлив с использованием растительных масел позволяет сделать следующие выводы:

1. ПМ и его смеси с ДТ в качестве топлива для дизелей являются хорошими кандидатами на роль возобновляемого энергоресурса для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин.
2. В первую очередь это связано с экономическими преимуществами, особенно для тех стран, в которых ПМ производится в изобилии.
3. Применение дизельного топлива с добавлением ПМ также не требует большой модификации конструкции дизельных двигателей.
4. Применение смесевого топлива с добавлением ПМ способствует улучшению экологических показателей двигателя.

Таким образом, можно предположить, что уже через несколько лет приоритетом для обеспечения энергоносителями станет моторное топливо растительного происхождения. ПМ является перспективным в качестве возобновляемого топлива, как по техническим, так и по экономическим причинам в условиях мирового рынка. В странах, где оно находится в изобилии, оно послужит одним из катализаторов развития экономики.

Сделанные выводы позволяют сформулировать цели и задачи исследования.

Целью исследования является определение влияния добавок ПМ на показатели работы дизельных двигателей и необходимости изменения регулировок топливной аппаратуры при эксплуатации дизельных двигателей сельскохозяйственных машин на смесевых дизельных топливах с добавлением ПМ.

Задачи исследования:

1. Определить физические свойства смесей ДТ с различным содержанием ПМ – плотность, вязкость, поверхностное натяжение, ЦЧ, коэффициент сжимаемости. Оценить стабильность топливных смесей.
2. На основе теоретических и экспериментальных исследований определить требуемые регулировки топливной аппаратуры при работе двигателя на дизельном топливе с добавкой ПМ.
3. Определить характеристики дизеля при переходе на дизельное топливо с добавлением ПМ.
4. Исследовать влияние добавок ПМ на дымность отработавших газов.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА

Нефтяное ДТ и ПМ хорошо смешиваются, что благоприятно сказывается на возможности использования таких смесей в качестве топлива для дизелей. Однако при этом необходимо учитывать существующие отличия в физических свойствах смесового и дизельного топлив.

Растительное масло более вязкое, имеет большую плотность. Это способствует увеличению диаметра капель распыленного в КС топлива и повышению дальности топливного факела. Данное обстоятельство может привести к увеличению количества топлива, попадающего на стенки КС [155].

Меньшее значение коэффициента сжимаемости ПМ может вызвать изменение динамики процесса подачи топлива в топливной системе и, например, увеличение действительного угла опережения впрыскивания топлива, т.е., более раннее впрыскивание топлива, увеличение максимального давления впрыскивания. Все это усложняет процессы смесеобразования и сгорания топлива.

При расчете процесса подачи топлива, в том числе и смесового, необходимо учитывать его сжимаемость в зависимости от давления, плотности и других параметров.

Оценить степень влияния содержания ПМ в смесовом топливе на показатели процесса топливоподачи (величина цикловой подачи, давление и продолжительность впрыскивания и другие) при переходе работы дизеля с ДТ на смесовое без оценки сжимаемости ПМ и его смесей невозможно.

Из-за физико-химических параметров и эксплуатационных свойств ПМ и его смеси требуют определенной конструкции системы питания, изменений в технологии эксплуатации двигателя. Эти параметры и свойства влияют на многие другие составляющие общего процесса технической эксплуатации автотранспорта и смежных с ним направлений.

Перевод транспортных средств на смесовое топливо вызывает не только изменение конструкции двигателей, но и необходимость проведения комплексных

мероприятий, связанных с особенностями таких транспортных средств (ремонт, хранение, приспособление ПТП, топливоснабжение, подготовка персонала и специалистов для выполнения необходимых работ). Значительная часть этих мероприятий является задачами технической эксплуатации и требует обеспечения дополнительными материальными средствами.

2.1 Планирование и организация экспериментального определения физических характеристик (стабильность, плотность, поверхностное натяжение, вязкость, ЦЧ, коэффициент сжимаемости) дизельных топлив с различным содержанием пальмового масла

Для определения физических свойств ДТ и его смесей с ПМ и оценки их влияния на показатели процесса подачи топлива был составлен план экспериментальных исследований, включающий в себя теоретические, лабораторные и стендовые эксперименты (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Общий план и методы исследований

	Теоретические	Лабораторные	Стендовые
Исследования	1.Обоснование методов и методик приготовления смесевое топлива. 2.Обоснование методов и методик определения физических свойств смесевое топлива с добавлением ПМ.	1. Изготовление топливных смесей из ПМ и ДТ. Подготовка топливных смесей. 2. Определение вязкости, плотности, поверхностного натяжения, ЦЧ в зависимости от температуры и композиций смесевое дизельного топлива с добавлением ПМ.	1. Определение коэффициента сжимаемости смесевое топлива в зависимости от композиции.

В лабораторных условиях готовились топливные смеси ПМ и нефтяного ДТ. Определение свойств каждого вида смесевое топлива повторялось три раза для каждого приготовленного образца. Полученные средние значения для смесевое и ДТ представлены в таблице 2.4.

Плотность смесевое топлива определялась по методике определения плотности нефти и нефтепродуктов по ГОСТ 3900-85 «Методы определения плотности нефти и нефтепродуктов» [6, 209, 238].

Поверхностное натяжение в зависимости от состава топливной смеси определялось с использованием тензиометра DST-30 по «Методическим указаниям к лабораторному практикуму по коллоидной химии «Методика определения поверхностного натяжения и абсорбции на границе жидкость-газ» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» [60].

Определения вязкости топливной смеси в зависимости от ее температуры и композиции, сырого ПМ и нефтяного ДТ проводились при температурах 50⁰С, 60⁰С, 75⁰С, 100⁰С по ГОСТ 1929-87 «Нефтепродукты. Методы определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре» [8, 24], в соответствии с ASTM D44, ISO 3104 и другими общепринятыми стандартами. Для измерения вязкости использовался вискозиметр типа Brookfield DV2TRVC.

ЦЧ топливных смесей в зависимости от объемного содержания пальмового масла определялось стандартным методом по ГОСТ Р 52709-2007 на установке CFRF-5 [16].

Одним из исходных параметров модели процесса топливоподачи, характеризующих физические свойства топлива, является коэффициент сжимаемости. Коэффициенты сжимаемости ПМ и его смесей с ДТ рассчитаны по методике проф. И.В. Астахова на основе измеренных величин скорости распространения импульса давления по длинному трубопроводу – местной скорости звука.

2.2 Методика приготовления топливных смесей из пальмового масла и дизельного топлива

Сырое ПМ, полученное способом прессования, было приобретено в ДР Конго, Африка, у местных несертифицированных производителей. ДТ было приобретено в г. Волгограде на автозаправочной станции.

ПМ и ДТ смешиваются очень хорошо, а для исключения стратификации после смешения, особенно смеси биотоплива растительного происхождения и ДТ, рекомендуется приближать вязкость этих двух компонентов, чтобы полученное смесевое топливо оставалось гомогенно со временем, и концентрационные пределы

его компонентов не изменялись при хранении. Для этого ПМ следует нагреть до 60-70 °С, чтобы снизилась его вязкость по отношению к вязкости ДТ. Необходимая кинематическая вязкость находится в интервале от 3 сСт до 8-9 сСт. Для получения образцов гомогенных топливных смесей ПМ перемешивалось с ДТ в течение 30 минут с соблюдением методики смешивания растительного масла и ДТ в соответствии с порядком работы в лабораторных условиях для изготовления смешанного топлива [232, 238].

Каждый образец подготовленной топливной смеси имел маркировку с указанием количества ПМ 10, 20, 30, 40, 50, 60% объемных на один литр топливной смеси (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 - Пальмовое масло, смешанные топлива (ПМ) и дизельное топливо (ДТ)

2.3 Стабильность дизельного топлива с добавлением пальмового масла

Большое значение для практического применения имеет физическая стабильность дизельного топлива с повышенным объемным содержанием ПМ в условиях длительного хранения.

В лабораторных условиях проводились контрольные измерения стабильности топливной смеси каждые 24 часа при температуре образцов 20⁰С. За критерий стабильности принималось время до появления визуальнонаблюдаемых изменений (осадка, расслоения или отстоя) в образце. Для оценки возможности длительного хранения проводились систематические

наблюдения за качеством (однородностью) опытного смесового топлива с добавлением ПМ, хранившегося в лаборатории при температуре окружающей среды, соответствующей летнему сезону (22°C) и зимнему сезону (20°C).

Всего было 6 проб смесового топлива в соответствии с объемным содержанием ПМ (№1 – ПМ10, №2 – ПМ20, №3 – ПМ30, №4 – ПМ40, №5 – ПМ50, №6 – ПМ60). В течение недели летнего сезона появление осадка (расслоение) проявлялось в пробе №6 (содержание ПМ 60%объемных). В течение недели зимнего сезона заметно появление осадка (расслоения) в пробах №5 (50%объемных ПМ) и №6. Для проб №1, №2, №3, №4 можно сказать, что при хранении в течение недели в помещении лаборатории с соответствующими физическими показателями внешней среды, качество топливных смесей практически не изменилось.

Таким образом, однородность (стабильность) исследованных образцов смесового топлива при хранении в эксплуатационных условиях получилась удовлетворительной. Организации специальных условий хранения для смесей ДТ и ПМ с содержанием 10, 20, 30, 40% объемных ПМ не требуется.

2.4 Методика определения плотности дизельного топлива с добавлением пальмового масла

Измерения плотности образцов смесового топлива, ДТ и ПМ проводились по ГОСТ 3900-85. Метод основан на определении относительной плотности – отношения массы испытуемого продукта к массе воды, взятой в том же объеме и при той же температуре. Так как за единицу массы принимают массу 1 см воды при температуре 4°C , то плотность, выраженная в г/см, будет численно равна плотности по отношению к воде при температуре 4°C .

Пикнометр, подготовленный по ГОСТ 3900-85, взвешивали и заполняли испытуемым продуктом с помощью пипетки при температуре $18-20^{\circ}\text{C}$, стараясь не задеть стенки пикнометра, не допуская возникновения пузырьков. Пикнометр закрывали пробкой, погружали до горловины в баню с температурой 20°C и выдерживали не менее 30 мин. Избыток продукта

отбирали пипеткой или фильтровальной бумагой. Уровень продукта в пикнометре устанавливали по верхнему краю мениска.

Пикнометр с испытуемым нефтепродуктом вынимали из бани, охлаждали при температуре, которая немного ниже заданной температуры, тщательно вытирали снаружи, удаляли статическое электричество и взвешивали. Результаты измерений показаны на рисунке 2.2.

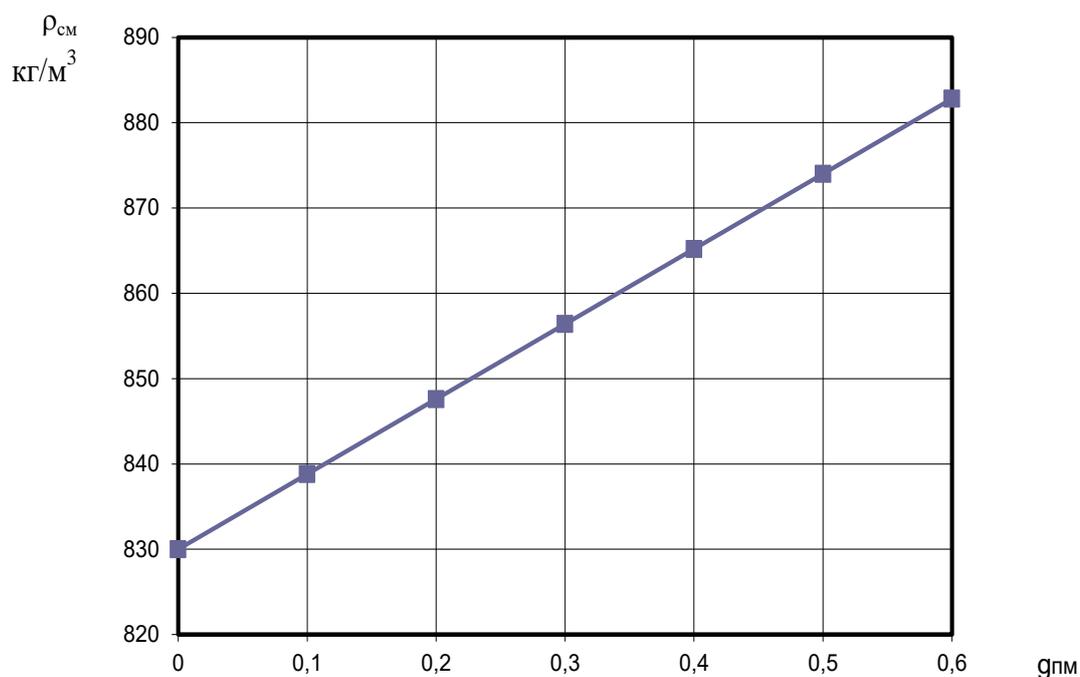


Рисунок 2.2 - Влияние состава смесевое топлива $g_{пм}$ на плотность смеси $\rho_{см}$ (кг/м³)

2.5 Методика определения поверхностного натяжения дизельного топлива с добавлением пальмового масла

Для измерения поверхностного натяжения использовался метод определения поверхностного натяжения и адсорбции на границе жидкость-газ с помощью тензиометра DST-30 (рисунок 2.3). Определение поверхностного натяжения в тензиометре DST-30 основано на методе отрыва кольца. Данный метод достаточно удобен, точен и прост, однако при его использовании необходимо соблюдать ряд условий [60]. В работе использовались готовые смеси ПМ и ДТ с содержанием ПМ от 0,1 до 0,6 объемных долей.

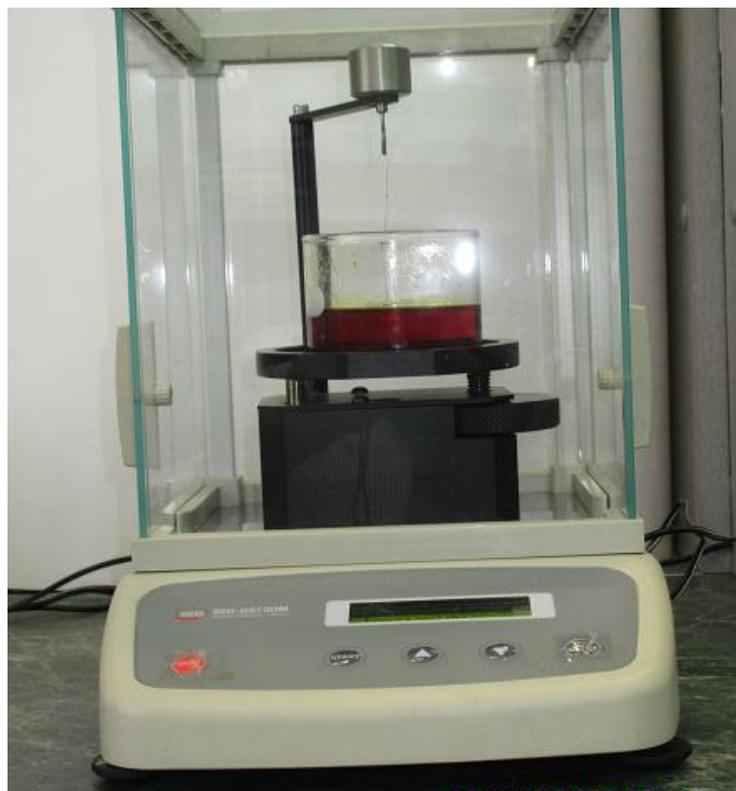


Рисунок 2.3 – Тензиометр DST-30

Измерения поверхностного натяжения начинались с чистого дизельного топлива, затем исследовались пальмовое масло и далее – образцы смесевых топлив при нормальных условиях. Определялись σ_0 и h_0 – поверхностное натяжение и высота капиллярного поднятия для стандартных жидкостей. Поверхностное натяжение σ вычислялось как:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{h \cdot \rho}{h_0 \cdot \rho_0}, \quad (2.1)$$

где h – высота капиллярного поднятия, м;

ρ – плотность топливной смеси, кг/м³;

ρ_0 – плотность стандартной жидкости, кг/м³.

Перед каждым измерением прибор тщательно промывался горячей водой. Опыт повторялся несколько раз для каждого образца. Определялись показатели поверхностного натяжения шести вариантов топливной смеси, пальмового масла и дизельного топлива при температуре помещения 25⁰С. Топливные смеси были нагреты до температур 50⁰С и 60⁰С.

2.6 Определение вязкости дизельного топлива с добавлением ПМ

Для решения проблемы повышенной вязкости смесового топлива [24, 146] используется предварительная подготовка ПМ-компонента для приближения вязкости смесового топлива к значениям вязкости чистого ДТ. Предлагается использовать подогрев смесового дизельного топлива. В этом исследовании подогревали ПМ (как добавку к смесовому дизельному топливу) до нужной температуры для приближения значений кинематической вязкости ПМ к значениям вязкости ДТ. Оптимальная температура нагрева ПМ для достижения соответствующей вязкости составляет 60–70⁰С. Это позволяет снизить вязкость сырого ПМ до значений 3–8 сСт, которые близки к вязкости чистого ДТ [238].

Для определения вязкости использован ротационный вискозиметр Brookfield DV2TRVC, его технические характеристики приведены в таблице 2.2.

Испытания проводились по ГОСТ 1929-87 «Нефтепродукты. Методы определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре». Были использованы образцы чистого ДТ, чистого ПМ и образцы топливных смесей со следующим содержанием сырого ПМ: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 объемных долей.

Таблица 2.2. Технические характеристики ротационного вискозиметра Brookfield DV2TRVC

№	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1	Вязкость	мПа·сек	100...40·10 ⁶
2	Погрешность	% п.ш.	±1,0
3	Воспроизводимость	%	±0,2
4	Скорость вращения	мин ⁻¹	0,1...200
5	Число ступеней		200

Пробу тщательно перемешивали и фильтровали через фильтровальную бумагу. Испытуемую смесь наливали в стакан, нагревали до 60-70⁰С и выдерживали при указанной температуре 15-20 мин, периодически помешивая. Нагретый стакан с пробой охлаждали до температуры окружающей среды без перемешивания.

Устройство для измерения вязкости подготавливали в соответствии с инструкцией по эксплуатации. Величину зазора в паре конус-плита проверяли после каждого отсоединения конуса от измерительного вала. Все детали измерительных устройств промывали растворителем, просушивали и собирали. Собранные измерительные устройства заполняли испытуемой пробой при температуре окружающей среды в соответствии с инструкцией по его эксплуатации. Перед проведением последующих испытаний удаляли влагу с рабочих поверхностей вискозиметра, когда их температура сравнивается с температурой окружающей среды.

Измерительное устройство соединяли с термостатом, охлаждали до температуры, указанной в нормативно-технической документации, со скоростью 1-2⁰С в минуту, выдерживали при этой температуре в течение 30 мин. Испытание проводили в соответствии с инструкцией по эксплуатации вискозиметра. Регистрировали угол относительного вращения внутреннего цилиндра или конуса при температуре и градиенте скорости сдвига, указанных в нормативно-технической документации.

За результат принимали установившееся значение, которое сохранялось неизменным в течение 1 минуты. Если значение не устанавливалось, то показание регистрировали через 3 минуты. Значение определяли с точностью до 0,5 деления шкалы прибора. Испытание повторяли на новой порции топливной смеси. За результат испытания принимали среднее арифметическое результатов двух последовательных определений.

Динамическую вязкость в Па·с вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{\tau}{D}, \quad (2.2)$$

где τ – напряжение сдвига, Па;

D – градиент скорости сдвига, с.

Напряжение сдвига в Па для цилиндрического измерительного устройства вычисляют по формуле

$$\tau = \frac{Z \cdot \alpha}{10}, \quad (2.3)$$

где Z – константа измерительного устройства, указанная в паспорте прибора, дин/см, · деление шкалы;

α – относительный угол вращения на блоке измерения, деления шкалы;

10 – коэффициент перевода константы измерительного устройства в единицы системы СИ.

Напряжение сдвига в паскалях для измерительного устройства конус-плита вычисляют по формуле

$$\tau = \frac{C \cdot \alpha}{10}, \quad (2.4)$$

где C – константа соответствующего конуса измерительного устройства, указанная в паспорте прибора, дин/см·деление шкалы;

α – относительный угол вращения на блоке измерения, деления шкалы;

10 – коэффициент перевода константы измерительного устройства в единицы системы СИ.

2.7 Определение цетанового числа дизельного топлива с добавлением пальмового масла

Экспериментально ЦЧ для чистого ДТ, чистого ПМ и их смесей (10, 20, 30, 40, 50, 60% объемных ПМ) определялось стандартным методом по ГОСТ Р 52709-2007 и ГОСТ 32508-2013 [16, 22] на установке CFRF-5XCP на российском предприятии. Технические характеристики установки приведены в таблице 2.3.

Полученные значения плотностей, поверхностного натяжения, вязкости и ЦЧ топливных смесей представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.3 - Технические характеристики установки CFRF-5 XCP

Параметр	Значение
1	2
Диапазон цетановых чисел	30...65
Степень сжатия	от 8:1 до 36:1
Количество цилиндров	один

1	2
Количество тактов	четыре
Диаметр цилиндра, дюйм	3,250
Ход поршня, дюйм	4,50
Рабочий объем, дюйм ³	37,33
Температура масла, °C (°F)	57±8 (135±15)
Температура цилиндра, °C (°F)	100±1,5 (212±3)
Температура впускного воздуха, °C (°F)	66±0,5 (150±1)
Температура топливной форсунки, °C (°F)	38±3 (100±5)
Давление масла, КПа (psi)	172-207 (25-30)
Скорость вращения двигателя, об/мин	900 ± 9
Угол опережения впрыска	13° до ВМТ
Задержка воспламенения	13° после ВМТ
Давление открытия форсунки, МПа (psi)	10,3±0,34 (1500±50)
Расход топлива, мл/мин	13,0

Таблица 2.4 - Физические свойства дизельного топлива и смесей с добавлением пальмового масла

Показатель	Дизельное топливо	ПМ	Биодизельная топливная смесь, ПМ, % об.					
			10	20	30	40	50	60
Плотность при 20 ⁰ С, кг/м ³ 50 ⁰ С, кг/м ³	830	918 907	838,8	847,6	856,4	865,0	874,0	882,8
Вязкость при 20 ⁰ С, сСт 50 ⁰ С, сСт 100 ⁰ С, сСт	3.8	37 8,6	4,37 4	4,84 4.7	5.7 5,31	8.3 5,78	11.1 6,25	12.8 6,72
Коэффициент поверхностного натяжения при 25 ⁰ С, мН/м	25	27.8	24.5	24.8	25.2	25.3	25.7	26.5
Цетановое число	50	40	48,6	47,4	46,1	45	44,4	43,8

2.8 Определение коэффициента сжимаемости дизельного топлива с добавлением ПМ

2.8.1 Методика определения коэффициента сжимаемости

При исследованиях обычно используется истинный (мгновенный) коэффициент сжимаемости или средний коэффициент сжимаемости [52, 99]. Истинный коэффициент сжимаемости $\alpha_{\text{ист}}$, получаемый путем измерения скорости звука в топливе, определяется относительным изменением объема $\Delta V/V$ при изменении давления ΔP и вычисляется в виде:

$$\alpha_{\text{ист}} = \frac{\Delta V}{VP}, \quad (2.5)$$

где V – начальный объем топлива;

ΔV – уменьшение объема топлива при повышении давления,

P – давление топлива.

Он характеризует изменение объема при данном давлении. Средний коэффициент $\alpha_{\text{ср}}$ сжимаемости определяется при изменении давления от атмосферного до выбранного верхнего предела. Он характеризует среднюю сжимаемость топлива в рассматриваемом диапазоне изменения давлений

$$\alpha_{\text{ср}} = \left(\frac{1}{V}\right) \cdot \left(\frac{\Delta V}{\Delta P}\right), \quad (2.6)$$

где V – начальный объем жидкости;

ΔV – уменьшение объема жидкости при повышении давления от атмосферного до P , кг/см²;

ΔP – относительное приращение давления. Он характеризует среднюю сжимаемость топлива в рассматриваемом интервале изменения давления.

Основное влияние сжимаемости топлива на процесс топливоподачи выражается зависимостью приращения давления ΔP при сжатии от $\alpha_{\text{ист}}$. Существенно что, истинный $\alpha_{\text{ист}}$ используется в расчетах для описания сжимаемости при данном давлении, а средний коэффициент сжимаемости $\alpha_{\text{ср}}$ – удобен для оценки процесса в конечном интервале от какого-либо начального давления P_0 до текущего P [52, 150].

Коэффициент сжимаемости можно определить с помощью эмпирических формул при данном давлении.

Д. Н. Вырубов предложил следующую формулу для определения среднего коэффициента сжимаемости [47].

$$\frac{10^{-11}}{\alpha_{cp.}} = a + b \cdot p - C \cdot p^2 + d \cdot p^3 \quad (2.7)$$

или

$$\frac{10^{-11}}{\alpha_{cp.}} = a + b \cdot p - c \cdot p^2, \quad (2.8)$$

при определении мгновенных коэффициентов сжимаемости топлива с плотностью 800–840 кг/м³. Коэффициенты a , b , c , d – функции средней за цикл температуры и зависят от плотности масла и температуры, p – функция среднего за цикл давления.

Истинный коэффициент сжимаемости топлива в условиях изменения давления и температуры в системе топливоподачи непосредственного действия можно определить экспериментальным путем. В такой системе давление в трубопроводе распространяется в виде волны со скоростью звука.

Уравнение для определения скорости распространения волны давления дается в современных методах расчета процесса впрыска, в основу которых положена теория гидравлического удара Н. Е. Жуковского, и имеет вид [52, 99]:

$$a_{\infty} = \frac{1}{\sqrt{\rho_H \left[\alpha + \frac{2}{E} \left(\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu \right) \right]}}, \quad (2.9)$$

где a_{∞} – скорость распространения волны давления, м/с;

α – коэффициент сжимаемости топлива;

E – модуль упругости материала, из которого изготовлен трубопровод;

R и r – внешний и внутренний радиусы трубопровода, м;

μ – коэффициент Пуассона;

ρ_H – удельная плотность топлива при заданном начальном давлении.

При расчетах было сделано два допущения [52]:

1) скорость движения жидкости мала в сравнении со скоростью звука и поэтому не учитывается;

2) коэффициент сжимаемости считается не зависящим от давления, т.е. сжатие жидкости подчиняется закону Гука.

Для определения плотности ρ_H используем выражение:

$$\rho_H = \rho_0(1 + \alpha_{cp} p_H), \quad (2.10)$$

где ρ_0 – удельная плотность жидкости, кг/м³;

p_H – начальное давление, МПа.

При нормальных условиях в чистом ДТ $a = 1250-1450$ м/с.

Для каждого вида топлива средний коэффициент сжимаемости определяется по выражению:

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha_0 + \alpha_{30}}{2}, \quad (2.11)$$

где α_0 – коэффициент сжимаемости при нормальных условиях;

α_{30} – коэффициент сжимаемости при начальном давлении 30 МПа.

И.В. Астахов [52, 71, 96] предложил следующую формулу для определения скорости распространения волны в нагнетательной магистрали высокого давления. Ввиду малой зависимости удельной плотности от давления было принято допущение равенства среднего и истинного коэффициентов сжимаемости $\alpha_{cp} = \alpha$

Подставляя выражение 2.10 в 2.9 и решая последнее относительно α , получим выражение для расчета истинного коэффициента сжимаемости:

$$\alpha = -\frac{1+p_H k}{2p_H} + \sqrt{\left(\frac{1+p_H k}{2p_H}\right)^2 + \frac{1}{a^2 \rho_0 p_H} - \frac{k}{p_H}}, \quad (2.12)$$

где

$$k = \frac{2}{E} \left(\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu \right), \quad (2.13)$$

где α_{cp} – средний коэффициента сжимаемости;

k – поправка Ротрока;

p_H – начальное давление, МПа;

ρ — плотность топлива, г/м³;

R, r — внешний и внутренний радиусы трубопровода, м;

μ — коэффициент Пуассона;

E — модуль упругости, Па.

Коэффициент сжимаемости увеличивается с ростом температуры, а при росте давления — уменьшается.

На величину коэффициента сжимаемости топлива оказывают влияние характер процесса сжатия, количество содержащегося в топливе воздуха и ряд других факторов, что приводит к различным результатам даже при измерении коэффициента сжимаемости одного и того же образца топлива [52, 71, 104, 105, 119, 123, 138, 153, 238, 239].

При проведении экспериментальных исследований ставились следующие цели:

- определение скорости звука в топливопроводе для пальмового масла и его смесей;
- определение зависимости коэффициента сжимаемости смесевоего топлива от объемного соотношения в нем ПМ и ДТ;
- определение зависимости коэффициента сжимаемости ПМ и смесевоего топлива от величины давления сжатия.

При этом решались такие задачи:

- создание экспериментальной установки для определения скорости волны давления в трубопроводе высокого давления;
- разработка методики проведения экспериментов и обработки их результатов.

Коэффициенты сжимаемости ПМ и его смесей с ДТ рассчитаны на основе измеренных по методике проф. И.В. Астахова величин скорости распространения импульса давления по длинному трубопроводу — местной скорости звука.

Использовался экспериментальный стенд (рисунок 2.4, 2.5), созданный на базе стенда для регулировки форсунок КИ-3333. В исследовании рассматривались смесевые топлива с долей от 0,1 до 0,6 объемных долей ПМ.

Каждый опыт проводился 3 раза и состоял из 25 впрыскиваний топлива. Подготовка и отбор смесей проводились при их нагревании до 60°C.

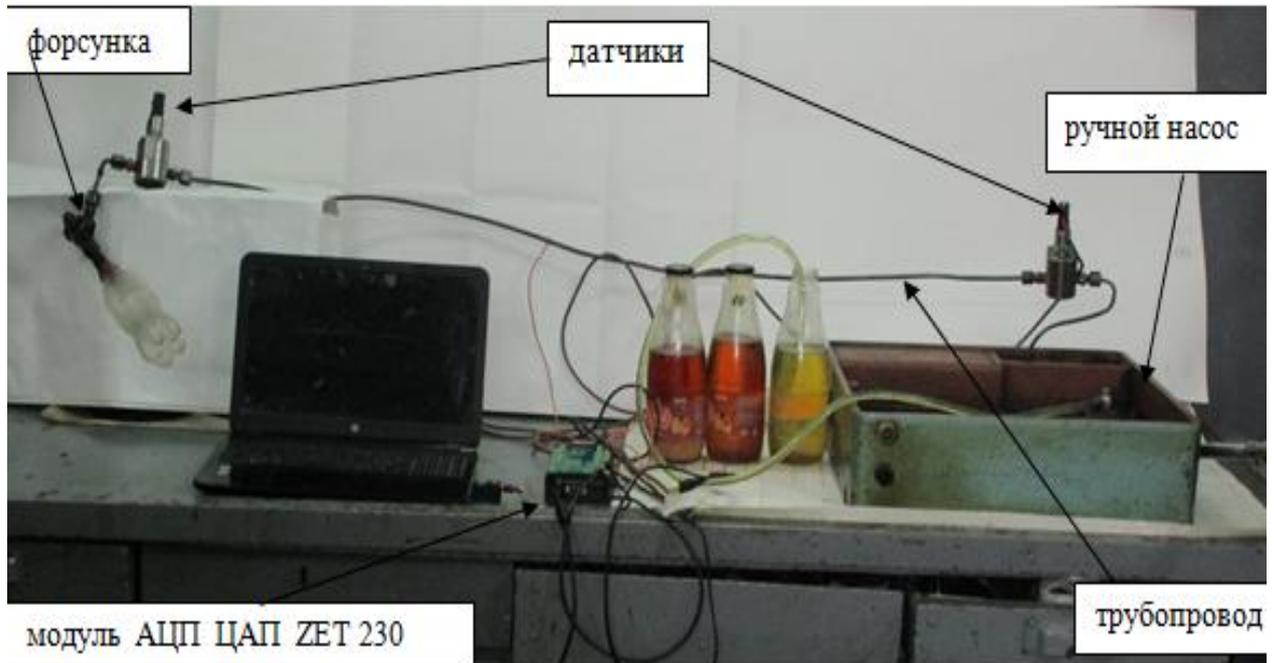


Рисунок 2.4 - Экспериментальный стенд для определения скорости распространения импульса давления по трубопроводу

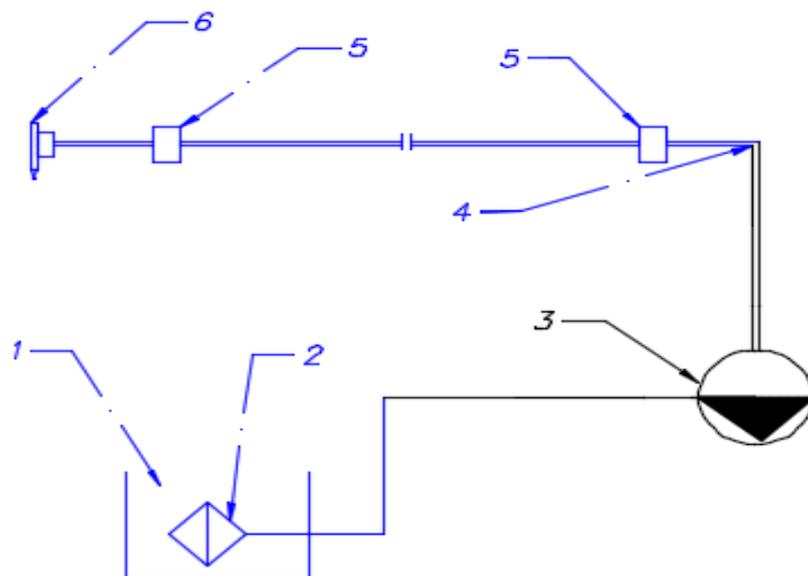


Рисунок 2.5 - Гидравлическая схема установки. 1 – бак для топлива; 2 – фильтр; 3 – насосная секция; 4 – трубопровод; 5 – датчики; 6 – форсунка

Стенд был дополнен трубопроводом длиной 1,4 м. Использована форсунка диаметром 22 мм с возможностью регулирования давления начала впрыска от 10 до 40 МПа. В трубопроводе на входе и выходе установлены датчики с преобразователем давления с техническими характеристиками:

измерительный ПД – РО 60 МПа, выход 4-20 мА, G ¼ наружная резьба, точность 0,5 %, питание 8-30 VDC. Чувствительный элемент: кремниевый тензорезистивный; температура измеряемой среды от -40 до 150⁰С.

Таблица 2.5 -Технические характеристики трубопровода установки

Длина трубопровода, м	1,4
Коеф. Пуассона, μ	0,28
Внеш. радиус трубопровода, R, м	0,003
Внутр. радиус трубопровода, r, м	0,001
Поправка Ротрока, $\times 10^{-11}$	1,47
Модуль упругости E стали трубопровода, $\times 10^{11}$, Па	2,08

Методика проведения опытов: с помощью ручного насоса в длинный трубопровод нагнеталось топливо, сжимаемое в нем до заданного давления. Импульс давления, создаваемый ручным топливным насосом стенда, регистрировался с помощью датчиков давления, установленных на входе в трубопровод высокого давления длиной $L=1,4$ м и на выходе из него. Примеросциллограммы, записанной с помощью модуля АЦП, приведен на рисунке 2.6. Время распространения импульса давления Δt , а затем и его скорость a , определялись по запаздыванию нарастания фронта давления на выходном датчике относительно входного.

Сигнал с датчиков регистрировался и записывался с помощью АЦП ЦАП ZET 230. Полные характеристики давления топлива на входе и выходе с трубопровода позволяют установить скорость прохождения волны давления по трубопроводу. Использовался участок с резким нарастанием давления. При этом заметно, что импульс давления на выходном датчике запаздывает относительно импульса давления входного. Это запаздывание характеризует временной интервал, необходимый для прохождения волны давления по трубопроводу. Скорость импульса волны a определялась по моментам появления импульса во входном и выходном сечениях трубопровода по формуле:

$$a = \frac{L}{t}, \quad (2.14)$$

где L – действительное расстояние между точкам измерения, м;

t – время, в течение которого импульс проходит расстояние от одного датчика до другого, с.

Зная время, расстояние (длину трубопровода) и a – скорость распространения волны (местную скорость звука), определяли α коэффициенты сжимаемости смесевых масел по формуле Астахова (2.10). На рисунке 2.6 показана осциллограмма движения.

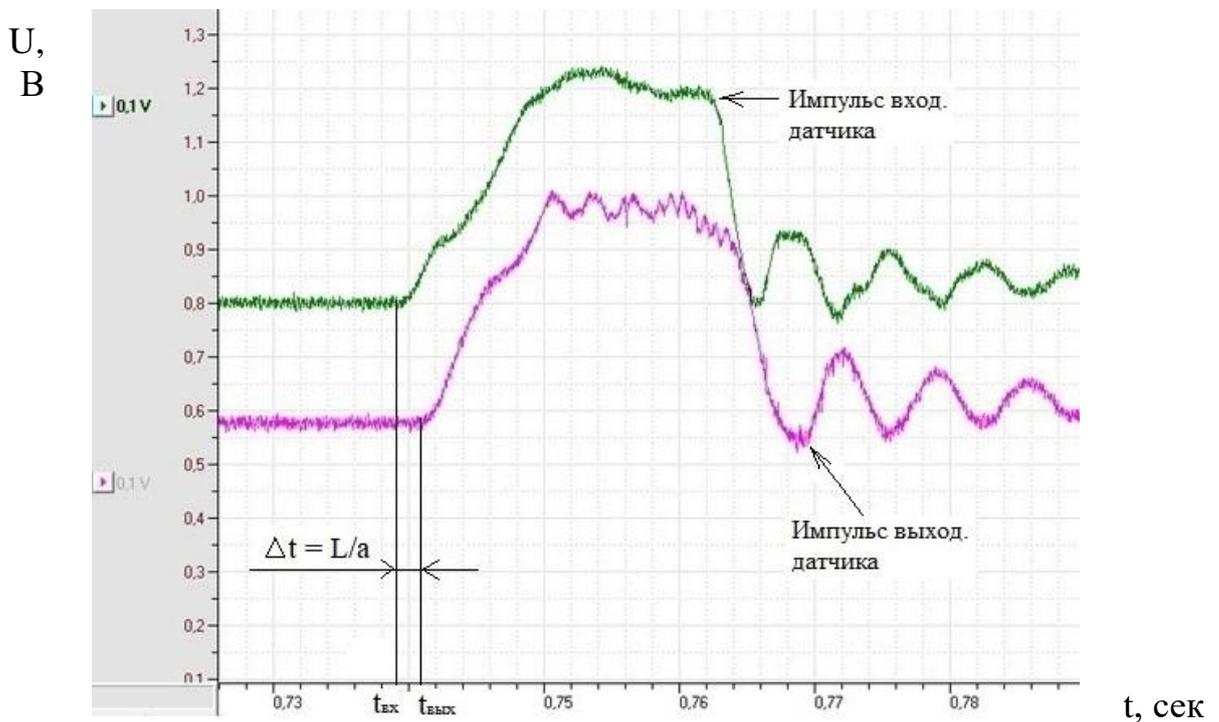


Рисунок 2.6 - Осциллограмма распространения импульса давления в трубопроводе

Опыты были проведены для шести сортов смесового топлива, стандартного ДТ и чистого ПМ, их физические свойства показаны в таблице 2.4.

Условия опытов следующие: внешние температура $t=24^{\circ}\text{C}$ и давление 720 мм рт.ст., температура смесевых топлив, $t = 50^{\circ}\text{C}$, тарировки датчиков относительно начального давления P_n и входные и выходные напряжения датчиков на АЦП и другие дополнительные данные представлены в таблице 2.6. Давление начала впрыска $P_n = 10, 20, 30, 40$ МПа.

Таблица 2.6. Результаты тарировки датчиков

P_n , МПа	U , В				
	1-3 Вых.	1-4 Вых.	U_{cp}	ΔU	Шаг
0	1,5573	1,5776	1,56745		
4	1,9583	1,9854	1,97185	0,4044	0,01011
8	2,3558	2,3882	2,372	0,40015	0,010004
12	2,5677	2,6083	2,588	0,216	0,0054
16	2,7786	2,822	2,8003	0,2123	0,005308
20	2,954	2,9968	2,9754	0,1751	0,004378
24	3,1067	3,1522	3,12945	0,15405	0,003851
28	3,2501	3,2894	3,26975	0,1403	0,003508
32	3,37	3,4216	3,3958	0,12605	0,003151
36	3,479	3,5317	3,50535	0,10955	0,002739
40	3,5277	3,578	3,55285	0,0475	0,001188

Для расчета начального давления P_n , скорости распространения волны a , коэффициента сжимаемости α в линии высокого давления использовалась линейная интерполяция данных, с учетом результатов тарировки датчиков.

Тарировка проводилась следующим образом:

- предварительно было установлено необходимое давление открытия форсунки;
- затем на место форсунки на экспериментальный стенд устанавливался манометр (рисунок 2.7);
- в систему закачивалось топливо, при этом снимали одновременно показание манометра и соответствующее ему значение напряжения с помощью осциллограммы, записанной модулем АЦП ЦАП ZET 230.



Рисунок 2.7 - Манометр для тарировки датчиков

Результаты измерений для начального давления в системе представлены в таблице 2.7. Скорость волны a , рассчитанная по данным таблицы 2.7 составляет 1150,000 м/с, коэффициент сжимаемости $\alpha - 8,89762E^{-10}$, Па⁻¹. Аналогичным образом проводились измерения при других значениях P_n , результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице 2.8.

Расшифровка показателей табл. 2.7, 2.8

P_n , МПа – давление начальное;

$I-3_{Вх}$, В – напряжение входного сигнала;

$I-4_{Вых}$, В – напряжение выходного сигнала;

$V_{ср}$, В – среднее значение соответствующего напряжения;

ΔB , В – приращение напряжения при изменении давления;

$Шаг$ – интервал градиента давления;

T'' , с – время окончания прохождения волны;

T' , с – время начала прохождения волны;

dT , с – время прохождения волны;

P'' , МПа – начальное давление на выходе;

P' , МПа – начальное давление на входе;

$P_{ср}$, МПа – среднее давление;

P , МПа – давление на манометре, соответствующее таблице тарировки.

Результаты экспериментов графически представлены на рисунках 2.8, 2.9, на оси абсцисс отложены начальные давления P_n .

