

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ТАВРИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**И.Б. ВОРОНОВСКИЙ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ В УСЛОВИЯХ  
ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

---

**Монография**

**Мелитополь, 2016**

УДК 631.3

ББК 621.43.73

**Рецензенты:**

**Войтов Виктор Анатольевич**, доктор технических наук, профессор  
(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
им.П.Василенко)

**Паламарчук Игорь Павлович** доктор технических наук, профессор  
(Виницкий национальный аграрный университет )

*Рекомендовано к изданию*

*Ученым советом Таврического государственного агротехнологического университета  
Протокол №9 от 30.05.2016г*

Рассматривается решение проблемы высокой загрязненности дизельного топлива в баках тракторов и комбайнов в процессе сельскохозяйственного производства и ее отрицательное влияние на работу топливной аппаратуры и надежность дизелей в целом. Обосновано повышение чистоты топлива при заправке, и в системах питания тракторов и комбайнов.

В монографии представлено теоретическое обоснование и новое решение научной задачи повышения эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в условиях загрязненности технологической среды путем математического моделирования и разработкой новых средств очистки и обезвоживания.

Обоснована конструктивно-технологическая схема и разработаны фильтры-водоотделители как для системы питания энергетического средства МТА, так и для средств заправки топлива. Это позволит повысить ресурс фильтров тонкой очистки, топливных насосов высокого давления, что устраняет причины снижения производительности и увеличения расхода топлива мобильными энергетическими средствами в условиях сельскохозяйственного производства.

Монография рассчитана на научных работников, техническую и творческую интеллигенцию, студентов, фермеров и работников сельскохозяйственного производства.

© **И.Б. Вороновский, 2016**

© **Таврический государственный агротехнологический университет, 2016**

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДЕСЛОВИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1.....	12
СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	12
1.1. Анализ запыленности воздуха технологической средой и ее влияние на загрязненность дизельного топлива.....	12
1.2. Анализ влияния механических примесей и воды на ресурс узлов топливной аппаратуры и производительность сельскохозяйственной техники .....	15
1.3. Анализ методов и средств очистки дизельного топлива .....	19
Выводы.....	23
РАЗДЕЛ 2.....	37
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОЦЕССА ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ .....	37
2.2. Влияние схем соединения фильтров на надежность топливных систем дизелей машинно-тракторных агрегатов .....	48
2.3. Математическое моделирование влияния загрязненности топлива на функциональные характеристики машинно-тракторных агрегатов .....	53
2.4. Теоретическая оценка изменения функциональных характеристик машинно- тракторных агрегатов при различных уровнях загрязненности топлива технологической средой.....	61
Выводы.....	49
РАЗДЕЛ 3.....	50
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПОРИСТЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ.....	50
3.1. Оценка обезвоживания дизельного топлива методом гравитационного отстаивания ....	50
3.3. Оценка эффективности обезвоживания дизельных топлив с помощью пористых перегородок .....	121
Выводы.....	125
РАЗДЕЛ 4.....	111
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ, КОАГУЛИРУЮЩИХ И ВОДООТТАЛКИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ ПЕРЕГОРОДОК .....	111
4.1. Нормативная документация, методы и методики проведения экспериментальных исследований .....	111
4.3. Экспериментальные исследования коагулирующих свойств пористых перегородок...	119
4.4. Экспериментальные исследования водоотталкивающих свойств перегородок.....	132
Выводы.....	142
РАЗДЕЛ 5.....	147
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ТОПЛИВА .....	147
5.1. Результаты эксплуатационных испытаний воздушных фильтров заливной горловины топливных баков тракторов и комбайнов.....	147
5.2. Эксплуатационные испытания фильтров-водоотделителей.....	149
5.3. Техничко-экономическая оценка эффективности совершенствования системы очистки топлива.....	161
Выводы.....	164
ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	160
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	160
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	171

## ПРЕДЕСЛОВИЕ

В настоящее время в сельском хозяйстве Украины используется около полумиллиона тракторов и комбайнов, а суммарная мощность двигателей – порядка десяти миллионов киловатт.

Структура парка – преобладание машин тягового класса 1,4 и выше. Средняя мощность двигателей 58 – 66 кВт и эта тенденция роста мощности будет продолжаться, что соответствует мировому опыту использования. При этом ресурс дизельных двигателей возрастает, а удельный расход топлива снижается до 180...220 г/кВт·ч.