Таблица 2.7 - Экспериментальные данные для расчета начального давления, скорости распространения волны, коэффициента сжимаемости для начального давления

T''	T	dT	P''	P'	$P''*2$	$P'*2$	P_{cp}	P	dT, c	$P_H, \text{МПа}$
1,211	1,21	0,001	1,225	1,21	2,45	2,42	2,435	9,166667		
1,901	1,9	0,001	1,318	1,299	2,636	2,598	2,617	12,5464	0,001	12,5464
2,68	2,679	0,001	1,314	1,294	2,628	2,588	2,608	12,37683	0,001	12,37683
3,321	3,319	0,002	1,299	1,292	2,598	2,584	2,591	12,05652	0,002	12,05652
3,958	3,956	0,002	1,329	1,317	2,658	2,634	2,646	13,09279	0,002	13,09279
4,588	4,586	0,002	1,319	1,306	2,638	2,612	2,625	12,69713	0,002	12,69713
5,208	5,207	0,001	1,328	1,313	2,656	2,626	2,641	12,99859	0,001	12,99859
5,843	5,842	0,001	1,297	1,281	2,594	2,562	2,578	11,81481	0,001	11,81481
6,452	6,451	0,001	1,301	1,291	2,602	2,582	2,592	12,07537	0,001	12,07537
7,087	7,086	0,001	1,313	1,298	2,626	2,596	2,611	124,3335	0,001	12,43335
7,7	7,699	0,001	1,316	1,305	2,632	2,61	2,621	12,62176	0,001	12,62176
8,288	8,287	0,001	1,294	1,275	2,588	2,55	2,569	11,64815	0,001	11,64815
8,882	8,881	0,001	1,296	1,282	2,592	2,564	2,578	11,81481	0,001	11,81481
9,471	9,469	0,002	1,309	1,29	2,618	2,58	2,599	12,20725	0,002	12,20725
10,074	10,073	0,001	1,309	1,284	2,618	2,568	2,593	12,09421	0,001	12,09421
10,682	10,681	0,001	1,313	1,294	2,626	2,588	2,607	12,35798	0,001	12,35798
11,265	11,263	0,002	1,308	1,3	2,616	2,6	2,608	12,37683	0,002	12,37683
11,864	11,863	0,001	1,284	1,26	2,568	2,52	2,544	11,18519	0,001	11,18519
12,455	12,452	0,003	1,317	1,295	2,634	2,59	2,612	12,45219		
13,043	13,042	0,001	1,303	1,284	2,606	2,568	2,587	11,98148	0,001	11,98148
13,661	13,66	0,001	1,31	1,29	2,62	2,58	2,6	12,2261	0,001	12,2261
14,28	14,279	0,001	1,292	1,278	2,584	2,556	2,57	11,66667	0,001	11,66667
14,894	14,893	0,001	1,315	1,298	2,63	2,596	2,613	12,47103	0,001	12,47103
15,52	15,519	0,001	1,319	1,304	2,638	2,608	2,623	12,65944	0,001	12,65944
16,189	16,188	0,001	1,306	1,285	2,612	2,57	2,591	12,05652	0,001	12,05652
Средние									0,001217	12,23736

Таблица 2.8 - Результаты расчета начального давления, скорости распространения волны и коэффициентов сжимаемости смесевых топлив, чистых ПМ и ДТ

ДТ			ПМ10			ПМ20			ПМ30		
P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹	P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹	P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹	P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹
3,65232	1076,92	10,24	1,72556	1110,34	9,56	2,44481	1157,02	8,687	3,15618	1176	8,34
3,34597	1100	9,8135	1,43554	1125,87	9,3	2,76044	1147,54	8,831			
3,31372	1105,26	9,7195	1,52624	1122,64	9,35	2,04314	1155,34	8,716	4,51401	1192,59	8,1
12,2792	1166,67	8,6434	8,96721	1176,99	8,44	9,81684	1198,2	8,043	14,3636	1272,73	7,05
12,2374	1150	8,8976	9,14851	1184,62	8,33	9,9187	1195,12	8,084	13,8948	1262,75	7,16
12,2601	1152,94	8,8518	10,5706	1183,1	8,34	10,7925	1200	8,012			
20,4309	1200	8,1131	16,4033	1229,01	7,69	18,5285	1256,41	7,261	20,7807	1278,26	6,96
20,4479	1217,39	7,8824	17,1239	1222,22	7,77	19,2599	1235,29	7,509	20,1209	1244,44	7,34
20,0597	1166,67	8,5863	17,5983	1226,28	7,72	19,2619	1240,51	7,445			
25,9857	1200	8,0774	20,297	1241,94	7,51	24,8077	1283,33	6,927	26,7205	1278,26	6,93
26,6148	1225	7,748	21,3613	1252,03	7,38	24,0607	1300	6,753	27,494	1306,67	6,62
26,8114	1200	8,0722	22,3914	1245,76	7,45	25,1111	1262,3	7,159	26,8148	1283,33	6,87
ПМ40			ПМ50			ПМ60			ПМ100		
P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹	P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹	P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹	P_H , Мпа	a , м/с	α, E^{-10} , Па ⁻¹
2,21085	1193,18	8,022	2,49753	1217,39	7,61				4,57678	1272,73	6,57959
2,4183	1196,58	7,974				2,504451	1217,39	7,565	4,09829	1339,13	5,93253
			2,48417	1217,39	7,61	2,811243	1235,29	7,342	5,1494	1292,31	6,37553
10,0953	1283,33	6,878	7,47953	1235,29	7,36	8,161119	1247,52	7,168	14,2103	1365,85	5,66439
			8,06706	1235,29	7,36	8,504201	1250	7,137			
7,74369	1253,73	7,224	7,99937	1235,29	7,36	8,323221	1250	7,138	12,3309	1346,15	5,84076
14,0709	1244,44	7,299	16,991	1278,54	6,82	13,64783	1272,73	6,857	20,8632	1369,57	5,61203
19,5073	1283,33	6,834	19,769	1285,71	6,73	17,58724	1302,33	6,528	21,345	1354,84	5,73481
17,33	1263,89	7,058	19,2835	1312,5	6,46				21,9844	1333,33	5,92143
23,3209	1292,31	6,721	25,025	1324,32	6,32				28,0715	1377,05	5,52823
20,5363	1305,08	6,601	24,4875	1333,33	6,24	26,44571	1354,84	5,994	27,3179	1333,33	5,90287
22,606	1312,5	6,518	24,5978	1344	6,14	26,58636	1354,84	5,993	27,6926	1400	5,34752

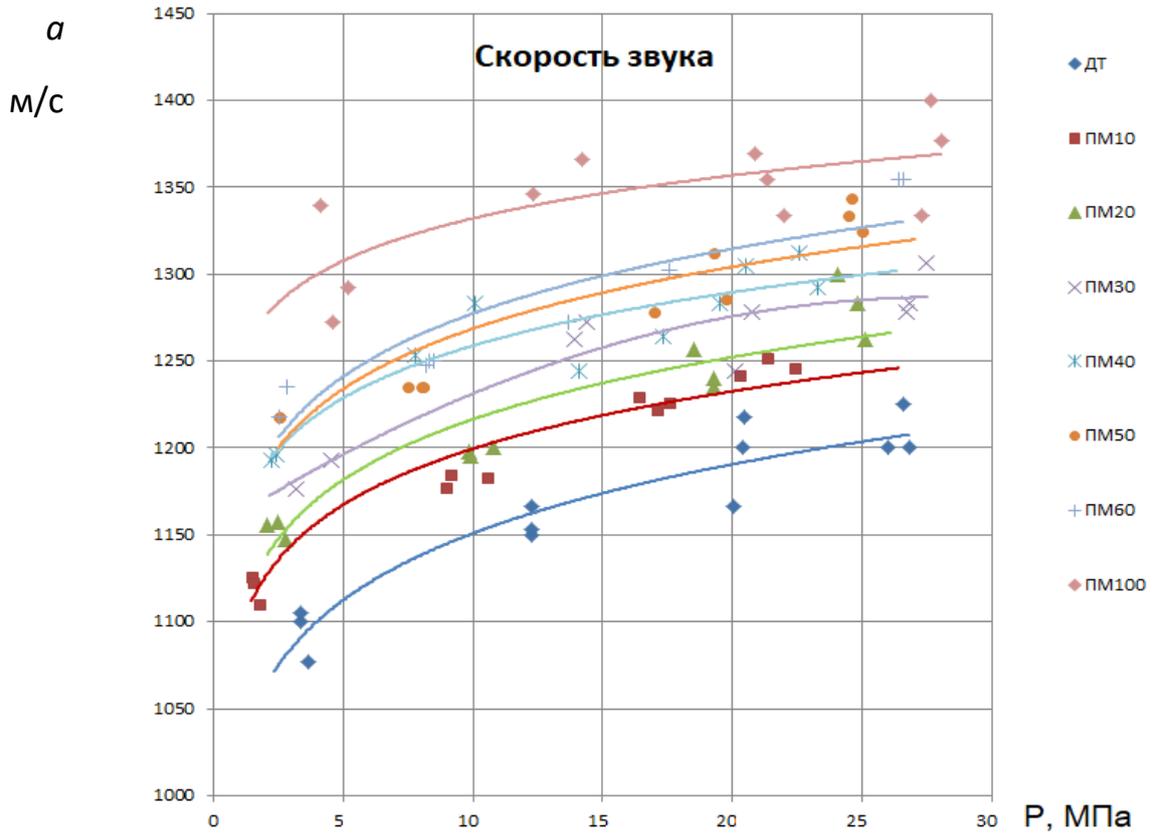


Рисунок 2.8 - Зависимость скорости распространения импульса давления для ПМ и его смеси с ДТ от давления при различных составах смесей

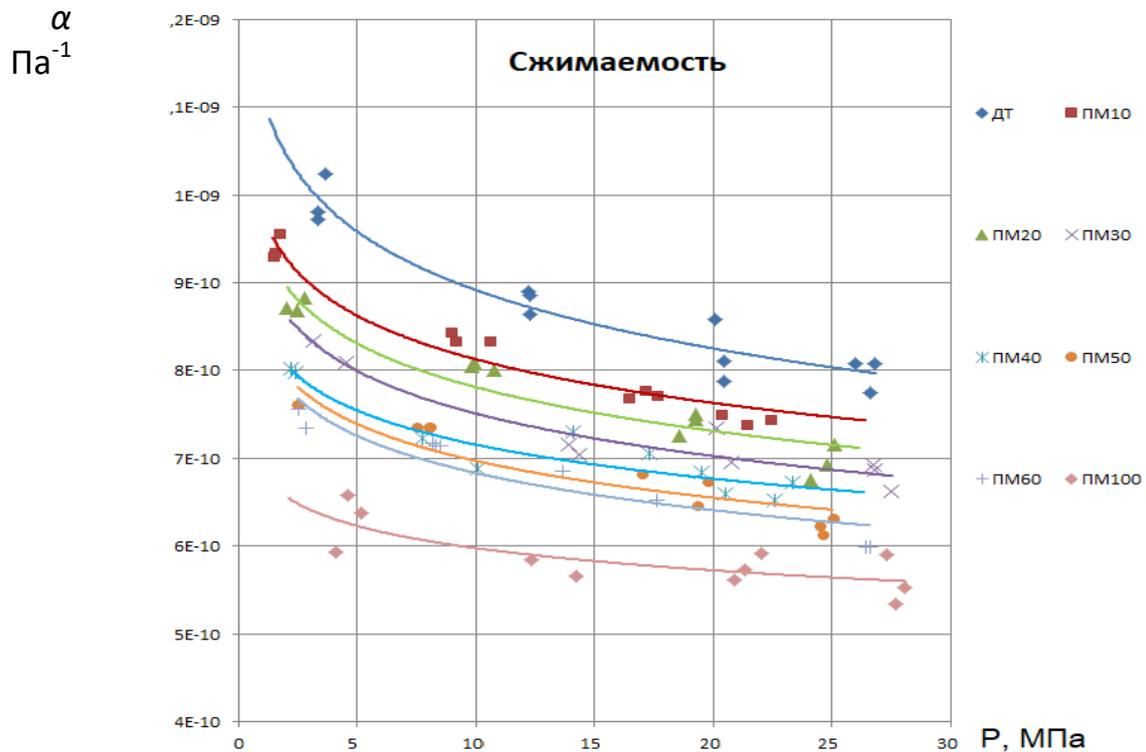


Рисунок 2.9 - Зависимость коэффициента сжимаемости ПМ и его смеси с ДТ от давления P при различных составах смесей: с 10,20 ... 100% объемными ПМ в смесевом топливе, ДТ – дизельное топливо

Скорости распространения звука во всех испытанных топливах (ДТ, ПМ и его смеси с ДТ) увеличиваются по мере увеличения начального давления, P_n . С другой стороны, чем больше плотность топлива, тем больше скорость распространения звуковой волны.

2.8.2 Анализ результатов

Скорости распространения звука во всех испытанных топливах (ДТ, ПМ и его смеси с ДТ) увеличиваются по мере увеличения начального давления, P_n (рисунок 2.8). С другой стороны, чем больше плотность топлива, тем больше скорость нарастания звуковой волны. На рисунке 2.9 показано, что при увеличении P_n и плотности топлива, зависящей от увеличения процентного объема ПМ в смесевом дизельном топливе, коэффициент α уменьшается. Чем меньше плотность, тем больше предельные изменения α . В номинальном режиме двигателя можно отметить что $\alpha_{ист}$ ДТ больше на 22% при начальном давлении 25 МПа, чем смесевое топливо с 0,6 объемных долей ПМ (ПМ60) при таком же давлении. При увеличении давления разница изменяется.

Результаты подчиняются теории для ряда тяжелых видов топлива, зависимость α от давления не так велика.

Это представляет совпадение полученных результатов данной работы с использованием ПМ и его смесей с ДТ с имеющимися данными результатов опытов с чистыми ДТ. Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для моделирования процесса подачи топлива в дизеле. На рисунке 2.10 приведена кривая среднего коэффициента сжимаемости, который надо выбирать с учетом плотности топлива.

Можно отметить, что при увеличении доли ПМ в смесевом топливе $\alpha_{ист}$ и $\alpha_{сред}$ изменяются. При начальном давлении 25 Мпа для чистого ДТ $\alpha_{сред} = 8,03598 \cdot 10^{-10}$ Па, для ПМ60 $\alpha_{сред} = 6,27238 \cdot 10^{-10}$ Па. Снижение $\alpha_{сред}$ составило от 21,94% до 22,32% при номинальном режиме.

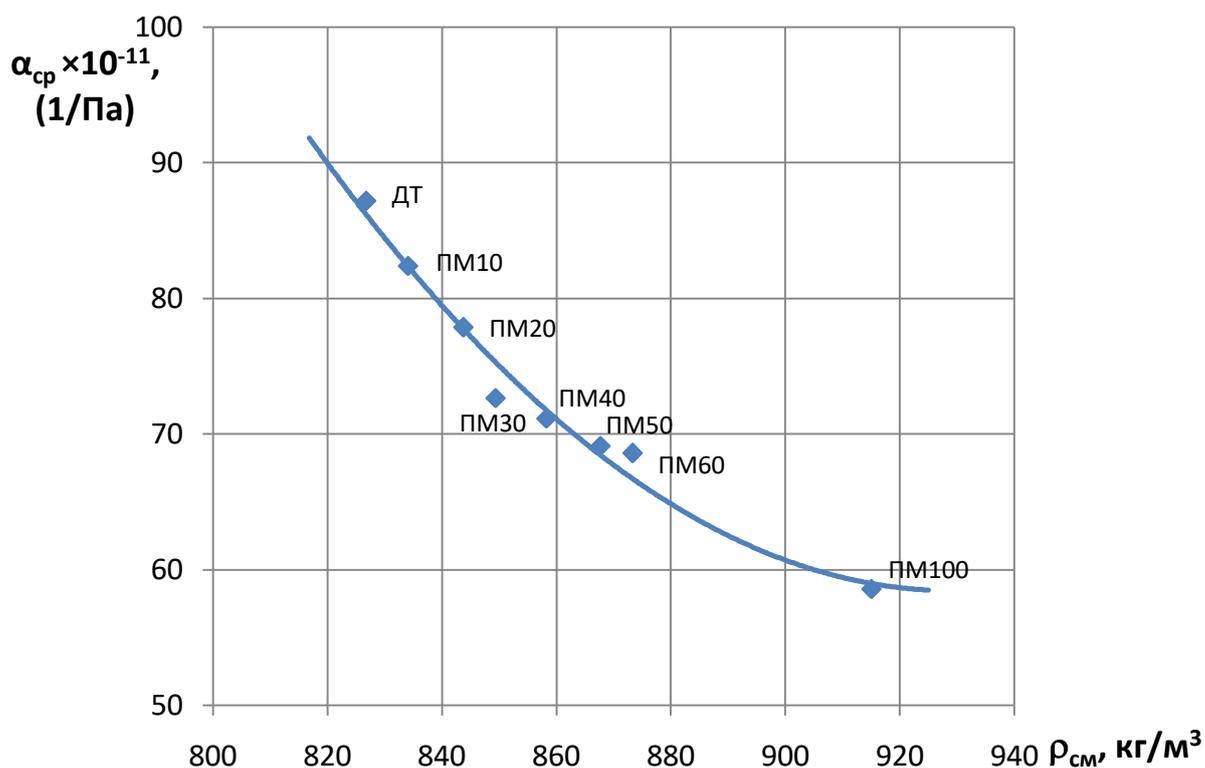


Рисунок 2.10 - Зависимость среднего коэффициента сжимаемости от плотности топлива

Выводы

1. Разработана общая программа проведения экспериментальных лабораторных исследований по определению физических свойств дизельных топливных смесей с добавлением ПМ и нефтяного ДТ.
2. Проведены лабораторные исследования по определению физических свойств смесевых ДТ с добавлением ПМ. В качестве оценочных показателей были приняты вязкость, плотность и коэффициент сжимаемости смесей.
3. При разработке инженерных решений по переводу дизеля на смесевое топливо необходим расчет, для оценки стабильности процессов топливоподачи и сгорания смесевых топлив в КС. Результаты экспериментальных исследований по расчету скорости распространения волн давления в системе топливоподачи, проводимых на основе смесевых топлив, и найденные истинный и средний коэффициенты сжимаемости для каждого давления с помощью математической формулы И.В. Астахова могут быть использованы для моделирования процесса подачи топлива при переводе дизельного двигателя на смесевое топливо с добавлением ПМ.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ РЕГУЛИРОВОК ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВПРЫСКИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ВПРЫСК»

Развиваемая двигателем мощность определяется, главным образом, количеством впрыскиваемого в КС топлива и его теплотворной способностью. Количество топлива, подаваемого в КС дизельного двигателя, зависит не только от положения дозирующего органа (рейки) топливopодающей аппаратуры ТНВД, но и от физических свойств топливной смеси, которые учитываются при расчете и конструировании топливopодающей аппаратуры дизелей – плотности, вязкости и сжимаемости топлив [11, 27, 28, 29, 31, 44, 46, 59, 124, 133, 175, 176, 177, 220, 222].

Для оценки влияния свойств смесевых топлив на топливopодающую систему при переходе от ДТ на смесевое решались следующие задачи:

- анализ влияния физических свойств смесевого топлива на работу топливной системы двигателя. Состав смесевого топлива определяется объемной долей ПМ $g_{\text{пм}}$ в смеси с ДТ;
- анализ влияния конструктивно-регулирующих параметров насоса высокого давления при работе на смеси ПМ с ДТ марки Л, которые соответствуют их значениям при работе дизеля Д-144 на чистом ДТ;
- анализ процесса топливopодачи при сохранении постоянной теплотворной способности смеси, $Q_{\text{см}} = \text{const}$, ($h_{\text{акт}} = \text{var}$).

Разработанный план и методы исследования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Общий план и методы исследований

	Теоретические	Лабораторные	Стендовые
Исследования	1. Анализ характеристики давления впрыска и цикловой подачи топливного насоса высокого давления (ТНВД) с помощью математической модели «ПК-Впрыск». 2. Обоснование зависимости цикловой подачи от плотности ПМ-топливной смеси. 3. Обоснование зависимости цикловой подачи, от концентрационных пределов компонентов топливной смеси. 4. Обоснование влияния конструктивно-регулирующих параметров ТНВД при работе двигателя на чистом дизельном топливе и на смесевом топливе.	1. Установить концентрационные пределы компонентов смесевого топлива с добавлением ПМ;	1. Оценка влияния физических свойств смесевого топлива с добавлением ПМ на показатели работы топливной аппаратуры

3.1 Методика исследования влияния состава топливной смеси на показатели процесса впрыскивания топлива в дизельный двигатель

Рассматривая физические свойства дизельных топлив с добавлением ПМ (таблица 2.4, таблица 3.2), можно отметить сравнительно небольшие отличия значений их коэффициентов сжимаемости относительно нефтяных ДТ, кроме того, хотя ПМ, как все растительные масла, характеризуется большим поверхностным натяжением, исследованные топливные смеси обладают поверхностным натяжением, сопоставимым с этим показателем у нефтяного ДТ. Указанные особенности физических свойств ПМ и топлива с его добавлением оказывают заметное влияние на параметры процесса топливоподачи и его стабильность. Для оценки этого влияния при переходе от ДТ на смесевое топливо проведены расчетные исследования в соответствии с определенными критериями – перенастройка ТНВД для того, чтобы получить допустимые оптимальные характеристики впрыскивания. Исследовалась работа топливной системы на ДТ и на его смеси с ПМ с 10, 20, 30, 40, 50, 60% объемных при соответствующих регулировках ТНВД. В расчетах использовались значения коэффициентов сжимаемости, полученные в главе 2. Расчеты проводились при частотах вращения 1400, 1600, 1800, 2000 мин⁻¹.

Таблица 3.2 - Основные свойства исследуемых дизельных топлив

Физико-технические свойства	Топливо							
	ДТ	Смесь 90% ДТ и 10% ПМ	Смесь 80% ДТ и 20% ПМ	Смесь 70% ДТ и 30% ПМ	Смесь 60% ДТ и 40% ПМ	Смесь 50% ДТ и 50% ПМ	Смесь 40% ДТ и 60% ПМ	ПМ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плотность * при 20°С, кг/м ³ 50°С, кг/м ³	830,0	838,8	847,6	856,4	865,0	874,0	882,8	918,0
Вязкость * кинематическая при 20°С, мм ² /с 100°С, мм ² /с	3,8	4,37	4,84	5,31	5,78	6,25	6,72	– 8,6
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,5	42,01	41,33	40,73	40,32	39,98	39,2	37,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цетановое число*	50	48,6	47,4	46,1	45	44,4	43,8	40
Температура самовоспламенения, °С	250	260	270	280	290	300	289	315
Количество* воздуха, для сгорания 1 кг топлива кг/кг	14,3	14,14	13,98	13,82	13,66	13,5	13,34	12,7
Содержание, % по массе								
С	87	85,96	84,8	83,88	82,84	81,8	80,76	76,6
Н	12,6	12,54	12,48	12,22	12,36	12,3	12,24	12,0
О	0,4	1,5	3,7	3,7	4,8	5,9	7	11,4
Теплота, выделяемая топливом, Дж	2539,8	2534,71	2520,5	2501,2	2511,1	2515,8	2489,3	2452,1
Температура кипения, °С	150-360	159-348	168-336	177-324	–	–	–	240
Теплота испарения, кДж/кг	514-795	486-743	458-690	430-638	–	–	–	234-270
Коэффициент поверхностного натяжения, * 25°С, мН/м	25	24,5	24,8	25,2	25,3	25,7	26,5	27,8
Коэффициент сжимаемости, * Е ⁻¹⁰ , Па ⁻¹ , при 20 МПа	8,5863	7,51	7,445	7,34	6,601	6,46	–	5,735

* Данные получены экспериментальным или расчетным путем при проведении настоящих исследований.

Для определения свойств исследуемых смесевых топлив использовались известные положения из теории рабочего процесса двигателя [35, 52, 57, 59, 102, 107, 178, 181]. Теплота сгорания рассчитывалась по уравнению Д.И.Менделеева

$$H_U = 33,9C + 103H - 10,9(O - S) - 2,514W, \quad (3.1)$$

где С, Н, О, S, W — массовые доли топлива углерода, водорода, кислорода, серы и воды, соответственно.

В смесевых топливах при отсутствии химического взаимодействия между компонентами химический состав смеси полностью определяется химическим составом компонентов. Поэтому для таких смесевых топлив применимо свойство аддитивности. В связи с этим теплота сгорания смесевого топлива может быть определена из выражения:

$$Hu_{см} = \frac{(\sum H_{ui} m_i)}{\sum m_i} , \quad (3.2)$$

где H_{ui} — низшая теплота сгорания i -го компонента,
 m_i — его массовая доля.

Массовая доля для компонентов может быть определена через их массовое содержание в смеси

$$m_i = \frac{M_i}{M_{см}} , \quad (3.3)$$

где M_i — масса содержащегося в смеси i -го компонента;
 $M_{см}$ — масса смеси.

Количество теплоты, выделяющейся при сгорании топлива в цилиндре с учетом цикловой массовой подачи чистого ДТ).

$$Q_{дт} = m_{дт} H_{u дт} , \quad (3.4)$$

где $m_{дт}$ — цикловая массовая подача дизельного топлива.

$$m_{дт} = V_{дт} \rho_{дт} , \quad (3.5)$$

где $V_{дт}$ — цикловая объемная подача ДТ, мм³;

$\rho_{дт}$ — плотность ДТ, кг/м³;

$H_{удт}$ — низшая теплота сгорания ДТ.

Количество теплоты, выделяющееся при сгорании смеси определяется из выражений:

$$Q_{см} = a \% (V_{дт} \rho_{дт} H_{удт}) + b \% (V_{пм} \rho_{пм} H_{упм}) , \quad (3.6)$$

где $a\%$ и $b\%$ — объемные доли ДТ и ПМ в смеси топлива.

Для решения поставленных задач были организованы многофакторные расчетные эксперименты [143].

На первом этапе серии экспериментов исследовалось влияние состава смеси ДТ и ПМ на характеристики впрыскивания топлива при фиксации активного хода плунжера, $h_{акт} = \text{const}$.

На втором этапе расчет был произведен для оценки влияния состава смеси на характеристики впрыскивания топлива при фиксации цикловой подачи $q_u = \text{const}$

Постоянные значения активного хода плунжера $h_{акт} = \text{const}$ и цикловой подачи топлив, $q_u = \text{const}$ соответствуют их значениям при работе дизеля Д-144 на чистом ДТ.

На третьем этапе серии экспериментов исследовалось влияние смеси ДТ топлива с ПМ с долей от 0,1 до 0,6 объемных на параметры впрыскивания топлива при сохранении теплотворной способности смеси, $Q_{см} = \text{const}$, ($H_{и см} = \text{var}$) и переменных $q_{ц}$ и $h_{акт}$.

В качестве объекта расчетных исследований выбрана топливная система дизельного двигателя Д-144. Этот двигатель оснащен ТНВД УТН-5 с диаметром плунжера $d_m = 8\text{мм}$, с ходом плунжера $h_{пл.} = 8\text{мм}$, $n_n = 1000\text{ мин}^{-1}$, форсунки ФД-22 со штатным распылителем, давление начала впрыскивания топлива составляет 17 МПа.

Для оценки влияния свойств смесевых топлив на топливоподающую систему, при переходе от ДТ на смесевое, в качестве эталона были выбраны параметры при номинальном режиме: объемная цикловая подача 72 мм^3 , массовая цикловая подача $0,06\text{г}$, плотность дизельного топлива 830 кг/м^3 .

При расчетных исследованиях процесса впрыскивания топлив в дизелях использована математическая модель «ПК-Впрыск», разработанная на кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им. Баумана [91, 92, 93, 94, 95].

В математической модели «ПК-Впрыск» учитывается сжимаемость топлива, изменение скорости звука, гидравлические потери, утечки, кавитация, тепловые эффекты, физические свойства различных топлив, инерционность механических элементов. Программный комплекс позволяет прогнозировать работу ТПА на различных режимах работы двигателя, при пуске и на режиме

холостого хода. Математическая модель, положенная в основу «ПК-Впрыск», базируется как на апробированных подходах, так и на результатах оригинальных фундаментальных исследований, посвященных процессам в современной ТПА. В математических моделях, примененных в ПК «Впрыск» для расчета процесса топливоподачи в дизелях, использован ряд эмпирических зависимостей плотности ρ_T и коэффициента сжимаемости α_T от значения давления P , полученных российскими учеными Д.Н. Вырубовым, И.В. Астаховым, Ю.Я. Фоминым, Я.В. Колупаевым, Ю.Л. Астанским и др. Настройка математической модели проводилась по данным, полученным на экспериментальном стенде, и измеренным характеристикам смесевых топлив.

«ПК-Впрыск» учитывает действительный закон подачи топлива и отражает влияние свойств топлива и состава смеси на динамику развития показателей процесса впрыскивания в системах топливоподачи [91, 92, 93].

Рассмотрены и проанализированы с использованием математической модели работа двигателя на различных видах смесевых топлив, влияние свойств топлив на показатели процесса подачи топлива на разных режимах работы двигателя. Основная задача, решаемая при гидродинамическом расчете процесса впрыскивания – определение количества топлива, поданного в камеру сгорания дизеля за цикл, а также определение характера изменения скорости подачи топлива, т.е. его распределения во времени. Методика расчета предполагает решение системы уравнений Н.Е. Жуковского – Л. Аллиеве для гидравлического удара с уравнениями начальных условий, а также с уравнениями граничных условий у насоса и форсунки, представляющих собой уравнения объемного баланса топлива и динамического равновесия движущихся элементов системы в каждый момент времени.

При математическом моделировании за основу принята система с нагнетательным трубопроводом и закрытой форсункой [35, 42, 94]. Иные схемы топливных систем являются частными случаями этой системы, как с точки зрения принципа действия, так и теоретических посылок, положенных в основу процесса впрыскивания топлива. Процесс подачи топлива считают

кратковременным единичным импульсом, возникающим во входном сечении нагнетательного трубопровода в результате выталкивания топлива плунжером насоса из объема нагнетания. Во входном сечении нагнетательного трубопровода возникает неустановившееся движение сжимаемой жидкости, при котором от насоса к форсунке с местной скоростью звука идет первичная волна давления. Факторы, определяющие граничные условия во входном сечении трубопровода, заметно искажают импульс давления. К таким факторам относят объемы камеры нагнетания и штуцера насоса, нагнетательный клапан, перетекание топлива через впускные окна гильзы при движении нагнетательного клапана, а также изменения сжимаемости, вязкости и плотности топлива в результате изменения давления в системе. Упругость стенок нагнетательного трубопровода, их шероховатость и гидравлическое сопротивление при движении топлива являются также искажающими факторами.

Дополнительно искажают подошедшие к форсунке импульсы:

1. движение иглы форсунки;
2. объем распылителя;
3. резкий переход от сечения трубопровода к проходным сечениям распыливающих отверстий.

Резкий переход от сечения трубопровода к проходным сечениям отверстий распылителя тормозит движение топлива и значительно повышает его давление, в результате чего возникает гидравлический удар. Это и позволяет описывать движение топлива в нагнетательной магистрали уравнениями теории гидравлического удара:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}; \\ \frac{\partial c}{\partial x} = -\frac{1}{a^2 \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial t}, \end{cases} \quad (3.7)$$

где c – скорость движения топлива в сторону форсунки;

P – давление топлива;

ρ – плотность топлива;

a – местная скорость распространения волны давления;

x – координата по длине трубопровода;

t – время.

После исключения из системы уравнений (3.7) давления P , путем дифференцирования, получено волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (3.8)$$

Решение уравнений (3.7) имеет вид:

$$P = P_0 + F\left(t - \frac{x}{a}\right); \quad (3.9)$$

$$c = c_0 + \frac{1}{a \cdot \rho_T} \cdot F\left(t - \frac{x}{a}\right); \quad (3.10)$$

или

$$P = P_0 - W\left(t + \frac{x}{a}\right); \quad (3.11)$$

$$c = c_0 + \frac{1}{a \cdot \rho_T} \cdot W\left(t + \frac{x}{a}\right). \quad (3.12)$$

Выражения (3.9, 3.10, 3.11, 3.12) являются частными решениями уравнений (3.7). Подстановка их в (3.7) дает тождество.

Следовательно, в общем случае, при гидравлическом ударе, для сложных граничных условий и единичного импульса целесообразно решение системы уравнений (3.7) представить в форме Даламбера, т.е. в виде совокупности двух бесконечных рядов:

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 + F_1\left(t - \frac{x}{a}\right) - W_1\left(t + \frac{x}{a}\right) + F_2\left(t - \frac{x}{a}\right) - W_2\left(t + \frac{x}{a}\right) + \dots; \\ c &= c_0 + \frac{1}{a \cdot \rho_T} \cdot \left[F_1\left(t - \frac{x}{a}\right) + W_1\left(t + \frac{x}{a}\right) + F_2\left(t - \frac{x}{a}\right) + W_2\left(t + \frac{x}{a}\right) + \dots \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Функции импульса давления $F_i\left(t - \frac{x}{a}\right)$ и $W_i\left(t + \frac{x}{a}\right)$ характеризуют движение прямых и обратных волн вдоль нагнетательной магистрали. Обратные или отраженные волны давления распространяются в направлении,

обратном основному импульсу подачи. Возникают волны вследствие резкого изменения эффективной проходной площади. Если к моменту подхода обратной волны к штуцеру насоса подача топлива в нагнетательную магистраль не прекратилась, то эта волна, наряду с другими факторами, исказит величину и характер импульса подачи.

От момента начала отсечки в нагнетательной магистрали возможны волновые колебания топлива. Наложение прямых и обратных волн давления обуславливает сложный закон изменения давления в каждой точке нагнетательной магистрали. При недостаточной разгрузке последней, в момент посадки клапана, у насоса может сформироваться значительная прямая волна давления, способная повторно поднять иглу распылителя и осуществить дополнительное впрыскивание топлива (подвпрыскивание). Правильный подбор конструктивных параметров элементов системы обеспечивает затухание колебаний давления в линии нагнетания к началу следующего цикла.

Учитывались потери энергии движения топлива по нагнетательному трубопроводу на преодоление сил трения. При этом определяется коэффициент трения

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt[4]{100 \cdot R_e}}, \quad (3.14)$$

где R_e – число Рейнольдса,

$$R_e = \frac{c_{cp} d_T}{\nu};$$

тогда фактор гидравлического сопротивления определяется так:

$$k = \frac{\lambda \cdot c_{cp}}{4d_T}, \quad (3.15)$$

где c_{cp} – средняя скорость потока топлива для рассматриваемого участка трубопровода и интервала времени;

d_T – внутренний диаметр топливопровода;

ν – кинематическая вязкость топлива.

Если учитывается гидравлическое сопротивление, уравнения (3.7) используют в таком виде [35, 102, 104, 131]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + \rho_T \cdot \frac{\partial c}{\partial t} + 2\rho_T \cdot k \cdot c &= 0; \\ \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \cdot \rho_T} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

После дифференцирования уравнений (3.16) получается телеграфное уравнение, характеризующее волны давления:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2 \cdot \rho_T} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} - \frac{2k}{a^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = 0. \quad (3.17)$$

Если не учитывается вязкость топлива, решение дифференциального уравнения (3.17) записывается в таком виде [35]:

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 + F \left(t - \frac{x}{a} \right) e^{-kt_1} - W \left(t + \frac{x}{a} \right) e^{-kt_2}; \\ c &= \frac{1}{a \cdot \rho_T} \cdot \left[F \left(t - \frac{x}{a} \right) e^{-kt_1} + W \left(t + \frac{x}{a} \right) e^{-kt_2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

где t_1 и t_2 – время распространения по трубопроводу, соответственно, прямой и обратной волн давления.

Импульс давления $F \left(t - \frac{x}{a} \right)$ в течение рабочего цикла непрерывным потоком перемещается от насоса к форсунке.

Скорость движения топлива в каждом сечении трубопровода:

$$c = \frac{1}{a \rho_T} \cdot F_H, \quad (3.19)$$

где a – скорость распространения импульса давления, равная местной скорости звука в среде;

F_H – импульс давления.

Система уравнений (3.7-3.19) определяет характер движения потока в отдельно взятой части нагнетательной магистрали. Решение задачи моделирования процесса движения потока от насоса в нашем случае возможно

при наличии единой системы уравнений, решение которой, совместно с уравнениями начальных условий, позволяет определить амплитуды обозначенных волн давления в любом сечении нагнетательной магистрали, в любой момент времени. Решая системы уравнений вида (3.7-3.19), записанные для характерных сечений магистрали, совместно с уравнением неразрывности потока, получим систему уравнений, определяющую характер течения потока от насоса к форсунке.

Характер изменения давления в штуцере насоса $P_{шт}$ и в полости форсунки $P_{ф}$ определяются уравнениями граничных условий, записанными для соответствующих полостей системы.

Расчетная схема системы топливоподачи представлена на рисунке 3.1.

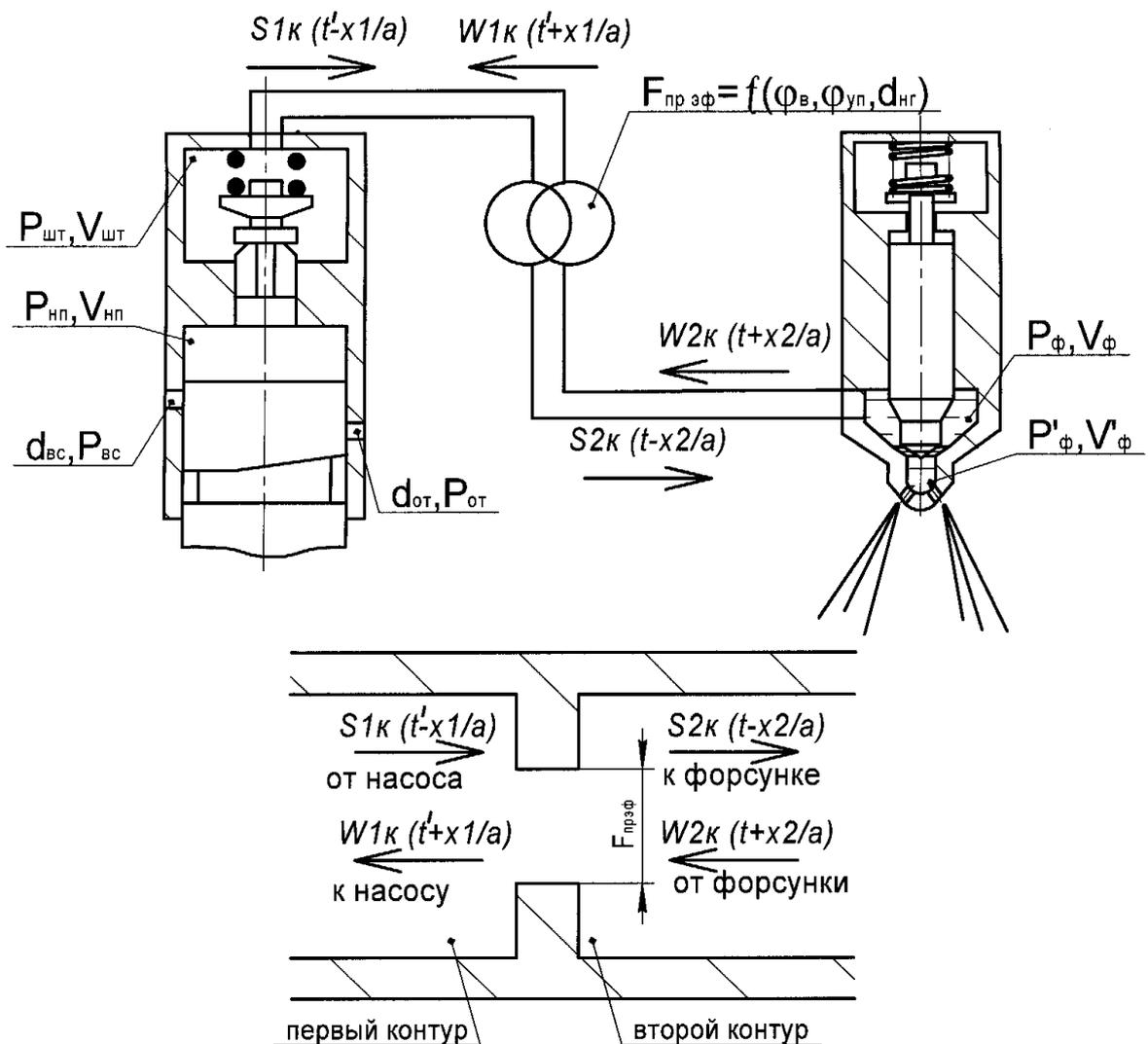


Рисунок 3.1 - Расчетная схема системы топливоподачи

3.2 Оценка влияния состава смеси дизельного топлива и пальмового масла на показатели процесса впрыскивания топлива в дизельном двигателе

Повышенная плотность и вязкость ПМ являются причиной увеличения массовой цикловой подачи и часового расхода топлива при его использовании в дизеле по сравнению с ДТ по ГОСТ 305-2013 [20, 30, 40, 41, 59, 117, 131, 185, 195]. Рассчитывались плотность $\rho_{см}$ и массовая цикловая подача $G_{цсм}$ для смесового топлива, состоящего из дизельного топлива и пальмового масла при работе дизеля Д-144 на номинальном скоростном режиме при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и частичных скоростных режимах при $n = 1800, 1600$ и 1400 мин^{-1} .

Значения объемной и массовой цикловых подач, а также активного хода плунжера $H_{пл.акт.}$ при работе на ДТ для каждого скоростного режима приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Объемная и массовая цикловые подачи и активный ход плунжера для различных скоростных режимов.

$n, \text{мин}^{-1}$	$Q_{ц}, \text{мм}^3$	$G_{ц}, \text{г}$	$H_{пл.акт.}, \text{мм}$
1400	61,2	0,051	1,602
1600	66	0,055	1,694
1800	69,6	0,058	1,809
2000	72	0,06	1,93

Состав смесового топлива определялся объемной долей ПМ $g_{пм}$ в смеси с ДТ. Плотность ДТ принималась 830 кг/м^3 , плотность ПМ – 918 кг/м^3 при нормальных условиях. Результаты расчетов показаны на рисунке 3.2.

Сначала были проведены расчеты показателей процесса топливоподачи для смесового топлива при постоянных активных ходах плунжера $H_{пл.акт.}$, соответствующих цикловым подачам на чистом ДТ при различных частотах вращения. Результаты расчетов представлены на рисунках 3.3-3.14.

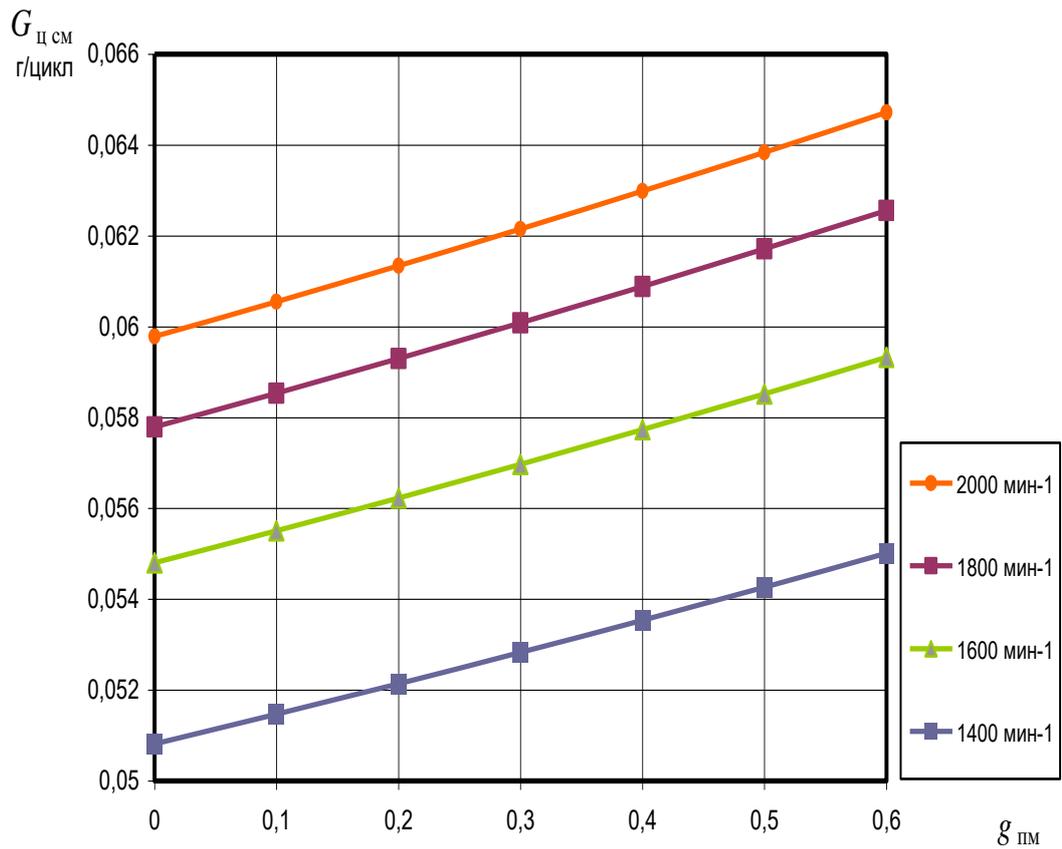


Рисунок 3.2 - Влияние состава смесового топлива $g_{\text{ПМ}}$ на массовую цикловую подачу смеси $G_{\text{Ц}_\text{СМ}}$ (г/цикл) с учетом только плотности смеси

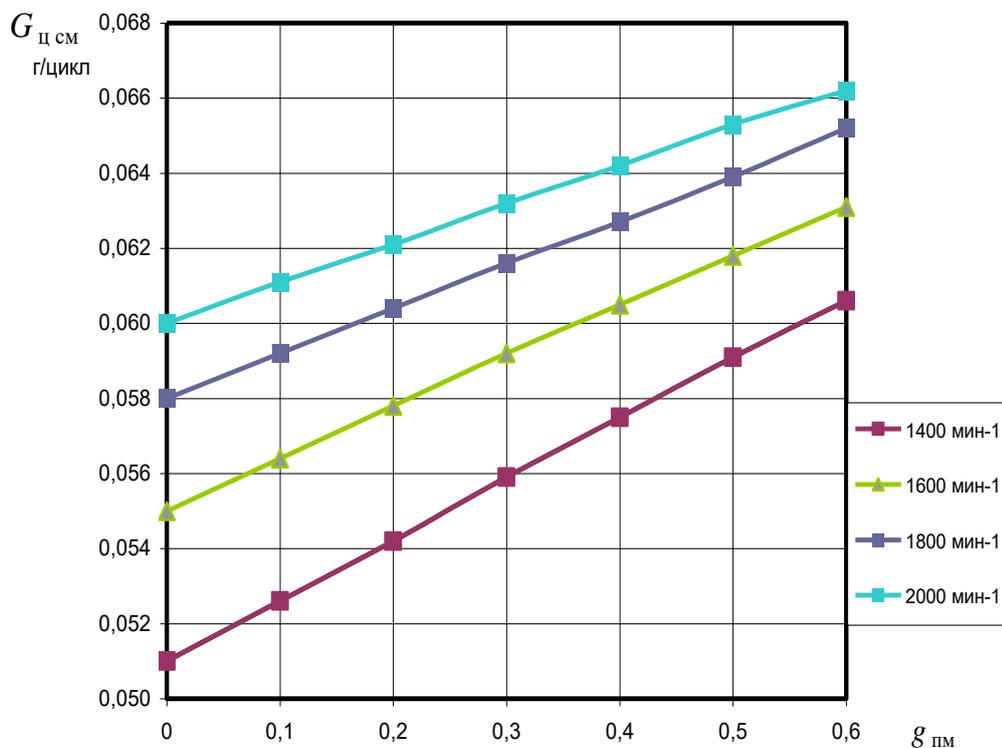


Рисунок 3.3 - Влияние состава смесового топлива $g_{\text{ПМ}}$ на массовую цикловую подачу смеси $G_{\text{Ц}_\text{СМ}}$ (г/цикл) при постоянном активном ходе плунжера $H_{\text{Пл.акт.}}$

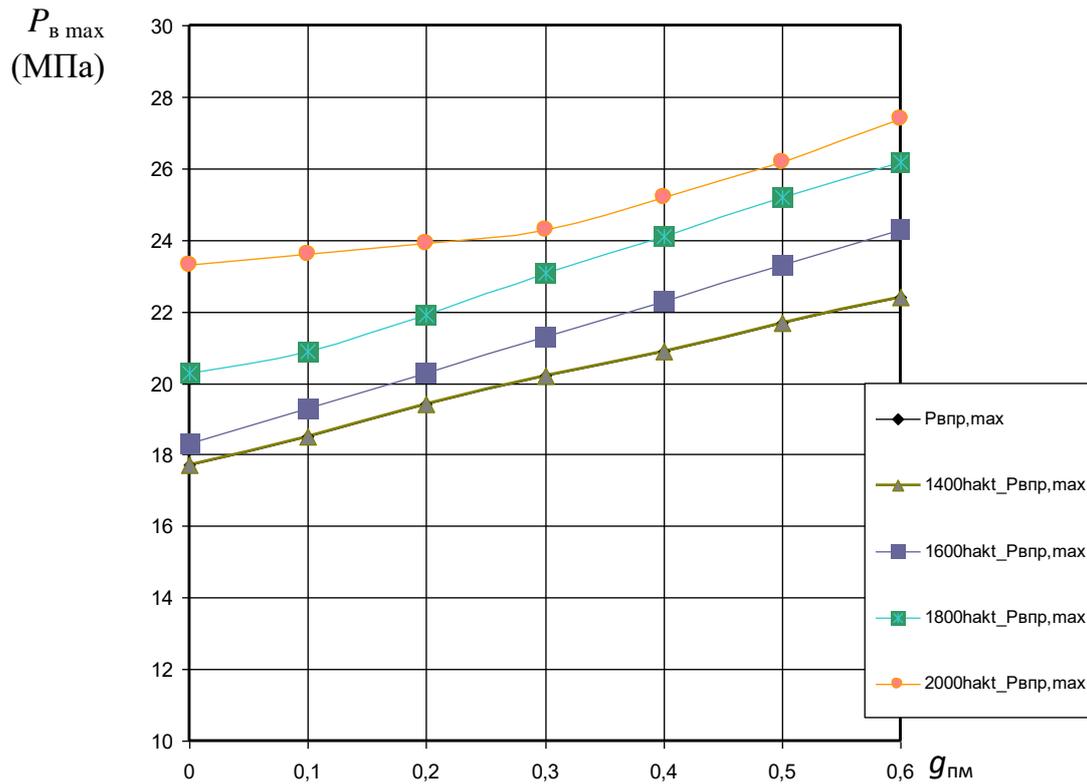


Рисунок 3.4. Влияние состава смесового топлива g_{FM} на максимальные давления впрыскивания топлива $P_{\text{v,max}}$ (МПа) при постоянном активном ходе плунжера $H_{\text{пл.акт.}}$.

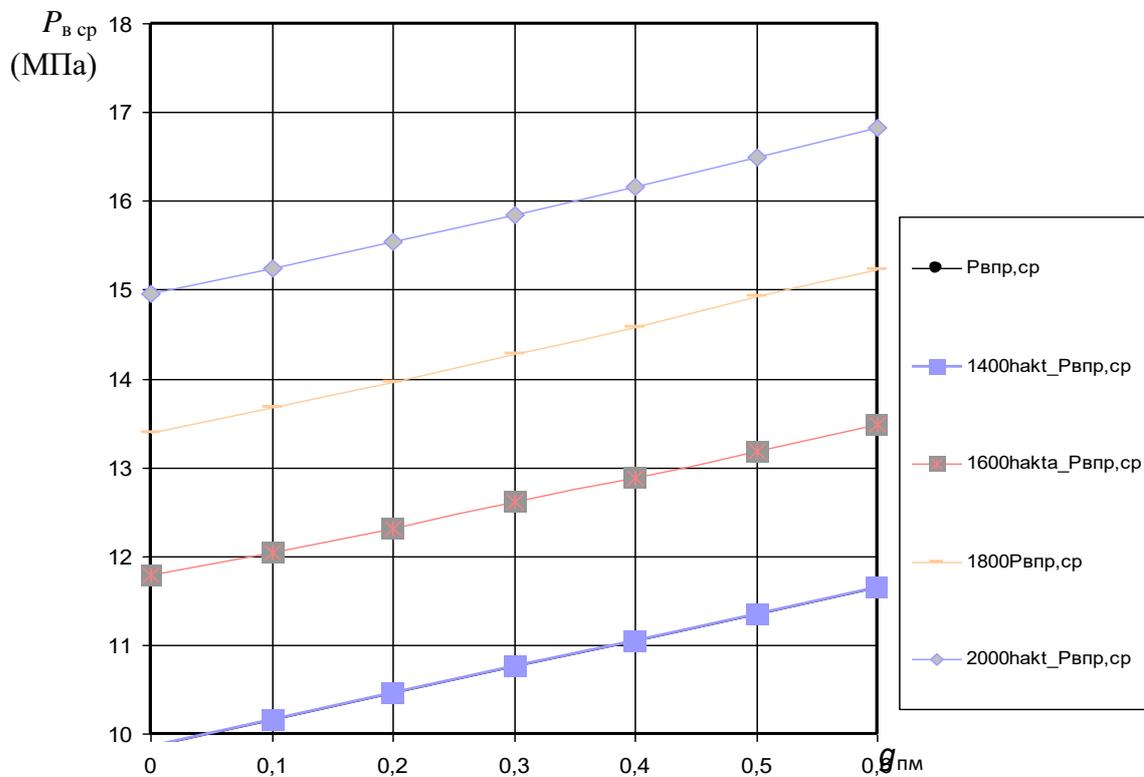


Рисунок 3.5. Влияние состава смесового топлива g_{FM} на средние давления впрыскивания топлива $P_{\text{v,cp}}$ (МПа) при постоянном активном ходе плунжера $H_{\text{пл.акт.}}$.