Экономное расходование топливно-энергетических, сырьевых и других материальных ресурсов является неперенным и важнейшим условием эффективного развития АПК Украины. Особенно важна проблема рационального использования нефтепродуктов. Сельское хозяйство является крупнейшим потребителем нефтепродуктов. Ежегодно в нем расходуется свыше 7 млн. т дизельного топлива и 4,5 млн. т автомобильного бензина.

Одновременно с ростом энергонасыщенности отраслей АПК значительно возрастает потребность в качественных нефтепродуктах.

Согласно нормативной документации дизельное топливо не должно содержать механических примесей и воды. Но увеличение количества механических примесей и воды наблюдается на всем пути следования топлива. Механические примеси и вода, попадающие в дизельное топливо, вызывают износ прецизионных пар топливного насоса высокого давления (ТНВД), загрязнение его микроорганизмами, ускоряют процесс формирования и агрегатизации загрязнений, что снижает ресурс фильтров тонкой очистки и является причиной других неисправностей.

Основными источниками загрязнения дизельного топлива в период хранения и эксплуатации является атмосферная влага и пыль. Поэтому, защита и очистка топлива в процессе хранения, заправки и эксплуатации является необходимым условием для сохранения его качества, снижения расхода, а, следовательно, повышения надежности и долговечности топливных систем мобильной сельскохозяйственной техники. При этом, чем выше эффективность очистки и обезвоживания, тем выше производительность с/х техники.

Данная проблема еще более усугубляется тем, что в средствах заправки, а также в двигателях мобильной сельскохозяйственной техники применяются устаревшие и несовершенные средства очистки. Практически отсутствуют современные высокоэффективные средства обезвоживания топлив. Опыт эксплуатации показывает, что около 70% неисправностей, возникающих в дизельных двигателях из-за высокой загрязненности топлив, приходится на систему питания, стоимость которой превышает 1/3 стоимости двигателя.

Надежность и долговечность дизельных двигателей мобильной сельскохозяйственной техники в значительной степени определяется эффективной очисткой топлив от загрязнений и в первую очередь от воды и механических примесей. Эта проблема актуальна для всех двигателей внутреннего сгорания, но особенно остро она стоит в сельскохозяйственном производстве, где условия для загрязнения топлив наиболее благоприятны.

*Объект исследования* – процесс влияния загрязненности топлива технологической средой на надежность, производительность и экономичность машинно-тракторных агрегатов.

В данной работе проведены исследования закономерностей повышения эффективности эксплуатации МТА в условиях запыленности воздуха технологической средой.

При исследовании использовались количественный и дисперсный анализ состава загрязнений дизельного топлива. Теоретические и экспериментальные исследования процесса обезвоживания базировались на положениях теории вероятности и математической статистики. Экспериментальные исследования проводились по общепринятым методикам и предусматривали использование планирования многофакторного эксперимента. Обработка

исходных данных осуществлялась с использованием теории вероятности и математической статистики, регрессионного, а также корреляционного анализов.

*Научная новизна полученных результатов.*

1. Получила дальнейшее развитие теория графов при прогнозировании надежности топливных систем сельскохозяйственных энергетических средств. А именно, установлено, что последовательное включение в систему фильтров грубой и тонкой очистки эффективнее (вероятность исправного состояния  $p=0,835$ ), чем параллельное (вероятность исправного состояния  $p=0,70$ ), а наиболее рациональным путем повышения надежности топливных систем является применение высокоэффективных фильтров-водоотделителей.

2. Впервые получены зависимости влияния различных размерных групп механических примесей и их концентраций в топливе на цикловую подачу топлива и эффективную мощность дизеля. Установлена наиболее «опасная» размерная группа и ее концентрация, при которой эффективная мощность дизеля уменьшается до 25%.

3. Получило дальнейшее развитие изучение закономерностей изменения производительности и расхода топлива энергетическим средством МТА при выполнении различных технологических операций. А именно, установлено, что снижение мощности до 25 % приводит к увеличению сроков полевых работ на 5,1...5,3 % при одновременном увеличении расхода топлива на 5,0...6,8 % по каждой технологической операции. С расчета на 100 га обрабатываемой площади расход топлива увеличивается на 283 кг.