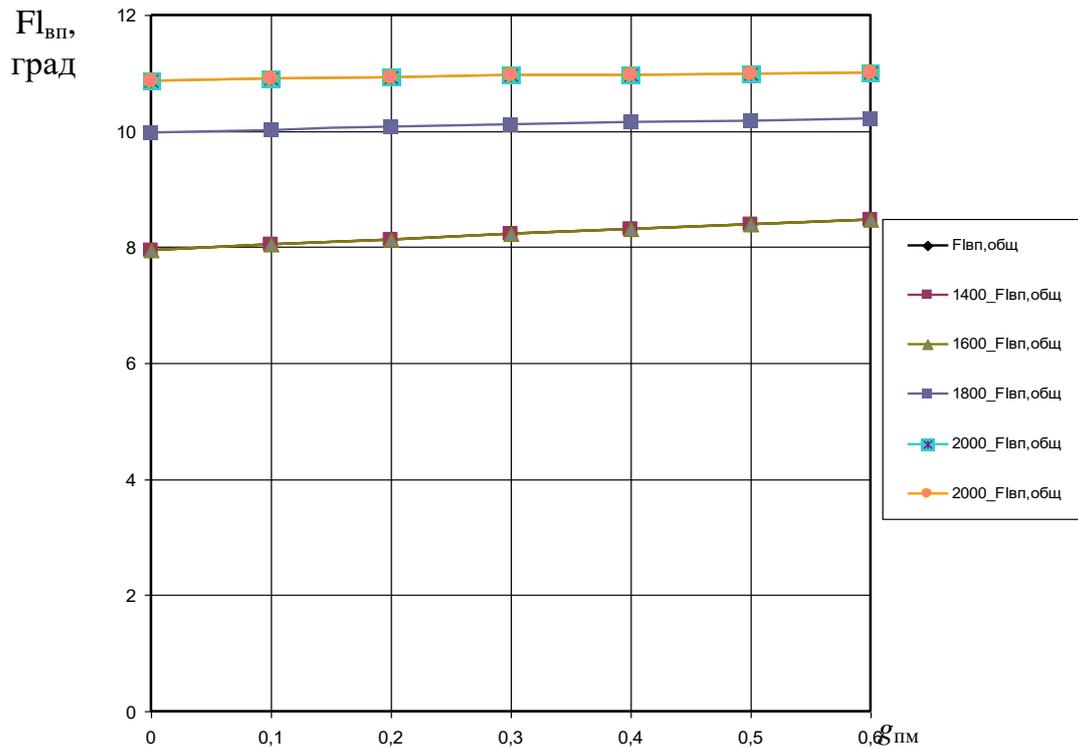


Рисунок 3.6 - Влияние состава смесового топлива $g_{\text{ПМ}}$ на общую продолжительность впрыскивания $F_{\text{ВП}}$, град., при постоянном активном ходе плунжера $H_{\text{ПД,акт}}$.

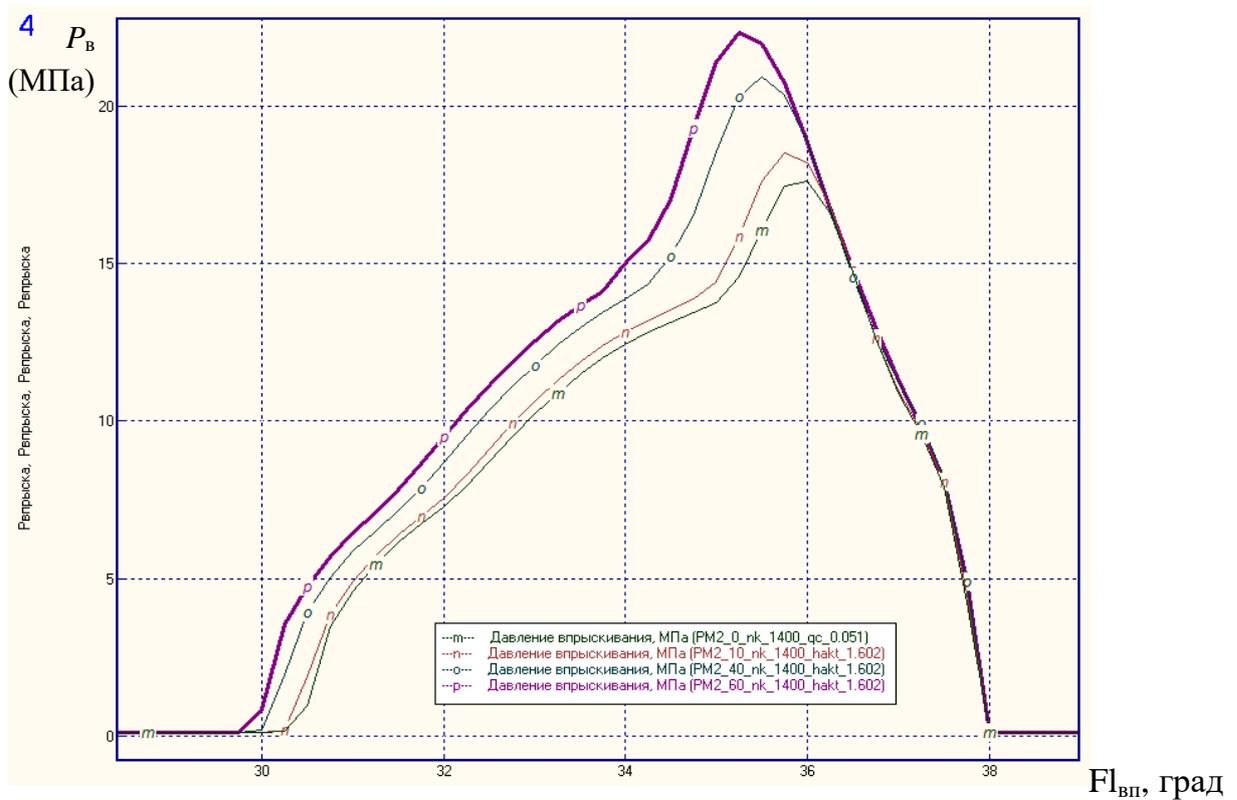


Рисунок 3.7 - Дифференциальные характеристики впрыска в зависимости от состава смесового топлива при постоянном активном ходе плунжера и частоте коленчатого вала 1400 мин^{-1}

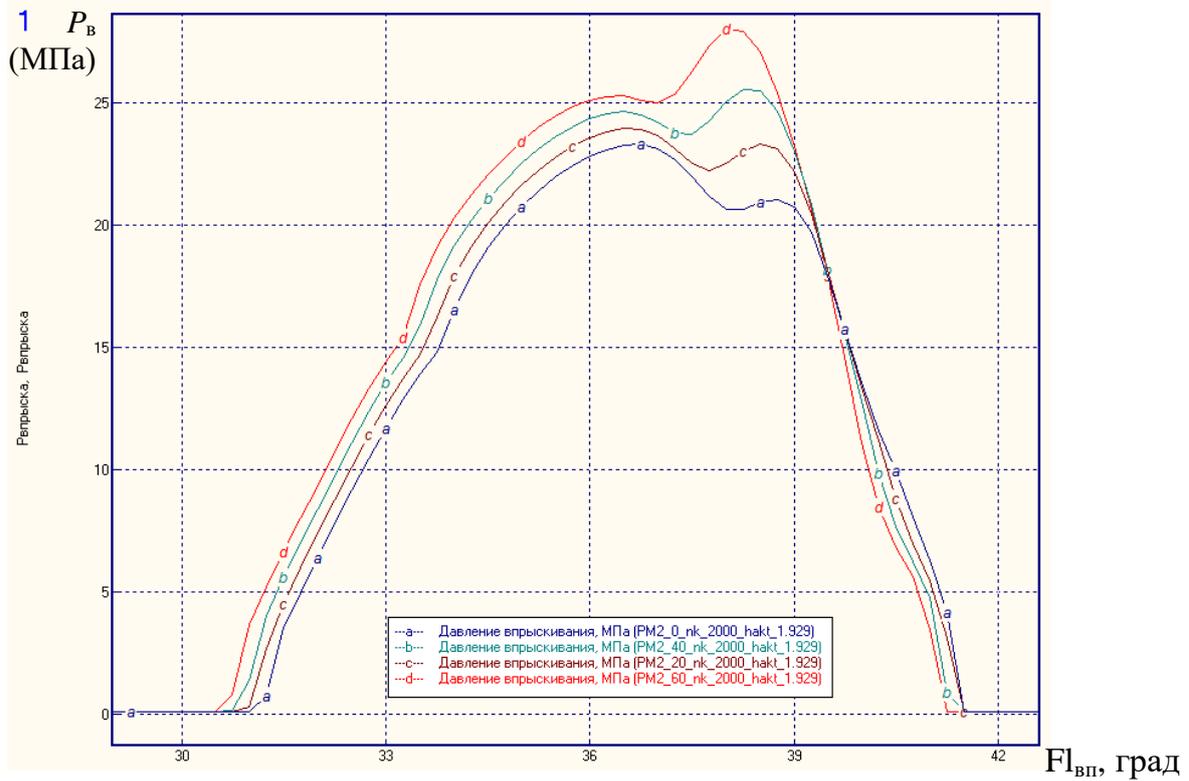


Рисунок 3.10 - Дифференциальные характеристики впрыска в зависимости от состава смесового топлива при постоянном активном ходе плунжера и номинальной частоте коленчатого вала 2000 мин^{-1}

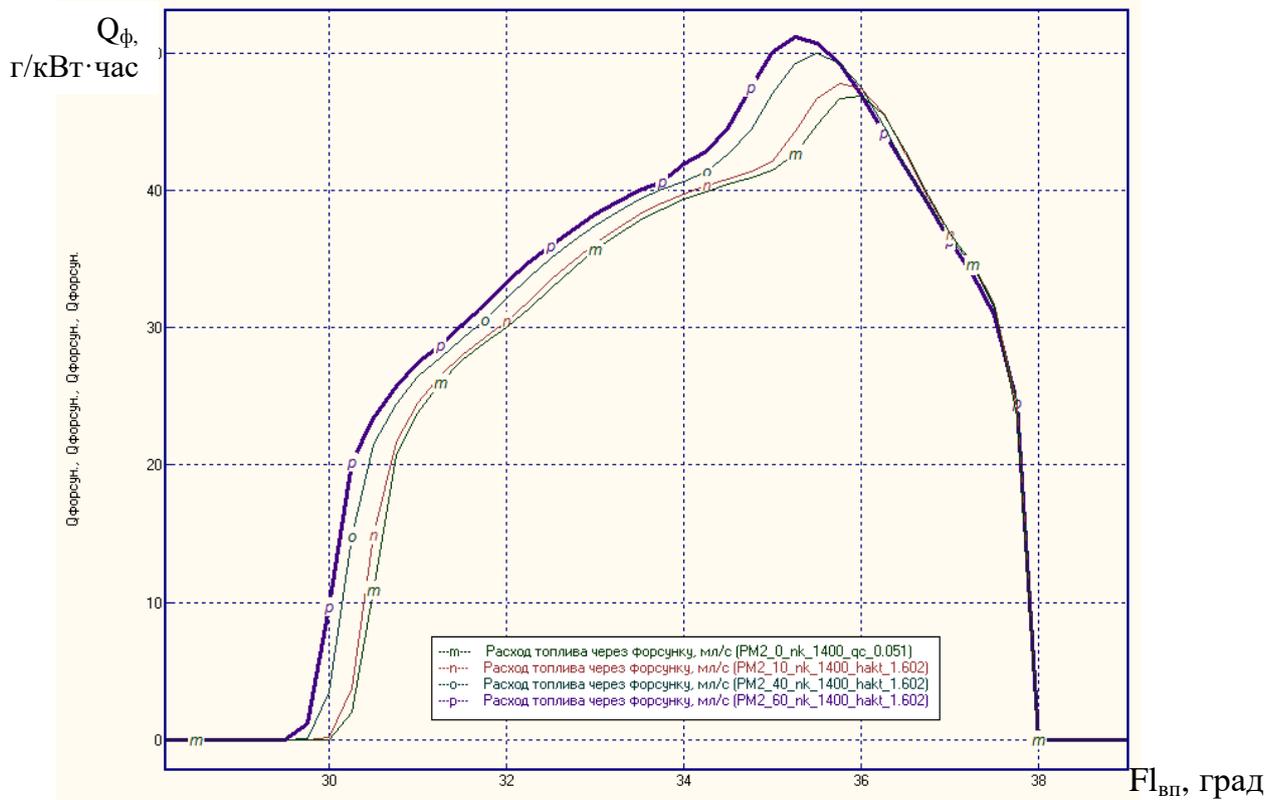


Рисунок 3.11 - Дифференциальные характеристики впрыска в зависимости от состава смесового топлива при постоянном активном ходе плунжера и частоте коленчатого вала 1400 мин^{-1}

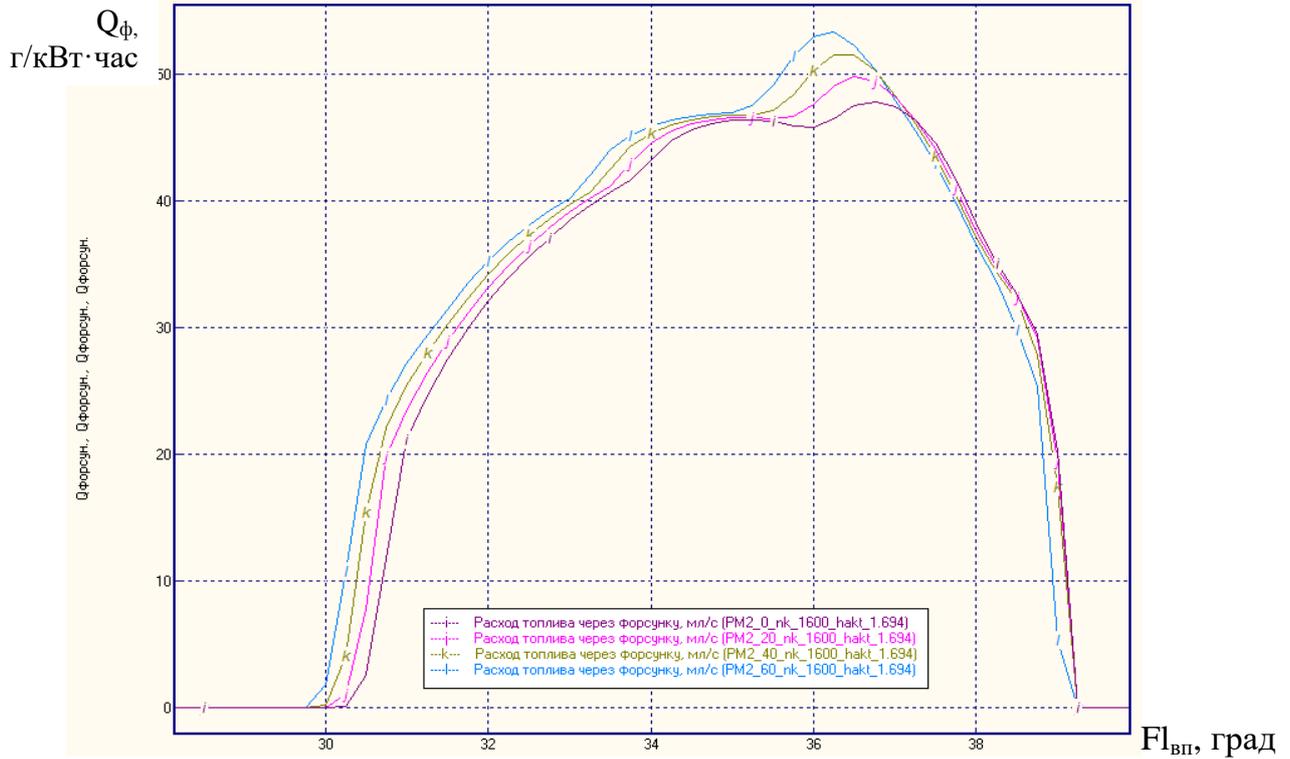


Рисунок 3.12 - Дифференциальные характеристики впрыска в зависимости от состава смесевое топлива при постоянном активном ходе плунжера и частоте коленчатого вала 1600 мин⁻¹

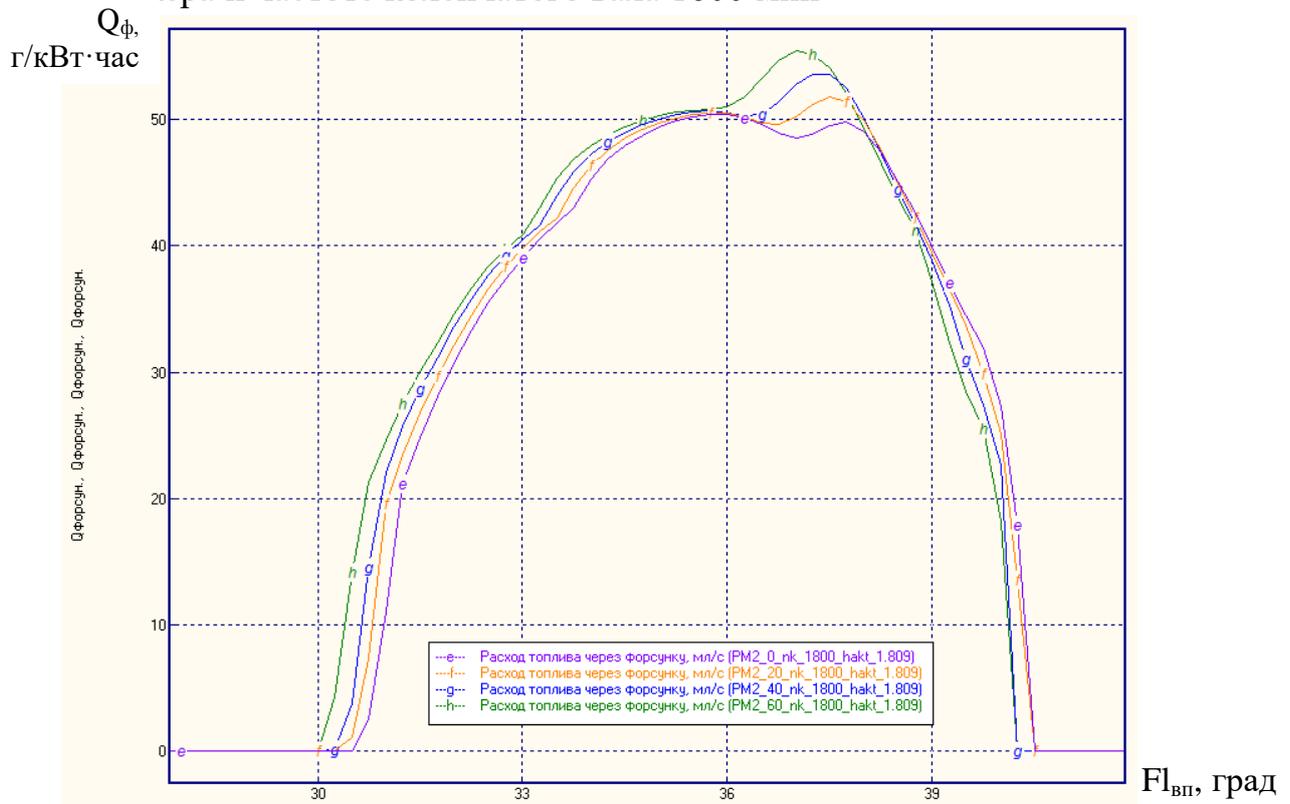


Рисунок 3.13 - Дифференциальные характеристики впрыска в зависимости от состава смесевое топлива при постоянном активном ходе плунжера и частоте коленчатого вала 1800 мин⁻¹

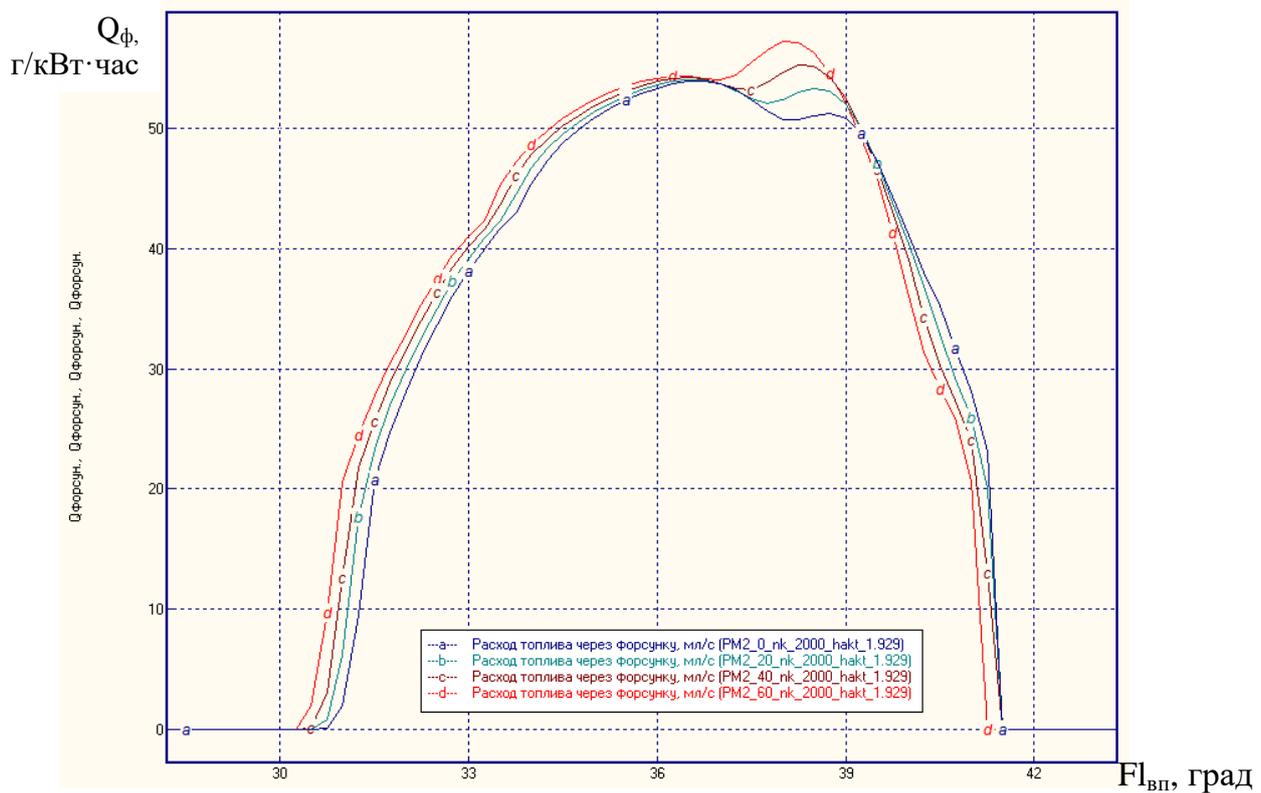


Рисунок 3.14 - Дифференциальные характеристики впрыска в зависимости от состава смесового топлива при постоянном активном ходе плунжера и номинальной частоте коленчатого вала 2000 мин^{-1}

Анализ рисунков 3.3-3.6 показывает, что увеличение доли ПМ $g_{\text{пм}}$ в составе смесового топлива ведет к увеличению массовой цикловой подачи смеси, росту средних и максимальных давлений впрыскивания и общей продолжительности подачи. Это объясняется увеличением плотности и вязкости смеси.

Следует отметить большее увеличение массовой цикловой подачи смеси $G_{\text{ц см}}$ с ростом доли ПМ в смеси $g_{\text{пм}}$, полученной при гидродинамическом расчете (см. рисунок 3.4), по сравнению с массовой цикловой подачей смеси $G_{\text{ц см}}$, полученной только при учете плотности смеси (см. Рисунок 3.2). Это можно объяснить уменьшением утечек смеси через зазоры в плунжерной паре из-за увеличения вязкости смеси с ростом доли ПМ $g_{\text{пм}}$. При уменьшении скоростного режима влияние доли ПМ в смеси на показатели впрыскивания становится заметнее. Так, при $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ $G_{\text{ц см}}$ увеличивается на 0,0062 г, а при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ – на 0,0096 г.

Для стабилизации массовой цикловой подачи смеси $G_{\text{ц см}}$ с ростом доли ПМ в смеси $g_{\text{пм}}$ необходимо уменьшать активный ход плунжера, то есть производить регулировку топливной аппаратуры.

Выполнена серия расчетов показателей процесса топливоподачи для смесового топлива при условии постоянной массовой цикловой подачи смеси

$G_{\text{цсм}}$, соответствующей цикловой подаче на чистом ДТ при каждом скоростном режиме. Результаты расчетов представлены на рисунках 3.15-3.19.

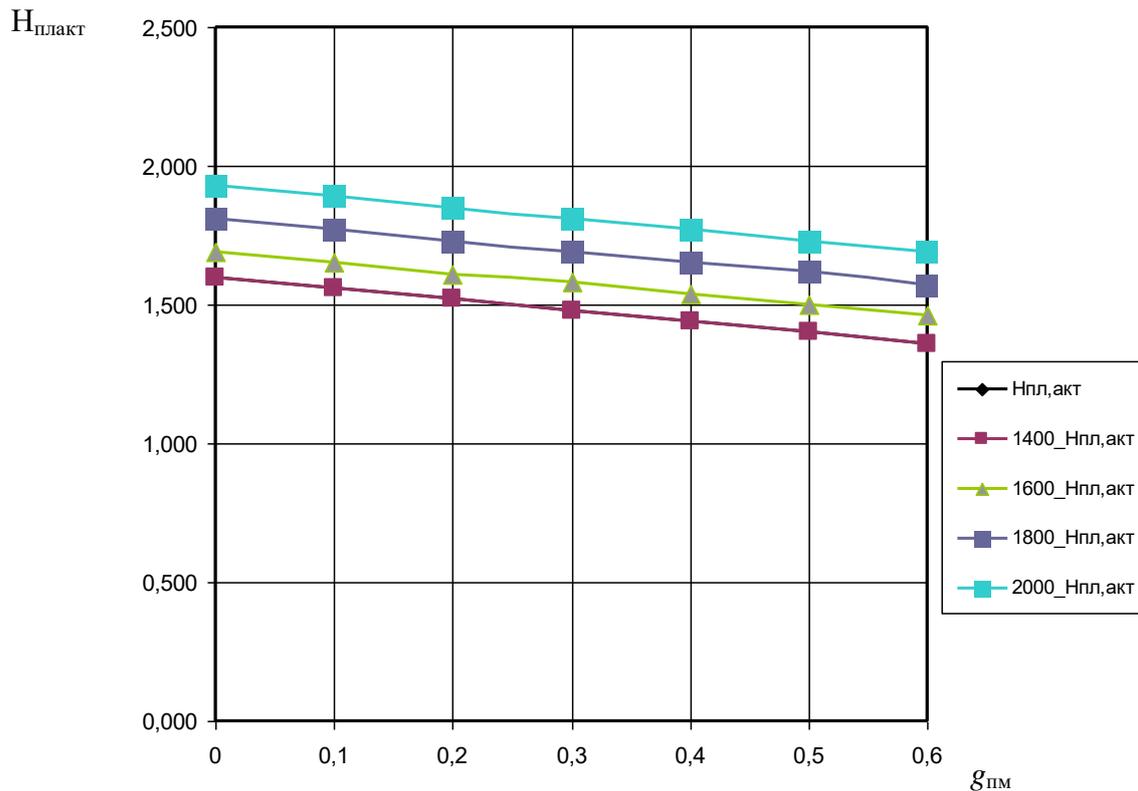


Рисунок 3.15 - Влияние состава смесового топлива $g_{\text{пм}}$ на активный ход плунжера $H_{\text{пл,акт}}$ (мм) при постоянной массовой цикловой подаче смеси $G_{\text{ц см}}$

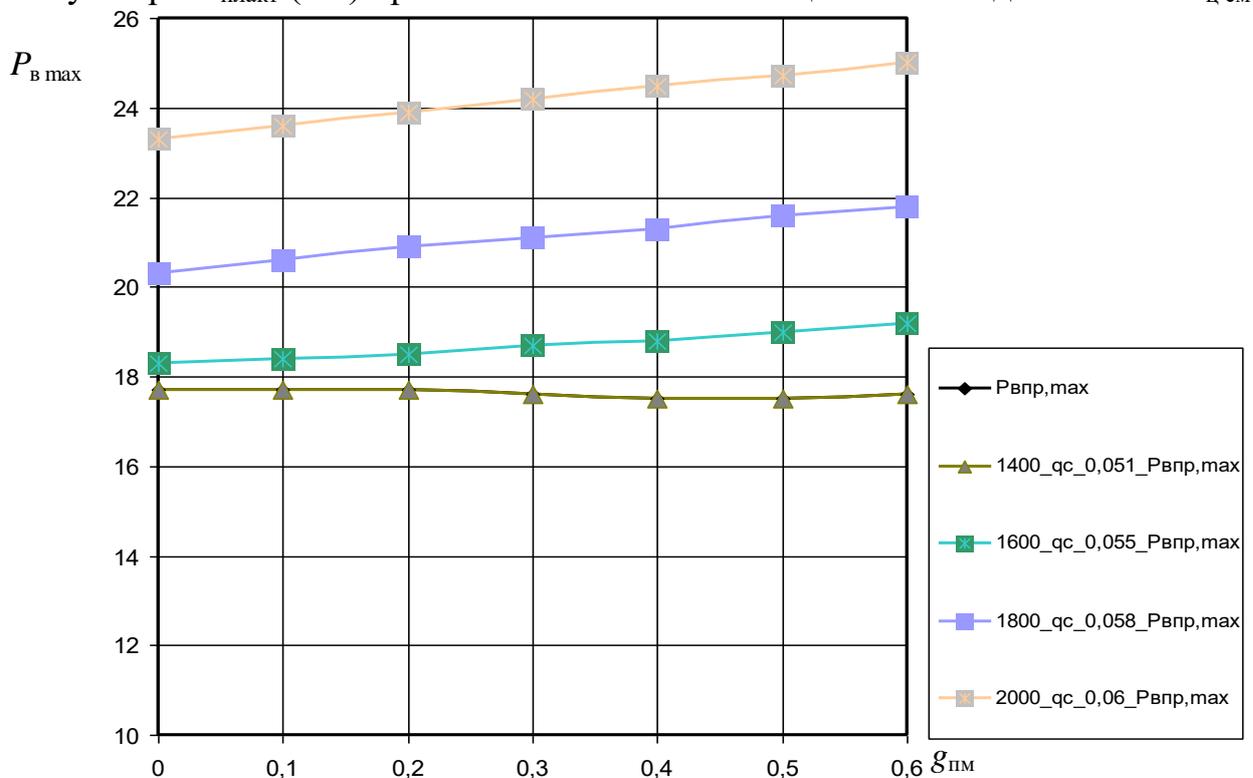


Рисунок 3.16 - Влияние состава смесового топлива $g_{\text{пм}}$ на максимальные давления впрыскивания топлива $P_{\text{в max}}$ (МПа) при постоянной массовой цикловой подаче смеси $G_{\text{ц см}}$

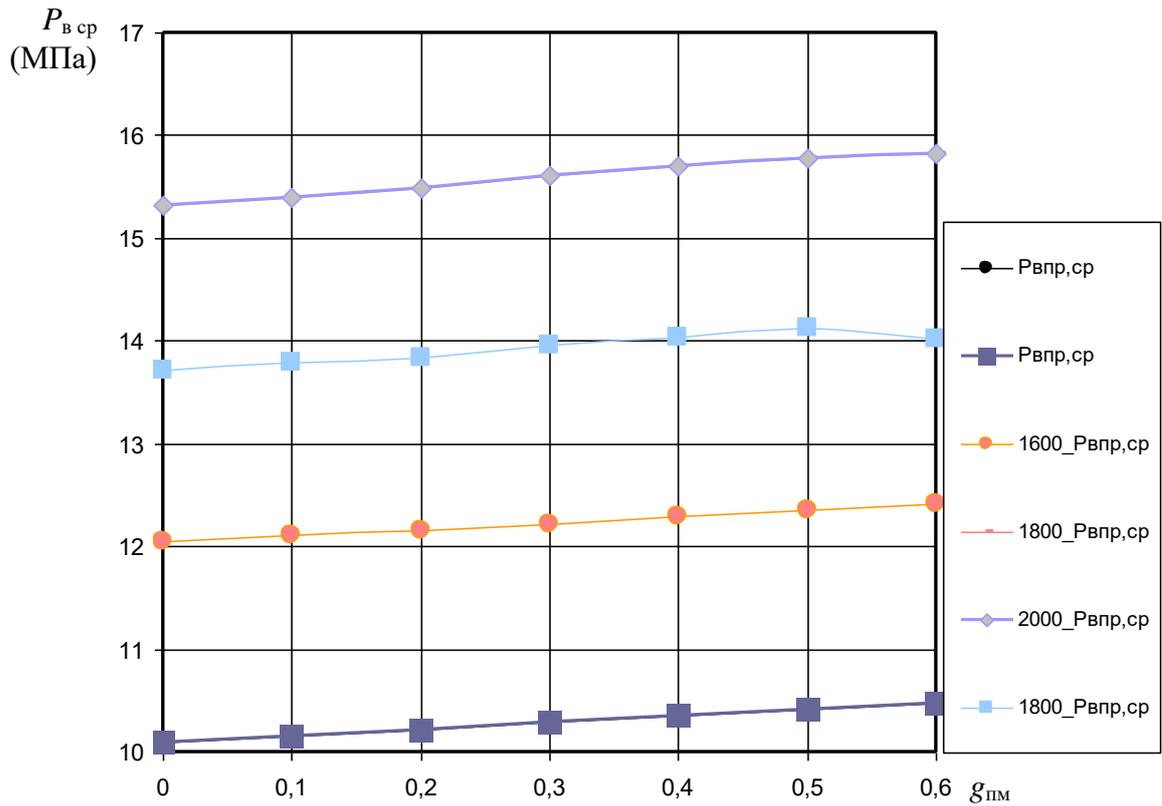


Рисунок 3.17 - Влияние состава смесевго топлива $g_{\text{ПМ}}$ на средние давления впрыскивания топлива $P_{\text{вср}}$ (МПа) при постоянной массовой цикловой подаче смеси $G_{\text{цсм}}$

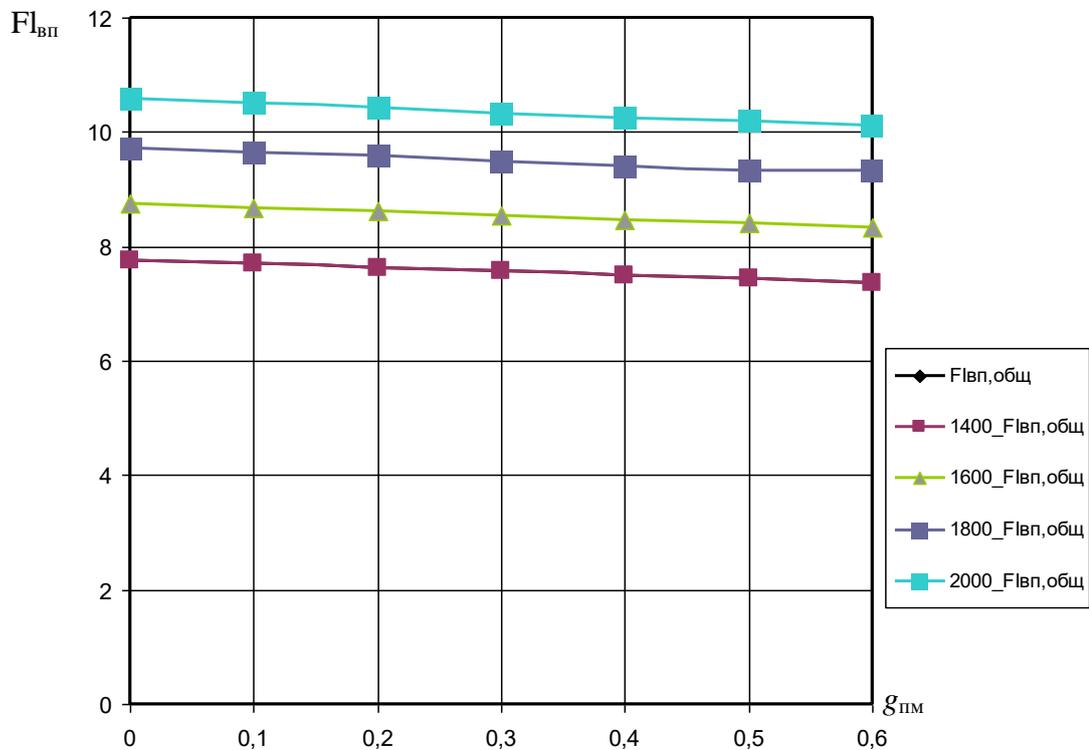


Рисунок 3.18 - Влияние состава смесевго топлива $g_{\text{ПМ}}$ на общую продолжительность впрыскивания $Fl_{\text{вп}}$, град., при постоянной массовой цикловой подаче смеси $G_{\text{цсм}}$

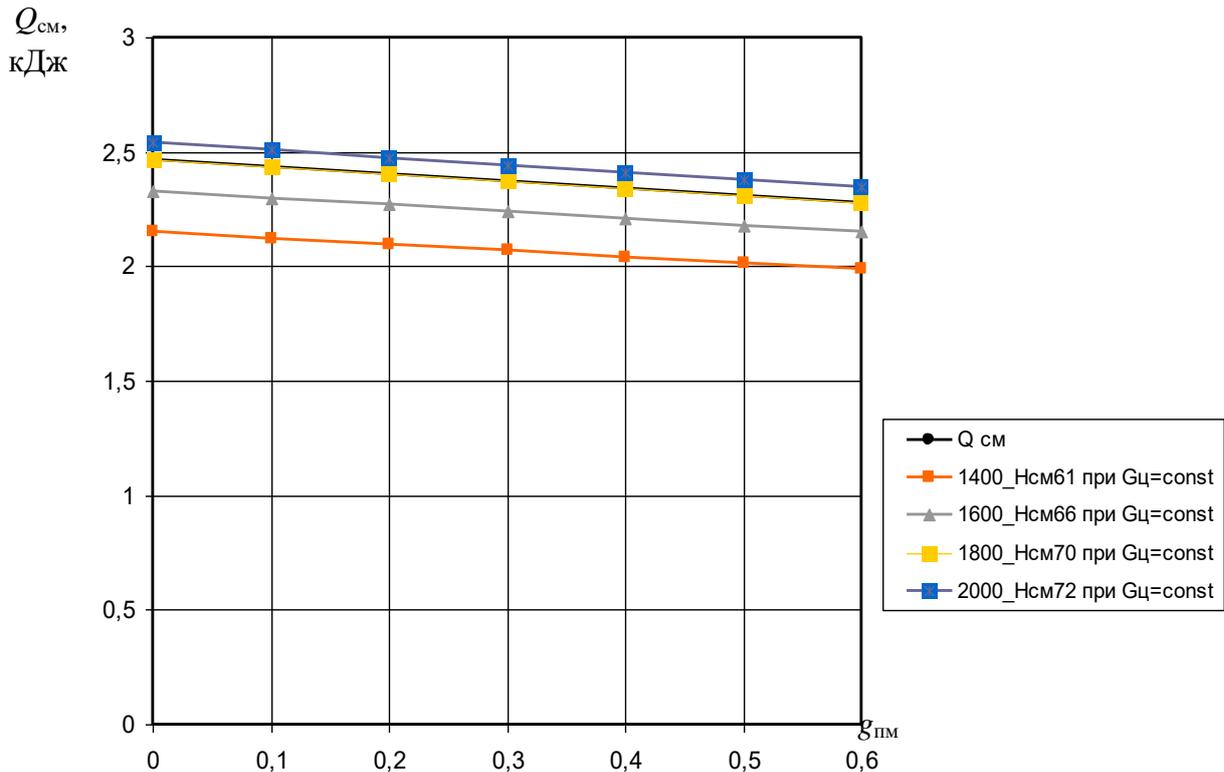


Рисунок 3.19 - Влияние состава смеси топлива $g_{пм}$ на количество теплоты $Q_{см}$, кДж, введенной с топливом в камеру сгорания при постоянной массовой цикловой подаче смеси $G_{ц см}$

Как видно из рисунка 3.15, активный ход снизился с 1,93 до 1,7 мм при 2000 мин⁻¹, и с 1,6 до 1,36 мм при 1400 мин⁻¹, также снизилась общая продолжительность подачи (см. рисунок 3.18). Однако максимальные и средние давления впрыскивания продолжают увеличиваться с ростом доли пальмового масла в смеси $g_{пм}$ до 24,9 МПа и до 15,8 МПа соответственно при $n = 2000$ мин⁻¹ (см. рисунки 3.16, 3.17), что объясняется увеличением плотности и вязкости смеси. С уменьшением скоростного режима рост максимальных давлений впрыскивания при увеличении доли ПМ становится менее интенсивным, а при $n = 1400$ мин⁻¹ максимальные давления впрыскивания не увеличиваются (см. рисунки 3.16, 3.17).

Стабилизация массовой цикловой подачи смеси $G_{ц см}$ с ростом доли ПМ в смеси $g_{пм}$ ведет к снижению количества теплоты, введенной с топливом в КС в связи со снижением теплотворной способности смеси, что ведет к снижению мощности дизеля. На рисунке 3.19 показано изменение теплоты $Q_{см}$, введенной с топливом в КС при постоянной массовой цикловой подаче смеси $G_{ц см}$,

соответствующей массовой цикловой подаче $G_{ц}$ чистого ДТ при соответствующей частоте коленчатого вала (см. таблицу 3.2). Теплотворная способность ДТ принята равной 42500 кДж/кг, ПМ– 37100 кДж/кг.

В связи с этим представляется целесообразным проводить регулировку активного хода плунжера с целью стабилизации количества теплоты, введенной с топливом в КС.

Были проведены расчеты показателей процесса топливоподачи для смесевоего топлива с учетом данного обстоятельства для постоянного количества введенной теплоты $Q_{см}$, соответствующего чистому ДТ при номинальной цикловой подаче при частоте 2000 мин⁻¹ и при частичных цикловых подачах, соответствующих частотам 1800, 1600 и 1400 мин⁻¹. Результаты расчетов представлены на рисунках 3.20-3.33.

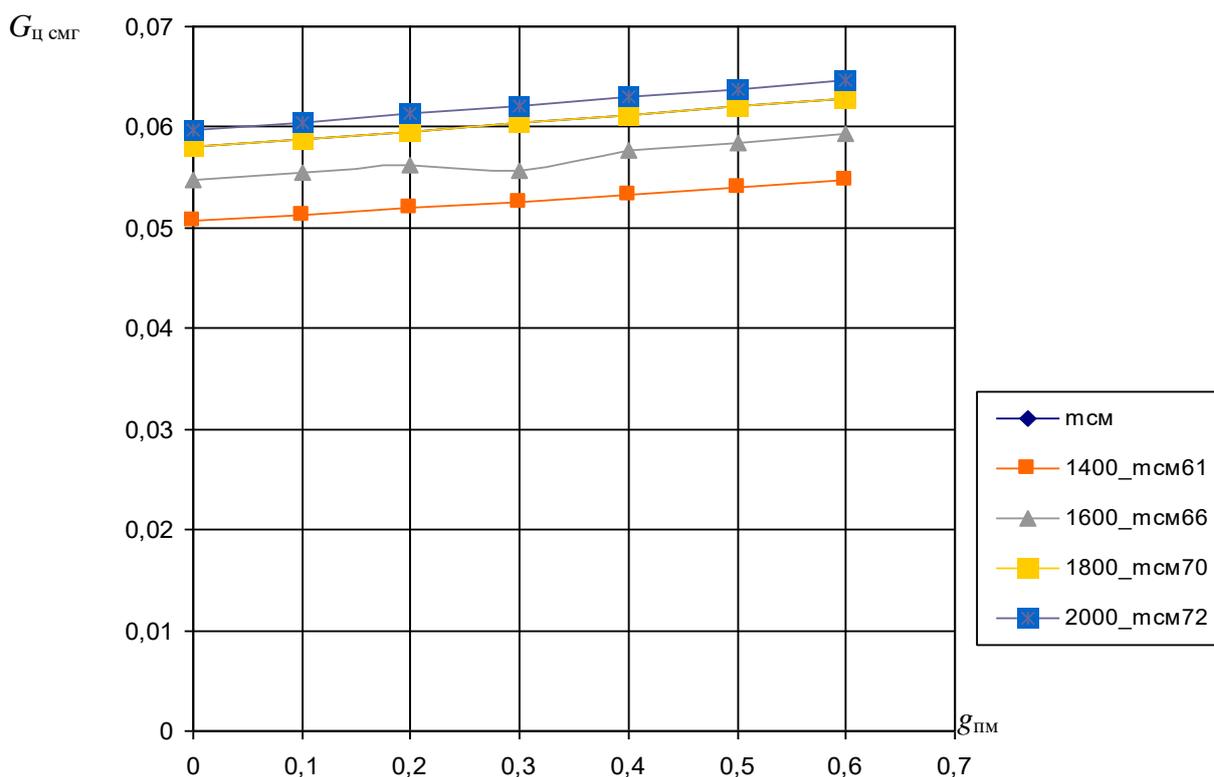


Рисунок 3.20 - Влияние состава смесевоего топлива $g_{пм}$ на массовую цикловую подачу смеси $G_{ц смг}$, г, при постоянном количестве подведенной теплоты $Q_{см}$

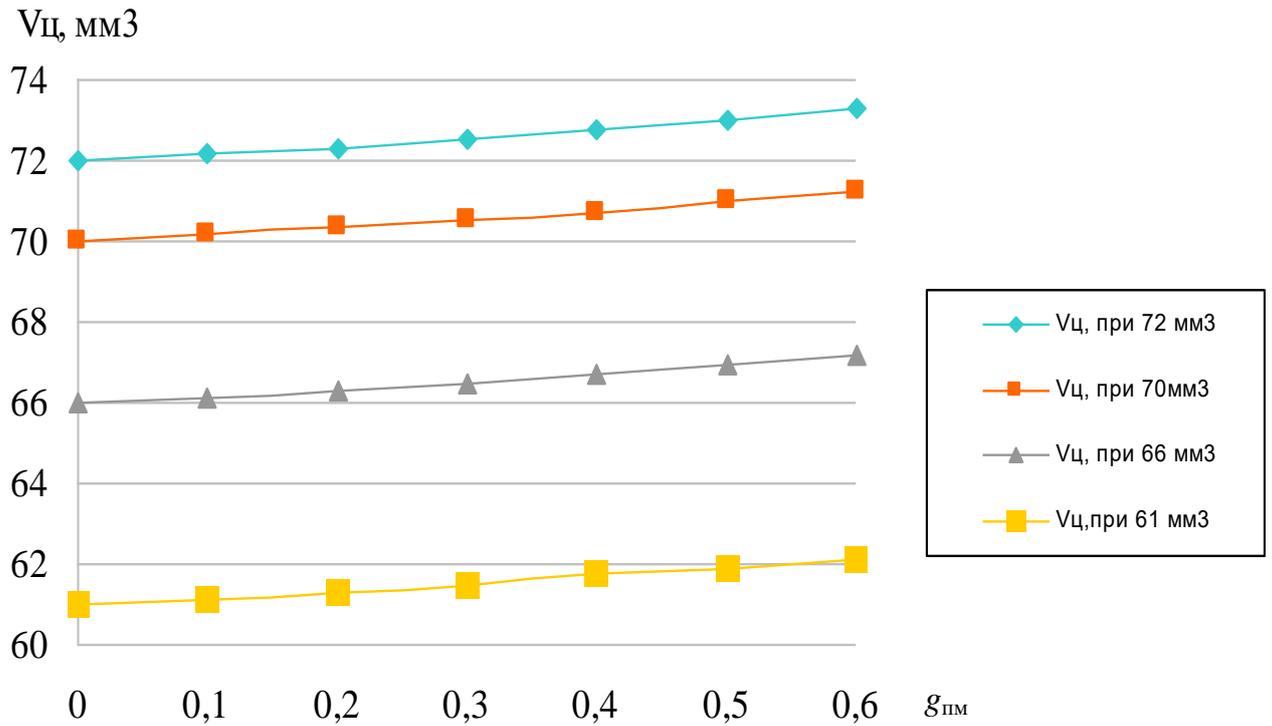


Рисунок 3.21 - Влияние состава смесевго топлива $g_{пм}$ на объемную цикловую подачу смеси $V_{цсм}$, мм³, при постоянном количестве подведенной теплоты $Q_{см}$

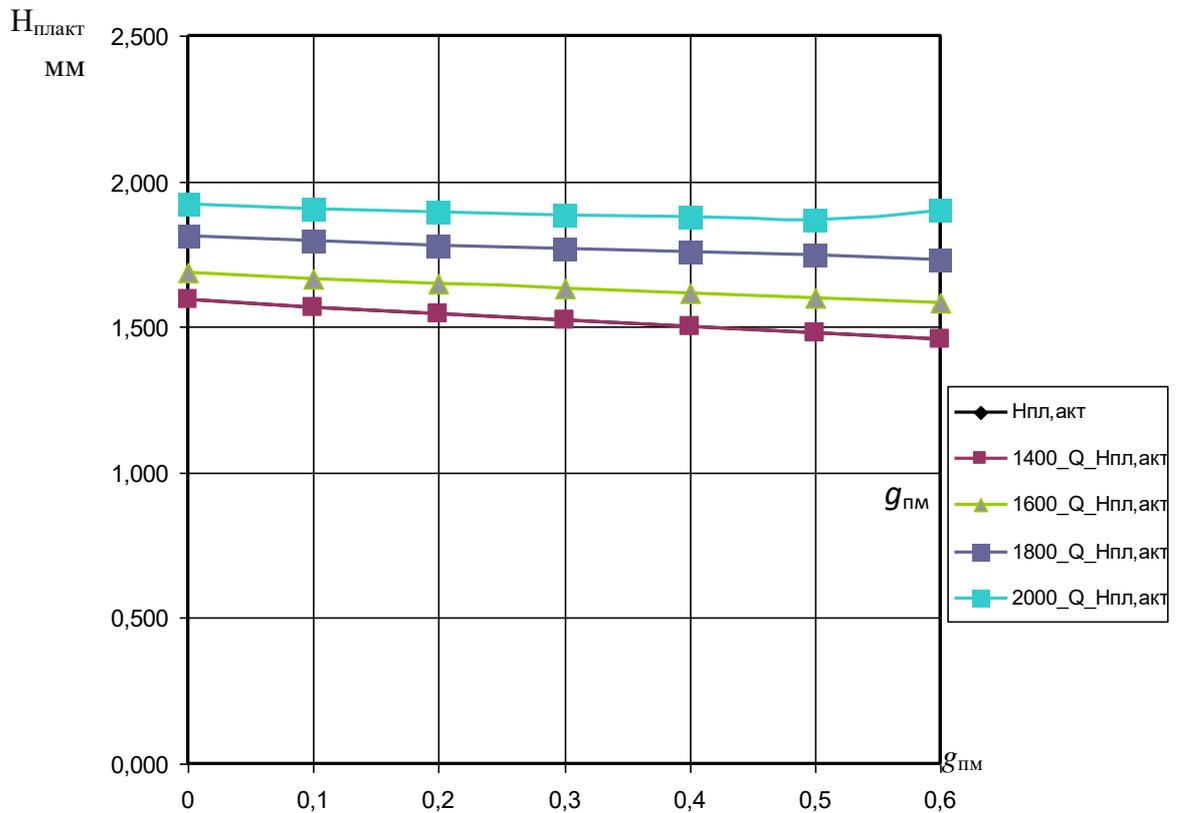


Рисунок 3.22 Влияние состава смесевго топлива $g_{пм}$ на активный ход плунжера $N_{плакт}$, мм, при постоянном количестве подведенной теплоты $Q_{см}$

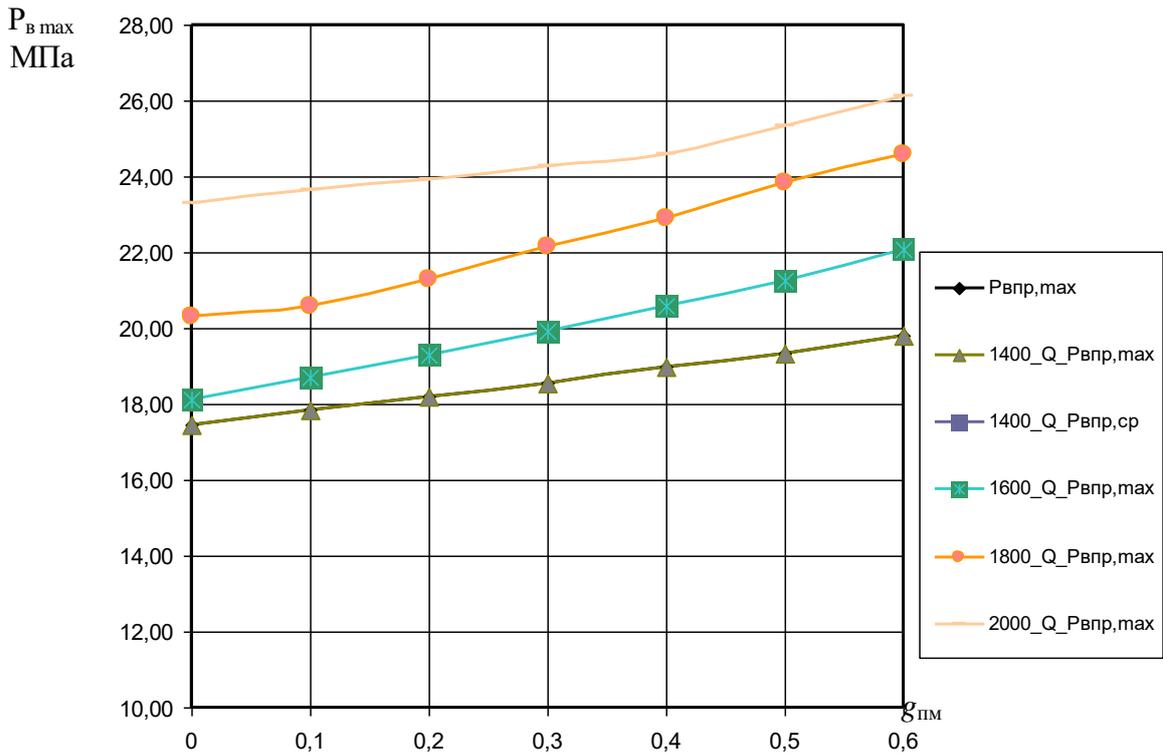


Рисунок 3.23 - Влияние состава смесового топлива $g_{ПМ}$ на максимальные давления впрыскивания топлива $P_{в\ max}$, МПа при постоянном количестве подведенной теплоты $Q_{см}$

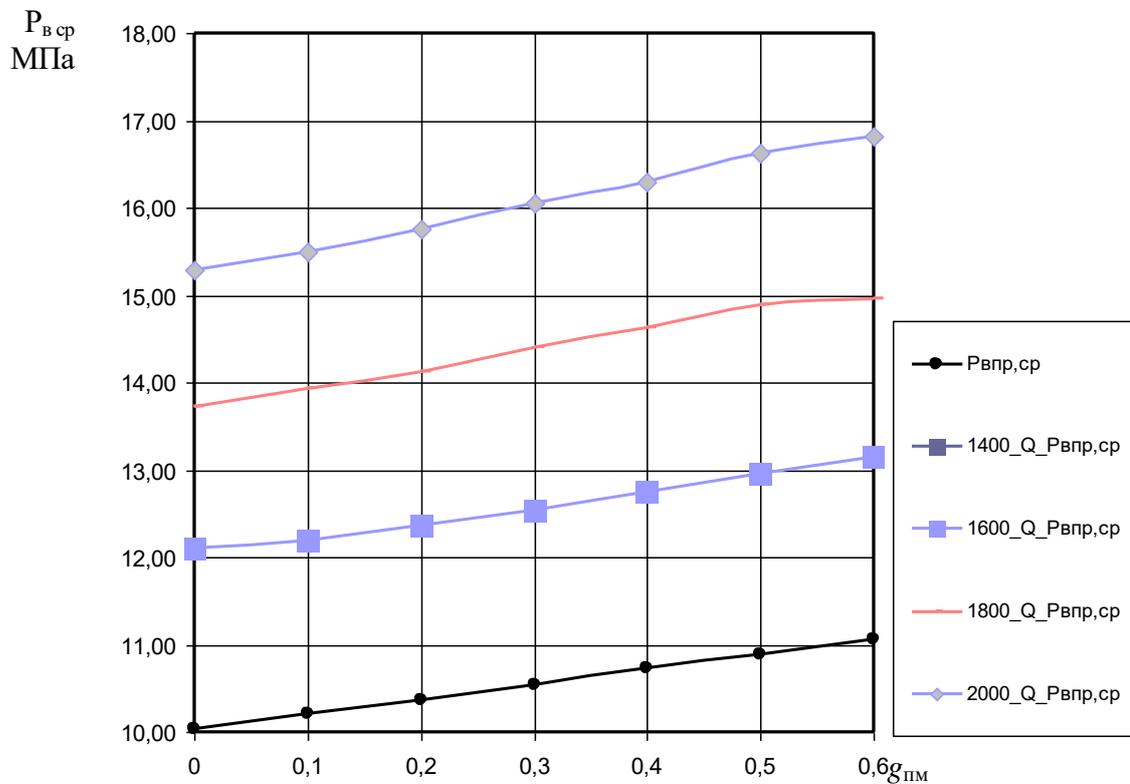


Рисунок 3.24 - Влияние состава смесового топлива $g_{ПМ}$ на средние давления впрыскивания топлива $P_{в\ ср}$, МПа при постоянном количестве подведенной теплоты $Q_{см}$

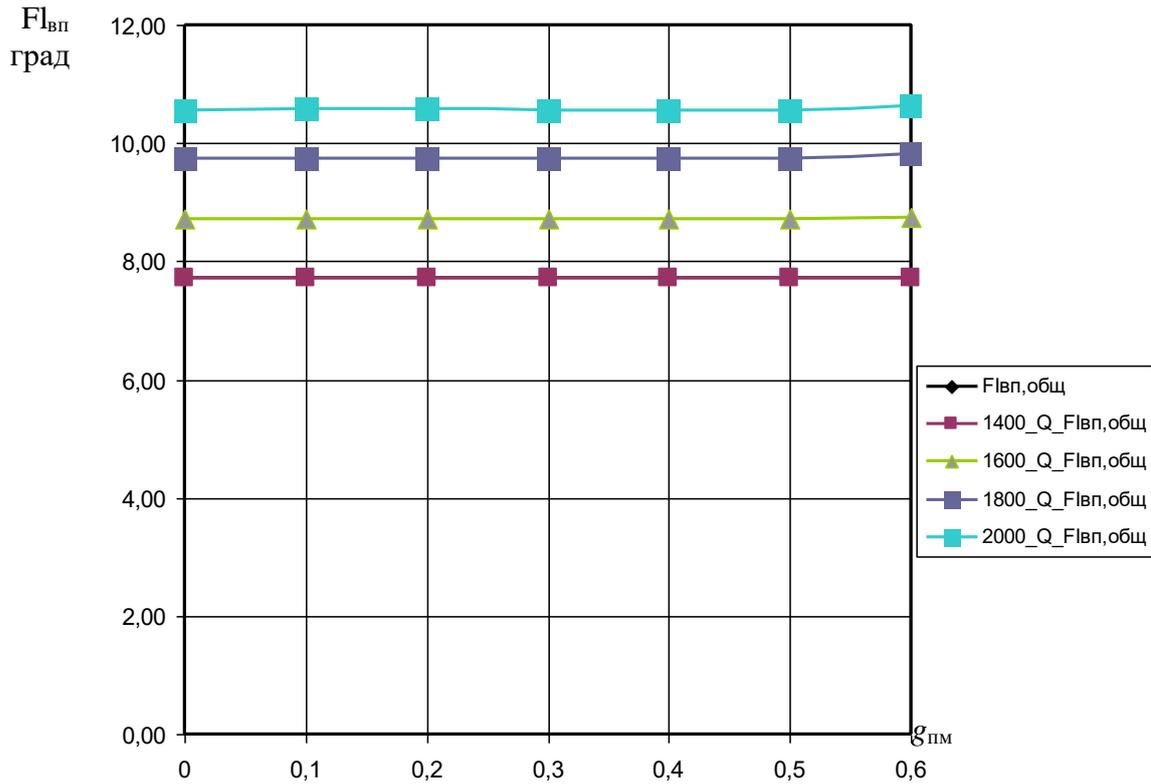


Рисунок 3.25 - Влияние состава смеси топлива $g_{пм}$ на общую продолжительность впрыскивания $FL_{вп}$, град., при постоянном количестве подведенной теплоты $Q_{см}$

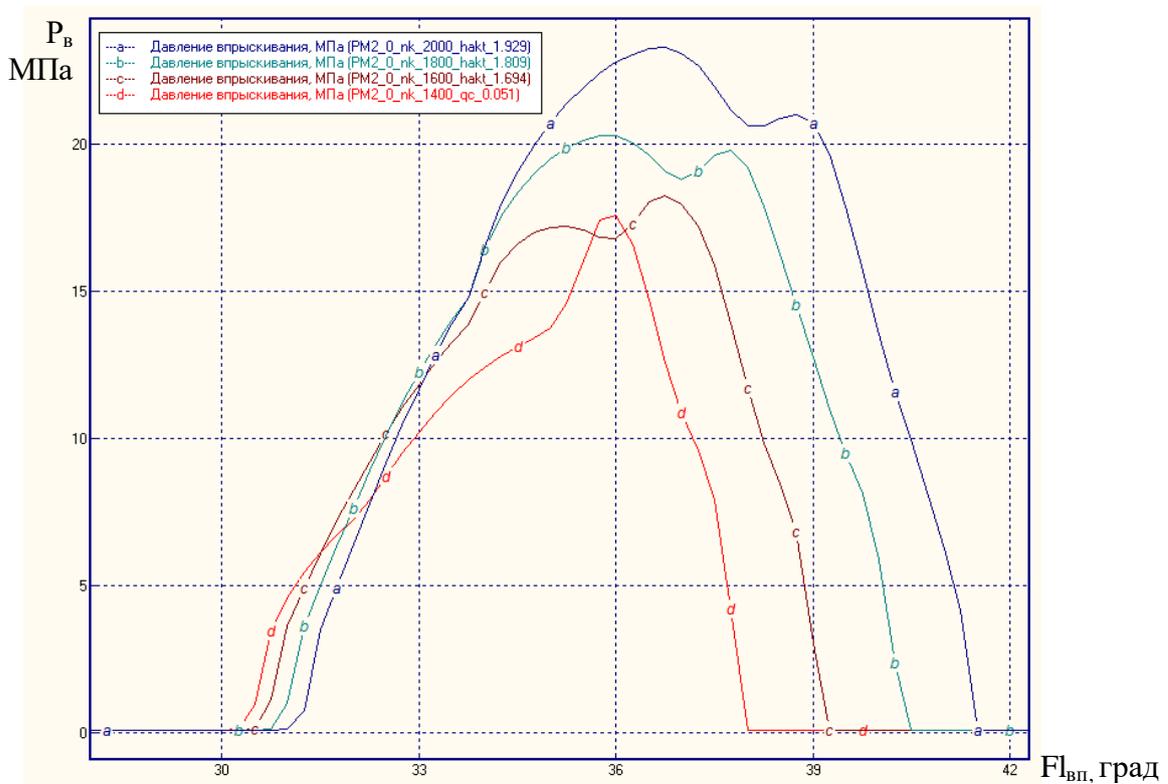


Рисунок 3.26 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для чистого ДТ.

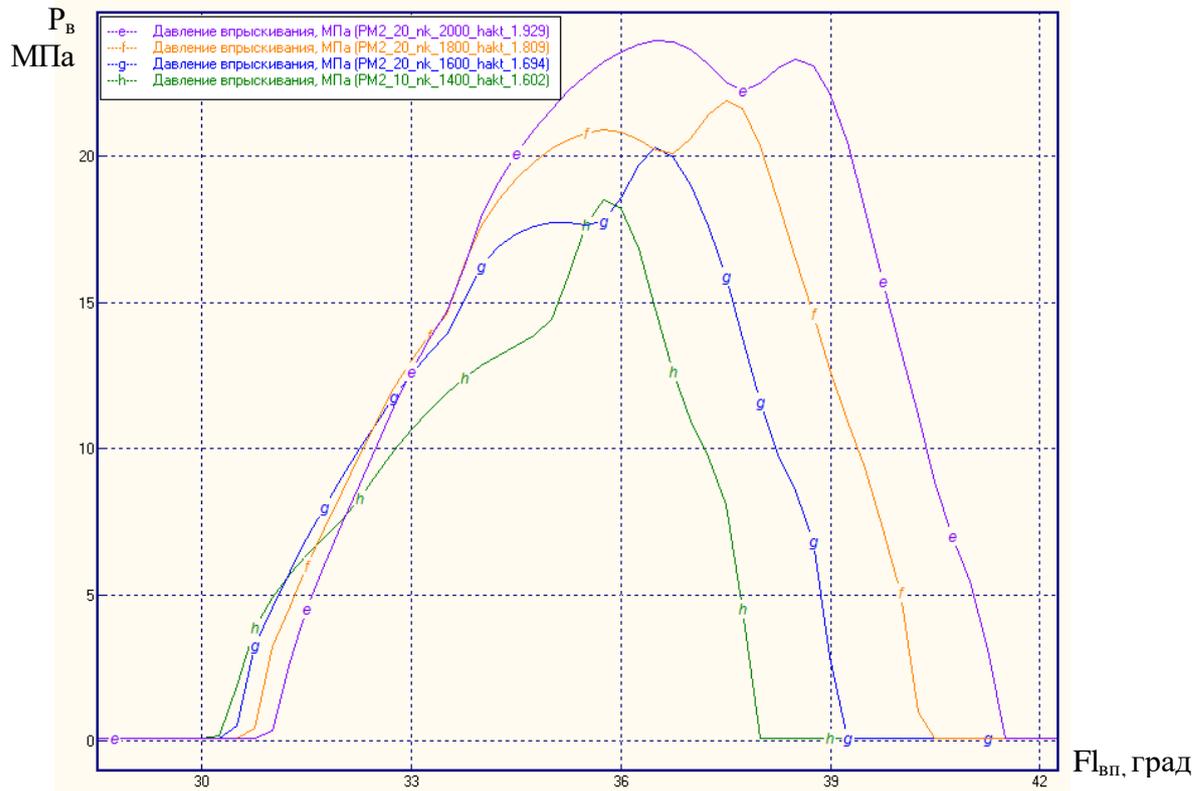


Рисунок 3.27 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для ПМ20.

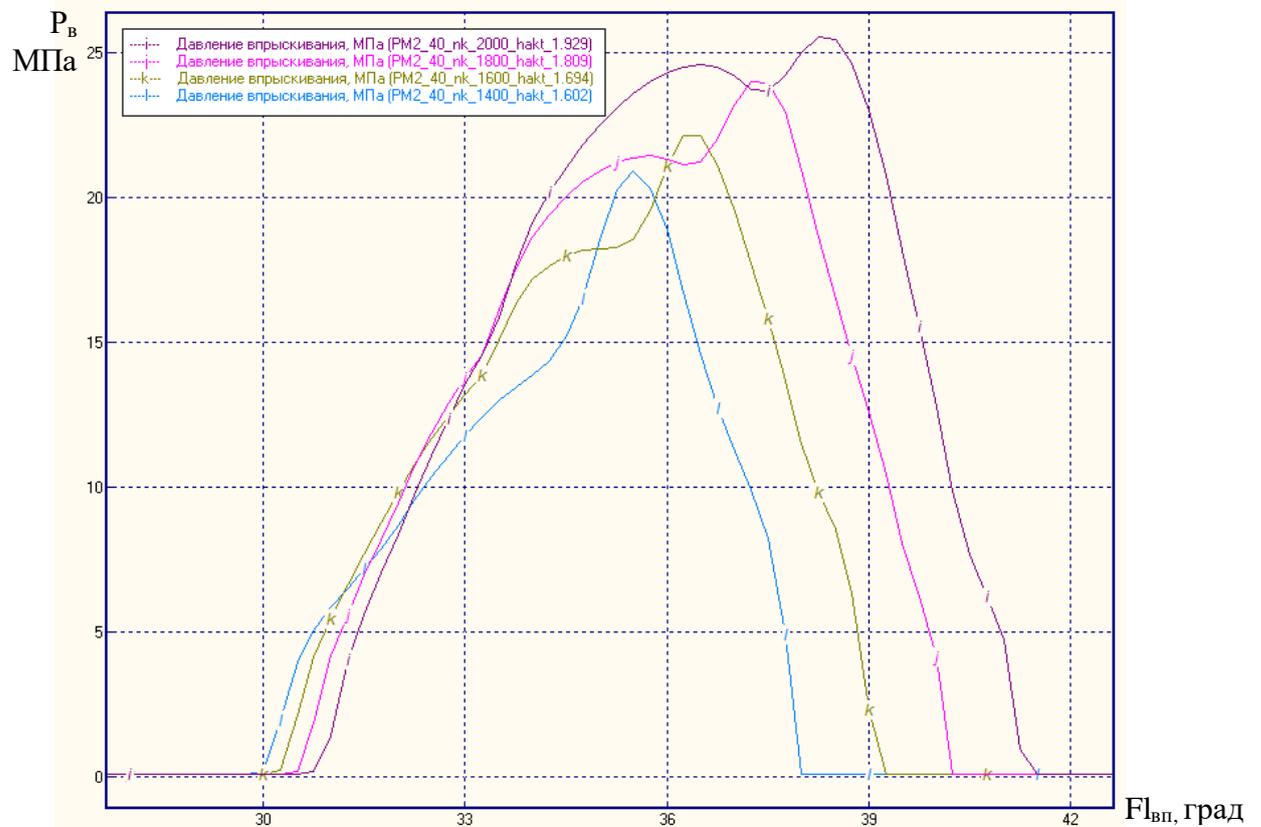


Рисунок 3.28. Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для ПМ40.

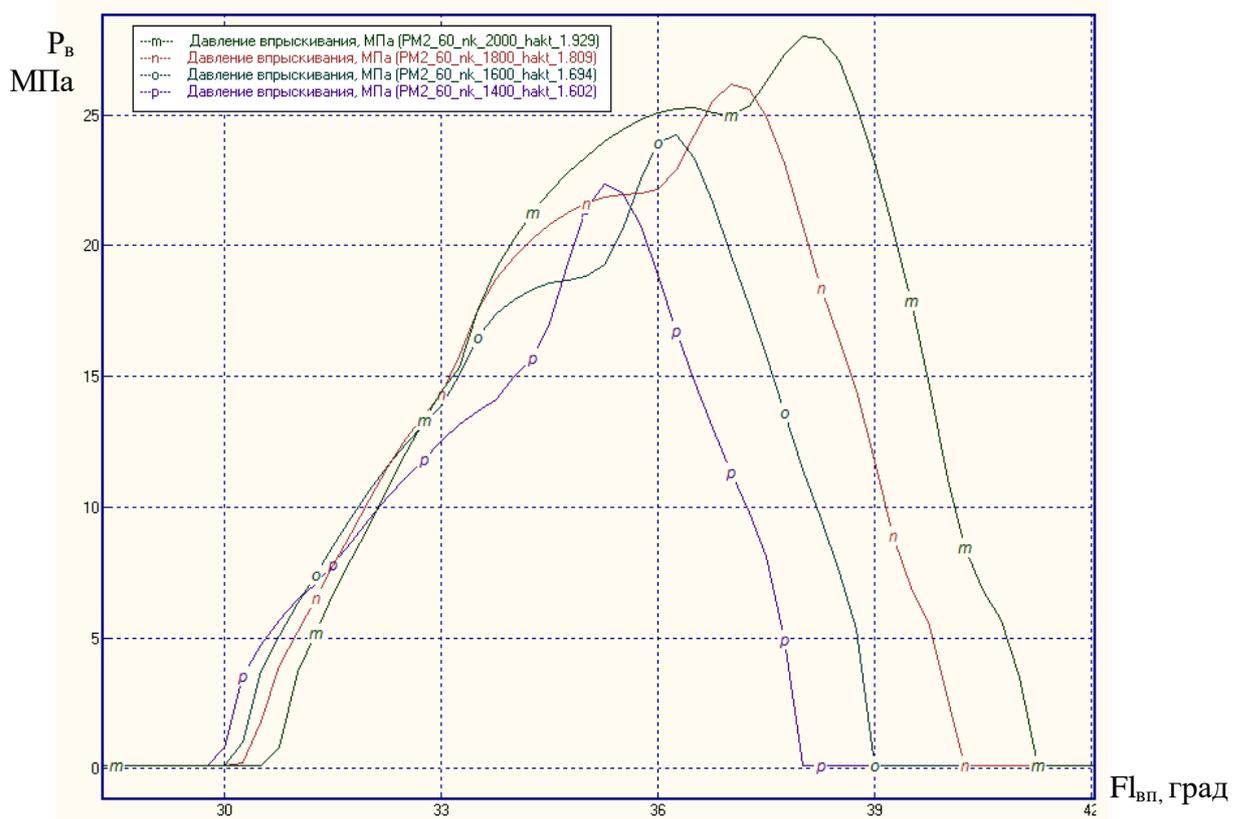


Рисунок 3.29 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для ПМ60

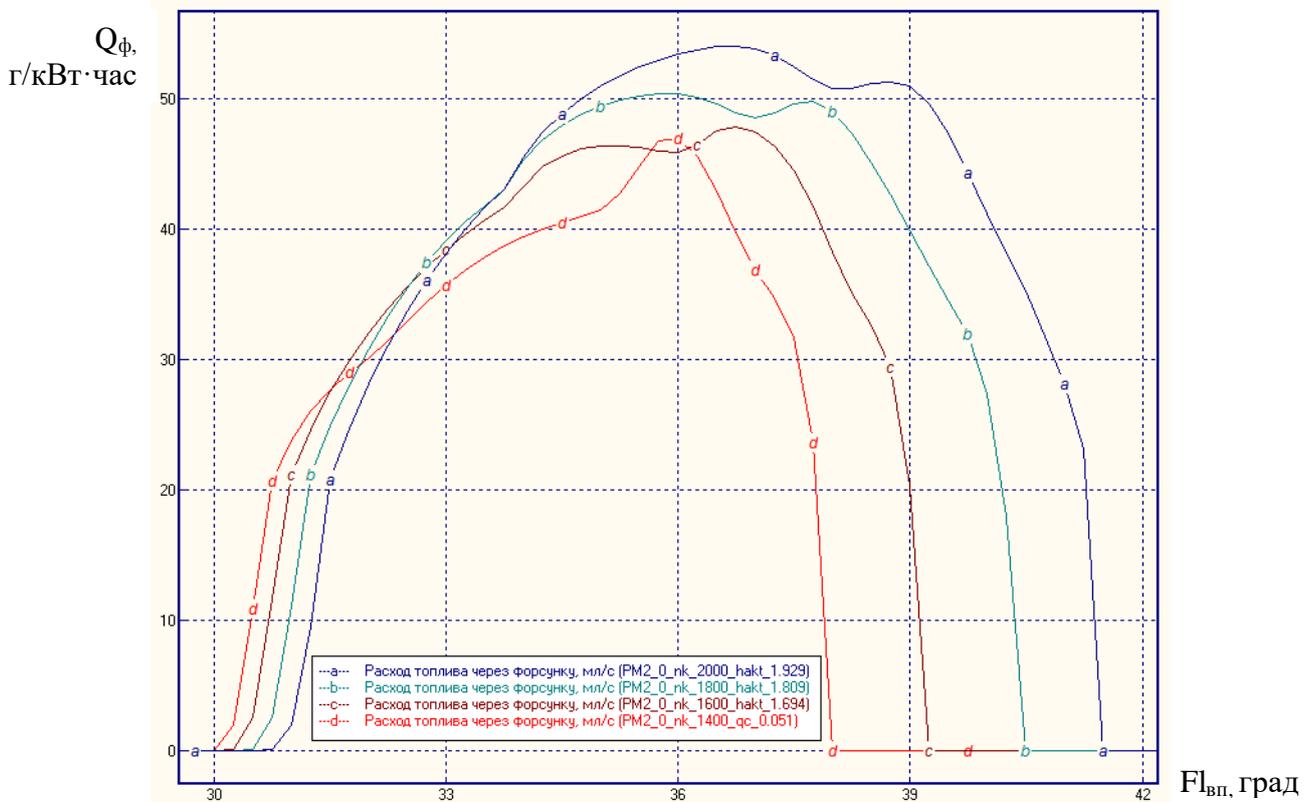


Рисунок 3.30 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для чистого ДТ.

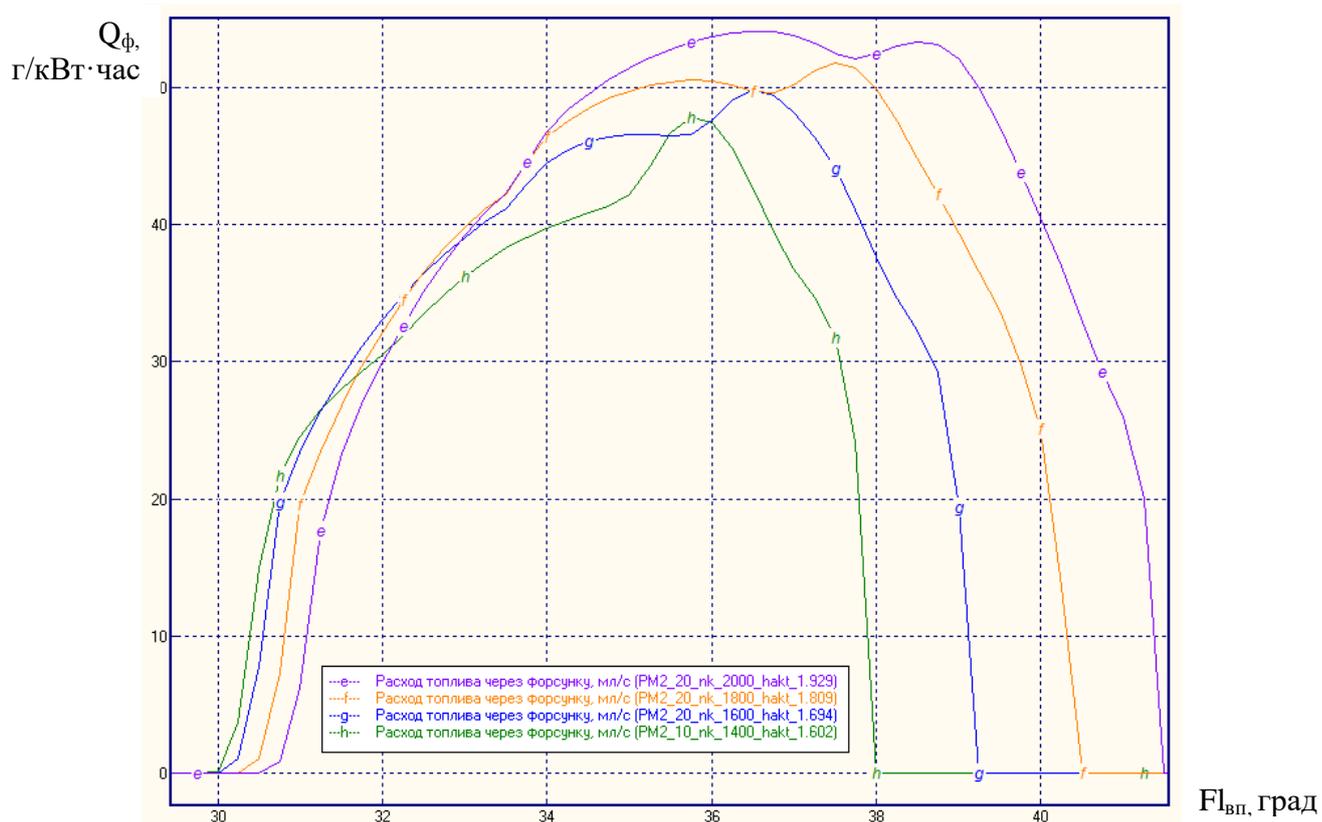


Рисунок 3.31 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для ПМ20

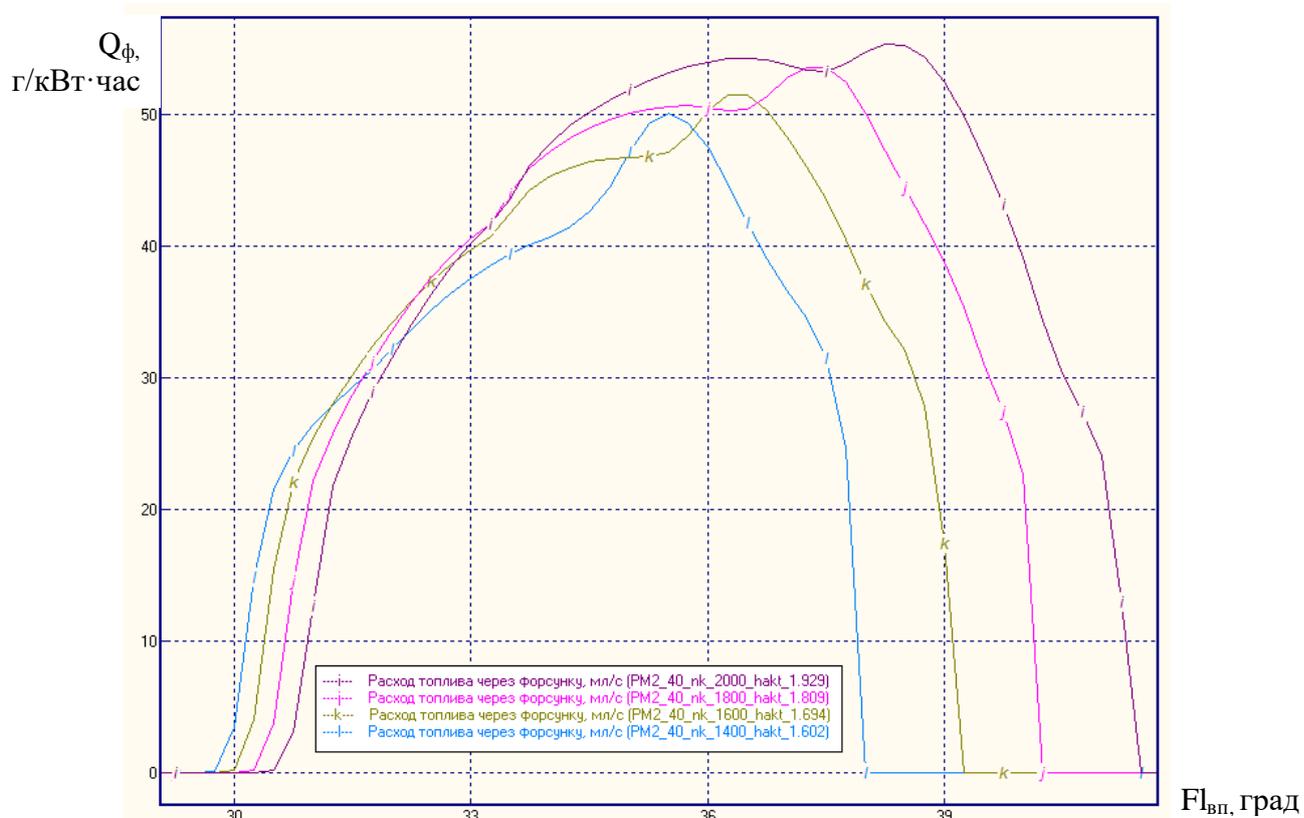


Рисунок 3.32 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для ПМ40.

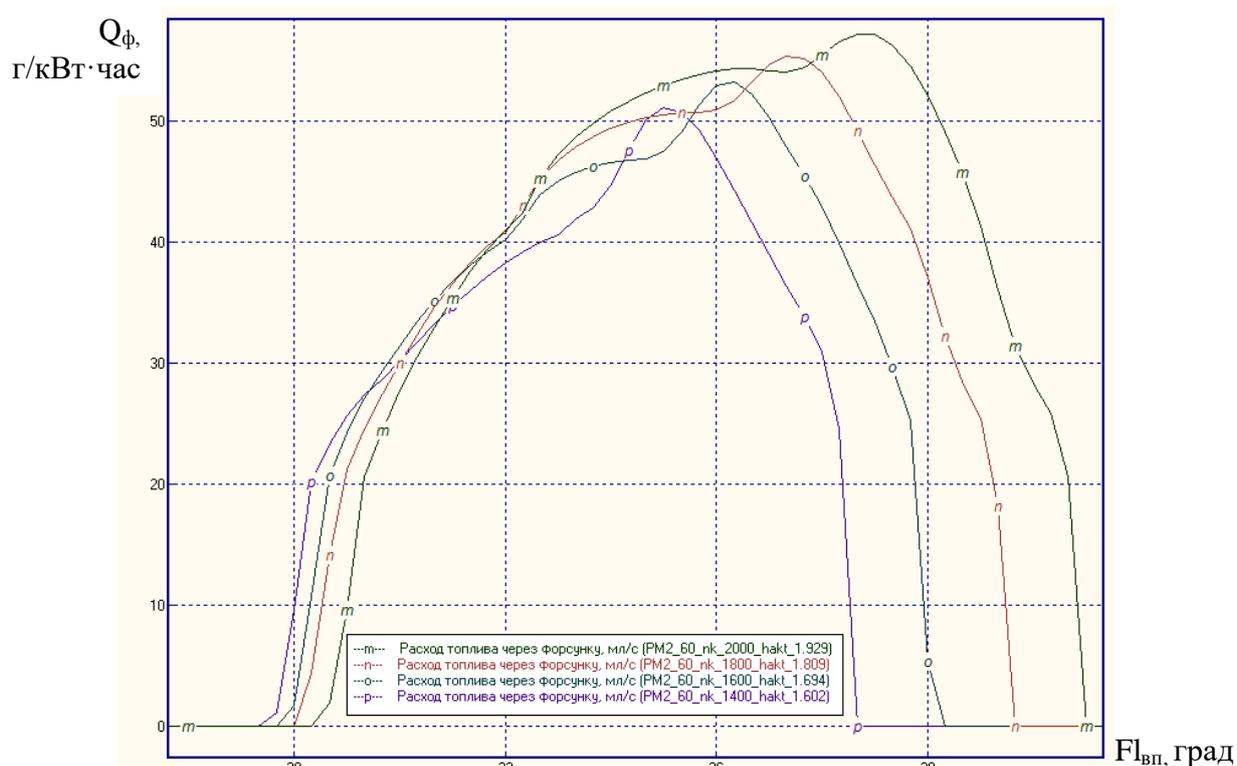


Рисунок 3.33 - Дифференциальные характеристики впрыска при постоянном количестве подведенной теплоты для ПМ60.

Для сохранения при подаче смесей ДТ и ПМ постоянным количества введенной теплоты $Q_{см}$, соответствующего чистому ДТ, необходимо уменьшать активный ход плунжера. Анализ рисунков 3.20-3.22 показывает, что в этом случае массовая и объемная цикловая подача смеси возрастают, при этом массовая подача смеси возрастает в меньших пределах, чем при сохранении постоянного активного хода плунжера (см. рисунок 3.3). Результаты представлены в таблице 3.3. Отклонения объемной цикловой подачи при сохранении постоянным количества теплоты, введенной с топливом в КС, при изменении состава смеси на всех скоростных режимах не превышают 2% от объемной цикловой подачи при работе на чистом ДТ, при этом отклонения массовой цикловой подачи превышают 8%.

Средние и максимальные давления впрыскивания возрастают в меньших пределах, чем при условии сохранения постоянного активного хода плунжера (см. рисунки 3.4 и 3.5), но в больших пределах, чем при условии сохранения постоянной цикловой подачи смеси (см. рисунки 3.16 и 3.17). Активный ход плунжера снижается в меньших пределах, чем при сохранении постоянной

массовой цикловой подачи смеси (см. рисунок. 3.15). Однако при уменьшении частоты вращения коленчатого вала необходимое снижение активного хода плунжера становится более значительным. Общая продолжительность впрыскивания при данных условиях практически не менялась.

Таблица 3.3 - Изменение регулировочных параметров ТНВД при сохранении постоянным количества теплоты, введенной с топливом в камеру сгорания с изменением объемной доли пальмового масла

Доля пальмового масла в смеси $g_{\text{пм}}$	Изменение массовой цикловой подачи смеси		Изменение объемной цикловой подачи смеси		Изменение активного хода плунжера	
	г/цикл	%	мм ³ /цикл	%	мм	%
$n=2000 \text{ мин}^{-1}$						
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,00077	1,29	0,16142	0,22	0,013	0,68
0,2	0,00153	2,56	0,31005	0,43	0,025	1,32
0,3	0,00235	3,93	0,52452	0,73	0,035	1,86
0,4	0,00319	5,34	0,75774	1,05	0,043	2,29
0,5	0,00405	6,78	1,00915	1,40	0,052	2,78
0,6	0,00492	8,23	1,26688	1,76	0,063	2,9
$n=1800 \text{ мин}^{-1}$						
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,00075	1,29	0,15975	0,23	0,015	0,83
0,2	0,00151	2,6	0,32798	0,47	0,03	1,68
0,3	0,00229	3,94	0,51611	0,74	0,043	2,43
0,4	0,0031	5,34	0,73509	1,05	0,055	3,13
0,5	0,00393	6,76	0,97254	1,39	0,065	3,72
0,6	0,00478	8,23	1,22791	1,75	0,082	4,74
$n=1600 \text{ мин}^{-1}$						
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,0007	1,28	0,14211	0,22	0,02	1,2
0,2	0,00143	2,61	0,31666	0,48	0,039	2,37
0,3	0,00217	3,96	0,49923	0,76	0,057	3,5
0,4	0,00294	5,37	0,7129	1,08	0,074	4,59
0,5	0,00372	6,79	0,93364	1,41	0,09	5,64
0,6	0,00453	8,27	1,18396	1,79	0,106	6,7
$n=1400 \text{ мин}^{-1}$						
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,00066	1,3	0,14700	0,24	0,024	1,53
0,2	0,00133	2,63	0,30275	0,5	0,048	3,11
0,3	0,00201	3,97	0,46698	0,77	0,071	4,67
0,4	0,00279	5,51	0,74344	1,22	0,091	6,06
0,5	0,00344	6,8	0,8656	1,42	0,114	7,71
0,6	0,00419	8,28	1,09859	1,80	0,134	9,19

В качестве оценочных показателей приняты параметры процесса впрыска (продолжительность, дифференциальный и интегральный законы впрыска). Распространение и развитие топливного факела, угол опережения впрыска и др. имеют тенденцию к повышению. Но динамика развития струи и основные геометрические параметры распыливаемого топлива оказываются практически в рекомендуемых для данного двигателя пределах.

Выводы

В качестве оценочных показателей работы топливоподающей аппаратуры дизельного двигателя были приняты: действительная цикловая подача максимальное давление впрыска, среднее давление впрыска, продолжительность впрыскивания, град., дифференциальные характеристики впрыска.

На наш взгляд, для практического использования наиболее ценными представляются результаты расчетов топливоподачи, выполненные при сохранении постоянным количества теплоты, введенной с топливом в камеру сгорания, так как именно в этом случае влияние состава смеси на смесеобразование и динамику сгорания будет минимальным. Численные значения изменений массовой и объемной подачи смесевоего топлива, а также регулировочного параметра ТНВД – активного хода плунжера при изменении объемной доли ПМ $g_{\text{ПМ}}$ в смеси для этого случая приведены в таблице 3.3.

Отклонения активного хода плунжера возрастают с увеличением доли пальмового масла в смеси и с уменьшением скоростного режима, достигая 9,19% при объемной доле ПМ в смеси – 0,6 при частоте 1400 мин⁻¹.

Исходя из полученных результатов, использование в качестве топлива смесей ДТ с ПМ возможно без каких-либо вмешательств в регулировки топливной аппаратуры непосредственного действия для смесей с содержанием до 0,3 объемных долей ПМ (см. рисунок 3.4). Изменение величины цикловой подачи при этом останется в пределах установленных норм, например, ГОСТ 10578-95 «Насосы топливные дизелей. Общие технические условия» (до 5% для топливных насосов многотопливных дизелей).

Для поддержания неизменной цикловой подачи топлива величина активного хода плунжера ТНВД УТН-5 должна измениться на 13,5% (2,3 мм) при переходе от чистого ДТ на смесевое с 60% объемными ПМ. Увеличение содержания в смесевом топливе ПМ приводит к снижению его теплотворной способности. Однако для сохранения количества теплоты, выделяющейся при сгорании смесевое топлива ПМ10, требуется уменьшить величину активного хода плунжера менее, чем на 3% (0,6 мм), так как с увеличением доли ПМ увеличивается плотность смесевое топлива и масса его цикловой подачи. Если принять в качестве основной цели при замене ДТ на смесевое сохранение количества теплоты, выделяющейся при его сгорании, то каких-либо изменений в регулировках ТНВД не требуется.

4 РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задачи работы:

- оценка изменений показателей работы дизельного двигателя при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ при моделировании процессов с помощью ПК «Дизель РК» [42, 43, 44, 45, 61, 94];
- выбор оптимального состава топливной смеси по результатам расчетных экспериментов и оценка экологических показателей работы дизельного двигателя [75, 91, 92, 98, 125, 166, 186, 187, 236]

4.1 Эффективные характеристики дизеля

С использованием характеристик процесса подачи топлива, полученных в главе 3, проведено моделирование рабочего процесса для оценки показателей характеристики дизеля Д-144.

Моделирование выполнялось в программном комплексе «Дизель РК» [89]. В качестве топлива наряду с нефтяным дизельным применялось дизельное топливо с добавлением ПМ 10, 20, 30% объемных. Полученные результаты показаны в таблице 4.1 и на рис. 4.1.

Определялись и рассчитывались следующие показатели:

n_k – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1}

n_n – частота вращения распределительного вала, мин^{-1}

N_e – мощность двигателя, кВт

q_c – массовая цикловая подача, г/цикл

g_e – эффективный расход топлива, г/кВт ч

α – коэффициент избытка воздуха

η – коэффициент наполнения

M_k – крутящий момент, Н м

Для расчетной оценки характеристик работы дизельного двигателя в ПК «Дизель РК» в качестве исходных данных приняты параметры двигателя Д-144. Характеристики впрыскивания топлива получены расчетным методом в ПК «Впрыск».

Таблица 4.1. Результаты расчетного моделирования зависимости эффективных показателей работы дизельного двигателя Д-144 от состава топливной смеси на номинальном режиме $n=2000 \text{ мин}^{-1}$.

ПМ, об.доли	N_e , кВт	g_e , г/кВт	G_t , кг/ч	M_k , Н*м	q_c , г
0	50,0	288	14,40	238,8	0,060
0,1	50,0	288	14,40	238,8	0,060
0,2	49,1	297	14,88	239,1	0,062
0,3	47,1	321	15,12	225,1	0,063

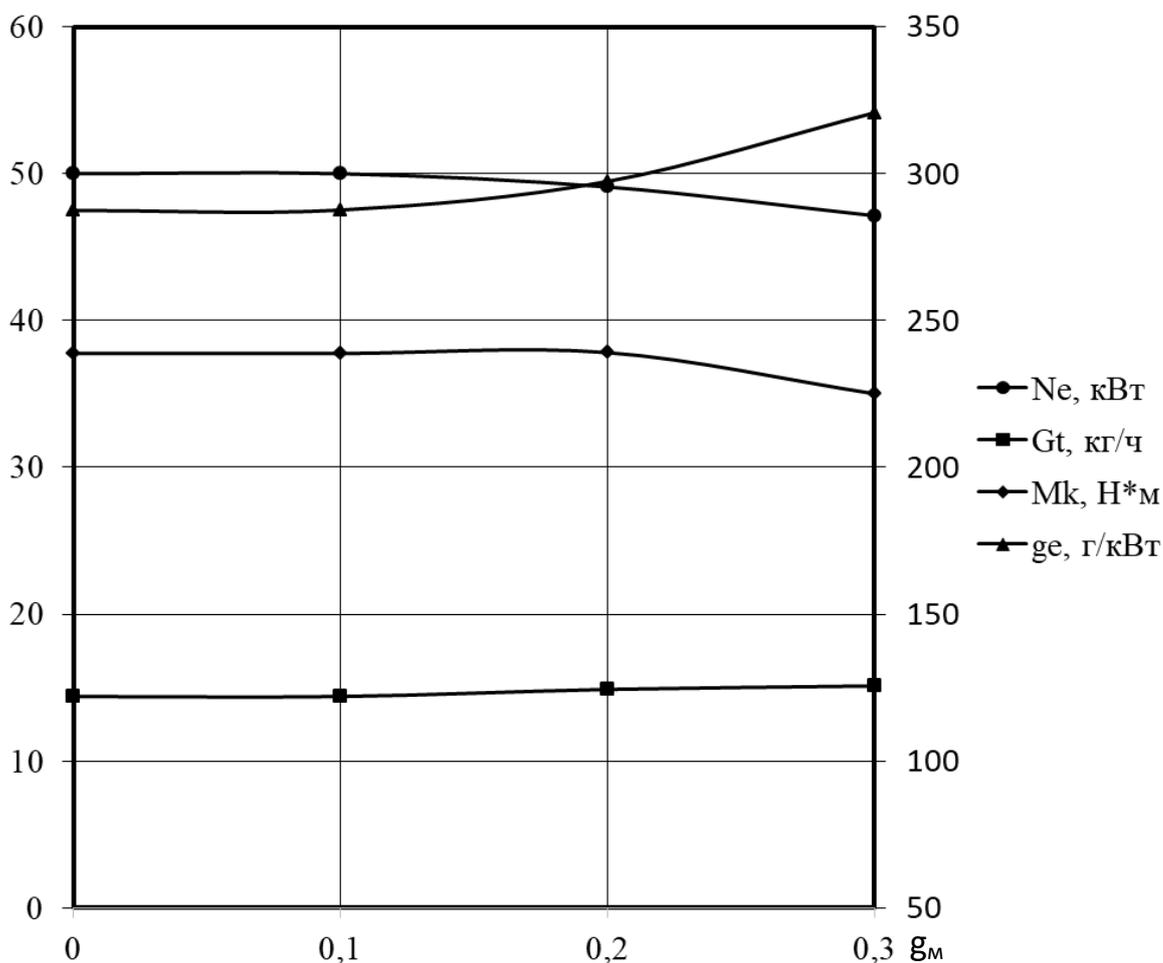


Рисунок 4.1 - Зависимость эффективных показателей дизельного двигателя Д-144 от состава смесового дизельного топлива с добавлением ПМ.