4. Впервые получены экспериментальные зависимости свойств многослойных фильтрующих, коагулирующих и водоотталкивающих перегородок из различных материалов, которые позволили обосновать структуру пористых перегородок для высокоэффективных фильтров-водоотделителей, а также рассчитать их параметры с учетом уровня загрязненности дизельного топлива технологической средой в условиях сельскохозяйственного производства.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена проведенными математическим моделированием, лабораторными и эксплуатационными испытаниями различных структур пористых фильтровальных материалов. Достоверность полученных результатов подтверждена согласованностью теоретических и экспериментальных данных, а также тем, что экспериментальные результаты имеют физическое объяснение и не противоречат ранее полученным зависимостям.

Применение системы очистки топлив, включающей использование разработанных фильтров-водоотделителей, а также воздушного фильтра пробки заправочной горловины топливных баков позволяет снизить уровень содержания воды в топливе, находящемся в баке, до 0,0032%, а механических примесей до 0,0012%.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны конструкции фильтра-водоотделителя для топливораздаточных колонок, фильтра-водоотделителя для топливных систем дизелей и пробки заправочной горловины топливного бака с воздушным фильтром. На разработанные конструкции фильтров получены 5 патентов Украины на изобретения и полезную модель.

Автор искренне благодарен за научную школу Стефановскому Б.С., Серому И.С., Жулдыбину Е.Н., Дидуру В.А., Войтову В.А.

## РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Анализ запыленности воздуха технологической средой и ее влияние на загрязненность дизельного топлива

Проблеме повышения чистоты топлив в системах питания тракторов и комбайнов посвящены работы М.А. Григорьева, Л.А. Емельянова, А.И. Селиванова, К.В. Рыбакова, Я.Б. Черткова, Т.П. Карпенкиной, В.А. Дидура, В.П. Коваленко, С.В. Путинцева, Ю.В. Дубского, Г.Ф. Большакова, А.И. Руденко, а также зарубежных исследователей [1-45].

В этих работах отмечается высокая загрязненность дизельного топлива в баках тракторов и комбайнов в процессе сельскохозяйственного производства и ее отрицательное влияние на работу топливной аппаратуры дизелей. Авторы указывают, что отрицательное влияние на работу топливной аппаратуры и фильтроэлементов наряду с механическими загрязнениями оказывает и свободная вода. Наличие свободной воды в топливе оказывает отрицательное влияние на его качество и свойства.

В работах [7, 31] отмечается, что загрязнения дизельного топлива представляют собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из частиц органического и неорганического происхождения, пузырьков газа, микроорганизмов, а также микрокапель воды.

Механические загрязнения представляют собой твердые частицы неорганического и органического происхождения. Источниками механических загрязнений являются: частицы кварца; атмосферная пыль; продукты коррозии запорной арматуры, топливных баков и емкостей; смолистые отложения вокруг твердых частиц, образующиеся в результате термоокисления нестабильных углеводородов; продукты износа агрегатов системы топливоподачи, а также разнообразные конгломераты, возникающие на поверхности микрокапель воды [6, 18, 46, 47].

Обеспечить необходимую чистоту дизельных топлив возможно лишь в том случае, если на всем пути их следования от нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) до двигателя будет обеспечено устранение источников образования загрязнений и их постоянное удаление из топлив. Для этого необходимо знание уровня загрязненности топлив, характера загрязнений, причин и источников образования загрязнений и своевременное применение средств и способов предотвращения загрязнений.

Проведенные исследования показали, что основным фактором, влияющим на надежность топливной аппаратуры тракторных и комбайновых двигателей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, является повышенная загрязненность топлив водой и механическими примесями [3, 48].

Авторы [18, 46, 49] считают, что дизельное топливо, отгружаемое с НПЗ, всегда содержит некоторое количество загрязнений, которые образуются в результате технологического процесса при его производстве.

По некоторым данным [18, 27, 49], исходная загрязненность дизельного топлива механическими примесями на нефтеперерабатывающих заводах составляет в среднем 0,0004% (масс.). При транспортировании топлив от НПЗ к нефтебазам, уровень загрязненности возрастает, количество механических примесей и свободной воды, как правило, удваивается на каждом этапе перевозки топлива.

Л.А. Емельянов [6], исследуя загрязненность дизельных топлив при транспортировке, пришел к выводу, что содержание загрязнений в нем составляет 0,02 – 0,03% (масс.).

Некоторые авторы, исследуя загрязненность дизельных топлив в условиях южной климатической зоны, пришли к выводу, что топливо, доставляемое на склад ГСМ хозяйства, содержит 0,0115 – 0,0148% (масс.) загрязнений. При нарушении правил хранения топлива в наземных резервуарах хозяйства, содержание загрязнений в нем достигает 0,0649% (масс.),

что в 5 раз выше загрязненности топлив в средней климатической зоне, где она достигает 0,0126% (масс.) [23, 49].

Исследованиями [46] установлено, что загрязненность топлива механическими примесями возрастает от 0,006% (масс.) в резервуаре склада, до 0,025% (масс.) в топливном баке.

По результатам исследований А.И. Селиванова, дизельные топлива, получаемые предприятиями АПК от поставщиков, уже содержат не менее 0,01 – 0,12% (масс.) загрязнений [7].

По данным К.В. Рыбакова и А.И. Руденко [31], загрязненность дизельных топлив механическими примесями в условиях сельского хозяйства составляет 0,0005 – 0,063% (масс.), а размер частиц при этом колеблется от 1 мкм до 500 мкм.

Р.М. Баширов, В.Г. Кислов и другие авторы [47] приводят сведения, что в баках тракторов и комбайнов содержание механических примесей составляет 200-300 г на тонну, а в некоторых случаях эта величина достигает 650 г на тонну.

По данным Е.А. Путинцева [27], среднее содержание загрязнений в баках не превышает 0,008 – 0,009% (масс.). Минимальное содержание загрязнений в топливе составляет 0,002% (масс.), максимальное – более 0,025% (масс.).

Е.А. Путинцев делает вывод о том, что среднее содержание загрязнений в баке зависит от условий и типа выполняемых работ и составляет: при прикатывании – 0,065% (масс.); посеве зерновых культур и трав – 0,048% (масс.); лущении – 0,038% (масс.) и культивации пара – 0,0294% (масс.).

При работе дизеля в условиях, когда запыленность воздуха составляет 1 – 2,5 г/м<sup>3</sup>, содержание загрязнений в баке трактора возрастает в 2-3 раза и достигает 0,25% (масс.) [18].

По данным зарубежных источников [33-45] загрязненность топлива в условиях Англии составляет 0,00035 (масс.), в условиях Африки – около 0,025% (масс.). Среднее содержание загрязнений по этим же данным – 0,005% (масс.).

Исследованиями [20] установлено, что загрязненность дизельного топлива при заправке в летний период составляет 0,006%, а зимой – 0,0034% (масс.) [21, 49].

Т.П. Карпекина [22] свидетельствует, что загрязненность заправляемого топлива составляет 0,0018% зимой и 0,0062% (масс.) летом при размере частиц до 60 мкм. В баках топливо подвергается дальнейшему загрязнению за счет остаточного топлива, продуктов коррозии, атмосферной пыли и влаги, поступающих в баки по мере расходования топлива и при колебании температуры [21].

При этом содержание загрязнений в баках возрастает до 0,0091% с размерами частиц до 70 мкм, а к концу рабочего дня достигает 0,026% с размерами частиц более 80 мкм. Топливо, поступающее к топливным насосам высокого давления (ТНВД) после очистки фильтрами грубой и тонкой очистки, содержит до 0,098% (масс.) загрязнений с максимальным размером частиц более 80 мкм [21].

Наряду с дисперсным составом загрязнений дизельного топлива важен их элементный состав. Исследования в этом направлении свидетельствуют, что для различных районов он весьма неоднороден. При этом основными элементами загрязнений являются двуокись кремния и окись алюминия (табл. 1.1) [23].

Таблица 1.1

Химический состав атмосферной пыли по данным [23]

Вещества, входящие в состав пыли	Количество, % (масс.)			
	Московская обл.	Одесская обл.	Полтавская обл.	Запорожская обл.
Двуокись кремния	71,3-72,4	68,0	82,55	70,90-79,15
Окись железа	3,3-5,6	-	2,42	1,8-2,3
Закись железа	0,12-0,20	-	0,1	0,12-0,60
Окись алюминия	8,54-10,80	14,0	7,8	8,80-9,35
Окись магния	1,13	2,0	0,64	1,7
Окись кальция	0,91-1,89	4,0	1,25	2,49-5,40

В работах [50-53] отмечается, что основным источником обводнения топлив является атмосферная влага, которая содержится в воздухе в виде водяных паров. Между водой, растворенной в топливе, и атмосферной влагой существует динамическое равновесие, которое наступает очень быстро после того, как топливо вступило в контакт с влажным воздухом [50].