Увеличение цикловой подачи при росте доли ПМ в топливе происходит, в основном, за счет снижения сжимаемости смесового топлива относительно ДТ.

Так, при работе на чистом ДТ и на смеси ПМ10 объемная цикловая подача составила $0,060 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, а при работе на ПМ20 – уже $0,062 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, рост на 3,33%. Увеличение объемной цикловой подачи смесового топлива объясняется уменьшением доли хода плунжера, необходимого для сжатия топлива до требуемого давления.

Это свойство влияет также на фазы процесса топливоподачи, т.е., на наружный угол начала подачи топлива ϕ , начало и окончания впрыска (Рисунок 3.3). Взаимозависимость действительного угла начала подачи топлива от содержания ПМ в смесовом топливе на режиме $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ представлена на рисунках 3.6 и 3.25.

Состав смесового топлива оказывает значительное влияние на давление подачи топлива в линии высокого давления. При переходе от ДТ к смесовым топливам максимальное давление впрыскивания при увеличении объемного содержания ПМ в смеси приводит к росту среднего давления впрыскивания и действительной продолжительности впрыскивания $\phi_{\text{впр}}$. (рисунки 3.7 – 3.10, 3.16, 3.17, 3.23, 3.24, 3.26 – 3.29).

Повышение содержания ПМ в топливной смеси приводит к уменьшению максимального крутящего момента и максимальной мощности. Для смеси ПМ10 и ПМ20 крутящий момент и мощность сравнимы с показателями для чистого ДТ, при этом объемная цикловая подача увеличилась для ПМ20 на 3,3%. Для смеси ПМ30 крутящий момент уменьшился на 5,74%, мощность уменьшилась на 5,8% по сравнению с чистым ДТ, при этом объемная цикловая подача увеличивается на 5%.

Это можно объяснить ухудшением характеристик распыливания смесовых топлив при повышении их вязкости и плотности, уменьшением теплотворной способности, ухудшением смесеобразования и сгорания. При этом рост среднего давления впрыскивания не дает значительного эффекта для улучшения смесеобразования.

Уменьшение низшей теплоты сгорания сильно снизило результаты моделирования показателей работы двигателя при использовании смесей ПМ20

и ПМ30. На режиме максимальной мощности при частоте вращения коленчатого вала $n=2000$ мин⁻¹ при работе на смешевом топливе растет удельный эффективный расход топлива от 288 кг/час у ПМ10 (практически как у ДТ) до 321 кг/час у ПМ30 (что на 11,46% выше, чем при работе на ДТ). Указанное увеличение удельных расходов смешевых топлив ПМ20 и ПМ30 можно объяснить уменьшением их теплотворной способности H_u по сравнению с ДТ (на 2,8% и 4,2% соответственно). При этом эффективность процесса сгорания при увеличении содержания ПМ в смешевом топливе практически не изменилась. Степень влияния вязкости топлива на объемную цикловую подачу ДТ, смешевом топлива определить сложнее.

4.2 Экологические показатели

Анализ экологических показателей позволяет говорить, что добавка ПМ к ДТ влияет на содержание в ОГ газообразных токсичных компонентов (NO_x , CO , CH_x , CO_2) [32, 33, 38, 99, 151, 152, 156, 157, 166, 170, 179, 186, 187, 203]. Результаты полученных значений интегральных массовых выбросов токсичных компонентов, представленные в таблице 4.3, показывают, что при номинальном режиме использование смешевых топлив снижает дымность двигателя по сравнению с работой на нефтяном ДТ. Это объясняется присутствием атомов кислорода в смешевом топливе.

Взаимозависимость эффективного КПД двигателя и дымности от K_x в режиме максимальной мощности при $n=2000$ мин⁻¹, удельных массовых выбросов оксидов азота NO_x , оксида углерода CO_2 . Рассчитанный коэффициент избытка воздуха α составляет более 1,5, поэтому при расчетах было принято, что происходит полное окисление углерода и, соответственно, монооксид углерода и углеводороды в ОГ не определяются.

Такое уменьшение выбросов углеводородов обусловлено наличием в ПМ около 11% кислорода, участвующего в окислении углерода и водорода. В результате уменьшается количество воздуха, необходимое для сгорания топлива и увеличивается суммарный коэффициент избытка воздуха. Это

приводит к более полному сгоранию топлива и снижению эмиссии CH_x и РМ. Характер изменения токсичности выбросов ОГ подтверждает возможность заметно улучшить экологические показатели дизеля при использовании смесевых топлив с добавлением ПМ.

Представленные в таблице 4.2 результаты для автотракторного дизеля Д-144 при использовании смесевых топлив свидетельствуют о том, что изменение содержания в них ПМ от 0 до 0,3 объемных долей оказывает заметное влияния на экологические показатели работы исследуемого двигателя.

Наблюдается понижение интегрального выброса диоксида углерода при использовании топливной смеси ПМ10 на 8,3% и повышение интегрального выброса диоксида углерода при использовании смесей ПМ20, ПМ30 (на 7,23%, 8% соответственно) по сравнению с ДТ. Это можно объяснить увеличением количества атомов кислорода в составе топливных смесей.

При этом повышается удельный интегральный выброс оксидов азота (на 83,9%, 102%, 121% соответственно). Это связано с более ранним сгоранием топлив и более высокой температурой в конце сгорания из-за более высоких ЦЧ, а также более высоким содержанием кислорода в них.

Таблица 4.2 - Показатели токсичности отработавших газов при расчете показателей дизеля Д-144 при использовании смесевых топлив

Показатели ОГ	Состав топливной смеси			
	ДТ	ПМ10	ПМ20	ПМ30
1	2	3	4	5
Интегральный удельный выброс моно-оксида углерода, C_{CO} , г/(кВтч)	-	-	-	-
Интегральный удельный выброс диоксида углерода, C_{CO_2} , г/(кВтч)	9,26	8,49	9,93	10,00
Интегральный удельный выброс углеводородов C_{CH_x} , г/(кВтч)	-	-	-	-
Интегральный удельный выброс оксида серы C_{SO_x} , г/(кВтч)	0,0015	-	-	-

1	2	3	4	5
Интегральный удельный выброс оксида азота, $C_{NOx}, \text{г}/(\text{кВтч})$	4,72	8,68	9,532	10,43
Интегральная дымность на максимальной мощности, N_{max} , $K_x, \text{м}^{-1}$ $N, \%$	4,5 61,6	3,09 34,66	4,13 47,4	4,09 46,9
Интегральная удельная эмиссия твердых частиц, $PM, \text{г}/(\text{кВтч})$	1,51	0,72	1,41	1,30

Отмечено снижение дымности по шкале Хартриджас 61,6% у чистого ДТ до 34,66% 47,4% и 46,9% у ПМ10, ПМ20 и ПМ30 соответственно; и по шкале Бош с 4,5 до 3,09, 4,13 и 4,09 (31,33%, 8,22%, 9,11%) соответственно. Снижение содержания твердых частиц РМ при переходе на смесевые топлива ПМ10, ПМ20 и ПМ30 составляет 52,32%, 6,62%, 13,91% соответственно.

Из результатов расчетных исследований смесевое топливо ПМ10 (10% объемных ПМ) видно, что содержание в смеси ПМ в интервале от 0 до 10% объемных оказывает наиболее заметное влияние на показатели работы исследуемого дизеля. Это можно объяснить тем, что при содержании 10% объемных ПМ в топливной смеси процесс смесеобразования и сгорания протекает более эффективно благодаря присутствию большого количества атомов кислорода в топливе и незначительным различием в низшей теплоте сгорания ДТ и ПМ10.

4.3 Анализ результатов расчетов показателей дизеля при работе на дизельном топливе с добавлением ПМ

Анализ результатов показывает, что изученные образцы топливных смесей заметно превосходят стандартное ДТ.

На всех исследованных режимах физико-технические свойства дизельных топлив с добавлением ПМ соответствуют стандартам.

Мощности и крутящие моменты для смесевых топлив ПМ20 и ПМ30 снижались по сравнению с ДТ (на 1,8% и 0,1% для смеси ПМ20, на 5,8% и 5,74% для смеси ПМ30), из-за понижения теплоты сгорания ПМ и ухудшения показателей впрыскивания (смесеобразования и сгорания) вследствие повышения вязкости смесей. Показатели для смеси ПМ10 практически соответствуют показателям для чистого ДТ.

Средние значения удельного расхода для ПМ20, ПМ30 оказались несколько выше (на 3,3 и 5%), чем расход ДТ. Эти результаты можно объяснить более высокими вязкостью и плотностью и пониженной теплотой сгорания этих смесей.

Анализ расчетов показателей дизеля при использовании дизельных топлив с добавлением ПМ показывает, что смеси на основе ПМ могут улучшить состав выбросов ОГ автотракторного дизеля [56, 58, 61, 62, 63, 72, 74, 75, 125, 155, 156, 157, 173, 186, 187]. Уровень дымности ОГ, сажеобразование и содержание в ОГ CO_2 для всех этих видов смесевоего топлива снижались.

Однако увеличилось содержание оксидов азота NO_x . Это можно объяснить высоким содержанием кислорода в смесевом топливе, повышением ЦЧ и повышением давления впрыскивания.

Монооксид углерода и остаточные углеводороды в ОГ отсутствуют, поскольку коэффициент избытка воздуха α больше 1, имеется дополнительный кислород в составе топлива и более высокое ЦЧ, все это предполагает полное окисление компонентов топлива.

Отмечено снижение количества отложений РМ и плотности дыма.

Расчетные исследования позволяют предположить, что смесевые топлива ПМ10, ПМ20, ПМ30 могут обеспечить топливную экономичность и меньшую дымность ОГ.

Таким образом, исследованные смесевые топлива по основным физико-техническим свойствам приближаются к стандартным топливам и обладают

хорошими моторными качествами. Переход на использование дизельных топлив с добавлением ПМ может обеспечить улучшение экономических и экологических показателей автотракторного дизеля.

Выводы

Проведенный комплекс расчетных исследований показал возможность использования смесевых топлив с добавлением ПМ в дизельном двигателе ДТ-144 и возможность уменьшения выбросов токсичных компонентов ОГ путем оптимизации состава смесевого топлива.

5 МЕТОДИКА СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ Д-144 НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ 4D56T АВТОМОБИЛЯ MITSUBISHI PAJERO В ПРОЦЕССЕ ПЭИ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА

Целью проведения экспериментальных исследований является оценка влияния состава дизельных топлив с добавлением ПМ на параметры рабочего цикла, эффективные и экологические показатели дизеля Д-144 при работе на стенде и определение эксплуатационных показателей дизельного двигателя автомобиля.

Определялись основные теплотехнические характеристики двигателя и их соответствие заводским данным.

Рассматривались возможности:

- эксплуатации дизельного двигателя Д-144 при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ без конструктивных и регулировочных изменений в системах двигателя;
- улучшения мощностных, экономических и экологических показателей дизельного двигателя Д-144 при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ;
- повышение КПД дизельного двигателя при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ в эксплуатационных условиях.

Сущность предлагаемого способа работы дизеля заключается в подаче смесевых топлив, в результате чего происходит замещение нефтяного ДТ.

Разработана общая программа стендовых и производственных испытаний двигателя Д-144 (таблица 5.1).

Таблица 5.1 - Программа стендовых и производственных испытаний двигателя Д-144 при работе на дизельном топливе с добавлением ПМ

Стендовые	Производственные
1. Определение эффективных и экологических показателей двигателя Д-144 при работе на дизельном топливе с добавлением ПМ. 2. Оценка влияния дизельного топлива с добавлением ПМ на дымность и токсичность смесового топлива.	1. Исследование эффективных и эксплуатационных показателей автомобиля Mitsubishi (модель двигателя 4D56T). 2. Определение экологических характеристик автомобиля при его эксплуатации на дизельном топливе с добавлением ПМ.

5.1 Планирование и организация стендовых испытаний дизельного двигателя при использовании дизельного топлива с добавлением ПМ

В исследовании использовался дизельный двигатель Д-144 с ТНВД УТН-5 и форсунками ФД-22, установленном на динамометрическом стенде MEZ с динамометром постоянного тока DS 932-4/N.

При организации стендовых испытаний принимались во внимание требования ГОСТ Р 52517-2005 (ИСО 3046-1:2002). «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1» [15].

Дизельный двигатель Д-144 испытывался на режимах внешних скоростных характеристик (корректорные ветви внешней скоростной характеристики) режима при частотах вращения коленчатого вала 1400, 1600, 1800, 2000 мин.⁻¹

В процессе исследований решались следующие задачи:

1. Оценка влияния физико-технических свойств дизельного топлива с добавлением ПМ на показатели двигателя на всем диапазоне рабочих режимов, выявление оптимальных регулировок.

2. Определение эффективных показателей двигателя Д-144 при работе на дизельном топливе с добавлением ПМ.

3. Влияние дизельного топлива с добавлением ПМ на дымность и токсичность продуктов сгорания.

Сравнительные лабораторно-стендовые испытания предусматривают несколько этапов:

– подготовка оптимальных по составу топливных смесей с добавлением ПМ, максимально стабильных во времени. Способом достижения поставленных целей является подбор оптимального содержания ПМ, исходя из критериев вязкости и плотности, приближенных к показателям для нефтяного ДТ. Методика приготовления топливных смесей и их физико-технические свойства приведены в главе 2. При испытании дизельного двигателя на стенде были использованы топливные смеси с содержанием ПМ от 10 до 30% объемных (ПМ10, ПМ20, ПМ30). Применение растительного масла в качестве добавки к ДТ рекомендовано в пределах до 30% объемных, поскольку при этом возможно эксплуатировать дизельный двигатель без изменения конструкции самого двигателя [32, 33, 72, 74, 75, 129, 146, 186, 195];

– проводились подготовка стендовой установки и дизельного двигателя Д-144 к испытанию и проверка соответствия техническим условиям, проверка комплектности двигателя, состояния деталей и агрегатов, фаз газораспределения и подъема клапанов, объемов камер сгорания и компрессии в цилиндрах. Составление технической характеристики объекта по заводским техническим условиям было выполнено с помощью документации двигателя и по литературным данным. Особое внимание обращалось на те сведения о двигателе, которые имеют наибольшее значение для решения задач испытания [42, 43, 59, 68, 79, 87, 169];

– поверка и тарирование приборов и аппаратуры для измерения основных параметров испытываемого двигателя, а именно: весов для измерения массы расходуемого при испытаниях топлива «MASSA-K» МК-32.2-A21(R), манометра, микроманометра, дымомера для измерения дымности «Инфракар» Д1-3.02; динамометр постоянного тока DS 932-4/N; ртутных термометров и секундомеров для измерения температуры и времени работы двигателя и расхода топлива; динамометра и тахометра стенда MEZ для измерения крутящего момента и частоты вращения двигателя;

– сравнительные лабораторно-стендовые испытания, которые предусматривают проведение исследований при работе дизеля на дизельном топливе (штатный цикл) и на различных по составу смесевых топливах на номинальном режиме и режимах полных нагрузок [144, 169].

Приборы, применяемые в эксперименте, прошли поверку в соответствии с Приказом Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 2 июля 2015 года N 1815 «Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».

При проведении экспериментальных исследований показатели работы дизеля определяются в соответствии с требованиями ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний» [10].

Дымность отработанных газов замерялась согласно ГОСТ 24028-2013 и ГОСТ 33997-2016 [13, 14].

При проведении экспериментальных исследований использовалось ДТ, ГОСТ 305-2013 [20], моторное масло М-10Г₂, ГОСТ 17479.1-2015, рекомендованные для данного типа дизелей и взятые из одной партии.

В процессе экспериментальных исследований производилось измерение температуры воздуха на впуске; расхода топлива; частоты вращения коленчатого вала дизеля; крутящего момента двигателя; контролировались температурный режим работы дизеля и давление в системе смазки, внимание уделялось чистоте используемых компонентов смесевых топлив [66, 81, 84].

Для проведения экспериментальных исследований в лаборатории испытаний автотракторных двигателей кафедры «Транспортные машины и двигатели» Волгоградского государственного технического университета была сформирована экспериментальная установка (рисунки 5.1, 5.2). В таблице 5.2 приведена техническая характеристика дизельного двигателя Д-144, оснащенного топливной аппаратурой непосредственного действия с механическим управлением.

Экспериментальная установка (рисунок 5.1) включает в себя: динамометрический стенд с динамометром постоянного тока, дизель Д-144,

нагрузочный электродвигатель-тормоз, карданный вал, фильтры, насосы низкого и высокого давления, емкость и весы для подачи и замера расхода топливной смеси, пульт управления, комплекс контрольно-измерительных и регистрирующих приборов, газоанализатор, вытяжной вентилятор.

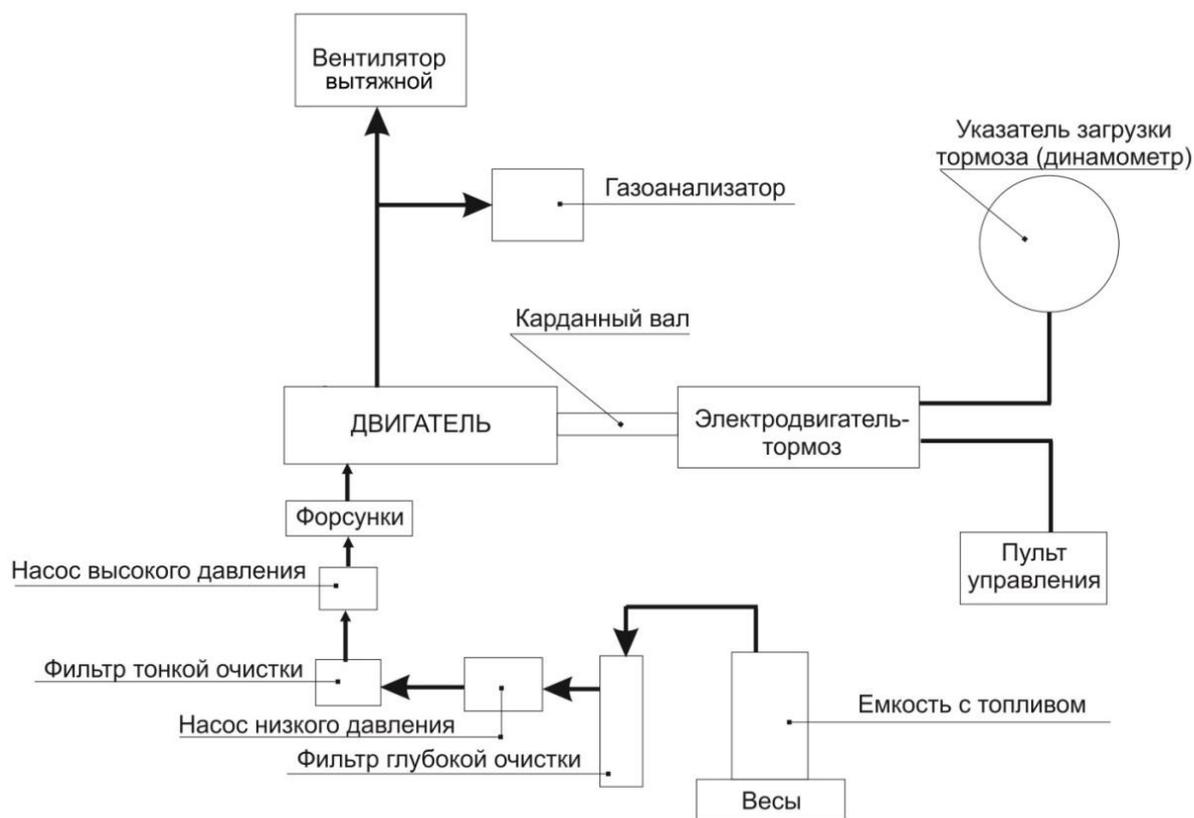


Рисунок 5.1 - Схема экспериментальной установки.

Таблица 5.2 - Техническая характеристика дизельного двигателя Д-144, оснащенного топливной аппаратурой непосредственного действия с механическим управлением

Марка двигателя	Д-144
Мощность, кВт	44,1
Число цилиндров	4
Удельный расход топлива при полной нагрузке, г/л.с.ч а) с топливным насосом типа УТН-5	не более 195
Диаметр цилиндра, мм	105
Ход поршня, мм	120
Степени сжатия	16,5
Частота вращения коленчатого вала (номинальная), мин ⁻¹	2000
Частота вращения холостого хода, мин ⁻¹	2150

Устройство для подачи и замера расхода топливной смеси состоит из емкости для топливной смеси, весов и переключателя, соединенных трубопроводами. Определение расхода топливной смеси производилось весовым способом. В комплект измерительной аппаратуры стенда входят вольтметр, амперметр, тахометр, динамометр постоянного тока DS 932-4/N.

Методика проведения экспериментальных исследований позволяет с достаточной точностью определить влияние использования дизельного топлива с добавлением ПМ на показатели работы дизеля Д-144.



Рисунок 5.2 - Общий вид экспериментального стенда с дизельным двигателем Д-144



Рисунок 5.3 - Общий вид пульта управления экспериментального стенда

5.2 Выбор топливных смесей с добавлением пальмового масла для проведения стендовых испытаний

Испытываемые топливные смеси готовились по методике, изложенной в главе 2. Топливо смешивалось путем гомогенизации с соответствующей скоростью. Оценка физико-механических свойств смесевых топлив при различных соотношениях объемов ПМ и нефтяного ДТ, срока, температуры хранения и использования при их применении в дизельном двигателе проведена при лабораторном исследовании стабильности смеси ДТ и ПМ масла (определялись время и температура появления расслоения в емкостях). Готовые топливные смеси сохранялись 72 часа при температуре внешней среды 20°C. В таблице 3.2 приведены основные свойства исследуемых смесевых топлив с содержанием ПМ от 10 до 60% объемных.

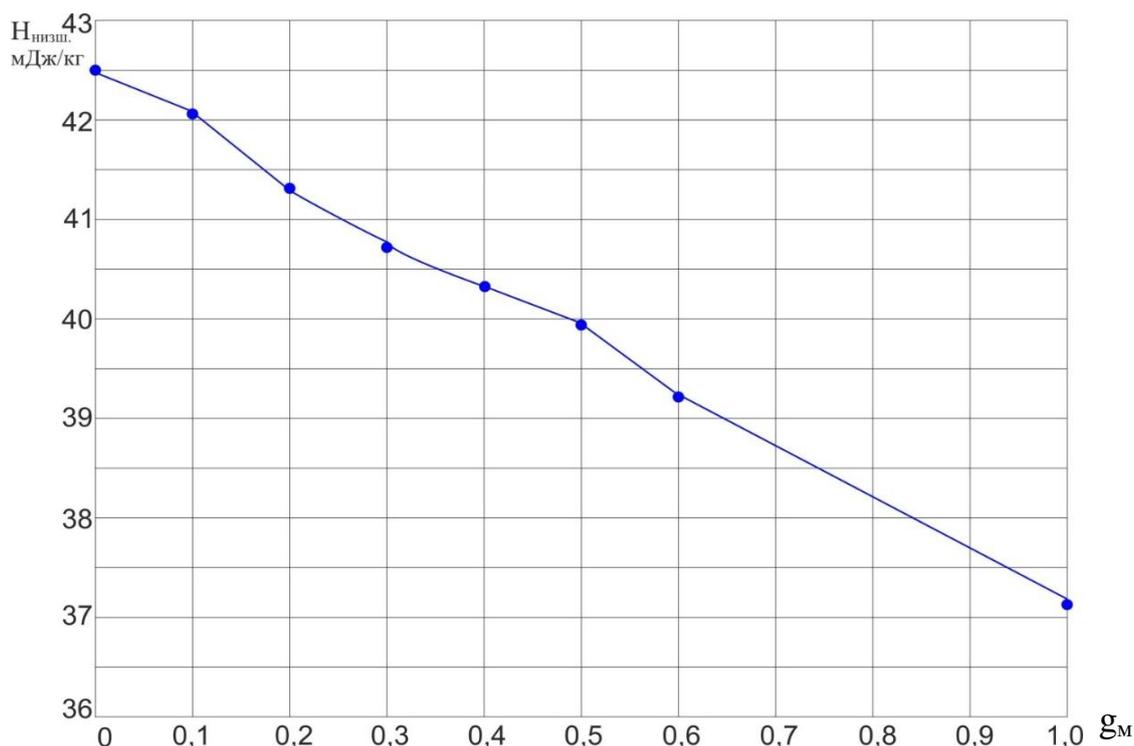


Рисунок 5.4 - Зависимость низшей теплоты сгорания от объемной доли пальмового масла в смесевом топливе.

Для испытания были выбраны три вида дизельного топлива с содержанием ПМ 10, 20, 30% объемных. В качестве критериев отбора использовались плотность, кинематическая вязкость, теплота сгорания и

температура самовоспламенения. При этом добавка до 30% объемных растительного масла не требует регулировок двигателя при эксплуатации. Топливные смеси на основе ПМ желательно применять в двигателе при температуре 50°C [237, 239].

В качестве предварительной подготовки двигатель работал на нефтяном ДТ в течение 30 минут для его прогрева перед испытанием смесового топлива. Кроме того, двигатель работал на нефтяном ДТ 30 минут до выключения.

5.3 Методика исследования и определение параметров свежего заряда

Целью исследований является сравнительный анализ параметров свежего заряда при работе дизеля на ДТ и на смесовом топливе. Для этого проводилось измерение температуры, давления и влажности свежего заряда на впуске в цилиндр и расход воздуха [49, 94, 95, 140].

Измерение температуры воздуха (окружающей среды) производилось при помощи ртутного термометра. Давление окружающей среды измерялось барометром БТКСН-18 (диапазон измерения давления, мм рт. ст. (кПа) 695-805 (927-1073), диапазон измеряемой температуры от -10 до +50°C).

Расход воздуха объемный Q'_B , м³/час и массовый Q''_B , кг/час, в стендовых экспериментах определялся расчетным путем по следующим формулам:

$$Q'_B = V_h \frac{n}{2} \cdot 4, \quad (5.1)$$

$$Q''_B = Q'_B \cdot \rho_{\text{возд}}, \quad (5.2)$$

где V_h – объем свежего заряда, м³;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

4 – тактность двигателя;

$\rho_{\text{возд}} = 1,2041$ – плотность воздуха, кг/м³.

Объем цилиндра:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S, \quad (5.3)$$

где $D=0,105$ – диаметрцилиндра, м;

$S=0,12$ – ход поршня, м.

Действительный расход воздуха рассчитывался по формуле:

$$Q_B = Q_B'' \cdot \eta_V, \quad (5.4)$$

где $\eta_V = 0,75$ – коэффициент наполнения цилиндра.

Для чистого ДТ и $n=2000$ мин⁻¹ и времени работы двигателя 60 мин. получены следующие результаты:

$$V_h = \frac{3,14 \cdot 0,105^2}{4} \cdot 0,12 = 0,001039, \text{ м}^3$$

$$Q_B' = 0,001039 \cdot \frac{2000}{2} \cdot 4 = 249,3796, \text{ м}^3/\text{час}$$

$$Q_B'' = 249,38 \cdot 1,2041 = 300,278, \text{ кг/час}$$

$$Q_B = 300,278 \cdot 0,75 = 225,208, \text{ кг/час.}$$

В таблице 5.3 приведены результаты расчета действительного расхода воздуха при сгорании различных смесевых топлив.

Таблица 5.3. Действительный расчетный расход воздуха

Содержание ПМ, об. долей	0	0,1	0,2	0,3
$Q_{v \text{ кор}}, \text{ кг/ч}$	225,2085	223,9077	222,5876	220,314

Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кмоль/кг, определялось из выражения:

$$L_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \quad (5.5)$$

Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, l_0 , кг возд./кг топл.:

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right), \quad (5.6)$$

где C, H, O – элементарный состав жидких топлив (таблица 4.3).

Коэффициент избытка воздуха α рассчитывается как:

$$\alpha = \frac{G_B}{G_T l_0}, \quad (5.7)$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/час.

Были также рассчитаны теоретически необходимое количество воздуха, количества воздуха необходимое для полного сгорания 1 кг смесового топлива, расход воздуха при работе двигателя и коэффициент избытка воздуха.

Таблица 5.4 - Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топливной смеси

	ДТ	ПМ10	ПМ20	ПМ30	ПМ
С	0,87	0,8596	0,84	0,8388	0,766
Н	0,126	0,1254	0,124	0,1242	0,12
О	0,004	0,00474	0,00548	0,00622	0,0114
L_0 , кмоль возд./кг топл.	0,499	0,494	0,489	0,484	0,449
l_0 кг возд./кг топл.	14,4	14,3	14,16	14,02	13,0

Таблица 5.5 - Результаты определения коэффициента избытка воздуха для двигателя Д–11 при работе на чистом и ПМ–смесовом дизельных топливах

	ДТ	ПМ10	ПМ20	ПМ30
Плотность смеси, кг/м ³	0,830	838,8	847,6	856,4
Расход топлива, кг/час	10,288	10,332	10,376	10,376
Действительный расход воздуха, кг/час	225,2085	223,907	222,587	220,314
L_0 , кмоль/кг	0,499	0,4944	0,4894	0,4844
l_0 , кг/кг	14,4	14,3	14,16	14,02
G_t , кг/ч	10,288	10,332	10,376	10,376
G_v , м ³ /ч	148,684	147,8252	146,9536	145,4526
α	1,514679	1,523479	1,532514	1,548329

Значения измеренных параметров из постовых бланков и результаты последующих расчетов заносились в протокол. Результаты лабораторных испытаний двигателя Д-144 представлены в таблицах 5.4 и 5.5. Время работы двигателя – 60 мин, скорость вращения коленчатого вала $n=2000$ мин⁻¹.

На рисунке 5.5 представлен график зависимости стехиометрических чисел от состава смесового топлива. На рисунке 5.6 представлен график зависимости коэффициента избытка воздуха от состава смесового топлива.

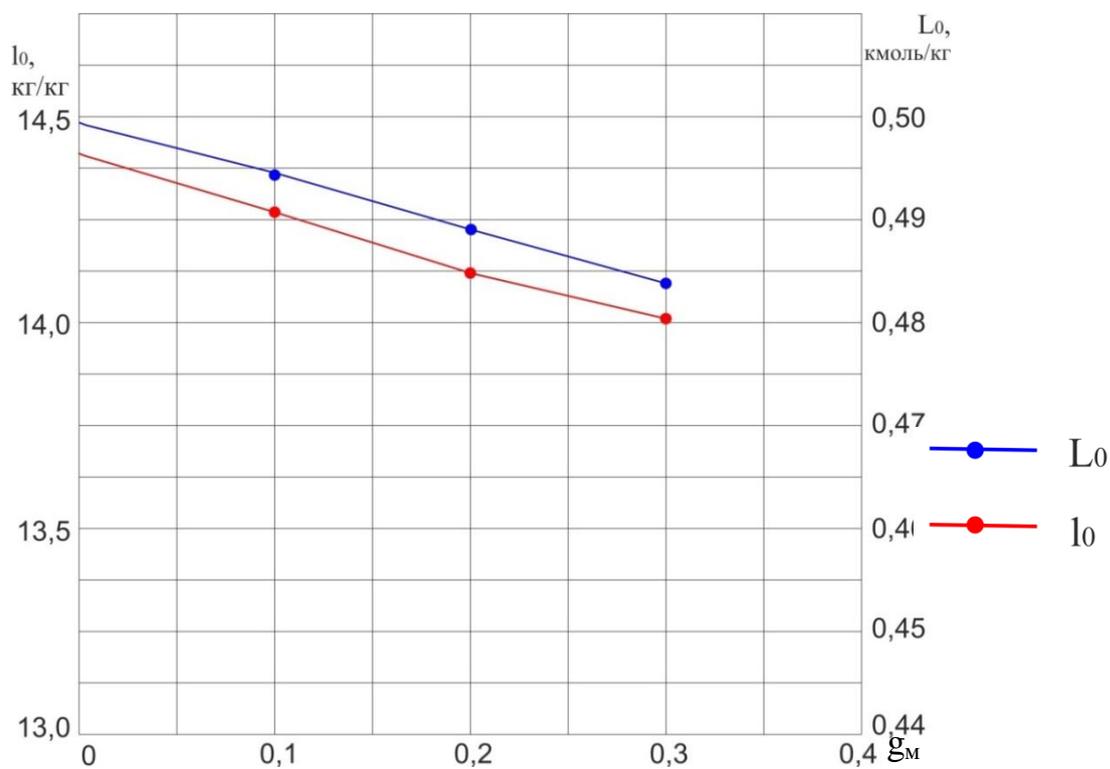


Рисунок 5.5 - Зависимости стехиометрических чисел L_0 , кмоль/кг и l_0 , кг/кг от состава топливной смеси.

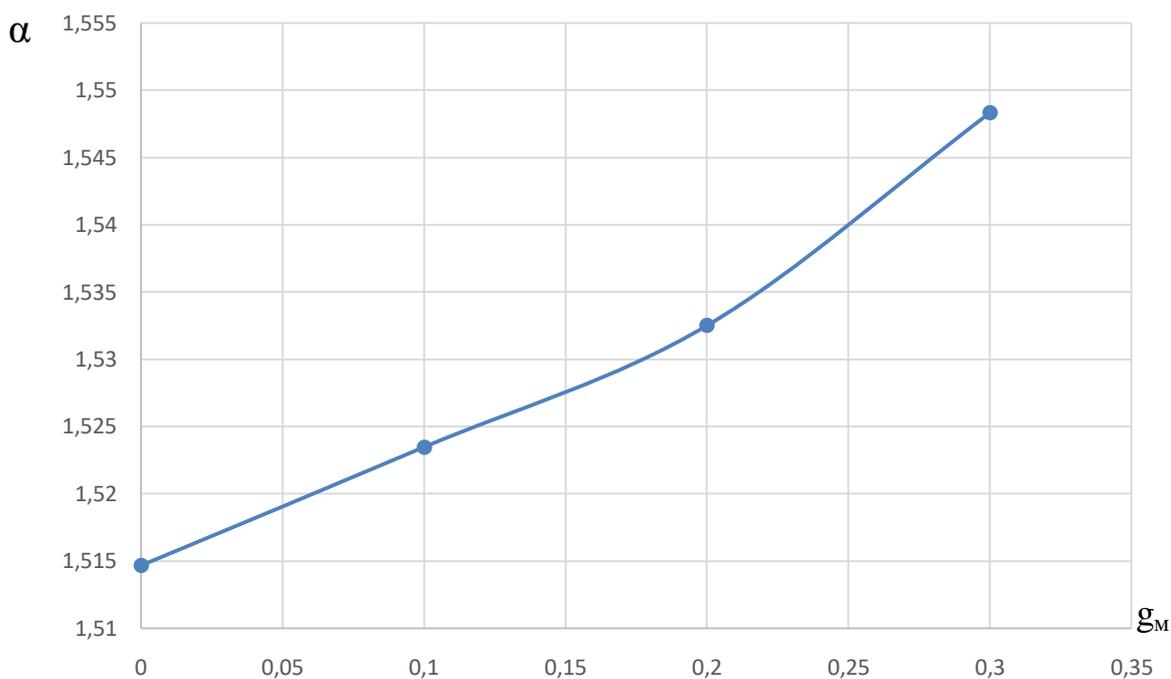


Рисунок 5.6 - Зависимость коэффициента избытка воздуха α от состава топливной смеси

5.4 Методика исследования и определение эффективных показателей дизеля

Цель исследований: сравнительный анализ эффективных показателей дизеля при его работе на ДТ и на дизельном топливе с добавлением ПМ.

Определялись значения следующих показателей: мощности, крутящего момента, удельного расхода топлива, дымности ОГ и коэффициента расхода воздуха. Сравнительные испытания трех видов топливных смесей для дизельного двигателя проводились на основе анализа эффективности процессов топливоподачи, смесеобразования, динамики сгорания.

Эксперименты проводились при различных режимах внешних скоростных характеристик. Ставилась задача определения мощностных и экономических показателей двигателя на всем диапазоне рабочих режимов, выявление оптимальных регулировок.

При сравнении с требованиями Росстандарта к свойствам биодизеля (Межгосударственный стандарт ГОСТ 305-2013 [20], Европейский стандарт EN14214) параметры (ЦЧ и плотность) всех образцов смесового топлива оказались соответствующими требованиям. Низшая теплота сгорания обеспечивает преимущество сырого пальмового масла как топлива с точки зрения транспортировки и обработки. Измеренные значения температуры вспышки соответствуют стандарту, эти топливные смеси достаточно безопасны в эксплуатации.

При проведении исследований согласно ГОСТ 18509-88 [10] использовалась контрольно-измерительная аппаратура, установленная на динамометрическом стенде MEZ с динамометром постоянного тока DS 932-4/N.

Технические характеристики и погрешности измерения динамометра приведены в таблицах 5.6, 5.7.

До начала испытаний двигателя на смесовом топливе двигатель работал на установочном режиме холостого хода 1 час с нефтяным ДТ.

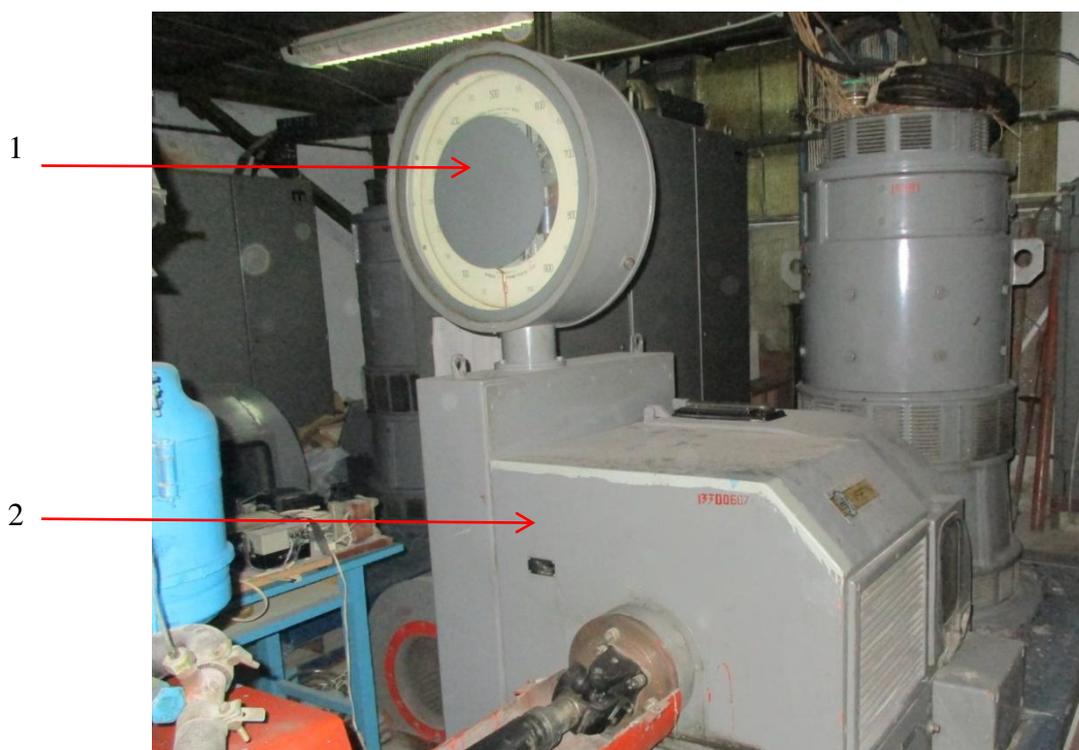


Рисунок 5.7 - Устройство для измерения тормозного момента: 1 – указатель величины тормозного момента; 2 – электрический тормоз

Таблица 5.6 - Технические характеристики динамометра DS 932–4/N

Тип динамометра	Мощность [кВт]	Ток [А]	Числооборотов [мин ⁻¹]
DS 932–4/N	180/169	367	3000

Таблица 5.7. Допустимые отклонения на динамометре DS 932–4/N

Физическая величина	Диапазоны измерения	Точность [%]
Деление	±1...5	0,2
Обороты [мин ⁻¹]	0..3000	0,2

На первом этапе определялись контрольные скоростные и регулировочные характеристики при заводских регулировках:

- потери на трение и наполнение цилиндров при прокручивании коленчатого вала;
- регулировочные характеристики по составу смеси – при полной нагрузке.

Определялись внешние скоростные характеристики при полной нагрузке

в случае:

- а) оптимальных регулировок;
- б) автоматического регулирования.

Определялись:

- нагрузочные характеристики при заводских регулировках и частотах вращения коленчатого вала 1400, 1600, 1800, 2000 мин⁻¹;
- неравномерности работы цилиндров при полной нагрузке и частотах вращения коленчатого вала 1400, 1600, 1800, 2000 мин⁻¹;
- характеристики холостого хода.

На втором этапе проводились испытания с использованием смесового топлива. Продолжительность испытания на каждом виде готовой топливной смеси составляла 1 час без регулирования двигателя и изменения его рабочих параметров. Для каждого вида топливной смеси (ПМ10, ПМ20, ПМ30), а также для чистого ДТ на режиме строго по сигналу регистрировались частота вращения коленчатого вала n и эффективный крутящий момент M_k , часовой расход топлива G_T (массовым методом), коэффициент дымности выхлопа. Кроме того, снимались скоростные характеристики.

При проведении исследований согласно ГОСТ 18509-88 [10] использовалась измерительная аппаратура экспериментального стенда, предназначенная для определения частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента при стендовых испытаниях дизелей. В комплект аппаратуры входят датчик частоты вращения и электронный тахометр. Среднее эффективное давление [94, 101, 122, 127, 137]:

$$P_e = \frac{30 \cdot \tau_{дв} \cdot N_e}{n \cdot V_l}, \quad (5.8)$$

где $\tau_{дв} = 4$ – тактность двигателя;

N_e – эффективная мощность, кВт;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹;

V_l – рабочий объем цилиндра, л.

Эффективная мощность определяется по выражению :

$$N_e = \frac{M_K \cdot n}{9550}, \quad (5.9)$$

где N_e – эффективная мощность, кВт;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Часовой расход топлива [98]:

$$G_T = \frac{3,6 \cdot \Delta G_T}{\tau_T}, \quad (5.10)$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч;

ΔG_T – масса навески топлива, г;

τ_T – время расхода навески топлива, с.

Удельный эффективный расход топлива :

$$g_e = \frac{10^3 \cdot G_T}{N_e}, \quad (5.11)$$

где g_e – удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч).

Коэффициент избытка воздуха α

$$\alpha = \frac{G_B}{l_0 \cdot G_T}, \quad (5.12)$$

где l_0 – масса воздуха, теоретически необходимая для сгорания 1 кг топлива, (кг/кг).

Технические характеристики испытуемого двигателя и сравнительные результаты испытаний приведены в таблице 5.8.

Таблица.5.8. Технические показатели двигателя и сравнительные результаты испытаний

Параметры	Изучаемые топливные смеси			
	ДТ	ПМ10	ПМ20	ПМ30
Число цилиндров	4	4	4	4
Рабочий объем цилиндра, м ³	0,001	0,001	0,001	0,001
Степень сжатия	16,5	16,5	16,5	16,5
Процесс сгорания	–	–	–	–
Литровая мощность, кВт/л				
Максимальный крутящий момент, Н·м	210,48	223,47	203,22	191,71
Изменение крутящего момента, %	–	3,6	6,8	12
Удельный расход топлива при полной нагрузке, г/кВтч	242,28	251,07	260,21	275,72
Увеличение удельного расхода в % от расхода дизельного топлива, %	–	3,6	6,8	12

Значения параметров из полевых бланков заносятся в таблицы. На основании результатов измерений дополнительные величины рассчитывают. Результаты приведены в таблице 5.9.

По результатам исследований анализировались зависимости изменения эффективных показателей дизеля при его работе на дизельном топливе с добавлением ПМ разного состава.

5.5 Анализ и оценка результатов испытания дизельных топлив с добавлением ПМ на автотракторном двигателе

Проведенные эксперименты с топливными смесями позволили получить результаты, свидетельствующие о достоинствах использования дизельных топлив с ПМ в качестве моторного топлива для автотракторного дизеля. Для исследования показателей двигателя выбран режим номинальной мощности, так как тракторные дизельные двигатели эксплуатируются на режимах, близких к номинальным [75, 96, 97, 98, 124, 140, 145, 149, 150].

На изменение мощности дизельного двигателя влияют плотность топливной смеси, изменение ее теплотворной способности, количество утечек из плунжерной пары.

С ростом доли ПМ в смеси растет ее плотность, что приводит к увеличению массовой цикловой подачи топлива при сохранении постоянной объемной цикловой подачи.

При повышении содержания ПМ снижается теплотворная способность топливной смеси.

При этом также уменьшается количество утечек из плунжерной пары за счет увеличения вязкости. При этом с ростом нагрузки массовый расход топлива увеличивается.

В результате экспериментальных исследований (таблица 5.9, рисунок 5.8) можно сделать вывод о том, что с увеличением объемной доли ПМ в смесевом топливе эффективная мощность двигателя уменьшается, а удельный эффективный расход топлива увеличивается.

Таблица 5.9 - Результаты экспериментальных исследований

ДТ чистое				
n, об/мин	Мк, Н*м	Ne, кВт	Gт, кг/ч	ge, г/кВт*ч
1400	255,78	37,5	8,085	215,6
1600	243,91	40,87	8,96	219,23
1800	228,16	43,01	9,87	229,48
2000	210,48	44,08	10,68	242,28
10% содержания пальмового масла				
n, об/мин	Мк, Н*м	Ne, кВт	Gт, кг/ч	ge, г/кВт*ч
1400	249,39	36,56	8,191	224,04
1600	240,06	40,22	9,275	230,61
1800	225,19	42,445	10,226	240,92
2000	206,38	43,22	10,75	248,73
20% содержания пальмового масла				
n, об/мин	Мк, Н*м	Ne, кВт	Gт, кг/ч	ge, г/кВт*ч
1400	242,92	35,62	8,73	245,09
1600	234,99	39,37	10,017	254,43
1800	221,11	41,68	11,205	268,83
2000	201,79	42,26	11,85	280,41
30% содержания пальмового масла				
n, об/мин	Мк, Н*м	Ne, кВт	Gт, кг/ч	ge, г/кВт*ч
1400	239,89	35,17	9,793	278,44
1600	226,48	37,95	10,740	283,00
1800	211,24	39,82	11,965	300,48
2000	191,71	40,15	12,508	311,54

При $n=1600 \text{ мин}^{-1}$ снижение мощности составляет 1,59%, 3,67% и 7,1% для ПМ10, ПМ20 и ПМ30 соответственно. При $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ снижение мощности составляет 1,95%, 4,13% и 8,92% для ПМ10, ПМ20 и ПМ30 соответственно.

Данное явление в основном вызвано уменьшением теплоты сгорания смеси по мере роста в ней объемной доли ПМ, имеющего меньшую теплоту сгорания, чем дизельное топливо.

На изменение мощности дизельного двигателя влияют плотность топливной смеси, изменение ее теплоты сгорания, количество утечек из плунжерной пары. С ростом доли ПМ в смеси растет ее плотность, что приводит к увеличению массовой цикловой подачи топлива при сохранении

постоянной объемной цикловой подачи. При повышении содержания ПМ снижается теплота сгорания топливной смеси. При этом также уменьшается количество утечек из плунжерной пары за счет увеличения вязкости.

Снижение эффективного крутящего момента и эффективной мощности двигателя при использовании смесевых топлив с содержанием 0,1; 0,2 и 0,3 объемных долей ПМ (ПМ10, ПМ20, ПМ30) можно объяснить уменьшением теплотворной способности смесевых топлив по сравнению с чистым ДТ, с одной стороны. С другой стороны, значительно повышаются вязкость и плотность смеси. С увеличением вязкости изменяются условия для смесеобразования, что приводит к их отклонению от оптимальных и способствует неполному сгоранию топлива, вызывая снижения мощности. Таким образом, наблюдаемое снижение крутящего момента от 1,72%, 4,12% до 8,92% соответственно при работе двигателя со смесевыми топливами ПМ10, ПМ20 и ПМ30 можно связать с их более высокой вязкостью и ухудшением гидродинамического режима в КС. Эти результаты согласуются с результатами других авторов [7, 74, 75, 97, 98, 125, 157, 215].

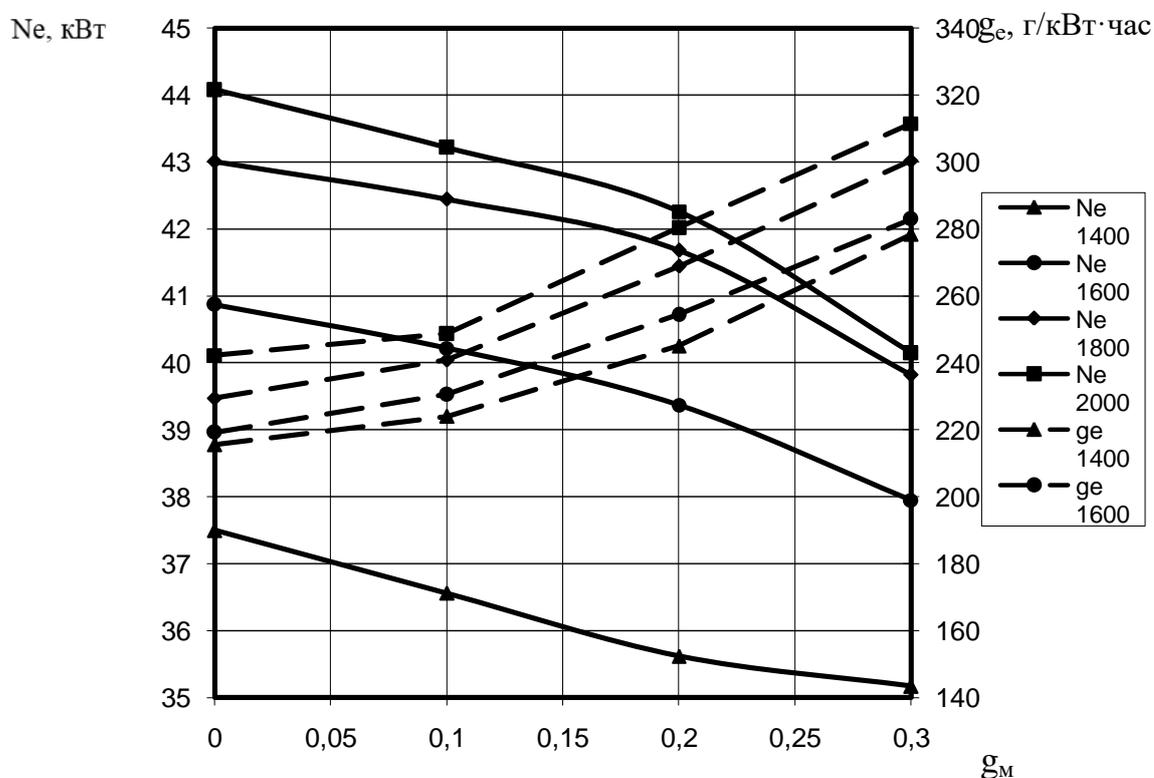


Рисунок 5.8 Показатели работы двигателя в зависимости от состава смесевого топлива.

Установлено увеличение удельного расхода топлива от 242 г/кВт·ч для чистого ДТ до 249 г/кВт·ч для ПМ10, 280 г/кВт·ч для ПМ20 и 311 г/кВт·ч для ПМ30. Повышение составило 2,67%; 15,74% и 28,59% соответственно (ПМ10, ПМ20, ПМ30). Анализ показателей работы двигателя демонстрирует хорошее поведение тракторного дизельного двигателя для каждого используемого топлива.

Добавление в ДТ различных долей ПМ (0,1; 0,2 и 0,3 объемных), позволяет получить показатели автотракторный дизеля, сравнимые с полученными на дизельном двигателе (с непосредственным впрыскиванием) со стандартным ДТ, в соответствии с описанными в научной литературе.

Обнаруженные различия в значении крутящего момента M_k составляют менее 10%.

Анализ характеристик, приведенных на рисунке 5.8, полученных при полной нагрузке, показывает, что:

1. При полной нагрузке дизельного двигателя на стенде с обычным ДТ расход топлива был принят за 100% при работе на режиме 2000 мин.⁻¹. При работе двигателя на исследуемых топливных смесях получены следующие значения увеличения удельного расхода топлива 2,67%; 15,74% и 28,59% (соответственно ПМ10, ПМ20, ПМ30).

2. При анализе результатов испытаний смесевых топлив на дизельном двигателе Д-144 на режимах внешних характеристик отмечена зависимость показателей дизельного двигателя от вида применяемого топлива. Эта зависимость связана с большей плотностью и повышенной вязкостью смесевого топлива по сравнению с чистым ДТ. Физико-технические свойства исследуемых топливных смесей показаны в таблице 3.2.

3. Анализ результатов также показывает зависимость эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , расхода топлива G_T , коэффициента избытка воздуха α , дымности $K_{\text{Хот}}$ от удельного эффективного расхода топлива g_e , при частоте вращения коленчатого вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ двигателя.

5.6 Методика исследования и оценка дымности отработавших газов

Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера «Инфракар» Д1-3.02 оптического типа, в котором дымность измеряется по методу плотности дыма (рисунок 5.9). Технические характеристики дымомера приведены в таблице 5.11. Стендовое измерение дымности дизеля Д-144 при использовании различных видов смесового дизельного топлива ПМ10, ПМ20, ПМ30 проводилось на установившихся режимах внешней скоростной характеристики при свободном ускорении дизеля.

Анализ проводился в соответствии со стандартной методикой по определению дымности ГОСТ 24028–2013 [13], ISO 8176–2008, NEQ.



Рисунок 5.9 - Дымомер «Инфракар» Д1–3.02

Таблица 5.10 - Технические характеристики дымомера «Инфракар-Д»

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Эффективная оптическая база	L	м	0,43
Натуральный показатель ослабления светового потока	K	м ⁻¹	0 – ∞
Предел допускаемой абсолютной погрешности	Δ	м ⁻¹	± 0,05
Коэффициент ослабления светового потока	N	%	0–100
Предел допускаемой основной приведенной погрешности	Δ	%	± 1
Время прогрева рабочей камеры	t	мин.	не более 10
Время срабатывания	t	сек.	не более 1,5
Напряжение питания	U	В	12/220
Температура окружающего воздуха	t	°С	0 – 35

На каждом режиме внешней скоростной характеристики дымность измерялась три раза, с тем, чтобы разность результатов не превышала 4%. Для определения дымности выхлопа двигателя на стенде при работе дымомера регистрировали значение поглощения света относительно скорости вращения коленчатого вала и режимов крутящих моментов. Пробоотборная зона дымомера размещалась на выпускном коллекторе двигателя.

Уровень дымности характеризуется натуральным показателем ослабления светового потока K и относительным коэффициентом ослабления светового потока N . Коэффициент ослабления светового потока рассчитывается по формуле:

$$N = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) 100, \quad (5.13)$$

где Φ – световой поток, достигший приемника после просвечивания столба ОГ, лм;

Φ_0 – световой поток, достигший приемника после просвечивания чистого воздуха, лм.

Натуральный показатель ослабления светового потока вычисляется:

$$K = \frac{1}{L} \cdot \ln \left(1 - \frac{N}{100}\right), \quad (5.14)$$

где L – эффективная база дымомера оптического типа, м.

Предельно допустимый уровень дымности задают в зависимости от условного расхода газов V_r (м³/с). Величина V_r численно равна секунднему расходу воздуха при работе дизеля без наддува и рассчитывается по формуле:

$$V_r = \frac{\pi D^2}{4} S i z \frac{n}{60}, \quad (5.15)$$

где D – диаметр цилиндра, м;

S – ход поршня, м;

i – число цилиндров,

z – коэффициент тактности (0,5 или 1);

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

В таблице 5.11 приводится соотношение между сажеосодержанием и

единицами измерения дымности ОГ.

Таблица 5.11. Сажесодержание и коэффициенты измерения дымности ОГ

Сажа, г/м ³	Единицы измерения		Сажа, г/м ³	Единицы измерения	
	N, %	K, м ⁻¹		N, %	K, м ⁻¹
0	0	0	0,325	60	2,131
0,025	10	0,245	0,430	70	2,800
0,050	20	0,519	0,650	80	3,743
0,100	30	0,829	0,675	85	4,412
0,125	40	1,188	0,750	90	5,355
0,212	50	1,612	0,950	94,5	6,900

Обработка результатов и оценка измерения дымности

В таблице 5.12 приведены результаты определения дымности ОГ при работе стендового дизельного двигателя Д-144 на чистом ДТ и на смесевых топливах.

По результатам исследований анализировались характеристики ОГ в зависимости от состава смесевого топлива. При испытании дизеля на дизельном топливе, приобретенном на автозаправочной станции компании «Лукойл» в г. Волгограде, параметры и фазы процесса сгорания топлива имеют значения, соответствующие нормативным требованиям к дымности и ПДК, регламентированным российским стандартом ГОСТ 33997-2016 [13, 14].

Таблица 5.12 - Оценка дымности при работе на различных топливных смесях

Частота вращения, мин ⁻¹	ДТ			ПМ10		
	K, м ⁻¹	N, %	сажа, г/м ³	K, м ⁻¹	N, %	сажа, г/м ³
1400	4,726	90	0,680	2,671	70	0,430
1600	5,241	90	0,700	2,708	70	0,450
1800	5,331	90	0,730	2,461	66	0,330
2000	5,449	90	0,750	3,132	78	0,600
Частота вращения, мин ⁻¹	ПМ20			ПМ30		
	K, м ⁻¹	N, %	сажа, г/м ³	K, м ⁻¹	N, %	сажа, г/м ³
1400	2,201	66	0,350	2,256	66	0,350
1600	2,870	70	0,430	3,708	81	0,650
1800	2,831	70	0,430	3,629	81	0,630
2000	3,448	80	0,500	3,911	81	0,650

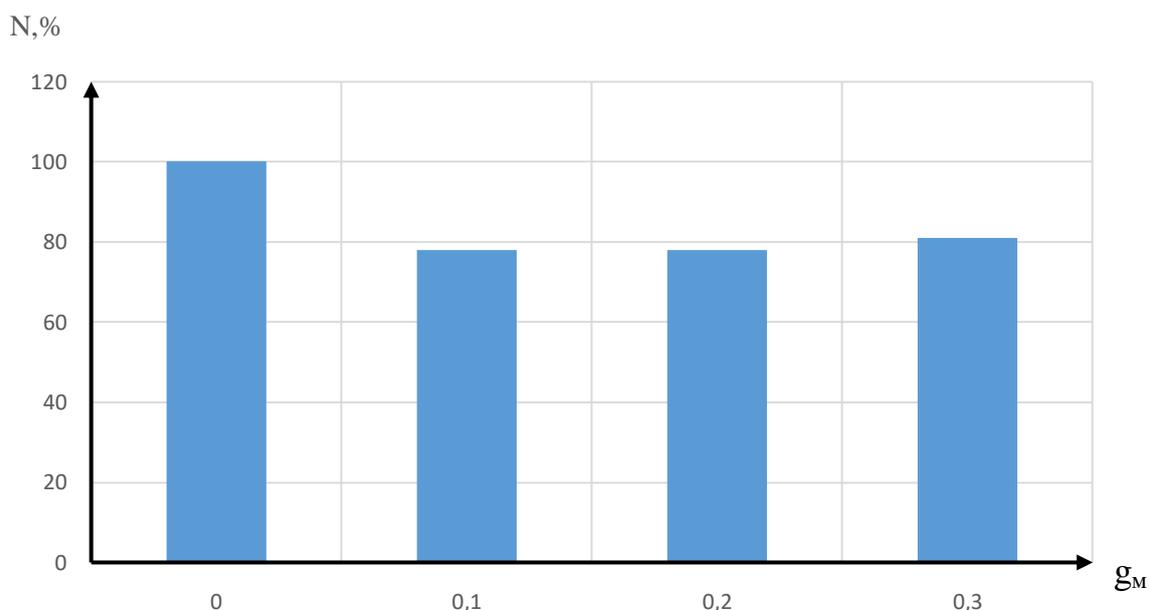


Рисунок 5.10 - Зависимость коэффициента дымности от состава топлива

При работе на смесевом топливе ПМ10, ПМ20, ПМ30 дымность отработавших газов ниже, чем для дизельного топлива – на 10-30% для относительного коэффициента ослабления светового потока $N\%$ и коэффициента поглощения светового потока $K, м^{-1}$ (рисунок 5.10).

Отмеченное значительное снижение дымности при использовании дизельных топлив с добавкой ПМ можно объяснить присутствием большего количества кислорода в топливах.

Также уменьшается в ОГ содержание монооксида углерода CO , углеводородов CH и сажи PM .

Кроме того, повышение давления впрыска смесевое топлива в КС, влияющее на динамику смесеобразования, приводит к повышенному содержанию оксидов азота в ОГ.

5.7 Методика оценки уровня токсичности отработавших газов на стенде

Целью данных исследований является оценка эмиссионных характеристик двигателя, бывшего в эксплуатации более 10 лет, работающего на чистом ДТ и их соответствие требованиям нормативной документации [19, 90, 128, 168].

В процессе исследований решались следующие задачи:

- расчет содержания токсичных компонентов в отработавших газах,
- расчет удельных выбросов вредных веществ.

Определение содержания токсичных компонентов в отработавших газах производилось оценочным путем с использованием «Методики расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок» Научно-исследовательского института охраны атмосферного воздуха (НИИ АТМОСФЕРА) [113, 203].

Данная методика предназначена для расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу стационарными дизельными установками при их эксплуатации. В качестве исходных данных для расчета максимальных разовых выбросов используются сведения из технической документации завода-изготовителя дизельной установки об эксплуатационной мощности (если сведения об эксплуатационной мощности не приводятся, – то номинальной мощности), а для расчета валовых выбросов в атмосферу, – результаты учетных сведений о годовом расходе топлива дизельного двигателя.

Методика позволяет, в зависимости от наличия или отсутствия, а также полноты имеющейся информации по выбросам вредных веществ, приводимых в сопровождаемой технической документации на стационарную дизельную установку, или располагаемых возможностей на выполнение соответствующего инструментального контроля выбросов, осуществлять расчет выбросов как с использованием усредненных значений удельных выбросов в зависимости от мощности и частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя, так и по данным инструментального контроля выбросов в условиях эксплуатации.

Приведенные в Методике усредненные удельные значения показателей выбросов отражают основные закономерности изменения параметров токсичности дизелей в зависимости от нагрузочно-скоростного режима работы силовой установки, а также мощности и быстроходности дизельного двигателя. При этом учитывается, что в реальной эксплуатации в течение года в соответствии с изменением характера внешних условий стационарная

дизельная установка работает на некоторой совокупности установившихся дискретных режимов, для которой значения удельных выбросов усредняются. Принимаются во внимание также особенности организации рабочего процесса многоцилиндровых мощных дизельных установок.

Расчеты выбросов выполняются для следующих вредных веществ, поступающих в атмосферу с ОГ стационарных дизельных установок:

- оксид углерода (СО);
- оксиды азота (NO_x) (в пересчете на NO_2);
- углеводороды (СН);
- сажа (С);
- диоксид серы (SO_2);
- формальдегид (CH_2O);
- бенз(а)пирен (БП).

В соответствии с основными классификационными признаками мощности, быстроходности, числа цилиндров дизельных двигателей, которые определяют способ организации рабочего процесса и, следовательно, токсикологические свойства выделяемых веществ, стационарные дизельные установки условно подразделяются на четыре группы (N_e – номинальная мощность, n – число оборотов, i – число цилиндров):

А – маломощные, быстроходные и повышенной быстроходности ($N_e < 73,6$ кВт, $n = 1000 - 3000$ мин⁻¹);

Б – средней мощности, средней быстроходности и быстроходные ($N_e = 73,6 - 736$ кВт, $n = 500 - 1500$ мин⁻¹);

В – мощные, средней быстроходности ($N_e = 736 - 7360$ кВт, $n = 500 - 1000$ мин⁻¹);

Г – мощные, повышенной быстроходности, многоцилиндровые ($N_e = 736 - 7360$ кВт, $n = 1500 - 3000$ мин⁻¹, $i > 30$).

Современные требования стандартов зарубежных стран к выбросам стационарных дизельных установок существенно отличаются от требований стандартов Российской Федерации. Кроме того, после капитального ремонта, происходит изменение количества выбросов дизельными двигателями. В связи

с тем, что в ряде организаций Российской Федерации находятся в эксплуатации как зарубежные стационарные дизельные установки, так и установки капитальноотремонтированные, данные по выбросам корректируются в соответствии с указанными обстоятельствами.

Дизельный двигатель экспериментальной установки по своим характеристикам относится к группе А. Учитывая срок эксплуатации экспериментальной дизельной установки, будем использовать в расчетах значения выбросов для агрегатов, прошедших капитальный ремонт. Таким образом, для оценки выбросов используем данные таблицы 5.15 для группы А. Номинальная мощность двигателя Д-144, принимаемая для расчета – 44,1 кВт.

Максимальный выброс i -того вещества (г/с) стационарной дизельной установкой определяется по формуле:

$$M_i = (1/3600) \cdot e_{Mi} \cdot P_э, \quad (5.16)$$

где e_{Mi} , (г/кВтч) – выброс i -го вредного вещества на единицу полезной работы стационарной дизельной установки на режиме номинальной мощности, определяемый по таблице 5.13 или таблице 5.14;

$P_э$, (кВт) – эксплуатационная мощность стационарной дизельной установки, значение которой берется из технической документации завода изготовителя. Если в технической документации не указывается значение эксплуатационной мощности, то в качестве $P_э$ принимается значение номинальной мощности стационарной дизельной установки (N_e);

(1/3600) – коэффициент пересчета «час» в «секунду».

Валовый выброс i -того вещества за год (т/год) стационарной дизельной установкой определяется по формуле:

$$W_{эi} = (1/1000) \cdot q_{эi} \cdot G_m, \quad (5.17)$$

где $q_{эi}$ (г/кг·топл.) – выброс i -го вредного вещества, приходящегося на один кг дизельного топлива, при работе стационарной дизельной установки с учетом совокупности режимов, составляющих эксплуатационный цикл [108]; определяемый по таблице 5.15 или таблице 5.16;

G_m , т – расход топлива стационарной дизельной установкой за год (берется поотчетным данным об эксплуатации установки);

1/1000 – коэффициент пересчета «кг» в «тонну».

Таблица 5.13 - Значения выбросов e_{Mi} (г/кВтч) для различных групп стационарных дизельных установок до капитальногоремонта

Группа	Выброс, г/кВтч						
	CO	NO _x	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	БП
А	7,2	10,3	3,6	0,7	1,1	0,15	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Б	6,2	9,6	2,9	0,5	1,2	0,12	$1,2 \cdot 10^{-5}$
В	5,3	8,4	2,4	0,35	1,4	0,1	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Г	7,2	10,8	3,6	0,6	1,2	0,15	$1,3 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5.14 - Значения выбросов e_{Mi} (г/кВтч) для различных групп стационарных дизельных установок, прошедших капитальный ремонт

Группа	Выброс, г/кВтч						
	CO	NO _x	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	БП
А	8,6	9,8	4,5	0,9	1,2	0,2	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Б	7,4	9,1	3,6	0,65	1,3	0,15	$1,5 \cdot 10^{-5}$
В	6,4	8,0	3,0	0,45	1,5	0,12	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Г	8,6	10,3	4,5	0,75	1,3	0,2	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5.15 - Значения выбросов q_{zi} (г/кг топл.) для различных групп стационарных дизельных установок до капитальногоремонта

Группа	Выброс, г/кг топл.						
	CO	NO _x	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	БП
А	30	43	15,0	3,0	4,5	0,6	$5,5 \cdot 10^{-5}$
Б	26	40	12,0	2,0	5,0	0,5	$5,5 \cdot 10^{-5}$
В	22	35	10,0	1,5	6,0	0,4	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Г	30	45	15,0	2,5	5,0	0,6	$5,5 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5.16 - Значения выбросов q_{zi} (г/кг топл.) для различных групп стационарных дизельных установок, прошедших капитальный ремонт.

Группа	Выброс, г/кг · топл.						
	CO	NO _x	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	БП
А	36	41	18,8	3,75	4,6	0,7	$6,9 \cdot 10^{-5}$
Б	31	38	15,0	2,5	5,1	0,6	$6,3 \cdot 10^{-5}$

Группа	Выброс, г/кг · топл.						
	CO	NO _x	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	БП
В	26	33	12,5	1,9	6,1	0,5	$5,6 \cdot 10^{-5}$
Г	36	43	18,8	3,15	5,1	0,7	$6,9 \cdot 10^{-5}$

Для стационарных дизельных установок зарубежного производства, отвечающих требованиям природоохранного законодательства стран Европейского экономического сообщества, США, Японии, значения выбросов по табл. 5.13, 5.154, 5.15, 5.16 могут быть соответственно уменьшены по CO в 2 раза; NO₂ и NO в 2,5 раза; CH, C, CH₂O и БП в 3,5 раза.

Расчет для выбросов CO по данным НИИ «Атмосфера»:

$$M_{CO} = (1/3600) \cdot 8,6 \cdot 44,1 = 0,10535 \text{ (г/с)}.$$

Расчет для выбросов NO_x:

по данным НИИ «Атмосфера»

$$M_{NO_x} = (1/3600) \cdot 9,8 \cdot 44,1 = 0,12005 \text{ (г/с)}.$$

Аналогично рассчитываем остальные показатели. Расчеты ведем табличным способом. Результаты расчетов представлены в таблице 5.17.

Расход отработавших газов от стационарной дизельной установки в соответствии с ГОСТ 24028–2013 определяется по выражению:

$$G_{o_2} = G_T (1 + \alpha \cdot l_0), \quad (5.18)$$

где G_T – расход топлива, кг/час

α – коэффициент избытка воздуха;

l_0 , кг воздуха/кг топлива – теоретически необходимое количество кг воздуха для сжигания одного кг топлива.

Объемный расход отработавших газов (м³/с) определяется по формуле:

$$Q_V = G_{o_2} / \gamma_{o_2} \quad (5.19)$$

где γ_{o_2} – удельный вес отработавших газов, кг/м³, рассчитываемый по формуле:

$$\gamma_{o_2} = \gamma_o / (1 + T_{o_2} / 273), \quad (5.20)$$

где γ_o (при $t=0$ °C) – удельный вес отработавших газов при температуре, равной 0°C; значение которого можно принимать 1,31 кг/м³;

T_{o_2} – температура отработавших газов, К.

Таблица 5.17 - Оценочные максимальные выбросы вредных веществ в ОГ при работе дизельного двигателя Д-144 на нефтяном ДТ

Компоненты ОГ	Максимальный выброс вредных веществ	
	г/с	кг/час
CO	0,1054	379,26
NO _x	0,1201	432,18
CH _x	0,0551	198,45
SO ₂	0,0147	52,92
CO ₂	-	-
PM	0,0110	39,69

При организованном выбросе отработавших газов в атмосферу, на удалении от стационарной дизельной установки до 5 м, значение их температуры можно принимать равным 450°С, на удалении от 5 до 10 м: 400°С.

Поскольку полученные данные для содержания вредных веществ в ОГ не превышают (соответствуют) норм, установленных для стендовых дизельных двигателей и согласуются с результатами других исследований [106, 132, 156, 168, 186, 187, 193, 194, 197, 198, 199, 200, 201, 204, 228]. то результаты проведенных стендовых исследований эмиссионных характеристик двигателя Д-144 следует признать достоверными.

5.8 Производственно-эксплуатационные испытания

Реальная работа автотракторного дизельного двигателя существенным образом отличается от работы на стенде. При исследовании двигателя на тормозном стенде задается определенная тормозная нагрузка и устанавливается фиксированная частота вращения коленчатого вала двигателя. Таким образом, характеристики двигателя определяются в стационарном «идеальном» режиме.

При реальных условиях эксплуатации, например, на трассе или при бездорожье, на транспортное средство действует постоянно меняющаяся нагрузка (N_p), коэффициент вариации которой достигает 30-70%. Это оказывает влияние на процессы, протекающие в цилиндрах двигателя.

5.8.1 Методика производственно-эксплуатационных испытаний

Производственные технико-экономические исследования и эксплуатационные испытания позволяют оценить эффективность производства и применения дизельного топлива с добавлением ПМ для дизелей сельскохозяйственных машин. ПЭИ проводились в г. Киншасе в ДР Конго на базе авторемонтной мастерской «SaintGabriel». В качестве объекта исследования использовался многоцилиндровый дизельный двигатель Mitsubishi pajero (модель 4D56T). В задачи дорожных ПЭИ входили:

- измерение мощности и динамических показателей;
- изучение пусковых качеств дизеля в эксплуатационных условиях автомобиля;
- исследование условий надежности и безотказности работы дизеля и топливной аппаратуры (количество и характер отложений на деталях масляных фильтров, расход и изменение физико-химических свойств картерного масла);
- исследование износов деталей цилиндро-поршневой группы;
- исследование экологических показателей работы двигателя.

Для расчета мощности использовалось выражение [158]:

$$N_e = \frac{G_A \cdot \psi_V \cdot V_{max} + K_B \cdot F_A \cdot V_{max}^3}{1000 \cdot \eta_{TP} \cdot K_P} \quad (5.21)$$

После преобразований формула 5.21 приобретает вид:

$$N_e = \frac{V_{max} \cdot (G_A \cdot \psi_V + K_B \cdot F_A \cdot V_{max}^2)}{1000 \cdot \eta_{TP} \cdot K_P}, \quad (5.22)$$

где G_A – полный вес автомобиля, Н;

ψ_V – суммарный коэффициент сопротивления дороги в режиме максимальной скорости (принимается $\psi_V = 0,35 - 0,4$)

V_{max} – максимальная скорость, м/с, $V_{max} = 90 \text{ км/ч} = 25 \text{ м/с}$;

K_P – коэффициент коррекции, принимается $K_P = 0,75$;

K_B – коэффициент обтекаемости, $K_B = 0,7$;

F_A – лобовая площадь автомобиля, м², $F_A = 3,47$;

η_{TP} – КПД трансмиссии, $\eta_{TP} = 0,85 - 0,9$

$$\eta_{TP} = \eta_X \cdot \eta_{ГЛ}, \quad (5.23)$$

η_X – КПД двигателя на холостом ходу;

$\eta_{ГЛ}$ – КПД главной передачи.

Массовый расход топлива рассчитывался по формуле:

$$G_T = \frac{\Delta V_T \cdot \rho_T \cdot 3,6}{\tau_T}, \quad (5.24)$$

где ΔV_T – измеренный объем смесового топлива, л;

ρ_T – плотность смесового топлива, кг/л;

τ_T – время расходования смесового топлива из бака, с.

Определение удельного расхода топлива (кг/кВт·час):

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} \quad (5.25)$$

Основным измерителем топливной экономичности автомобиля является путевой расход топлива Q_s , выраженный в литрах на 100 км пройденного пути [50].

Путевой расход топлива зависит от удельного расхода топлива g_e двигателя:

$$Q_s = \frac{g_e N_e}{36 \rho_T V} \cdot 1000 \quad (5.26)$$

где N_e – мощность, развиваемая двигателем, кВт;

V – линейная скорость, м/с;

ρ_T – плотность топлива, кг/м³;

g_e – удельный расход топлива, г/кВт ч).

Участком для проведения ПЭИ была выбрана междугородная трасса г. Киншаса – г. Матади. Длина участка 350 км, период проведения – август 2017 г. ПЭИ проводились пятичасовыми этапами на эксплуатационных режимах.

ПЭИ проводились на четырех видах топлива: стандартном ДТ, и дизельных топливах с добавлением ПМ 10, 20, 30% объемных (ПМ10, ПМ20, ПМ30). По литературным данным в смесовом топливе может использоваться до 30% объемных ПМ, без каких-либо конструктивных изменений двигателя [38]. Свойства этих смесей находятся в пределах стандарта ГОСТ Р 53605-2009 [18].

ПЭИ проводились следующим образом. Сначала двигатель работал на чистом ДТ в течение 30 минут для прогрева перед переходом к рядным испытаниям на эталонном или смесевом дизельном топливе. Кроме того, двигатель работал на чистом ДТ 30 минут до выключения. В качестве эталонных снимались показания при работе на чистом ДТ.

Испытания делились на два этапа:

- определение токсичности ОГ;
- определение топливной экономичности и мощности.

Топливная экономичность определялась при заездах на дистанцию от 50 до 100 км. Расход топлива определялся мерными цилиндрами [198], скорость контролировалась по спидометру, время замерялось по секундомеру. Массовый расход, мощность определялись расчетным путем. Для каждого вида топлива проводилась серия из 5 измерений. После каждых 75 км пробега производилась замена топливных фильтров грубой очистки, чтобы предупредить падение мощности двигателя.

При работе на ДТ снимали эксплуатационные параметры в начале ПЭИ. Двигатель работал при полной нагрузке и на различных скоростях вращения от 1000 мин⁻¹ до 4000 мин⁻¹. Затем таким же образом снимались показания для топливных смесей с добавлением ПМ.

На рисунке 5.11 показано принципиальное расположение и устройство подачи смесевое топлива.

На рисунках 5.12-5.14 показан внешний вид силовой установки автомобиля Mitsubishi pajero (модель 4D56T), использованного в ПЭИ.

В таблице 5.18 приведены технические характеристики двигателя модель 4D56T (Mitsubishi pajero), использованного в данном исследовании.

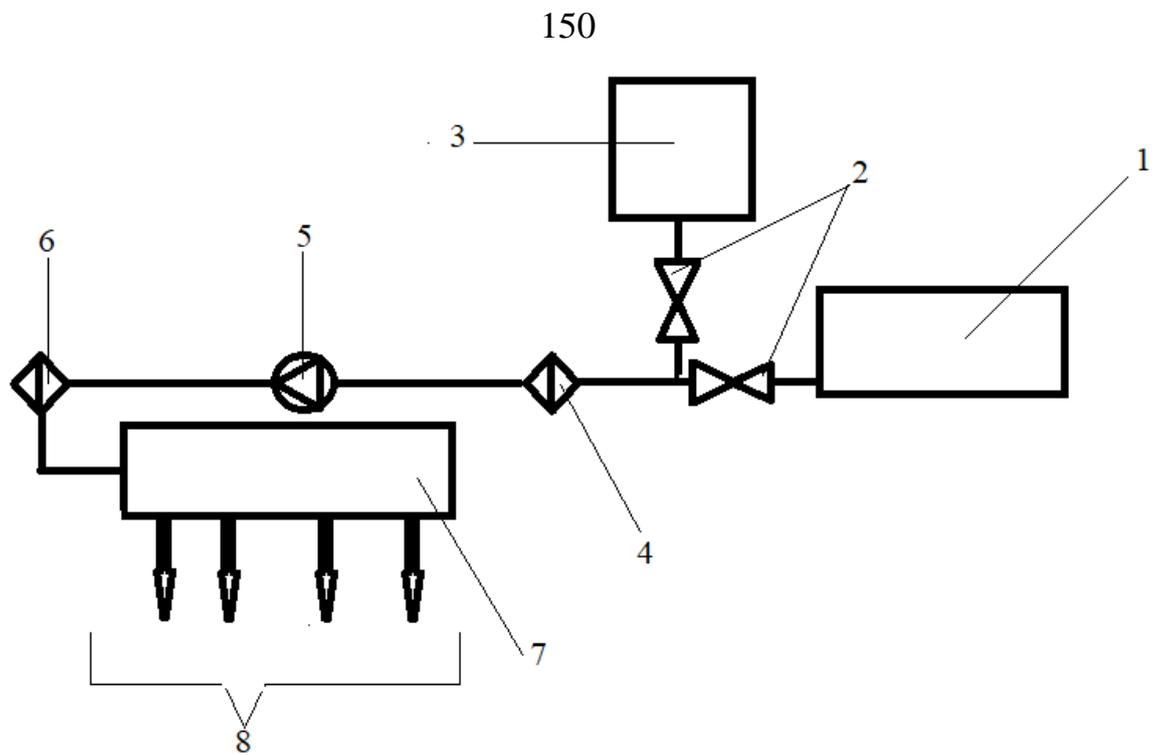


Рисунок 5.11 - Принципиальная схема устройства подачи топливной смеси: 1 – бак для ДТ, 2 – вентили, 3 – бак для смесового топлива, 4, 6 – фильтры, 5 – ТПН, 7 – ТНВД, 8 – форсунки.



Рисунок 5.12 - Общий вид под капотом автомобиля, использованного в ПЭИ



Рисунок 5.13 - Вид расположения двигателя в капоте 1.



Рисунок 5.14 - Вид расположения двигателя в капоте 2

Таблица 5.18 - Технические характеристики дизельного двигателя Mitsubishi pajero (модель 4D56T)

Марка мотора	4D56T
Годы выпуска	1997-2007
Рабочий объем цилиндров, м ³	
Мощность, кВт	74
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	4200
Степень сжатия	21:1
Система питания топлива	насос тип распределения струй – непрямой впрыск
Тип мотора	дизельный ряд
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндров, мм	91,1
Ход поршня, мм	95
Нормативы экологии	Евро ½
Расход топлива по трассе	10 л на 100км
Ресурс ДВС заявленный	250 тыс. км
Система смазки	распределительная под давлением
Камера сгорания	вихревая
Система охлаждения	радиаторная

5.8.2 Результаты определения эффективных показателей и их анализ

На всех скоростях испытания средняя выходная мощность для топлив ДТ, ПМ10, ПМ20, ПМ30 составляла 28,72; 28,55; 25,08 и 24,22 кВт, соответственно. По сравнению с работой на чистом ДТ мощность при работе на смесевом топливе снижалась. Итоговое изменение мощности по сравнению с ДТ составляет: -0,6%; -12,7%; -15,7% соответственно для ПМ10, ПМ20, ПМ30. Увеличение содержания ПМ в топливной смеси приводит к снижению теплоты сгорания. Мощность двигателя снижается [72, 74, 75, 94, 96, 103, 124, 125, 186, 187].

Увеличение удельного расхода топлива по сравнению с эталонным ДТ заметно для всех смесевых топлив (185,71; 198; 236, 258г/кВт·час) соответственно ДТ, ПМ10, ПМ20, ПМ30). На каждый кВт произведенной мощности расходуется больше смеси, чем ДТ, поскольку теплотворная способность биодизеля ниже, чем у ДТ. Средние величины роста удельного расхода смесевых топлив относительно ДТ составили 6,62%, 27,08%, 38,93% соответственно.

В таблице 5.19 приведены полученные в результате расчетов по формуле (5.26) значения путевого расхода топлива. Эти данные использованы при расчете экономического эффекта от использования исследованных топливных смесей.

За время длительных испытаний не наблюдалось никаких нарушений в работе дизеля и его топливоподающей аппаратуры. Средний угар масла при замене видов топлива к концу испытаний практически оставался таким же как для ДТ (пробы масла после испытания изменились незначительно). Содержание механических примесей оказалось незначительным. Таким образом, при работе на топливных смесях ПМ10, ПМ20, ПМ30 маслооставалось стабильным. Никаких особенностей в качестве масла не выявлено.

Было замечено, что срок работы фильтров грубой очистки при работе на ДТ с добавлением ПМ незначительно уменьшился по сравнению с временем работы на чистом ДТ [9, 55].

Таблица 5.19 - Путевой расход топлива при ПЭИ дизельного двигателя Mitsubishi pajero (модель 4D56T)

	ДТ	ПМ10	ПМ20	ПМ30
Плотность топлива, кг/м ³	830	838,8	847,6	856,4
Мощность, кВт/час	28,72	28,55	25,08	24,22
Удельный расход, г/кВт	185,71	198	236	258
Скорость автомобиля, м/с	22	22	22	22
Путевой расход, л/100 км	8,11	8,51	8,82	9,21

5.8.3 Определение экологических показателей отработавших газов

Для измерения токсичности выбросов ОГ использовался газоанализатор Bosh (модель ВЕА-350, рисунок 5.15, таблица 5.19). предоставленный Механической лабораторией Киншаского Государственного Университета ДР Конго. Определялось содержание NO_x, HC, CO и дымность ОГ.

С точки зрения организации производственной эксплуатации испытания

проводились как при полной подаче топлива, так и при частичных подачах топлива, при холостом ходе и под нагрузкой, с соблюдением процедур стандарта ГОСТ ISO8178-2-2013 [23].

Таблица 5.20 - Технические характеристики газоанализатора Bosh BEA-350

Технические данные BoshBEA 350	
Классы защиты	Устройство управления и индикации IP 30 Модуль измерения мутности дыма RTM 430 IP 33
Диапазон точности	+5°C – +40°C
Рабочий диапазон	+5°C – +45°C
Температура хранения	-25°C – +60°C
Электропитание	230 В

Испытания на токсичность ОГ проводилось на стенде с беговыми барабанами по так называемым ездовым циклам [198]. Во время циклов меняли режим работы двигателя, при этом проводили отбор проб ОГ и их анализ. Снятие показаний проводилось при работе двигателя на холостом ходу, на полной нагрузке и на различных скоростях вращения от 1000 мин⁻¹ до 4000 мин⁻¹ с шагом 500 мин⁻¹.

Знакомство с результатами уже существующих исследований по применению пальмового масла как добавки к дизельному топливу, способной уменьшить токсичность продуктов сгорания, показало, что применение пальмового масла в чистом виде или в топливной смеси влияет на эмиссию CO, CO₂, CH_x, NO_x, PM, дымность, сажеобразование [47, 52, 72, 125, 163, 173, 174, 187, 211, 216, 220, 228, 235].

Условия эксплуатации и содержание ПМ в топливной смеси существенно влияют на эмиссионные характеристики двигателя.

При анализе исследовательских работ по теме было обнаружено следующее:

- при низких нагрузках выбросы CO снижались в интервале от 4% до 46,5%;
- снижение CH_x было обусловлено более высокой нагрузкой и более низким содержанием ПМ в смеси;

- увеличение количества ПМ в смеси уменьшает количество РМ, а количество выбросов NO_2 увеличивается на 4% при 20% содержании ПМ в смеси;
- уровень дымности также снижается (на 20–30%) при более высокой нагрузке и более высоком содержании ПМ в смеси [33, 85, 97, 98, 100, 101].



Рисунок 5.15 - Газоанализатор Bosh BEA-350

5.8.4 Результаты определения и анализ экологических показателей отработавших газов

Выбросы монооксида углерода. Как правило, такие факторы, как соотношение воздух/топливо, частота вращения коленчатого вала двигателя, продолжительность и давление впрыска, а также состав топлива влияют на эмиссию CO [25, 56, 108, 121, 152, 186, 187, 195, 219].

При сравнении выбросов для смесевых топлив ПМ10, ПМ20, ПМ30 видно, что во всем диапазоне скоростей смесевое топливо дает эмиссию CO ниже, чем ДТ. Это подтверждается и другими исследователями [25, 216, 218, 220, 223, 224, 225, 227, 229, 233]. В среднем образцы топлива ПМ10, ПМ20, ПМ30 снижают эмиссию CO на 17,36%; 32,65%; 13,75% соответственно [25, 74, 75, 117, 125, 186, 187, 227, 233]. Таким образом, наилучшие показатели по эмиссии CO (самая низкая эмиссия) показала топливная смесь ПМ20. Это можно объяснить повышенным содержанием атомов кислорода и по сравнению с ДТ, и по сравнению с ПМ10. Повышение эмиссии CO при использовании смеси ПМ30 можно объяснить повышением вязкости топливной смеси и

соответствующимухудшением смесеобразования.

Эмиссия несгоревших углеводородов CH_x . Присутствие в ОГ углеводородов CH_x является результатом неполного сгорания и тушения пламени [96, 111, 141, 154, 221]. Во всем диапазоне скоростей среднее сокращение выбросов CH_x для смесей ПМ10, ПМ20, ПМ30 составило 18,42% и 30,26%, 18,26% соответственно.

Такое возрастание эмиссии углеводородов при использовании смеси ПМ30 вызвано увеличением длины струи распыливаемого смесевоего топлива, обусловленным его большей плотностью, повышением количества топлива, попадающего на стенки КС и, следовательно, доли пленочного смесеобразования.

Эмиссия оксида азота NO_x . Оксиды азота в выхлопных газах содержат монооксид NO и диоксид NO_2 . Их образование значительно зависит от температуры в цилиндре, концентрации кислорода и продолжительности времени ожидания смеси для протекания реакции [151, 216, 220, 231]. В среднем смесевые топлива ПМ10, ПМ20, ПМ30 давали увеличение выбросов NO_x , по сравнению с ДТ во всем диапазоне на: 3,38%;18,56%; 3,13% соответственно. Также было отмечено, что при увеличении нагрузки на автомобильный двигатель выбросы NO_x увеличиваются на 10-17% по сравнению с ДТ.

Полученные результаты объясняются более низким соотношением воздух/топливо для смесей, присутствием большого количества атомов кислорода в ПМ как компонента биодизеля. ПМ содержит на 11% больше молекулярного кислорода, чем ДТ, что повышает температуру в КС и улучшает процесс сгорания [26, 72, 117, 124, 157, 158, 188, 195, 212].

Кроме того, повышение выбросов NO_x может быть связано с более высокой адиабатической температурой пламени заряда смеси. Смесевое топливо содержит ненасыщенные жирные кислоты, что повышает температуру адиабатического пламени и объясняет увеличение выбросов NO_x [217, 220, 226, 227].

Эмиссия диоксида углерода CO_2 . Изменение выбросов CO_2 для всех образцов смесового топлива при различных скоростях движения в среднем составляло на 11,73% объемных больше, чем для ДТ. При увеличении нагрузки на дороге все смесовые топлива показали увеличение выбросов CO_2 на 6-15% по сравнению с ДТ.

Эти результаты согласуются с литературными данными, где предполагают, что эмиссия CO_2 указывает на полное сгорание топлива в цилиндре двигателя [125, 156, 157, 161, 186, 187, 216].

Таким образом, анализ экологических показателей при ПЭИ двигателя на смесовом топливе с добавлением ПМ показывает, что оптимальной топливной смесью является смесь ПМ10 (с 0,1 объемной долей ПМ). Хотя смесь ПМ20 дает хорошие показатели по содержанию CO и CH_x в ОГ, но по содержанию NO_x смесь ПМ10 лучше (ОГ менее токсичны).

Выводы

За время длительных ПЭИ не наблюдалось никаких нарушений в работе автомобиля и его топливоподающей аппаратуры. Средний угар масла с начала до конца испытаний оставался практически в допустимых пределах (незначительные изменения). По техническим причинам для избегания загрязнения масляного фильтра были проведены замены масляных фильтров (после нескольких километров или часов).

Стабильность смазочного масла в картере после испытания можно объяснить тем, что более высокая вязкость ПМ улучшает его смазывающие свойства и повышает противоизносные характеристики дизельного топлива с добавлением ПМ.

Дымность и токсичность ОГ (по содержанию CO и CH_x) заметно, на 25-35%, ниже, чем при работе на стандартном ДТ.

Проведенные испытания позволяют сказать, что ПМ является потенциальным сырьем для производства смесового топлива. Производительность смесового топлива уменьшается по сравнению с ДТ. Также уменьшается токсичность выбросов ОГ и их дымность.

Это смесевое топливо может заменить нефтяное на автомобильном дизельном двигателе без изменения его конструкции и уменьшить возрастающий спрос на нефтяное топливо. При этом улучшаются экологические показатели транспортного средства.

5.9 Обработка результатов и погрешности измерений

При проведении экспериментальных исследований осуществляется одновременная запись большинства контролируемых параметров, что позволяет повысить объективность получаемой информации.

При многократных замерах вероятное значение измеряемой величины \bar{x} определяется как средняя арифметическая величина из всех выполненных отдельных измерений одного и того же численного значения физической величины:

$$\bar{x} = \sum_1^n x_i \cdot n, \quad (5.27)$$

где $\sum x_i$ – сумма величин, получаемых при измерении; n – количество измерений. Среднеквадратичное отклонение σ :

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_1^n \Delta x_i^2 / (n - 1)}, \quad (5.28)$$

где $\sum \Delta x_i^2$ – сумма квадратов отклонений результатов отдельных измерений от их среднего арифметического значения.

Пригодность экспериментальных данных определяется по величине отклонения результатов исследований от средней арифметической величины, которая не должна превышать 3σ .

Ошибки параметров, определяемых расчетным путем, могут быть определены по выражениям [108].

Погрешность в определении эффективной мощности ε_{Ne} :

$$\varepsilon_{Ne} = \sqrt{\varepsilon_{Mk}^2 + \varepsilon_n^2}, \quad (5.29)$$

Погрешность в определении часовых расходов ПМ-смеси и топлива ε_{GT} :

$$\varepsilon_{GT} = \sqrt{\varepsilon_{GT}^2 + \varepsilon_T^2}, \quad (5.30)$$

Погрешность в определении удельного эффективного расхода топлива:

$$\varepsilon_{ge} = \sqrt{\varepsilon_{Ne}^2 + \varepsilon_{GT}^2}, \quad (5.31)$$

Величины предельных и относительных ошибок однократных измерений приведены в таблице 5.21.

Таблица 5.21 - Предельные и относительные ошибки однократных измерений.

Наименование измеряемого параметра		Тип прибора	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
Крутящий момент, Мк		DS 932-4/N	±5 Н·м	0,2
Частота вращения, n		–	±10 мин ⁻¹	0,5
Масса навески топлива, ΔG _T		МК-32.2-A21(R)	±5 г	1,5
Время расхода навески топлива, τ _T		Электронный секундомер	±0,1 с	0,05
Масса навески ПМ-смеси, ΔG _B		МК-32.2-A21(R)	±10 г	1,5
Время расхода навески ПМ-смеси, τ _B		Электронный секундомер	±0,1 с	0,05
Расход воздуха, G _{воз}		Микроанометр МН-240 + измерительный насадок	±5 кг/ч	1,0
Температура отработавших газов, t _{ог}		ТХК – 0806 + Ш4501	±10 °С	1,0
Содержание токсичных компонентов	NO _x	Газоанализатор «Bosh»	±50 ppm	5
	CO ₂		± 0,25 %	5
	СН		±50 ppm	5

Ошибки параметров, определяемых расчетным путем, определены по выражениям 5.23-5.25:

погрешность в определении эффективной мощности ε_{Ne} :

$$\varepsilon_{Ne} = \sqrt{\varepsilon_{Mk}^2 + \varepsilon_n^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,2^2} = 0,6\%$$

погрешность в определении часовых расходов МРЭ и топлива ε_{GT} :

$$\varepsilon_{GT} = \sqrt{\varepsilon_{GT}^2 + \varepsilon_t^2} = \sqrt{1,5^2 + 0,05^2} = 1,51\%$$

погрешность в определении удельного эффективного расхода топлива ε_{ge} :

$$\varepsilon_{ge} = \sqrt{\varepsilon_{Ne}^2 + \varepsilon_{GT}^2} = \sqrt{0,6^2 + 1,51^2} = 1,64\%$$

Принятая методика экспериментальных исследований дает возможность получить достоверные результаты.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность использования смесевых топлив на основе ПМ на тракторном дизеле Д-144 и возможность улучшения экологической и экономической эффективности путем оптимизации состава смесового топлива на основе ПМ.

1. Разработана общая программа проведения экспериментальных сравнительных моторных и производственных исследований дизеля при работе на стандартном ДТ и смесевом дизельном топливе.

2. Разработана методика проведения стендовых моторных исследований дизеля при работе на стандартном ДТ и смесевом дизельном топливе. В качестве оценочных показателей были приняты часовой расход топлива; удельный эффективный расход топлива; крутящий момент; эффективная мощность, дымность ОГ.

3. Разработана методика проведения производственных испытаний дизеля при работе на стандартном ДТ и смесевом дизельном топливе. В качестве оценочных показателей были приняты удельный расход топлива, эффективная мощность, токсичность ОГ, затраты на топливо.

4. Основной объем расчетных, стендовых и производственных испытаний был выполнен на четырех видах топлив: стандартном нефтяном дизельном топливе, смесевых топливах ПМ10, ПМ20, ПМ30 с содержанием ПМ10, 20, 30% объемных соответственно.

5. Произведена оценка стабильности смазочного масла в условиях производственных испытаний при работе дизеля на смесевом дизельном топливе с добавлением ПМ.

Смесевые топлива получены из серийных смесей ПМ и ДТ. Исследования подтвердили, что смесевое топливо пригодно для использования в дизельных двигателях, обеспечивает практически близкие к ДТ показатели работы двигателя при одинаковых максимальных давлениях цикла (мощность, экономичность, температура отработавших газов) при некотором снижении дымности ОГ. Особенно это заметно для смеси ПМ10.