Вода является постоянным спутником дизельных топлив. В топливах, отгружаемых с НПЗ, содержится незначительное количество воды, однако в процессе транспортирования, хранения, заправки и применения дизельных топлив содержание воды в нем неуклонно возрастает. При этом вода в дизельных топливах может находиться в различном физическом состоянии [17, 53].

Растворенная вода практически всегда находится в дизельном топливе и представляет собой облако сверхмелчайших частиц, которые можно увидеть только при охлаждении топлива. Топлива, представляющие собой смесь различных углеводородов, способны растворять определенное количество воды. Это объясняется разницей в строении молекул этих веществ.

Растворенная в топливе вода не диссоциирована на ионы, а находится в виде отдельных молекул, которые располагаются между молекулами углеводородов вплоть до концентрации насыщения [50].

На растворимость воды в топливах оказывают влияние в первую очередь температура, влажность воздуха и давление [54]. Их повышение приводит к резкому увеличению концентрации воды в топливе.

Содержание растворенной воды в топливе, отобранной из одной и той же емкости через небольшие промежутки времени, изменяется в довольно широких пределах. Это свидетельствует об относительно высокой скорости изменения содержания воды, растворенной в топливе. По данным авторов [9, 22, 55] дизельные топлива имеют следующие пределы растворимости воды: при  $-10^{\circ}\text{C}$  – 0,0021%, при  $+10^{\circ}\text{C}$  – 0,0024-0,0037% и при  $+30^{\circ}\text{C}$  – 0,0104-0,018%.

Авторами работ [23, 46, 47] делается вывод, что удалять из топлива растворенную воду практически не имеет смысла, так как за короткий промежуток времени, оно вновь насытится атмосферной влагой.

В топливах накапливается значительное количество свободной воды в процессе многократного перехода растворенной воды в эмульсионную и обратно. Свободная вода может находиться в топливе в виде эмульсии молочного цвета; отдельных капель, осаждающихся в топливе, и подтоварной воды (отстойной), скапливающейся на дне бака или резервуара. В работе [5] исследован механизм накопления воды в баках машин.

При исследовании загрязненности дизельных топлив в условиях эксплуатации автомобилей ряд авторов [11, 49, 56] отмечают, что наряду с загрязнениями неорганического и органического происхождения в топливе содержится значительное количество свободной воды, присутствие которой оказывает отрицательное влияние на работу системы топливоподачи и ТНВД.

Наиболее характерной причиной образования в топливах дисперсной фазы является конденсационное выпадение капель из растворенной в топливе воды при его охлаждении. Концентрация и дисперсный состав эмульсионной воды зависят от скорости и степени охлаждения, а также от соотношения газовой и жидкой фаз топливного бака. При быстром охлаждении топлив избыток растворенной воды выделяется в виде второй фазы [18, 50, 53].

Вторая причина, вызывающая появление свободной воды – конденсация водяного пара из влажного воздуха на поверхности охлажденного топлива. При повышении температуры топлива от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$  количество воды, которое может выделиться из воздуха достигает  $0,1 - 35 \text{ г/м}^3$ , при этом соответственно, увеличивается и содержание воды в топливе [55].



Третья причина образования эмульсионной воды – механическое диспергирование свободной воды перекачивающими насосами [9, 55].

Водо-топливные эмульсии, образующиеся при этом, подразделяются условно на грубо- и тонкодисперсные (устойчивые и неустойчивые). Устойчивые эмульсии – мелкие капли воды, находящиеся в топливе во взвешенном состоянии и осаждаются очень медленно. Неустойчивые эмульсии – крупные капли воды, которые под влиянием массы и взаимодействия между собой укрупняются и осаждаются на дно бака.

Г.Ф. Большаковым установлено, что при наличии гетероорганических соединений вода в топливе присутствует в виде капель со средним диаметром 30 – 50 мкм [30].

Если происходит захват подтоварной воды при перекачивании топлив насосами, то в результате она дробится и переходит в эмульсионное состояние. В ходе фотометрических и седиментометрических исследований установлено, что размеры капель воды в эмульсиях не превышают 35 мкм, при этом примерно 60% общего количества воды находится в виде капель размером 7 – 15 мкм [9]. Эмульсии, образованные конденсационным путем, при изменении температуры, давления, влажности и т.д. – наиболее часто встречающиеся. Для таких эмульсий характерны капли размером 5 – 11 мкм, причем встречаются капли диаметром менее 1 мкм [9, 55].