Сравнение результатов расчетных, стендовых и эксплуатационных исследований показывает, что переход на смесевое топливо не вызывает необходимости изменений базовой КС и основных параметров топливной аппаратуры. Таким образом, смесевое топливо ПМ30 можно считать оптимальным по составу. Оно обладает хорошими моторными качествами. Переход на его использование обеспечит значительное расширение топливных ресурсов для автотранспортных дизелей.

6 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПАЛЬМОВОГО МАСЛА В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА

Переход на альтернативные виды топлива является одним из резервов снижения материалоемкости транспортных услуг, к тому же важен не только экономический эффект, но и улучшение экологичности дизельных двигателей. Проведенные эксплуатационные и технико-экономические исследования позволяют оценить эффективность производства и применения дизельного топлива с добавлением ПМ.

Снижение расходов является одним из основных способов повышения прибыли. В структуре расходов статья «Топливо» – одна из самых важных, позволяющая сэкономить средства.

Экономический механизм охраны окружающей природной среды включает, с одной стороны, планирование и финансирование природоохранных мероприятий, и установление лимитов использования природных ресурсов, выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую природную среду. С другой стороны, предусматривает установление нормативов платы и размеров платежей за использование природных ресурсов, выбросы и сбросы загрязняющих веществ в окружающую природную среду, размещение отходов и другие виды вредного воздействия, а также предоставление налоговых, кредитных и иных льгот при внедрении малоотходных и ресурсосберегающих технологий [99, 110, 140].

Расчет экономического эффекта от использования ПМ в качестве добавки в дизельное топливо проводился для ДР Конго. В настоящее время в ДР Конго не сформирована до конца система платежей за экологический ущерб. поэтому при расчетах не учитывались расходы на экологические платежи.

Для определения целесообразности переоборудования дизельного транспорта любого назначения необходимо определить срок окупаемости вложений на конкретных моделях автотранспортной техники, входящей в состав парка данного предприятия, и рассчитать экономический эффект от

произведенных финансовых затрат. Годовая сумма экономии текущих (эксплуатационных) затрат \mathcal{E} складывается из экономии на топливе за вычетом дополнительной суммы эксплуатационных расходов, связанных с амортизацией, техническим обслуживанием и текущим ремонтом оборудования топливной системы, и прочих связанных с применением смесевых топлив [62, 73, 77, 85, 101, 124, 127, 146, 160].

Найдем по формуле стоимость расхода ДТ на эксплуатацию одного автомобиля в течение одного года:

$$T_{\text{ДТ}} = \frac{H_S \cdot S}{100} \cdot P, \quad (6.5)$$

где H_S – разовая норма расхода топлива на 100 км, л/100 км. Поскольку полученные при ПЭИ значения расхода топлива на 100 км не превышают нормативные, для расчета принимаем нормативные значения 10,1 л – для сухого сезона и 12,5 л для сезона дождей для всех видов топлива;

S – среднегодовой пробег ТС, км, примем $S=20000$ км;

P – цена за 1 литр топлива, долл. США.

Стоимость топлива с добавлением ПМ на эксплуатацию одного автомобиля в течение одного года, учитывая коэффициент увеличения расхода:

$$T_{\text{ПМ}} = \frac{H_S \cdot S \cdot Q}{100} \cdot P, \quad (6.6)$$

где H_S – разовая норма расхода топлива л/на 100 км;

S – среднегодовой пробег ТС, км;

Q – коэффициент увеличения расходов;

P – цена за 1 литр топлива с ПМ, долл. США.

Найдем разность затрат (экономия на стоимости топлива) в течение одного года:

$$T_{\mathcal{E}} = T_{\text{ДТ}} - T_{\text{ПМ}}, \quad (6.7)$$

где $T_{\text{ДТ}}$ – стоимость ДТ на эксплуатацию одного автомобиля в течение года;

$T_{\text{ПМ}}$ – стоимость топлива с добавлением ПМ на эксплуатацию одного автомобиля в течение года.

Эксплуатационные испытания показали, что при использовании дизельного

топлива с добавлением ПМ может возрасти частота замены фильтров грубой очистки системы топливоподачи. Определим дополнительные расходы на техническое обслуживание. Используем методику, предложенную [170].

Примем следующие данные для расчета:

количество автомобилей – 1;

среднегодовой пробег автомобиля $S=20000$ км;

пробег автомобиля до замены фильтра на чистом ДТ $s_{ДТ}$ и на смесевом топливе $s_{ПМ}$, соответственно 5000 км и 4000 км;

необходимое количество фильтров

$$n = \frac{S}{s_i} \quad (6.9)$$

где s_i – пробегавтомобиля до замены фильтра, км.

Суммарные эксплуатационные затраты на замену фильтров – независимо от оставшегося реального ресурса:

$$Z_{\text{сумм}} = (Z_{\text{пфто}} + Z_{\text{зфто}}) \cdot n, \quad (6.10)$$

где $Z_{\text{пфто}}$ – затраты на закупку фильтров, $Z_{\text{пфто}}=5$ долл. США;

$Z_{\text{зфто}}$ – затраты на замену фильтров, $Z_{\text{пфто}}=1,5$ долл. США.

Разница в эксплуатационных затратах на систему очистки топлива:

$$\Delta Z = Z_{\text{суммПМ}} - Z_{\text{суммДТ}} \quad (6.11)$$

Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_Г$ от эксплуатации одногоавтомобиля на смесевом топливе определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_Г = \mathcal{E} - E_H \cdot K, \quad (6.8)$$

где E_H – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений ($E_H=0,15$);

\mathcal{E} – годовая сумма экономии текущих эксплуатационных затрат, складывается из экономии на чистом ДТ за вычетом разницы затрат на ТО;

K – капитальные затраты на покупку ПМ для создания смесового топлива.

Результаты расчета показателей экономической эффективности приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Показатели экономической эффективности от использования дизельного топлива с добавлением ПМ

№	Наименование показателей	Базовая модель двигателя 4D56Т на чистом ДТ	Модель 4D56Т на смесевом топливе		
			ПМ10	ПМ20	ПМ30
1	Количество транспортных средств (ТС), ед.	1	1	1	1
2	Средний пробег ТС за год, км	20000	20000	20000	20000
3	Расход топлива, л/100 км	8,11	8,51	8,82	9,21
4	Годовой расход топлива, л	1622	1702	1764	1842
5	Добавка ПМ на ДТ, л	-	170,2	352,8	552,6
6	Цена 1 л ПМ, долл США.	-	0,3	0,3	0,3
7	Цена 1 л ДТ, долл. США.	1,5	1,5	1,5	1,5
8	Затраты на топливо за год, долл. США	2433	2348,76	2222,64	2099,88
	в том числе затраты на ПМ за год, долл. США.	-	51,06	105,84	165,78
9	Годовая экономия ДТ, л	-	90,2	210,8	332,6
10	Годовая экономия эксплуатационных затрат на ДТ за год, долл. США	-	84,24	210,36	333,12
11	Количество фильтров грубой очистки, шт.	4	5	5	5
12	Стоимость замены 1 фильтра, долл. США	6,5	6,5	6,5	6,5
13	Суммарные эксплуатационные затраты, долл. США	26	32,5	32,5	32,5
14	Разница в эксплуатационных затратах на ТО, долл. США	-	6,5	6,5	6,5
15	Годовая экономия эксплуатационных затрат с учетом затрат на ТО за год, долл. США	-	77,74	203,86	326,62
16	Годовой экономический эффект от эксплуатации автомобиля на смесевом топливе, долл. США	-	70,08	187,98	301,75

Таким образом, эксплуатация одного автомобиля Mitsubishi (модель двигателя 4D56Т) на дизельном топливе с ПМ по сравнению с чистым ДТ обеспечивает дополнительный годовой экономический эффект 71,08 долл. США при работе на смесевом топливе ПМ10, 187,98 долл. США при работе на ПМ20 и 301,75 долл. США при работе на ПМ30 с учетом увеличения затрат на

замену фильтров грубой очистки и ТО.

При этом экономия нефтяного топлива, приходящаяся на один автомобиль Mitsubishi (модель двигателя 4D56T), для смесевых топлив ПМ10, ПМ20, ПМ30 достигает 74,9 кг; 175 кг и 255,8 кг соответственно.

Выводы

Произведены оценочные расчеты экономической эффективности использования смесевых топлив и экономического эффекта при эксплуатации одной транспортной единицы в течение года. При расчете учтены затраты на нефтяное ДТ и ПМ в течение года при использовании топливных смесей с объемным содержанием ПМ 10, 20, 30% объемных и затраты на дополнительное ТО.

При ценах на ДТ и ПМ, которые были использованы при технико-экономическом анализе, применение ДТ с добавками пальмового масла до 30% экономически выгодно, так как при снижении затрат на топливо не требуются дополнительные расходы на изменение регулировок двигателя. Наибольший экономический эффект предполагается при использовании смеси ПМ30.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Определены физические свойства смесей ДТ с ПМ с содержанием пальмового масла до 60% по объему. Впервые определен коэффициент сжимаемости для исследованных смесей нефтяного ДТ с ПМ. Вследствие отличия физических свойств смесей ДТ с ПМ от свойств чистого ДТ нагрузка на элементы топливоподающей аппаратуры повышается.

2. В исследованном диапазоне температур с нижней температурой 20⁰С ПМ в смеси с ДТ остается в капельно-жидкой фазе. Это позволяет применять смеси ДТ с ПМ при температурах ниже 32⁰С – температуры застывания чистого ПМ. Срок хранения исследованных смесей без расслоения превышает 10 дней.

3. Установлено, что характеристики процесса подачи ДТ с добавлением ПМ до 30% по объему изменяются незначительно в сравнении с чистым ДТ.

4. При переводе дизельного двигателя с разделенной топливной аппаратурой на питание дизельным топливом с добавками ПМ до 30% по объему изменения регулировок топливной аппаратуры не требуется. В случае применения смесового топлива с добавками ПМ более 30% объема требуется изменение конструкции двигателя.

5. Определена зависимость эффективных показателей дизельного двигателя при эксплуатации на дизельном топливе с добавкой ПМ от содержания ПМ в смеси. Экспериментально полученный тренд соответствует зависимости, полученной в ходе математического моделирования.

6. На основе измерения токсичности в ходе производственно-эксплуатационных испытаний автомобиля на смеси ДТ с ПМ установлено, что дымность ОГ снизилась на 30-35%, а токсичность выбросов по показателям СО и СН_x снизилась на 25-35%. Эмиссия NO_x повысилась.

7. Оценочные экономические расчеты свидетельствуют об экономической целесообразности применения ПМ в качестве добавок к ДТ для мобильных транспортно-технологических средств сельскохозяйственного производства.

Предложения производству

Для облегчения последующего перехода дизеля в рабочий режим, предупреждения потери его мощности, уменьшения износа деталей топливной аппаратуры и нагрузки на ее элементы при использовании смесевого топлива с добавлением ПМ рекомендуется сначала запустить двигатель на холостом ходу на чистом ДТ в течение 10-15 минут для прогрева. Сразу по окончании работы, чтобы очистить элементы двигателя от остатков смесевого топлива, необходимо также запустить двигатель на холостом ходу на чистом ДТ в течение 10-15 минут. Это позволит облегчить последующий запуск двигателя и увеличить срок службы элементов топливной аппаратуры.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

В последующих научных исследованиях смесевого топлива с добавлением ПМ представляется необходимым продолжить работу над получением композиций, стабильных при длительном хранении в условиях эксплуатации. При этом особое внимание следует уделить повышению пусковых качеств при минимальной пусковой частоте, обеспечению эффективной работы без глубокой модернизации серийно выпускаемых и находящихся в эксплуатации двигателей (таких как Д-144 и др.). Представляется, что критериями оценки следует выбрать величину эффективного КПД двигателя 0,30-0,34 при улучшении экологических показателей, уменьшении дымности ОГ не менее, чем на 40%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГН 2.1.6.3492-17 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. Об утверждении ГН 2.1.6.3492-17 (с изменениями на 31 мая 2018 года). – Текст: электронный // Постановление Главного государственного санитарного врача РФ ГН; введ. – 20.02.2018. – URL: <http://www.pravo.gov.ru>.
2. О концепции развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года: Приказ Минсельхоза России от 25.06.2007 г. №3421 Текст: электронный // URL: <http://www.alppp.ru/law/hozjajstvennaja-dejatelnost/selskoe-hozjajstvo/17/prikaz-minselhoza-rf-ot-25-06-2007--342.html>.
3. Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке: Приказ Мин-ва промышленности и торговли РФ от 2 июля 2015 г. N 1815 Текст: электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации «Консорциум». – URL: [http://www/docs.cntd.ru/document/420287558](http://www.docs.cntd.ru/document/420287558)
4. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности: Федеральный закон от 23.11.2009 г. №261-ФЗ Текст: электронный // Москва, 2009. – Режим доступа: справ.-правовая система «Консультант Плюс».
5. О внесении изменений в статью 14 Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 04.11.2014 г. №339-ФЗ Текст: электронный // – Москва, 2014. – Режим доступа: справ.-правовая система «Консультант Плюс».
6. ГОСТ 3900-85. Методы определения плотности нефти и нефтепродуктов: дата введения 01-01-1987. // Москва: Стандартинформ, 2006. – – 35 с. – Текст: непосредственный.

7. ГОСТ 174791-2015. Масла моторные. Классификация и обозначение: дата введения 01-01-2017. // Москва: Стандартинформ, 2016. – 12 с. – Текст: непосредственный.

8. ГОСТ 1929-87. Нефтепродукты. Методы определения динамической вязкости на ротационном вискозиметре: дата введения 01-07-1988 // Нефтепродукты. Масла. Методы испытаний: Сб. ГОСТов / Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002.– 6 с. – Текст: непосредственный.

9. ГОСТ 14146-88. Фильтры очистки топлива дизелей: дата введения 01-01-1990 // Москва: ИПК Издательство стандартов, 1990.– 18 с. – Текст: непосредственный.

10. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний (с Изменением N 1): дата введения 01-01-1990 // Москва: ИПК Издательство стандартов, 1988. – 18 с. – Текст: непосредственный.

11. ГОСТ 10578-95. Насосы топливные дизелей. Общие технические условия: дата введения 01-07-1997 // Москва: ИПК Издательство стандартов, 2000.– 22 с. – Текст: непосредственный.

12. ГОСТ 17.202-98. Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин: дата введения 01-07-1999 // Охрана природы. Атмосфера: Сб. ГОСТов / Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004.– 15 с. – Текст: непосредственный.

13. ГОСТ 24028-2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения (с Изменением N 1): дата введения 01-01-2000 // Москва: ИПК Издательство стандартов, 1999. — 26 с. – Текст: непосредственный.

14. ГОСТ 33997-2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки: дата введения 01-02-2018 // Москва: Стандартинформ, 2018. – 74 с. – Текст: непосредственный.

15. ГОСТ Р 52517-2005 (ИСО 3046-1:2002). Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные

условия, объявление мощности, расхода топлива и смазочного масла. Методы испытаний (с Поправкой): дата введения 01-01-2007 // Москва: Стандартиформ, 2006.– 36 с. – Текст: непосредственный.

16. ГОСТ Р 52709-2007. Топлива дизельные. Определение цетанового числа: дата введения 01-07-2007 // Москва: Стандартиформ, 2007. – 36 с. – Текст: непосредственный.

17. ГОСТ Р ИСО 10307-1-2009. Нефтепродукты. Определение содержания общего осадка в остаточных жидких топливах. Часть 1. Метод горячей фильтрации: дата введения 01-07-2010 // Москва: Стандартиформ, 2010. – 11 с. – Текст: непосредственный.

18. ГОСТ Р 53605-2009 (EN 14214-2003). Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Метилловые эфиры жирных кислот (FAME) для дизельных двигателей. Общие технические требования: дата введения 01.01.2011 // Москва: Стандартиформ, 2010. – 16 с. – Текст: непосредственный.

19. ГОСТ 31967-2012. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения (с Изменением N 1): дата введения 01-07-2014 // Москва: Стандартиформ, 2014. – 31 с. – Текст непосредственный.

20. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия: дата введения 01-01-2015 // Москва: Стандартиформ, 2014. – 16 с. – Текст непосредственный.

21. ГОСТ 24028–2013. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения: дата введения 01-07-2014 // Москва: Стандартиформ, 2016. – 20 с. – Текст непосредственный.

22. ГОСТ 32508-2013. Топлива дизельные. Определение цетанового числа: дата введения 01-01-2015 // Москва: Стандартиформ, 2016. – 26 с. – Текст: непосредственный.

23. ГОСТ ISO 8178-2-2013 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 2. Измерение

выбросов газов и частиц в условиях эксплуатации: дата введения 01-01-2015 // Москва: Стандартиформ, 2019. – 45 с. – Текст: непосредственный.

24. ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости: дата введения 01-07-2018 // Москва: Стандартиформ, 2017. – 40 с. – Текст: непосредственный.

25. Методические рекомендации по учету увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности – Текст: электронный. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/456020155>

26. ПНСТ 355-2019. Масло пальмовое и его фракции. Общие технические условия: дата введения 01.04.2019 // Москва: Стандартиформ, 2019.– 24 с. – Текст: непосредственный.

27. Патент на изобретение № 2647355 РФ, 2018.03.15 F02M 37/08, F02M 37/14, F02M 27/08 /Бензонасос с гомогенизацией топлива. – Текст : электронный / Р.В. Пуков, А.А. Симдянкин, И.А. Юхин, Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев // Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО РГАТУ (РФ). – 2016123834: дата заявления 15.06.2016. – URL: <http://www.findpatent.ru/patent/264/2647355.html>

28. Патент на изобретение №2306448 РФ, F02M27/04. Способ обработки топлива и устройство для его осуществления / Скотин В.А., Степанов Ю.Б. (РФ). №2005110094/06: дата заявления 07.04.2005; дата публикации 20.09.2007. – Бюллетень № 26.

29. Патент на изобретение №2330984 РФ, F02M27/04. Устройство для обработки жидкого углеводородного топлива (варианты) / Туев С.В., Мамченко В.М., Багрянцев А.В. (РФ). №2007125612/06: дата заявления 03.07.2007; дата публикации 10.08.2008. – Бюллетень №22.

30. Патент на изобретение №2490510 РФ, F02M53/00, F02M31/00. Система подачи топлива для двигателя внутреннего сгорания / Хомма М. (JP); Като К. (JP); Цукимото (JP); Табу Ф. (JP) // Патентообладатель МИЦУБИСИ

ДЗИДОСЯ КОГИО КАБАСИКИ КАЙСЯ (JP). №2011149784/06: дата заявления 07.12.2011; дата публикации 20.08.2013. – Бюллетень № 23.

31. Патент на изобретение №2493416 РФ, F02M27/04. Устройство для магнитной обработки жидкого топлива в двигателях внутреннего сгорания / Александров А.Б.; Александров Б.Л.; Кузин Н.Н.; Степанова А.Н.; Дайбова Л.А. (РФ). №2012110442/06: дата заявления 19.03.2012; дата публикации 20.09.2013. – Бюллетень № 26.

32. Аганбегян, А.Г. Экономика России на распутье. Выбор посткризисного пространства / А.Г. Аганбегян. – Москва: АСТ. – 2010. – 379 с. – Текст непосредственный.

33. Альтернативные виды топлива. Настоящее и будущее. – Текст: электронный. – URL: <http://www.studentbank.ru/view.php?ID=41978>.

34. Анализ возможностей использования пальмового масла как возобновляемого энергоресурса в качестве топлива для дизелей / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущий, А.В. Курапин, Е.А. Шкумат, Н.К. Иконников, Е.Д. Тершуков // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2016. – № 5 (17). – С. 51-56.

35. Анализ методов диагностирования топливной аппаратуры автотракторных дизелей и разработка математической модели топливного насоса высокого давления / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Юхин, И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев, А.В. Шемякин, М.Ю. Костенко, Г.К. Рембалович, А.М. Кравченко, С.Д. Полищук, Б.П. Загородских, А.В. Смольянов, И.К. Данилов // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 123. – с. 169-192. – Текст непосредственный.

36. Анализ процесса подачи топлива в транспортном дизеле при использовании смесового биодизельного топлива на основе пальмового масла / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Прогресс транспортных средств и систем – 2018: материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И.А. Каляев, Ф.Л.

Черноусько, В.М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». – Волгоград, 2018. – С. 114-115.

37. Астахов, И.В. Топливные системы и экономичность дизелей / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.Н. Трусов. – М.: Машиностроение. – 1990. – 288 с. – Текст непосредственный.

38. Бижаев, А.В. Применение пальмового масла в качестве присадки к топливу в тракторных дизельных двигателях / А.В. Бижаев, А.А. Симсон. – Текст непосредственный // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 6. – с. 41-48.

39. Биоэнергетика: Мировой опыт и прогнозы развития /Л.С. Орсик, Н.Т. Сорокин, В. Ф. Федеренко [и др.]; под. ред. В. Ф. Федеренко. – Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 404 с. – Текст непосредственный.

40. Буров, А.Л., Тепловые двигатели: учебное пособие. – 2-е изд., измен. и доп. – Москва: МГИУ, 2008. – 308 с. – Текст непосредственный.

41. Бушуев, В.В. Основные положения Энергетической стратегии России-2035. – Текст электронный / В.В. Бушуев// Сайт Института Энергетической стратегии. – URL: <http://www/energystrategy.ru/projects/energestrategy.htm>.

42. Бышов, Н.В. Анализ методов диагностирования топливной аппаратуры автотракторных дизелей и разработка математической модели топливного насоса высокого давления. – Текст: электронный / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Юхин, И.А. Успенский, [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 123(09). – с. 169-192. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/09/>

43. Бышов, Н.В. Диагностирование мобильной сельскохозяйственной техники с использованием прибора фирмы «Samte». – Текст электронный /Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 78 (4). – с. 239-249. – URL: <http://www/ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/>

44. Бышов, Н.В. Периодичность контроля технического состояния мобильной сельскохозяйственной техники. – Текст электронный / Н.В. Бышов,

С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2012 г., – № 81 (7). – с. 390-400. – URL: <http://www/ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/>

45. Бышов, Н.В. Повышение готовности к использованию по назначению мобильной сельскохозяйственной техники совершенствованием системы диагностирования / Н.В.Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев [и др.] – Рязань: ФГОУ ВПО РГАТУ, 2013. – 157 с. – Текст непосредственный.

46. Ведрученко, В.Р. Влияние свойств разноразных топлив для дизелей на характеристики топливоподачи / В.Р. Ведрученко, В.В. Крайнов, П.В. Литвинов. – Текст непосредственный // Вестник СибАДИ. – Омск. – 2016. – выпуск 2(48) – с. 44 – 49.

47. Вельских, В.И. Диагностирование и обслуживание сельскохозяйственной техники / В.И. Вельских. – Москва: Колос. – 1980. – 575 с. – Текст непосредственный.

48. Вырубов, Д.Н. Смесеобразование в двигателях Дизеля // Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания и их агрегатов / Москва: Машгиз. – 1946. – с. 5-54.

49. Гайворонский, А.И. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях: учебное пособие / А.И. Гайворонский, В.А. Марков, Ю.В. Илатовский. – Москва: ИРЦ Газпром. – 2007. – 478 с.– Текст непосредственный.

50. Гершань, Д.Т. Влияние состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля / Д.Т. Гершань. – Текст непосредственный // Наука и техника. – 2017. – том 16, №3. – с. 225-231.

51. Глаголев, Н.М. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Н.М. Глаголев. – Харьков: изд. Харьковского университета им. А.М. Горького. – 1958. – 286 с. – Текст непосредственный.

52. Гладкий, П.П. Эксплуатационные свойства автотранспортных средств: Методические указания / П.П. Гладкий. – Ставрополь: ФГАОУ Северо-Кавказский Федеральный университет. -.2016. – 125 с.

53. Готовцева, Т.А. Комбинированная очистка топлива в топливных системах машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Текст: электронный / Т.А. Готовцева. – Москва, 2013. – 21 с. – Место защиты: Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В.П. Горячкина. –URL: <https://dlib.rsl.ru/01005535382>

54. Грехов, Л.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей: учебное пособие / Л.В. Грехов, И.И. Габитов, А.В. Неговора. – Москва: Легион-автодата, 2013. – 292 с. – Текст непосредственный.

55. Григорьев, М.А. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания / М.А. Григорьев, Г.В. Борисова. – Москва: Машиностроение, 1991. – 230 с. – Текст непосредственный.

56. Данилов, А.В. Топлива. Состав, применение, эксплуатационные свойства / В.Ф. Данилов. – Елабуга: Филиал ФГБОУ ВПО. – 2013. – 144 с. – Текст непосредственный.

57. Данилов, А.В. Использование спиртов в дизелях // ФГБОУ ВПО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия, инженерный факультет». – Киров. – 2015.

58. Данилов, А.В. Пути и методы снижения выбросов вредных веществ в автомобильном транспорте. – Текст: электронный // Юные техники и изобретатели: Всероссийская конференция/ ФГБОУ ВПО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия инженерный факультет». — Киров. – 2015. – URL: <https://www.docplayer.ru/34667280>

59. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов, том 1: учебное пособие / Под./ред. проф. д-ра техн. наук В.Н. Луканина, проф., д-ра техн. наук М.Г. Шатрова. – Москва: Высшая школа, 2007. – 479 с.– Текст непосредственный.

60. Девянин, С.Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей / С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов. – Москва: ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. – 340с. – Текст непосредственный.

61. Диагностирование мобильной сельскохозяйственной техники с использованием прибора фирмы «SAMTEC» – Текст: электронный / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар: КубГАУ. – 2012. – № 04 (078). – с.487-497. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17714629>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

62. Дрябина, С. С. Методы определения поверхностного натяжения и адсорбции на границе «жидкость-газ»: методические указания к лабораторному практикуму по коллоидной химии / С. С. Дрябина, Ю. В. Шулевич. – ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 40 с. – Текст непосредственный.

63. Жегалин, О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей / О.И. Жегалин, П.Д. Лупачев. – Москва: Транспорт. – 1985. – 120 с.

64. Зангиев, А. А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / А.А. Зангиев, А.В. Шпилько, А.Е. Левшин. – Москва: Колос, 2005. – 320 с.

65. Захаров, В.А. Экологические проблемы автомобильного транспорта: учебное пособие /В.А. Захаров, С.Н. Шумскин. – 2-е изд. испр. и доп. – Волгоград: ВолгТУ, 2011. – 120 с. – Текст непосредственный. – ISBN 5-230-05031-4.

66. Зыков, С.А. Комплексная очистка топлива в системе питания автотракторных дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 20.05.2003. Текст: электронный / С.А. Зыков. Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В. П. Горячкина. – Москва, 2003. – 21 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002651674>

67. Зыков, С.А. Совершенствование топливных систем сельскохозяйственных машин. Текст: электронный / С.А. Зыков, Э.И.Удлер, А.В. Исаенко // Вестник ФГОУ ВПО МГАИУ им. В.П. Горячкина. – 2008. - №3. – с.116-120. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/>

68. Иванов, А.А. Оценка эксплуатационных показателей машино-тракторного агрегата при работе на метанола-рапсовой эмульсии: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Текст: электронный / А.А. Иванов. – Рязань, 2017. – 147

с. – Место защиты: Рязан. гос. агротехнолог. ун-т им. П.А. Костычева. – URL: <https://www/search.rsl.ru/ru/record/01008711357>.

69. Иншаков, А.П. Методы подогрева биотопливных композиций на основе рапсового масла в тракторных дизелях с жидкостным и воздушным охлаждением / А.П. Иншаков, С.Ю. Городсков, С.Е. Федоров // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Международная конференция // Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, – 2014. – с. 59-63.

70. Исаенко, А.В. Повышение надежности топливных систем дорожных и строительных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук:05.05.2004. – Текст: электронный / А.В. Исаенко // Томский гос. архитектур.-строит. ун-т. – Томск, 2006. – 19 с. – URL: <https://www/search.rsl.ru/ru/record/01003290858>.

71. Использование альтернативных моторных топлив в дизельных двигателях /В.А. Марков, В.В. Володин, Б.П. Загородских, В.В. Фурман // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2015. – №6. – с. 28-35. – Текст непосредственный.

72. Использование арахисового масла в качестве присадки к дизельному топливу. – Текст электронный / А.В. Бижаев, С.Н. Девянин, С. Соо, В.М.Фомин, А.С.Х. Ибрагим, А.А. Ходяков // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. – Т. 12. – № 6. – с. 45-50. – URL: <https://www.vimsmmit.com/jour/article/view/302>

73. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б.С. Стефановский, Ю.М. Доколин, В.М. Сорокин [и др.] / Москва: Машиностроение. – 1972. – 367 с.– Текст непосредственный.

74. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода. – Текст: электронный / П.П. Ощепков, И.А. Заев, С.В. Смирнов, А.В. Бижаев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. – № 3. – с. 48-53. – URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38587781>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

75. Исследование дизельного топлива с добавками пальмового масла. – Текст: электронный / П.П. Ощепков, А.В. Бижаев, И.А. Заев, С.В. Смирнов, Адегбенро Симеон Адедожа // Транспорт на альтернативном топливе. – 2018. – Т. 13. - № 5(65). – с.56-62. – URL:<https://www.vimsmit.com/jour/article/view/335>.

76. Исследование сжимаемости смесового топлива на основе пальмового масла для дизельных двигателей / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славуцкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического ун-та. – 2018. – № 3 (61). – с. 238-245.

77. Карабаницкий, А.П. Теоретические основы производственной эксплуатации МТП / А.П. Карабаницкий, Е.А. Кочкин. – Москва: Колос, 2009. – 95 с.– Текст непосредственный.

78. Картошкин, А.П. Топливо для автотракторной техники. Справочник: учебное пособие для студ. учрежд. ср. проф. образования / А.П. Картошкин. – 2-е изд., стер. – Москва: Академия, 2013. – 192 с.– Текст непосредственный.

79. К выбору показателей эффективности при исследовании и совершенствовании системы технической эксплуатации автомобильного транспорта в сельском хозяйстве/Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев и др. // Политемат. сетев. электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2015. -№04(108). С. 1058-1071. – IDA: 1081504078. – URL: <http://www/ej.kubagro.ru/2015/04/pdf/78.pdf>

80. Кича, Г.П. Тонкая очистка моторного масла дизелях комбинированным фильтрованием Текст: электронный / Г.П. Кича, А.А. Калиберда // Труды Дальневосточного ГТУ. – 2004. – № 137. – с. 69-77. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9286404>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

81. Кожин, С.А. Обоснование параметров устройства воздухоподготовки автотракторных дизельных двигателей: диссер. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.А. Кожин. – Рязань, 2018. – 168 с. – Место защиты: Рязан. гос. агротехнолог. ун-тим. П.А. Костычева.

82. Козлов, Ю.С. Экологическая безопасность автомобильного транспорта / Ю.С. Козлов [идр.] – Москва: Агар рандву-Ам. – 2000.-174 с.– Текстнепосредственный.

83. Кокорев, Г.Д Системы мониторинга и диагностики автомобильного транспорта в сельском хозяйстве по вибрации. / Г.Д. Кокорев, И.Н. Николотов, Н.В. Бышов, И.А. Успенский // Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. «Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем». – Саранск, 2009. – с. 176-182. – Текст непосредственный.

84. Коновалов, В.В. Обеспечение чистоты дизельного топлива при заправке сельскохозяйственной и транспортной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 20.05.2003 / В.В. Коновалов. – Москва, 2013. – 20 с. – Место защиты: Московский. гос. агроинженер. ун-т им. В.П. Горячкина.

85. Конструкторско-экспериментальный анализ системы топливоподачи COMMONRAIL двигателя DCi-11 фирмы Renault. Текст: электронный. / М.В. Мазинг [и др.] // Труды НАМИ. – 2010. – с.6-18. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16118111>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

86. Копаев, Е.В. Улучшение эффективных и экологических показателей автотракторных дизелей с наддувом путем подачи водометанольных смесей на выпуске: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Копаев. – Тверь, 2010. – 19 с. – Место защиты: С.-Петерб. гос. аграр. ун-т.

87. Костин, А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: учебное пособие / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев. – Ленинград: Изд. Машиностроение, 1989. – 284 с.– Текст непосредственный.

88. Коэффициент охлаждения топлива (через кондиционер) под OEM рейки для NISSANGT-RR35. Текст: электронный / URL: <https://www.atomic-shop.ru/part/87091-AMSALP.07.07.0102-2>

89. Круглик, В.А. Технология обслуживания и эксплуатации автотранспорта: учебное пособие / В.А. Круглик, Н.Г. Сычев. – Минск: Новое знание; Москва: Инфра-М, 2013. – 260с.– Текст непосредственный.

90. Крупенио, Н.Н. Расчет выбросов загрязняющих веществ автотранспортом, работающем на бензине и дизельном топливе, а также платы за эти выбросы: метод. указания для студентов. Текст: электронный / Н.Н. Крупенио – Москва: МИИТ, 2006. – 38 с. – URL: <https://http://library.miit.ru/methodics/04022015/03-%2014179.pdf>.

91. Кулешов, А.С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. 1. Расчет распределения топлива в струе / А.С. Кулешов. Текст: электронный // Вестник МГТУ. Машиностроение.- 2007. – Специальный выпуск Двигатели внутреннего сгорания. – С. 18 – 31. – URL: https://www/journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2006_04/pdf/078%20kule.pdf.

92. Кулешов, А.С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. 2. Расчет скорости тепловыделения при многократном впрыске / А.С. Кулешов. Текст: электронный // Вестник МГТУ. Машиностроение.- 2007. – Специальный выпуск Двигатели внутреннего сгорания. – С. 32 – 45. – URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2006_04/pdf/078%20kule.pdf.

93. Кулешов, А.С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач / А.С. Кулешов. Текст: электронный // Москва, МГТУ им. Баумана. – 2004. – 123 с. – URL: <https://www/diesel-rk.bmstu.ru/Rus/index.php>.

94. Кулешов, А.С. Грехов Л.В. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А.С. Кулешов, Л.В. Грехов. Текст: электронный // Москва, МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2000. – 64 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002157233>.

95. Лаборатория топливных систем МГТУ им. Баумана. Текст: электронный // О программном комплексе «Впрыск». – МГТУ им. Баумана.– URL: <http://www/energy.bmstu.ru/e02/inject/i03rus.htm/>

96. Лебедев, А.Т. Повышение долговечности распылителей форсунок автотракторных дизелей. Текст: электронный / А.Т. Лебедев, А.Л. Болотоков, П.А. Лебедев // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 2(30) – с. 34-37. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35287255>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

97. Лебедев, А.Т. Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов. Текст: электронный / А.Т. Лебедев, А.Г. Арженовский / Технический сервис машин. – № 1(134). – 2019. – с. 48-52. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37257577>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

98. Лебедев, А.Т. Повышение эффективности функционирования машины оборудования АПК управлением надежностью их систем. Текст: электронный / А.Т. Лебедев, А.А. Серегин, А.Г. Арженовский / Вестник аграрной науки Дона. – № 2(46). – 2019. – с. 4-11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-funktsionirovaniya-mashin-i-oborudovaniya-apk-upravleniem-nadezhnostyu-ih-sistem/viewer>

99. Лебедев, А.Т. Улучшение показателей эффективности использования энергетических средств с дизельными двигателями модернизацией распылителей форсунок. Текст: электронный / А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев, Х.Л. Губжоков, А.Л. Болотоков / Наука в центральной России – № 5(35). – 2018. – с. 71-77. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36296207>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

100. Лухачев, В.С. Испытания тракторов / В.С. Лухачев. – Москва: Машиностроение, 1955. – 315 с.– Текст непосредственный.

101. Лухачев, В.С. Испытания тракторов / В.С. Лухачев. – Москва: Машиностроение, 1974. – 283 с.– Текст непосредственный.

102. Лышевский, А.С. Системы питания дизелей / А.С. Лышевский. – Москва: Машиностроение, 1981. – 216 с.– Текст непосредственный.

103. Маркин, С.Ю. Эффективность применения биотоплив в АПК. Текст: электронный / С.Ю. Маркин, Г.А. Бахматова / Никоновские чтения. – №14. – 2009. – с.116-118. – URL: <https://www.cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-biotopliva-v-apk>.

104. Марков В.А., Влияние состава смесового биотоплива на параметры процесса впрыскивания топлива в дизеле. Текст: электронный / В.А. Марков, В.С. Акимов, В.А. Шумовский // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №12. – с. 3- 9. – URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34083400>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

105. Марков, В.А. Впрыскивание топлива в дизелях: учебное пособие. / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.И. Мальчук. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 360 с.– Текст непосредственный.

106. Марков, В. А. Использование биодобавок растительного происхождения к топливу для снижения дымности отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Н. А. Иващенко, С. Н. Девянин // Известия ВолгГТУ // Процессы преобразования энергии и энергетические установки. – 2012. – том 4, выпуск 12. – с. 5–9. – Текст непосредственный.

107. Марков, В.А. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, А.В. Шахов, В.В. Багров. – Москва: ООО НИЦИ «Агроинженер», 2011. – 536 с. – Текст непосредственный.

108. Марков, В.А. Работа дизелей на многокомпонентных водотопливных эмульсиях. Текст: электронный / В.А. Марков., С.Н. Девянин., В.А. Шумовский // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 2(38). – с. 23 – 32. – URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33947294>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

109. Марков, В.А. Подсолнечное масло в качестве топлива для дизелей. Текст: электронный / В. А. Марков, С.Н. Девянин, С.Ю. Шустер // Грузовик. –

2009. – №4. – С.46-56. – URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33700651>. –

Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

110. Марков, В.А. Токсичность отработавших газов дизелей и возможности ее снижения. / В.А. Марков // Грузовик. – 2009 – № 8. – с. 28-41. –

URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33700654>. – Режим доступа:

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

111. Маслов, Г.Г. Техническая эксплуатация МТП: учебное пособие для студентов агроинженерных вузов / Г.Г. Маслов, А.П. Карабаницкий, Е.А. Кочкин. – КубГАУ. – Краснодар, 2008. – 142 с.– Текст непосредственный.

112. Медведева, А. Пальмовое масло: Растущие перспективы. Текст электронный / URL: <https://www.agroxxi.ru/analiz-rynka-selskohozjaistvennyh-tovarov/palmovoe-maslo-rastuschie-perspektivy.html>.

113. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок Научно-исследовательского института охраны атмосферного воздуха (НИИ АТМОСФЕРА). Текст: электронный / СПб, НИИ «АТМОСФЕРА», «ИНТЕГРАЛ». – 2001. – 14 с. – URL: <https://www/files.stroyinf.ru/Data2/1/4293852/4293852662.pdf>.

114. Неорганические присадки к нефтяному дизельному топливу. Текст: электронный / А.А. Севастенко, П.П. Ощепков, Э.А. Севастенко, В.А. Марков // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 2. – с. 19-22. – URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29929755>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

115. Мировое производство пальмового масла в 2019 году достигнет нового максимума. Текст: электронный // Зерно Он-Лайн. – URL: <https://www.zol.ru/n/2f271>.

116. Митусова, Т.Н. Дизельные топлива ЕВРО. Отечественные и зарубежные присадки. Текст: электронный / Т.Н. Митусова, М.В. Калинина // Научно-техническая конференция «Инновационные технологии производства и испытания продукции нефтепереработки». –ОАО ВНИИНП, 21-24 сентября 2011 г. – URL: <http://www/mitllc.nichost.ru/docs/3pdf>

117. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Г.А. Терентьев [и др.]; под. общ. ред. Г. А. Терентьева, В. М. Тюкова, Ф. В. Смаль. – Москва: Химия, 1989. – 272 с. – Текст непосредственный.

118. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / под. ред. В.В. Денисова. – Ростов-н/Д: Феникс, 2015. – 224с.– Текст непосредственный.

119. Николаенко, А. В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей / А. В. Николаенко. – Москва: Колос. – 1992. – 414 с. – Текст непосредственный.

120. Новиков, Е. Аналитика биодизельных топлив. Текст: электронный / URL: http://www.soctrade.com/pdf/4585_pdf.pdf

121. Орлов, Н.И., Смайлис, В.И. Временные рекомендации по расчету выбросов от стационарных дизельных установок. Текст: электронный // Ленинград, 1988. – URL: <https://www.zol.ru/n/2f271> <http://www.alppp.ru/law/okruzhayuschaja-sreda-i-prirodnye-resursy/obschie-voprosy/40/metodika-rascheta-vybrosov-zagrjaznjajuschih-veschestv-v-atmosferu-ot-stacionarnyh-dizelny.pdf>.

122. Оценка влияния состава и свойств смесей дизельного топлива и пальмового масла на показатели процесса впрыскивания топлива в дизеле / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славуцкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2017. – № 2 (46). – с. 284-288.

123. Оценка времени нахождения топлива в зоне ультразвуковой обработки / Пуков Р.В., Колупаев С.В., Колотов А.С., Кожин С.А. – Текст непосредственный // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 2 (50). – с. 362-366.

124. Оценка топливопотребления двигателей при ультразвуковой обработке топлива. / А.А. Симдянкин, Р.В. Пуков [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2017. – №11 (245). – с. 12-17.

125. Оценков, П.П. Альтернативное топливо для автотранспорта Нигерии на основе пальмового масла / П.П. Оценков, А.А. Симеон // Вестник РУДН: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, №4. – с. 437-444.– Текст непосредственный.

126. Патрахальцев, Н.Н.Повышение экономических и экологических качеств двигателей внутреннего сгорания на основе применения альтернативных топлив: учебное пособие. – Москва: РУДН. – 2008. – 248 с. – Текст непосредственный.

127. Пахомов, Ю.А. Основы научных исследований испытаний тепловых двигателей: учебное пособие. / Ю.А. Пахомов. – Москва: Транслит. – 2014. – 432 с. – Текст непосредственный.

128. Перспективы использования пальмового масла в качестве топлива для транспортных дизелей / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славуцкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического ун-та. – 2017. – № 4 (58). – с. 143-148.

129. Перспективы повышения эксплуатационных показателей транспортных средств при внутрихозяйственных перевозках плодоовощной продукции. Текст: электронный / Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А., Рембалович Г.К., Кокорев Г.Д., Юхин И.А., Жуков К.А., Булатов Е.П. // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 78. – с. 227-238. – URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33734506>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

130. Перспективы технической эксплуатации мобильных средств сельскохозяйственного производства / Бышов Н.В., Борычев С.Н., Аникин Н.В., Борисов Г.А., Голиков А.А., Кирюшин И.Н., Кокорев Г.Д., Колупаев С.В., Костенко М.Ю., Кравченко А.М., Латышенок М.Б., Полищук С.Д., Рембалович Г.К., Симдянкин А.А., Тимохин С.В., Успенский И.А., Шемякин А.В., Юхин И.А. – Рязань: РГАТУ, – 2015. – 192 с.

131. Подача и распыливание топлив в дизелях / Н.В. Астахов, В.Н. Трусов, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков. – М.: Машиностроение. – 1972. – 359 с. – Текст непосредственный.

132. Повышение надежности техники в сельском хозяйстве на основе применения систем непрерывного диагностирования / Р. В. Безносюк, В. В. Фокин, Н. В. Бышов [и др.] Текст: электронный // Международный научный журнал. – 2017. – № 2. – с. 112-116. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28925713>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

133. Повышение ресурса плунжерных пар дизельных двигателей / Лебедев А.Т., Захарин А.В., Лебедев П.А. [и др.] Текст: электронный // Технический сервис машин. – т.131. – 2018. – с. 160-167.– URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35606543>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

134. Повышение эффективности технической эксплуатации автомобилей / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев [и др.] Текст: электронный // Сельский механизатор. – 2015. – № 7. – С. 38-39. – URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34108736>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

135. Половинкин, В.Н. Альтернативные виды топлив: Gazweek «Еженедельное обозрение». Текст: электронный / В.Н. Половинкин.– URL: <http://www.gazweek.ru>.

136. Применение смесового топлива для автомобильных дизелей с использованием пальмового масла / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущкий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Совершенствование автотранспортных систем и сервисных технологий : сб. науч. тр. по материалам XIV междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 95-летию юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Фёдора Николаевича (1923-1996) / редкол.: В. Н. Басков (отв. ред.) [и др.]; Саратовский гос. технический ун-т им. Ю.А. Гагарина. – Саратов, 2018. – с. 283-294.

137. Проектирование технологических процессов ТО, ремонта и диагностирования автомобилей на автотранспортных предприятиях и станциях технического обслуживания: учебное пособие / Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А., Рембалович Г.К., Юхин И.А., Лунин Е.В., Голиков А.А., Безносюк Р.В., Жуков К.А., Колупаев С.В., Ванцов В.И. – Рязань: изд. РГАТУ, 2012. – 162 с.– Текст непосредственный.

138. Прокопенко, Н.И. Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания /Н.И. Прокопенко. – СПб, М., Краснодар: Лань. – 2010. – 592 с. – Текст непосредственный.

139. Пуков, Р.В. Возможные процессы передачи энергии топливу от излучателя при ультразвуковой обработке / Пуков Р.В., Симдянкин А.А. Текст: электронный // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства: материалы Междунар. науч.-прак. конф. (Международные Бочкаревские чтения), посвященной памяти члена-корреспондента РАСХН и НАН КР, академика МАЭП и РАВН Бочкарева Я.В. – Рязань: РГАУ. – 2019. – с. 167-170.

140. Пуков, Р.В. Испытания дизеля YANMAR 4TNV88-BGGE, укомплектованного устройством для энергонасыщения топлива / Р.В. Пуков. – Текст: электронный // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузов. сб. науч. тр. / редкол.: П.В. Сенин [и др.] / отв. за вып. А.В. Безруков. – Саранск: Мордовский ун-т. – 2017. – с. 64-68. – URL: <http://www/journal.mrsu.ru/tech/ehnergoehffektivnye-tekhnologii-i-sistemy>

141. Пуков, Р.В. Оценка времени нахождения топлива в зоне ультразвуковой обработки / Р.В. Пуков, С.А. Кожин. – Текст: электронный // Совершенствование системы подготовки и дополнительного профессионального образования кадров для агропромышленного комплекса. – Материалы Национальной научно-практической конференции. – 2017. – с. 165-169. – URL: [https:// www/elibrary.ru/item.asp?id=32684120](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32684120). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

142. Пуков, Р.В. Повышение экономичности автотракторных дизелей / Р.В. Пуков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – Рязань. – 2016. – № 2 (30) – с. 118-123.

143. Пуков, Р.В. Результаты сравнительных испытаний распыла дизельного топлива форсункой до и после его обработки ультразвуком / Р.В. Пуков, А.А. Симдянкин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Саранск: Мордовский университет. – 2018. – с. 26-31.

144. Пуков, Р.В. Стендовые испытания бензинового двигателя, укомплектованного устройством для ультразвуковой обработки топлива // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. трудов. – Саранск: Мордовский университет. – 2017. – с. 59-64.

145. Пуков, Р.В. Топливный насос с гомогенизацией топлива / Современное состояние прикладной науки в области механики и энергетики: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. к 85-летию Чувашской государственной сельскохозяйственной академии, 150-летию Русского технического общества и 70-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного работника высшей школы Российской Федерации Акимова Александра Петровича. – 2016. – с. 496-503.

146. Пуков, Р.В. Улучшение показателей автотракторных дизельных двигателей путем ультразвуковой обработки топлива: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Р.В. Пуков. – Рязань, 2018. – 166 с. – Место защиты: Рязан. гос. агротехнолог. ун-т им. П.А. Костычева.

147. Пуков, Р.В. Улучшение показателей дизельных двигателей путем совершенствования их существующих конструкций / Р.В. Пуков, А.А. Симдянкин. – Текст: электронный // Актуальные вопросы применения инженерной науки: Материалы Междунар. студенческой науч.-практ. конф. / Мин-во сельского хозяйства РФ, РГАУ им. П.А. Костычева. – 2019. – с. 74-78. – URL: [https:// www/elibrary.ru/item.asp?id=37263458](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37263458). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

148. Пуков, Р.В. Улучшение экологических характеристик автотракторных дизелей за счет энергонасыщения топлива / Р.В. Пуков, И.Ю. Богданчиков. – Текст: электронный // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. – Материалы 68-ой Междунар. науч.-прак. конф., посвященной Году экологии в России / Мин-во сельского хозяйства РФ; Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева. – 2017. – с. 252-255. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29967965>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

149. Пуков, Р.В. Улучшение эксплуатационных характеристик автотракторных дизелей за счет энергонасыщения топлива / Р.В. Пуков, А.А. Симдянкин. – Текст: электронный // Эксплуатация автотракторной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: сборник статей II Междунар. науч.-прак. конф. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. – 2015. – с. 61-64. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24974584>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

150. Пуков, Р.В. Устройство для ультразвуковой обработки топлива / Р.В. Пуков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2017. – № 3(35). – с. 127-131.

151. Пути совершенствования технического диагностирования автотранспортных средств при их эксплуатации / Н.В. Бышов, Г.Д. Кокорев, Г.Д. Рембалович, И.А. Успенский. Текст: электронный // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: материалы XII Междунар. науч.-прак. конф. – 2010. – с. 332-334. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21268836>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

152. Пылеуловитель для топливных систем дизелей строительных и дорожных машин / Э.И. Удлер, С.А. Зыков, В.Д. Исаенко, А.В. Исаенко. Текст: электронный // Вестник Томского ГАСУ. – Томск. – 2006. - №1. – с. 90-95. –

URL: [https:// www/elibrary.ru/item.asp?id=11612353](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11612353). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

153. Работа дизелей на нетрадиционных топливах : учебное пособие / В.А. Марков ; А.И. Гайворонский, А.В. Грехов; Н.А. Иващенко. – Москва: «Легион-Автодата», 2008. – 484 с. – Текст непосредственный.

154. Разработка многокомпонентного смесового биоуглеводородного топлива для дизелей. – Текст: электронный / С. Соо, А.Х.И. Сатер, А.А. Ходяков, С.В. Хлопков // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2019. – № 1(39). – с. 60-66. – URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37128662>.

155. Распыливание дизельного топлива с органическими добавками. – Текст: электронный / С. Салим, С.Х.И. Абдель, В.В. Бернацкий, А.А. Ходяков, С.В. Хлопков // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2019. – № 2(40). – с. 14-19. – URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38516740>.

156. Рекус, И.Г., Шорина, О.С. Основы экологии и рационального природопользования: учебное пособие / И.Г. Рекус, О.С. Шорина. – Москва: МГУП, 2001. – 146 с.– Текст непосредственный.

157. Рогожкин, В.М. Эксплуатация машин в строительстве: учебное пособие / В.М. Рогожкин, Н.Н. Гребенников. – Москва: Ассоциация строительных вузов. – 2005. – 152 с. – Текст непосредственный.

158. Рогожкин, В.М. Эксплуатация машин в строительстве: учебник / В.М. Рогожкин. – Москва: Ассоциация строительных вузов. – 2011. – 648 с. – Текст непосредственный.

159. Рыбаков, К.В. Авиационные фильтры для топлив, масел, гидравлических жидкостей и воздуха / К.В. Рыбаков, Ю.И. Дмитриев, А.С. Поляков. – Москва: Машиностроение. – 1982. – 53 с. – Текст непосредственный.

160. Рыжов Ю.Н. Двухтопливная система тракторного дизеля с многоступенчатым подогревом / Ю.Н. Рыжов, А.П. Иншаков, А.А. Курочкин. –

Текст: электронный // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. - №6. – с. 11-13. – URL: [https:// www/elibrary.ru/contents.asp?id=33969926](https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33969926). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

161. Самарский, А.А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – Москва: Физматлит, 2001. – 320 с. – Текст непосредственный.

162. Сбережение энергозатрат и ресурсов при использовании мобильной техники / Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А., Кокорев Г.Д., Максименко О.О., Рембалович Г.К., Карцев Е.А., Юхин И.А., Булатов Е.П., Безруков Д.В. – Рязань: Изд. РГАТУ, 2012. – 186 с.– Текст непосредственный.

163. Сжимаемость пальмового масла и его смесей с дизельным топливом / Эмери Чибанда Кадиата, В.М. Славущий, А.В. Курапин, Е.А. Салыкин // Вестник Иркутского гос. технического ун-та. – 2018. – т. 22, № 10. – с. 178-188.

164. Симдянкин, А.А. Оценка экономической эффективности применения устройств ультразвуковой обработки топлива / А.А. Симдянкин, Р.В. Пуков, И.К. Данилов. – Текст: электронный // Научный журнал КубанГАСУ. – 2017. – № 126. – с. 50-68. – URL: [https:// www/elibrary.ru/item.asp?id=28418721](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28418721). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

165. Симдянкин, А.А. Смешивание многокомпонентного топлива / А.А. Симдянкин, Г.З. Кайкацишвили // Вестник РГАТУ. – 2013. – №1. – с. 68-72. – Текст непосредственный.

166. Симдянкин, А.А. Стендовые испытания дизеля, укомплектованного устройством для энергонасыщения топлива / А.А. Симдянкин, Г.З. Кайкацишвили. Текст: электронный // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 10. – с. 26-28. – URL: [www/https://elibrary.ru/contents.asp?id=33898789](https://www/elibrary.ru/contents.asp?id=33898789). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

167. Симдянкин, А.А. Устройство для энергонасыщения топлива / А.А. Симдянкин, Е.Е. Симдянкина, Г.З. Кайкацишвили. – Текст: электронный // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. - №3. – с. 6-8. – URL: <https://>

[www/elibrary.ru/contents.asp?id=33745831](http://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33745831). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

168. Сеницын, В.А. Экологические показатели вредных выбросов при работе на смесевых биотопливах / В.А. Сеницын, С.С. Кулманаков. // «Известия. ВолгГТУ». - 2012. - №12. – с.14-18. – Текст непосредственный.

169. Сеницин, П.С. Основные принципы диагностирования МСХТ с использованием современного диагностического оборудования / П.С. Сеницин, Г.Д. Кокорев, И.А. Успенский // Сборник научных работ студентов РГАТУ: материалы науч.-практич. конф. 2011 г. – Том 1 / Рязань: ФГОУ ВПО РГАТУ. – 2011. – с. 263-269. – Текст непосредственный.

170. Сеницин, П.С. Совершенствование диагностирования технического состояния фильтра тонкой очистки двигателей мобильной сельскохозяйственной техники: диссер. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / П.С. Сеницин: защищена 03.07.2014. Текст: электронный // Рязань, 2014. – 135 с. - Место защиты: Морд. гос. ун-т им. Н.П. Огарева. – URL: <https://www/search.rsl.ru/ru/record/01007540832>.

171. Смайлис, В. Моторные испытания РМЭ на высокооборотном дизеле воздушного охлаждения / В. Смайлис, В. Синчила, К. Берейшение. – Текст: электронный // Двигателестроение. – 2005. – № 4 (222). – с. 45 – 49. – URL: [https://www/elibrary.ru/contents.asp?id=33348418](https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33348418). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

172. Смирнов, А.Ю. Улучшение эффективных и экологических показателей автотракторных дизелей с наддувом путем подачи метанола на впуске: авто-реф. дис...канд. техн. наук: 05.04.02 / А.Ю. Смирнов. – Санкт-Петербург – Пушкин. – 2009. – 19 с. - Место защиты: С.-Петербур. гос. аграр. ун-т.

173. Снижение выбросов углекислого газа дизельной техники при выполнении технологических операций / Лебедев А.Т., Захарин А.В., Лебедев П.А. [и др.] Текст: электронный // Наука в центральной России. – № 2(32). – 2018. – с. 60-68. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35162127>.

174. Сравнительные испытания альтернативных топлив для дизельных двигателей / П.Р. Вальехо [и др.] – Текст: электронный // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана / Серия: Машиностроение. – 2014. – № 6 – с. 596. – URL: <https://www.docplayer.ru/71159588-Тепловыe-dvigateli-udk-sravnitelnye-ispytaniya-alternativnyh-topliv-dlya-dizelnyh-dvigatelay.html>.

175. Татаров, Л.Г. Очистка моторных топлив / Л.Г. Татаров, О.Н. Степанидина, Ю.С. Тарасов. – Текст: электронный // Вестник Ульяновской ГСА. – 2009. – № 1. – с.60-61. – URL: <https://www.cyberleninka.ru/article/n/ochistka-motornyh-masel>.

176. Татаров, Л.Г. Анализ загрязнения топлива / Л.Г. Татаров, Ю.С. Тарасов // Вестник Курской ГСА. – 2009. – Т.4. – № 4. – с. 77-79.– Текст непосредственный.

177. Теоретическая оценка процессов очистки и подогрева топлива в мобильных машинах / Э.И. Удлер, П.В. Исаенко, Д.В. Халтурин, А.В. Лысунец. Текст: электронный // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Том 320. – № 2. – с.125-129. – URL: www/https://elibrary.ru/contents.asp?id=33731424. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

178. Теория двигателей внутреннего сгорания / Под. ред. проф. д-ра техн. наук Н.Х. Дьяченко / Ленинград: Машиностроение (Ленингр. отделение). – 1974. – 552 с. – Текст непосредственный.

179. Терентьев, Г.А. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Терентьев Г.А. [и др.] / под. общ. ред. Г.А. Терентьев, В.М. Тюков, Ф.В. Смаль – Москва: Химия. – 1989. – 272с: ил.

180. Техника и технологии производства и переработки растительных масел. – Текст: электронный / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.В. Романцова, В.П. Таров. – Тамбов: ГОУВПО ТГТУ. – 2010. – URL: <https://www.arow.pdf.reader>

181. Техническое обслуживание. Системы впрыскивания дизельного топлива и управления двигателем. Система COMMONRAIL фирмы

CONTINENTAL: учебный курс. Текст: электронный – 2010. – 37 с. – URL: http://www.vwts.ru/engine/diz_dvig_20_16_12_rus.pdf.

182. Топливко. – Текст: электронный. – URL: <http://www.toplivco.ru/ochistka-topлива/treb>.

183. Тракторы «Беларусь»: МТЗ-80, МТЗ-80Л, МТЗ-82, МТЗ-82Л: руководство. – Минск: Ураджай, 1973. – 194 с. – Текст непосредственный.

184. Указания по инспекционному сервису и техническому обслуживанию, регулировке и ремонту: программа самообучения. Текст: электронный. – 2005. – 47 с. – URL: http://www.autocd/info/348_ElsaWin.pdf.

185. Улучшение качества процесса смесеобразования дизеля при его работе на рапсовом масле / В.А. Марков [и др.] – Текст: электронный // Безопасность в техносфере. – 2007. – №5. – с. 26-30. – URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33697574>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

186. Улучшение экологических показателей дизеля при использовании добавок к нефтяному дизельному топливу. Часть 1. Текст: электронный / А.А. Севастенко, Э.А. Севастенко, В.А. Марков, П.П. Ощепков // Грузовик. – 2016. – № 12. – с. 43-44. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27719506>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

187. Улучшение экологических показателей дизеля при использовании добавок к нефтяному дизельному топливу. Часть 2. Текст: электронный / А.А. Севастенко, Э.А. Севастенко, В.А. Марков, П.П. Ощепков // Грузовик. – 2017. – № 1. – с. 40-44. – URL: https://searchworks.stanford.edu/articles/edselr__edselr.28431942.

188. Улюкина, Е.А. Улучшение эксплуатационных свойств современных и перспективных мотор топлив для сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Е.А. Улюкина. – Москва. – 2012. – 37 с. – Место защиты: Моск. гос. агроинженер. ун-т им. В.П. Горячкина.

189. Уменьшение энергетических затрат в сельскохозяйственном производстве (на примере картофеля) / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А.

Успенский, Г.Д. Кокорев [и др.]. Текст: электронный // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – №120. – с. 375-398. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26469942>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

190. Уханов, А.П. Дизельное смесевое топливо: монография / А.П. Уханов, Д.А. Уханов, Д.С. Шеменев. – Пенза: РИО ПТ СХА, 2012. – 147 с. – Текст непосредственный.

191. Федоренко, В.Ф. Развитие биоэнергетики, экологическая и продовольственная безопасность: научн. изд. / В.Ф. Федоренко [и др.] // Москва: ФГНУ Росинформагротех. – 2009. – 144 с. – Текст непосредственный.

192. Федоренко, В.Ф. Состояние и развитие производства биотоплива: науч. аналит. обзор / В.Ф. Федоренко [и др.] // Москва: ФГНУ Росинформагротех. – 2007. – 130 с. – Текст непосредственный.

193. Финченко, Н.И. Испытание автомобилей и тракторов: учебно-методическое пособие для практических занятий / Н.И. Финченко, А.В. Давыдов, Д.В. Халтурин. // Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 170 с.– Текст непосредственный.

194. Халтурин, Д.В. Совершенствование топливных систем мобильных машин при эксплуатации в условиях пониженных температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / Д.В. Халтурин. – Томск. – 2012. – 25 с. – Место защиты: Томский гос. архитектур.-строит. ун-т.

195. Ходяков, А.А., Хлопков С.В., Бернацкий В.В. Физико-химические свойства дизельного топлива стандарта «Евро». Текст: электронный / Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 1(102). – с. 40-43. – URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29304466>.– Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

196. Чернецов, Д.А. Загрязнение окружающей среды сельскохозяйственной техникой / Д.А. Чернецов. – Текст: электронный // Вопросы современной науки и практики / Университет им. В.И. Вернадского. -

№1 (32). – 2011. – с. 23-27. – URL: <http://www.vernadsky.tstu.ru/pdf/2011/01/02.pdf>.

197. Чернецов, Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие / Д.А. Чернецов. – Текст: электронный / Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского // Тамбов: ГОУВПО «Тамбовский государственный технический университет». – 2010. – с.54-59. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15489608>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

198. Черножуков, Н.И. Технология нефти. Очистка нефтепродуктов и производство специальных продуктов / Н.И. Черножуков. – Москва: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной аппаратуры. – 1952. – 336 с.– Текст непосредственный.

199. Шкаликова В.П., Патрахальцев, Н.Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях: Монография / изд. 2-е, доп. / В.П. Шкаликова., Н.Н. Патрахальцев. – Москва: РУДН, 1993. – 64 с. – Текст непосредственный.

200. Шуберт, М. Экологическая безопасность малогабаритных двигателей внутреннего сгорания в жизненном цикле: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Шуберт Менян; Моск. гос. техн. ун-т (МАМИ). Текст: электронный – Москва. – 2006. – 126 с.– URL: <https://www/search.rsl.ru/ru/record/01003277558>.

201. Экологическая безопасность автомобильного транспорта / Ю. С. Козлов, В. П. Меньшова, И. А. Святкин. – Москва: Агар : Рандеву-АМ, 2000. – 175, с. : ил.; 22 см. – ISBN 5-89218-095-6.

202. Экспериментальные исследования газодизельного двигателя трактора К-700А / В.В. Володин, Б.П. Загородских, В.А.Марков, В.В. Фурман. Текст: электронный // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. - №10. – с. 7-9.– URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23775817>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

203. Экспериментально-расчетная оценка выбросов вредных веществ с отработавшими газами ДВС на эксплуатационных режимах работы / О.И. Демочка, В.Н. Ложкин [и др.]. / Технический отчет по НИР. Текст:

электронный // Санкт-Петербург: НПО ЦНИТА. – 1990.– URL: <https://www/internet-law.ru/stroyka/text/45321/>.

204. Эксперт-ойл. Текст: электронный –URL: <http://www.expert-oil.com/site.xp/054057124054055054.html>

205. Энергетический бюллетень. Динамика цен на моторное топливо
Текст: электронный / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – URL: <https://www/ac.gov.ru/fils/publicaition/a/5012/pdf>

206. Энергоэффективная Россия. Пути снижения энергоемкости выбросов парниковых газов. Текст: электронный / McKinsey&Company. – 2009. – 167 с. – URL: <https://www/yandex.ru/clck/jsreidir>

207. Энергоэффективность и энергосбережение: тематическое сообщество Текст: электронный. – URL: <https://www/solexun.ru/energo/reviews/avtomobilnyy-transport/obzor-1>

208. IV Национальное сообщение по UNFCCC «Энергоэффективность в России: скрытый резерв» Текст: электронный. – 2008. – 213 с. – URL: <http://www.aret.ru/ru/news/id.287.html>

209. ASTM D445-19. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)

210. ASTM D 613-18a. Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil.

211. A comprehensive review the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines / – B.K. Debnath [et al] // Renewable and sustainable Energy Reviews. – 2015.– №42.– p.196 -211

212. Azad, A. Performance study of a diesel engine by first generation biofuel blends with fossil fuel: an experimental study / Azad A., Uddin S.A. // J Renew sustain Energy. – 2013. – №5. – p. 013-118

213. Barthélémy de Theux. Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel. Текст: электронный. – 2004. – URL: https://www.riaed.net /IMG/pdf/version_final_texte.pdf

214. Boudy Frederic. Etude du systeme d'injection d'un moteur a rampe d'injection commune: memoire de maitrise en genie mecanique; m. ing /Boudy Frederic / Quebec: Université de Technologie Superieure, Université du Quebec. – 2008. – 199 p.

215. Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines / Bernat Esteban [et al] // Fuel Elsevier journal. – 2012. – № 102. – p 231-238.

216. Claude Valery, Ngayihi Abbe. Contributin à la modelisation OD de la combustion Diesel Application au biodiesel: // Genie Mécanique. Université de yaounde I. – 2016. – Thèse doctorale.

217. Comparisons of NO emissions and soot concentrations from biodiesel – fuelled diesel engine / Song, M. [et al.] // Fuel. – 2012. – № 96 – p. 446-453.

218. Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with cooking oil /Kalam, M.A [et al] // Energy. – 2011.– №36. – p. 397-402.

219. Impact of diesel fuel and palm oil blend compositions on the performance of the fuel supply process in the diesel engine [Электронный ресурс] / Е. А. Салыкин, А. В. Курапин, Эмери Чибанда Кадиата, В. Г. Дыгало, В. М. Славущкий // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 386, conference 1: The 102nd International Scientific and Technical Conference «Intelligent Systems of Driver Assistance: Development, Research, Certification» (18-19 April, 2018, Nizhni Novgorod, Russian Federation) / Nizhny Novgorod State Technical University. – [Publisher: IOP Publishing Ltd], 2018. – 10 p. – URL : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/386/1/012014/pdf>.

220. Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and influence of methyl esters distribution. / Martinez G. [et al] // Boimass bioenergy. – 2014. - №63. – p. 22-32.

221. Impact of palm, mustard, waste cooking oil and calophyllum inophyllum biofuels on performance and emission of CI engine/ A. Sanjid [et al] //Renewable and sustainable energy reviews. – 2013. –№27. – p. 664-682.

222. Implementation of Palm biodiesel based on economic aspects, performance, emission, and wear characteristics / Mosarof [et al] // Energy conversion and Management. – 2015. – № 105. – p. 617-629.

223. Ing.A.-B. ErgoMSC. L'huile de palme et ses transformations comme carburant. Текст: электронный –URL: <http://www.abergol.e-monsite.com/medias/files/carbhp-l.doc>.

224. Januan, J. Perspectives on biodiesel as sustainable fuel. / J. Januan, N. Ellis // Renew sustain Energy Rev. – 2010. – № 14. – p. 1312-20.

225. Loury, M. Un nouveau carburant colonial possible. L'huile de palme methanolysée/ Loury. M. // France Energet. – 1945. – №11-12, p. 332.

226. Mathematical modeling of the technological system of the harvesting and transport process / Kurochkin V.N., Lebedev A.T., Rudenko N.E., Zhevora Y.I., Doronina N.P. // Research journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2018. – Т.9. – № 6. – p. 715-719.

227. Namlizan, N. Performance of diesel engine using diesel B3 mixed with crude palm oil /N. Namlizan., T. W. Wuttanasatian // The scientific world journal. – 2014. – Volume 6 p.

228. Ndayishimiye, P. Use of palm oil-based biofuel in the international combustion engines /Ndayishimiye, P., Tazerout Mohamed // Performances and emissions characteristics // Energy. – 2011. – № 361. – p. 790-796.

229. Performance and combustion characteristics of a engine fueled with wasta palm oil and canola oil methyl esters/Ahmet Nacati ozsezen [et al] // Fuel Elsevier journal. – 2009. – № 88 – p. 629-636.

230. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha and moringa oil methyl ester / Rashid, M.M. [et al.] // Industrial crops and products. – 2016. – №79. – p. 70-75

231. Performance and emission of diesel engine fueled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamics cavitation / Lai Fatt Chuah. [et al]// Springer «Clean Techn Environ policy». – 2015. – № 17. – p. 2229-2241.

232. Performance, emissions and heat losses of palm and jatropha biodiesel blends in a diesel engine / V.J. Abedin [et al] // Industrial crops and products «Elsevier journal». – 2014. – № 59. – p. 96-104.

233. Pradeep T. Kale. An overview of ignition delay and combustion of diesel fueled in CI Engine/Pradeep T. Kale, S.S. Ragit // Interne conference on emanations in moderation technology and engineering (ICEMTE). – 2017. – Volume5, № 5. – p. 121-126.

234. Prateepchaikul, G. Palm oil as a fuel for agricultural diesel engines: Comparative testing against diesel oil on. Текст: электронный / G. Prateepchaikul, A. Teerawat. – 2003. – URL: https://www.journeytoforever.org/biodiesel_SVO-palm.html

235. Sharon H, Karuppasamy K, Soban Kumar DR, Sundaresan A. A test on DI diesel engine fueled with methyl esters of used palm oil. *Renew Energy*– 2012. – № 47. – p. 160–6.

236. Shy, E.G. Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities. // *Biomass bioenergy*. – 1993. – № 4. – p. 227 – 242.

237. Tarabet, L. Etudes de la combustion d'un carburant innovant dans les moteurs à combustion interne de véhicules / Lyes Tarabet // Ecoles des mines de NANTES. Universités de NANTES école, militaire polytechniques: theses doctorat(Energétiques). Les 23septembre 2012.

238. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils / Bernat Esteban [et al] // *Sciverse science direct «Biomass and bioenergy»* . – 2012. – № 42. – p. 164-171.

239. Thermodynamic properties of palm oil (*Elaeis guineensis*) and evening primrose seed oil (*thera biennis*) as a function of temperature /Rebecca S.[et al] // *Wold journal Multidisciplinary Research and development*. – 2016.– № 2.vol. 1. – p. 38-43.

240. Ziejewski M. Vegetable oils as a potential alternate fuel in direct injection diesel engines/ M. Ziejewski., K. Kaufman // SAE technical paper. – 1983.

GARAGE ST GABRIEL**SPECIALISTE EN MARQUE****JEEP TOYOTA, LAND CRUISER 4X4****NRC 11507 Pld. Nat.: 01-93-64906 R****Kinshasa, Rép. Dém. Du Congo****Tél : +243814803654****TOYOTA****GENUINE PART**Kinshasa, le 30/07/2016

Objet : Produit tiré du mélange
mazout et huile de Palme.

Nous garage Sainte Gabriel, attestons par la présente que les produits de Monsieur KADIATA TSHIBANDA EMERY ont donné un résultat scompte. Sur nos véhicules de transport KINSHASA – MATADI.

Veuillez agréer nos sincères félicitations.

Pour le Garage Saint Gabriel

Emile Ndungula
Le 30/07/2016

Перевод:**АВТОСЕРВИС Св. ГАБРИЕЛЬ**

Специалист в области автомобилей
марки Джип, Тойота, Лэнд Крузер 4x4
NRC 11507 Плд. Нат.: 01-93-64906 P
Киншаса, Демократическая Республика Конго
Тел: +243814803654

ТОЙОТА
Оригинальные запчасти

Киншаса, 30/07/2016г.

Тема: продукт, полученный из смеси
мазута и пальмового масла.

Мы, Автосервис Святой Габриель настоящим подтверждаем, что продукт, разработанный Г-ном КАДИАТА ЧИБАНДА ЭМЕРИ, показал желаемый результат. Продукт использовался на наших транспортных средствах КИНШАСА-МАТАДИ.

Примите заверение в глубочайшем уважении к Вам.

Автосервис Святой Габриель
подпись

Печать:

Демократическая Республика Конго
Автосервис Святой Габриель

Перевод текста документа с французского языка на русский язык выполнен переводчиком Хлыновой Александрой Сергеевной



Пикнометры для определения плотности нефтепродуктов.

ГОСТ 22524-77(СТ СЭВ 3352-81)

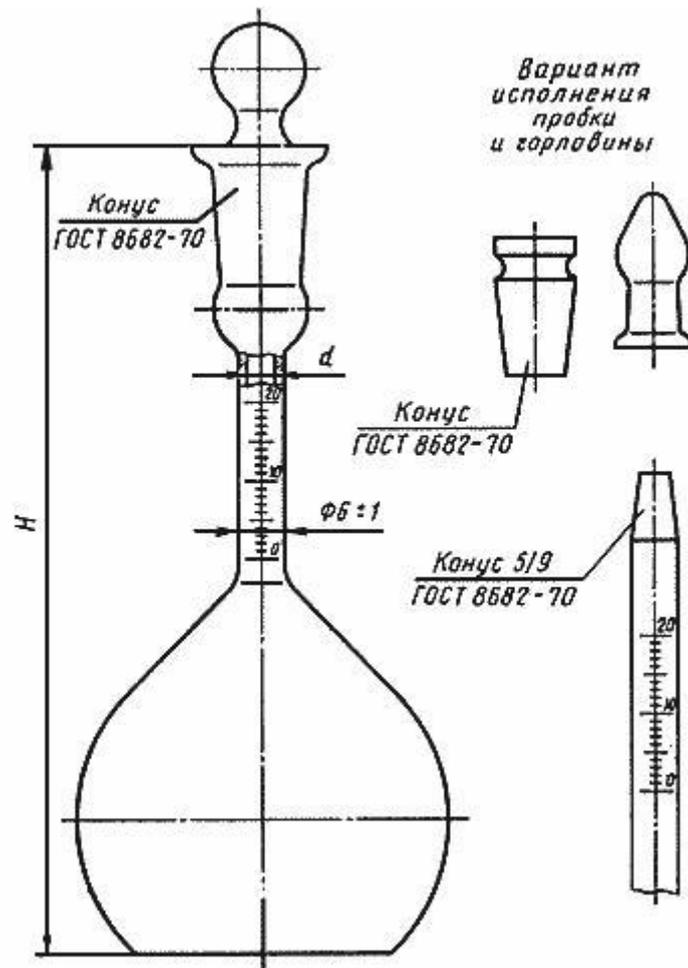


Рис.1 Пикнометр для определения плотности по ГОСТ 3900-85. Тип ПЖ1.

Номинальная вместимость пикнометра определяется для типа

ПЖ1 –объемом до нулевой отметки шкалы;

ПЖ2 - объемом до отметки на горловине;

ПЖ3 (исполнения 1, 2) - объемом до уровня верхнего отверстия пробки;

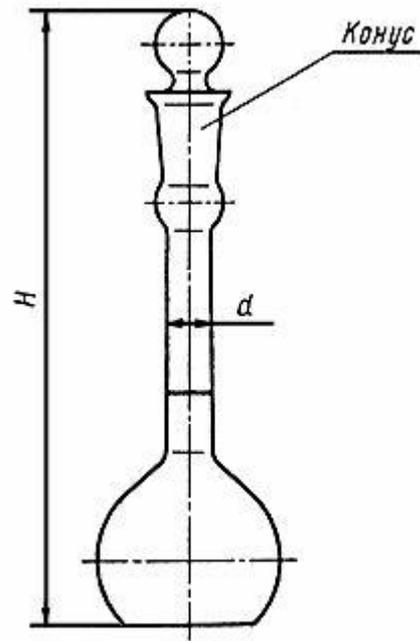


Рис.2. Пикнометр для определения плотности по ГОСТ 3900-85. Тип ПЖ2.

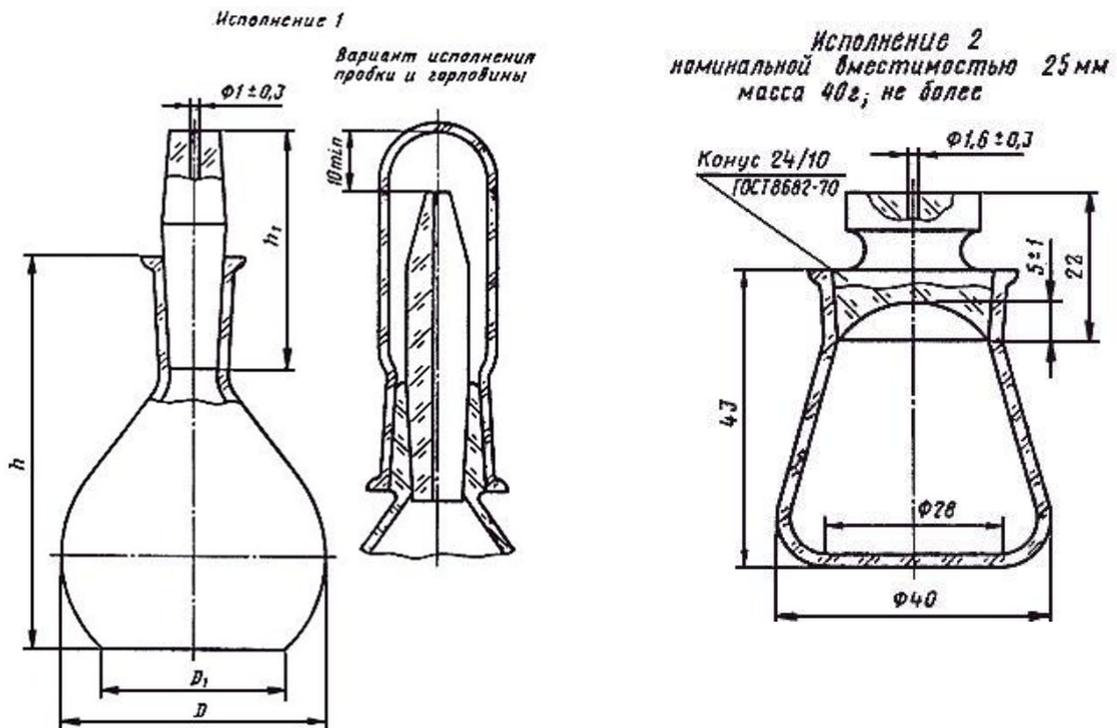


Рис.3. Пикнометр для определения плотности по ГОСТ 3900-85. Тип ПЖ3.

Извлечения из ГОСТ 3900-85

ГОСТ 3900—85 С. 3

1.4.6. Точность метода

1.4.6.1. Сходимость

Два результата определений, полученные одним исполнителем, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает $0,0005 \text{ г/см}^3$ для прозрачных продуктов; $0,0006 \text{ г/см}^3$ — для темных и непрозрачных продуктов.

1.4.6.2. Воспроизводимость

Два результата испытаний, полученные в двух лабораториях, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает $0,0012 \text{ г/см}^3$ для прозрачных продуктов; $0,0015 \text{ г/см}^3$ — для темных и непрозрачных продуктов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПИКНОМЕТРОМ

2.1. Сущность метода

Метод основан на определении относительной плотности — отношения массы испытуемого продукта к массе воды, взятой в том же объеме и при той же температуре. Так как за единицу массы принимают массу 1 см^3 воды при температуре $4 \text{ }^\circ\text{C}$, то плотность, выраженная в г/см^3 , будет численно равна плотности по отношению к воде при температуре $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.2. Определение плотности и относительной плотности пикнометром с капилляром в пробке и меткой

Метод применяют для определения плотности нефти, жидких и твердых нефтепродуктов, а также гудронов, асфальтов, битумов, креозота и смеси этих продуктов с нефтепродуктами, кроме сжиженных и сухих газов, получаемых при переработке нефти и легколетучих жидкостей, давление насыщенных паров которых, определенное по ГОСТ 1756, превышает 50 кПа , или начало кипения которых ниже $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Плотность продуктов определяют при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1, 2.2. (Измененная редакция, Изм. № 1).

2.2.1а. Отбор проб проводят по ГОСТ 2517.

(Введен дополнительно, Изм. № 1).

2.2.1. Аппаратура, реактивы и материалы

Пикнометры типов ПЖ-1, ПЖ-2, ПЖ-3 ПТ по ГОСТ 22524 или другого типа, обеспечивающие ту же точность.

Термометры ртутные стеклянные типа ТЛ-4 № 4 по ТУ 25-2021.003 или термометры стеклянные для испытаний нефтепродуктов типа ТИН 5 по ГОСТ 400.

В случае разногласий применяют термометр с ценой деления $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$, калиброванный на полное погружение.

Термостат или водяная баня для поддержания температуры $20 \text{ }^\circ\text{C}$ с погрешностью не более $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$; в качестве водяной бани можно использовать стакан любого исполнения (с мешалкой) вместимостью не менее 1 дм^3 по ГОСТ 25336.

Весы аналитические с погрешностью взвешивания не более $0,0002 \text{ г}$.

Пипетка с оттянутым капилляром.

Хромовая смесь (60 г двуххромовокислого калия по ГОСТ 2652, $0,1 \text{ дм}^3$ дистиллированной воды и 1 дм^3 серной кислоты, х. ч., или ч. д. а. по ГОСТ 4204).

Спирт этиловый ректификованный технический по ГОСТ 18300 или спирт этиловый технический по ГОСТ 17299.

Ацетон по ГОСТ 2603.

Нефрас-С 50/170 по ГОСТ 8505.

Вода дистиллированная, $\text{pH} = 5,4 - 6,6$.

Ткань мягкая безворсовая.

Эфир этиловый технический по ГОСТ 8981.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

2.2.2. Подготовка к испытанию

2.2.2.1. Пикнометр и пробку с капилляром тщательно моют хромовой смесью, затем водой, ополаскивают дистиллированной водой, потом ацетоном или спиртом. Такую промывку ведут перед калибровкой или при неравномерном смачивании пикнометра жидкостью.

Перед повторным испытанием пикнометр промывают бензином или другим растворителем, затем высушивают.

Для предотвращения появления статического заряда поверхность пикнометра протирают слегка увлажненным куском ткани. Статический заряд можно снять, если подуть на пикнометр.

С. 4 ГОСТ 3900—85

2.2.2.2. Устанавливают «водное число» пикнометра, то есть массу воды в объеме пикнометра при температуре 20 °С.

Подготовленный по п. 2.2.2.1 пикнометр взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г, наполняют при помощи пипетки дистиллированной свежeproкипяченной и охлажденной до 18—20 °С водой (пикнометр типов ПЖ-1, ПЖ-2, ПТ — немного выше метки, пикнометр типа ПЖ-3 — до полного заполнения), следя за тем, чтобы в пикнометр не попали воздушные пузырьки, и погружают до горловины в термостат или баню с температурой 20 °С.

Пикнометр выдерживают при 20 °С в течение 30 мин. Когда уровень воды в шейке пикнометра с меткой перестанет изменяться, избыток воды отбирают пипеткой или фильтровальной бумагой и вытирают шейку пикнометра внутри. Уровень воды в пикнометре устанавливают по верхнему краю мениска.

В пикнометре с капилляром в пробке вода выступает из капилляра, избыток ее снимают фильтровальной бумагой.

Пикнометр с установленным при 20 °С уровнем воды тщательно вытирают снаружи безворсовой тканью, снимают статический заряд и взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г. «Водное число» пикнометра (m) вычисляют по формуле

$$m = m_c - m_0, \quad (1)$$

где m_c — масса пикнометра с водой, г;

m_0 — масса пустого пикнометра, г.

«Водное число» пикнометра устанавливают перед первым использованием пикнометра и не реже одного раза после 20 определений плотности продуктов.

При установлении «водного числа» пикнометра производят не менее трех определений. За результат испытаний принимают среднеарифметическое трех последовательных определений.

При необходимости определения плотности или относительной плотности при температуре выше или ниже 20 °С пикнометр градуируют и проверяют при той же температуре, при которой определяют плотность.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

2.2.2.3. При определении плотности вязкого продукта последний предварительно нагревают до 50—60 °С, твердый продукт предварительно измельчают на кусочки.

2.2.3. Проведение испытания

2.2.3.1. Проведение испытания жидких нефтепродуктов

Пикнометр, подобранный в зависимости от свойств испытуемого продукта и подготовленный по п. 2.2.2.1, взвешивают с погрешностью не более 0,0005 г, если вместимость пикнометра более 25 см³, и с погрешностью не более 0,0002, если вместимость пикнометра менее 25 см³.

Пикнометр, подготовленный по п. 2.2.2.1, с установленным «водным числом», заполняют испытуемым продуктом с помощью пипетки при температуре 18—20 °С (пикнометр типов ПЖ-1, ПЖ-2, ПТ — немного выше метки, а пикнометр типа ПЖ-3 — до полного заполнения), стараясь не задеть стенки пикнометра, не допуская возникновения пузырьков. Пикнометр закрывают пробкой, погружают до горловины в термостат или баню с температурой 20 °С и выдерживают до тех пор, пока уровень испытуемого продукта не перестанет изменяться (как правило не менее 30 мин). Избыток продукта отбирают пипеткой или фильтровальной бумагой. Уровень продукта в пикнометре устанавливают по верхнему краю мениска. В пикнометре с капилляром в пробке продукт выступает из капилляра и избыток его снимают фильтровальной бумагой.

Пикнометр с испытуемым нефтепродуктом вынимают из бани, охлаждают при температуре, которая немного ниже заданной температуры, тщательно вытирают снаружи, удаляют статическое электричество и взвешивают с указанной выше погрешностью.

2.2.3.2. Проведение испытания твердых и вязких нефтепродуктов

Пикнометр, подготовленный по п. 2.2.2.1, с установленным «водным числом» взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г, заполняют (примерно наполовину) нагретым до 50—60 °С вязким испытуемым продуктом так, чтобы продукт не попал на стенки пикнометра, нагревают до (90 ± 10) °С (в зависимости от вязкости продукта) в течение 20—30 мин для удаления пузырьков воздуха и дают ему охладиться в термостате или водяной бане до температуры 20 °С.

При определении плотности твердого продукта пикнометр заполняют (примерно наполовину) мелкими кусочками продукта и затем помещают в термостат при температуре на 10 °С выше его температуры плавления, но не ниже 100 °С для удаления воздуха и полного расплавления.

Когда пикнометр частично (примерно наполовину) заполнен, нагрет и охлажден до температуры, близкой к 20 °С, его взвешивают с погрешностью не более 0,0005 г.

В пикнометр с испытуемым продуктом наливают свежeproкипяченную дистиллированную воду,

ГОСТ 3900—85 С. 5

вытесняя таким образом воздух, воздушные пузырьки снимают тонкой проволокой. Заполненный пикнометр погружают до горловины в баню (или термостат) при 20 °С или другой заданной температуре и выдерживают не менее 30 мин, пока все воздушные пузырьки не выйдут на поверхность и уровень жидкости в пикнометре не установится. Затем пикнометр закрывают крышкой (пробкой) с капиллярной трубкой, имеющей температуру испытания, не допуская возникновения воздушных пузырьков под крышкой (пробкой). Удаляют избыток воды с поверхности капиллярной трубки, мениск жидкости в капиллярной трубке устанавливают на уровне поверхности крышки (пробки).

Пикнометр вынимают из бани и охлаждают до температуры, которая немного ниже температуры испытания.

Сухой мягкой тканью с поверхности пикнометра снимают остатки воды и нефтепродукта, удаляют статическое электричество и взвешивают с погрешностью не более 0,0005 г.

2.2.3.1, 2.2.3.2. **(Измененная редакция, Изм. № 1).**

2.2.4. Обработка результатов

2.2.4.1. Вычисление плотности жидких нефтепродуктов

Если температура определения одинакова с температурой определения водного числа ($t_i = t_c$), плотность вычисляют по формуле (2), если температура определения отличается от температуры определения водного числа ($t_i \neq t_c$), плотность вычисляют по формуле (3)

$$\rho_i = \frac{(m_i - m_0) \cdot \rho_c}{(m_c - m_0)} + C, \quad (2)$$

$$\rho_i = \left[\frac{(m_i - m_0) \cdot \rho_c}{(m_c - m_0)} + C \right] \left[\frac{1}{1 - \alpha (t_c - t_i)} \right], \quad (3)$$

где ρ_i — плотность образца при температуре определения, кг/м³;

ρ_c — плотность воды при температуре определения водного числа (см. приложение 3), кг/м³;

t_c — температура, при которой определяется водное число, °С;

t_i — температура, при которой проводится испытание, °С;

m_0 — масса пустого пикнометра на воздухе, г;

m_c — масса пикнометра с водой на воздухе при температуре определения водного числа, г;

m_i — масса пикнометра с образцом на воздухе при температуре испытания, г;

C — поправка на давление воздуха (см. приложение 4), кг/м³;

α — коэффициент объемного расширения стекла, из которого изготовлен пикнометр (см. п. 2.2.4.5).

2.2.4.2. Вычисление плотности твердых и вязких нефтепродуктов

Применяя способ, описанный в п. 2.2.3.2, плотность твердых и вязких нефтепродуктов вычисляют по формуле 4, если температура определения одинакова с температурой определения водного числа ($t_i = t_c$)

$$\rho_i = \frac{(m_i - m_0) \cdot \rho_c}{(m_c - m_0 - m_2 + m_1)} + C, \quad (4)$$

и по формуле (5), если температура определения отличается от температуры определения водного числа ($t_i \neq t_c$)

$$\rho_i = \left[\frac{(m_i - m_0) \cdot \rho_c}{(m_c - m_0 - m_2 + m_1)} + C \right] \left[\frac{1}{1 - \alpha (t_c - t_i)} \right], \quad (5)$$

где m_1 — масса пикнометра в воздухе; частично наполненного твердым или вязким образцом, г;

m_2 — масса пикнометра с образцом в воздухе, наполненного водой при температуре t_i , г.

2.2.4.1, 2.2.4.2. **(Измененная редакция, Изм. № 1).**

2.2.4.3. Расчет относительной плотности

Относительная плотность — отношение плотности вещества при заданной температуре к плотности воды при такой же температуре. В соответствии с определением относительную плотность получают в результате деления соответствующей плотности образца на плотность воды в аналогичных единицах и при такой же требуемой температуре определения.

2.2.4.4. За результат испытания принимают среднееарифметическое результатов двух определений. Результат записывают, округляя число до четырех значащих цифр. Плотность, выраженная в кг/м³, переводится в г/см³ путем деления результата на 1000.

2.2.4.5. Поправка на термическое расширение стекла пикнометра

С. 6 ГОСТ 3900—85

При расчете плотности и относительной плотности по измерениям, проведенным при температуре t_t , отличающейся от температуры t_c , при которой калиброван пикнометр, учитывают поправку на объемное расширение стекла, из которого изготовлен пикнометр.

Коэффициенты объемного расширения боросиликатного стекла известны, зависят от его изготовления и относятся к трем основным категориям, имеющим коэффициент объемного расширения $10 \cdot 10^{-6}$, $14 \cdot 10^{-6}$ и $19 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

При использовании пикнометров из боросиликатного стекла и для получения большей точности определения необходимо:

а) обеспечить $t_t = t_c$ или

б) использовать пикнометр с известным коэффициентом объемного расширения.

Если это невозможно, то удовлетворительная точность достигается при учете коэффициента $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Коэффициент расширения для пикнометров из натриевого стекла $25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

2.2.4.3—2.2.4.5. (Введены дополнительно, Изм. № 1).

2.2.5. Точность метода

2.2.5.1. Для жидких нефтепродуктов

Сходимость

Два результата определений, полученные одним исполнителем, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает $0,0006 \text{ г/см}^3$.

Воспроизводимость

Два результата испытаний, полученные в двух разных лабораториях, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает $0,0006 \text{ г/см}^3$.

2.2.5.2. Для твердых нефтепродуктов

Сходимость

Два результата определений, полученные одним исполнителем, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает $0,0012 \text{ г/см}^3$.

Воспроизводимость

Два результата испытаний, полученные в двух разных лабораториях, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает $0,0024 \text{ г/см}^3$.

2.3. Определение плотности градуированным двухколennым пикнометром

Метод применяется для определения плотности продуктов с давлением насыщенных паров равным или менее 130 кПа и с кинематической вязкостью при температуре испытания равной или менее $50 \text{ мм}^2/\text{с}$, особенно, когда испытуемого продукта недостаточно для полного заполнения пикнометров других типов.

Плотность двухколennым пикнометром определяют при температуре испытания.

2.2.5.1, 2.2.5.2, 2.3. (Измененная редакция, Изм. № 1).

2.3.1. Аппаратура, реактивы и материалы

Термометры, весы, пипетки, реактивы и материалы — по п. 2.2.1.

Пикнометры типа ПЖ-4 по ГОСТ 22524.

Штатив-подставка для пикнометра.

Термостат или водяная баня, глубина которых должна быть больше высоты пикнометра, поддерживающие температуру с погрешностью не более $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2.3.2. Подготовка к испытанию

2.3.2.1. Подготовка пикнометра — по п. 2.2.2.1.

2.3.2.2. Перед первым использованием и далее не реже одного раза в год градуируют пикнометр. Для этого пикнометр взвешивают с погрешностью не более $0,0002 \text{ г}$. Заполняют дистиллированной водой, поместив в жидкость кривой конец и удерживая пикнометр в вертикальном положении. Благодаря капиллярному эффекту жидкость по изгибу попадает в колено, и пикнометр заполнится за счет сифонирования. Затем пикнометр помешают в термостат или водяную баню с температурой $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ таким образом, чтобы жидкость в пикнометре была ниже уровня жидкости в бане, и выдерживают около 30 мин , отмечают в каждом колене уровень жидкости с точностью до наименьшего деления.

Пикнометр извлекают из бани, дают стечь воде с наружной поверхности. Для ускорения высыхания пикнометр погружают в стакан с ацетоном и вытирают сухой чистой безворсовой тканью.

Снимают с поверхности пикнометра статический заряд и взвешивают пикнометр с погрешностью не более $0,0002 \text{ г}$.

Разность масс наполненного и пустого пикнометра является «водным числом» пикнометра при температуре $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ и соответствует сумме отсчетов уровней воды по обоим шкалам.

ГОСТ 3900—85 С. 7

Пикнометр градуируют в трех точках (минимальное, максимальное и промежуточное деления), определив массу дистиллированной воды и соответствующий ей уровень в делениях шкалы. На основании этих отсчетов строят график: по оси абсцисс откладывают значения «водных чисел», по оси ординат — суммы отсчетов уровня воды по обеим шкалам.

Все точки должны лежать на прямой линии, которая дает «водное число» пикнометра для любого суммарного показания шкал. Если разброс точек превышает два малых деления шкалы с любой стороны прямой линии и последующие испытания не вносят изменений, пикнометр считается непригодным к работе.

При проверке градуировки пикнометра необходимо получить не менее трех пар результатов, последовательно сливая воду.

2.3.3. Проведение испытания

Пикнометр, подготовленный по п. 2.2.2.1, с установленным «водным числом» взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г и заполняют испытуемым продуктом при температуре испытания. Если температура испытания ниже температуры окружающей среды или необходимо свести к минимуму потери от испарения, пикнометр следует заполнять до самого низкого градуированного участка шкалы. Пикнометр с испытуемым продуктом ставят в баню при температуре испытания и выдерживают не менее 30 мин, после чего производят отсчет уровня по обеим шкалам капиллярной трубки. При испытании более вязких продуктов отсчет производят, когда уровень жидкости в обеих капиллярных трубках установится.

Пикнометр вынимают из бани, опускают в стакан с ацетоном, вытирают сухой мягкой тканью и выдерживают на воздухе, чтобы температуру пикнометра привести к температуре окружающей среды, затем взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г.

При определении плотности легколетучих жидкостей испытуемый продукт и пустой пикнометр охлаждают до температуры от 0 до 5 °С. Если происходит конденсация влаги, то к одной из двух капиллярных трубок прикрепляют трубочку для осушки, при этом необходимо, чтобы в капиллярной трубке было как можно меньше испытуемого продукта. Минимальные потери летучих компонентов и оптимальная скорость испарения продукта обеспечиваются при общей длине пустой капиллярной трубки более 10 см.

2.3.4. Обработка результатов

Относительную плотность при температуре испытания (ρ_4^t) вычисляют по формуле

$$\rho_4^t = \frac{m_3 - m_1}{m}, \quad (6)$$

где m_1 — масса пустого пикнометра, г;

m_3 — масса пикнометра с продуктом, г;

m — «водное число» пикнометра, г.

Плотность испытуемого продукта (ρ), кг/м³, вычисляют по формуле

$$\rho = \rho_4^t \cdot \rho_c + C,$$

где ρ_c — плотность воды при температуре определения водного числа (см. приложение 3), кг/м³;

C — поправка на давление воздуха, кг/м³ (см. приложение 4).

Пересчет плотности при температуре испытания на плотность при температуре 20 °С проводят по таблице приложения 1.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

2.3.5. Точность метода

2.3.5.1. Сходимость

Два результата определений, полученные одним исполнителем, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает 0,0007 г/см³ для испытуемых продуктов, имеющих плотность 0,7770—0,8920 г/см³.

2.3.5.2. Воспроизводимость

Два результата испытаний, полученные в двух разных лабораториях, признаются достоверными (с 95 %-ной доверительной вероятностью), если расхождение между ними не превышает 0,001 г/см³ для испытуемых продуктов, имеющих плотность 0,7770—0,8920 г/см³.