Вследствие охлаждения топлива и отрицательной температуры воздуха, вода выпадающая из топлива, будет кристаллизоваться в виде вытянутых игл, имеющих большую поверхность и малую плотность, поэтому кристаллы могут долго удерживаться в топливе во взвешенном состоянии.

Во время заправки топливных баков при низких температурах создаются благоприятные условия для переохлаждения капель воды, выделившихся из топлива. При наличии свободной воды в топливе, имеющего положительную температуру, в случае охлаждения его до отрицательных температур образуются кристаллы льда [54]. Размеры кристаллов будут увеличиваться до тех пор, пока не испаряться все капли воды, содержащиеся в топливе.

Из этого следует, что вода в топливе может находиться в различном состоянии: растворенном, свободном или в виде кристаллов льда. Процесс неоднократного перехода воды из одного состояния в другое приводит к накоплению ее в баке во время эксплуатации двигателя. Поэтому фильтры грубой и тонкой очистки (ФГО и ФТО) должны удалять из топлива, помимо механических примесей также и воду, которая в значительной степени влияет на их работоспособность.

На основании проведенного анализа загрязненности дизельного топлива водой и механическими примесями в условиях с/х производства установлено, что содержание воды и механических примесей в баках тракторов и комбайнов зависит от вида выполняемых работ и составляет 0,029...0,065% (масс.). Причинами такого состояния является эффект «дыхания» бака, колебание температуры окружающего воздуха, наличие воздушного объема в баке при выработке топлива. Для удаления механических примесей и воды из топлива, которые в условиях сельскохозяйственного производства присутствуют в повышенных концентрациях, необходимы теоретические исследования, которые позволяют разработать высокоэффективные средства очистки топлива, что позволит устранить причины снижения производительности и увеличения расхода топлива с/х техникой при выполнении технологических операций.

## **1.2. Анализ влияния механических примесей и воды на ресурс узлов топливной аппаратуры и производительность сельскохозяйственной техники**

В процессе эксплуатации установлено, что значительная часть неисправностей, возникающих в дизелях, приходится на топливную аппаратуру вследствие высокой загрязненности и обводненности топлив [7, 47, 48, 58-62].

Так в двигателе ЯМЗ-238 НБ на топливную аппаратуру приходится более 25% отказов, в двигателе Д-240 – 50%, а в двигателе СМД-60 – 30%, констатируют авторы [47, 48].

Распределение отказов по отдельным узлам топливной аппаратуры следующее: в двигателях Д-240 около 60% приходится на форсунки, 20% на фильтры и 20% на нарушение параметров регулировки. В двигателях СМД-60 – почти половина отказов приходится на фильтры, 9-17% на форсунки, 14-31% на топливную аппаратуру и до 17% на нарушение регулировок. В насосах распределительного типа 28% дефектов приходится на износ и заедание плунжерных пар, 15% - на заедание и поломку привода дозатора, около 40% приходится на фильтры, а остальное на нарушение регулировок [47, 48].

Присутствие эмульсионной воды значительно снижает работоспособность фильтрующих элементов тонкой очистки и даже вызывает их набухание и разрушение. В этом случае фильтр не работает, что приводит к выходу из строя топливной аппаратуры.

Для выяснения причин наиболее частых отказов топливных насосов, на кафедре «Трактора и автомобили» Литовской сельскохозяйственной академии в течение ряда лет проводились эксплуатационные наблюдения за их работой. Было установлено [63], что на долю эксплуатационных отказов от общего их количества в среднем приходится 26,7...28,3%. В основном они происходят из-за попадания воды в дизельное топливо (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Причины отказов топливных насосов [63]**

Причина отказов	Распределение отказов		
	Тракторных насосов, находившихся в эксплуатации	Насосов, поступивших в ремонт	
		Тракторных	Комбайновых
Эксплуатационные отказы	28,3	26,7	45,1
<b>В том числе из-за:</b>			
- наличия воды в топливе	47,1	40,5	25,9
- загрязнения топлива	11,8	12,2	4,9
- нарушения смазки	29,3	23,6	21,8
- неудовлетворительного хранения	-	21,5	46,5
- других причин	11,8	2,2	0,9

При наличии воды в топливе из-за коррозии происходит заклинивание плунжера в гильзе, поршня подкачивающего насоса, валика привода дозатора (табл. 1.3) [63]. При заклинивании плунжера ломаются шестерни привода, изгибается валик регулятора, то есть топливный насос практически выходит из строя.

Кроме того, наличие воды в стандартном топливе, содержащем смолистые соединения, даже в пределах ГОСТ 17216-71, оказывает сильное влияние на эффективность фильтрации топлива, так как за счет собирательной способности капелек воды на их поверхности удерживаются органические загрязнители, которые, достигнув относительно больших размеров, способны закрывать поры фильтрующего материала [64].

Таблица 1.3

**Причины отказов топливной аппаратуры [63]**

Наименование отказа	Количество, %	Причина
Заклинивание плунжера	26,7	Вода или грязь в топливе
Заклинивание поршня подкачивающего насоса	13,3	Вода в топливе
Заклинивание валика привода дозатора	12,2	Вода или грязь в топливе
Нарушение работы двигателя на холостом ходу	6,7	Вода в топливе

Преждевременный износ подшипников и других деталей насоса	6,1	Отсутствие масла
Полная коррозия насоса	13,2	Загрязненность масла
Другие	11,8	Ослабление затяжек гаек

Также вода оказывает отрицательное влияние на энергетические свойства топлива. Наличие в топливе свободной воды приводит к неравномерному распылению топлива. В результате испарения воды снижается температура в камере сгорания, что ухудшает процесс испарения самого топлива [65]. При увеличении обводненности топлива электростатический заряд в нем возрастает в 10...15 раз по сравнению с обезвоженным топливом [50], что может привести к взрыву паро-воздушной смеси.

По данным ЦНИТА, в процессе эксплуатации 20-28% элементов ЭТФ-3 подвергается набуханию и деформации вследствие наличия воды в топливе [66, 67].

При обследовании фильтрующих элементов тонкой очистки тракторов в эксплуатации, Ю.В. Дубским было установлено [28], что более 40% фильтрующих элементов фильтров было деформировано из-за наличия свободной воды в топливе.

Исследуя влияние различных загрязнений на работоспособность фильтроэлементов тонкой очистки, С.П. Чесаков пришел к выводу, что интенсивность их забивки в присутствии воды значительно возрастает. Это приводит к деформации элементов, увеличению размера пор и пропуску частиц загрязнений [68].

По утверждению автора [66], увеличение коэффициента фильтруемости происходит за счет наличия эмульсионной воды. Так при содержании 0,032% (масс.) воды, коэффициент фильтруемости возрастает с 1,7 до 3,4; а при 0,05% (масс.) воды – до 8,4. Ресурс фильтрующих элементов тонкой очистки снижается при этом до 200-300 моточасов, при этом согласно с ГОСТ 14146-79 он составляет 1500 моточасов.

Дизельное топливо, содержащее 0,01% воды и следы мыл нафтеновых кислот, имеет коэффициент фильтруемости более 3, установлено исследованиями [57].

Присутствие воды в топливах значительно ухудшает их фильтруемость при низких температурах, что приводит к забивке фильтров кристаллами льда. Это вызывает частичные нарушения или даже полное прекращение подачи топлива в двигатель [69].

В работах [50, 69] отражено исследование процесса забивки фильтров тонкой очистки кристаллами льда. Таким образом, присутствие воды в топливе приводит к нарушению нормальной работы фильтров тонкой очистки. Следовательно, для улучшения их работы необходимо более полное отделение воды фильтрами грубой очистки или же фильтрами-водоотделителями.

Энергетические свойства топлив ухудшаются в результате присутствия в них воды. Наличие эмульсионной воды в топливах приводит к его неравномерному распыливанию, ухудшению процесса испарения, так как вода, испаряясь, снижает температуру в камере сгорания дизеля [65].

Скорость коррозии значительно возрастает при наличии воды в топливе и, особенно, в случае выделения воды в отдельную фазу. Накапливающиеся в воде агрессивные свойства, в значительной степени склонны к растворению защитных пленок на поверхности металла. Коррозионные процессы протекают при этом по химическому, электрохимическому и биологическому механизму [58, 62, 70].

При непосредственном химическом взаимодействии между металлом и коррозионной средой возникает химическая коррозия. Присутствие свободной воды в топливе приводит к биохимической коррозии, которая происходит при активном воздействии микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности. Присутствие микроорганизмов усиливает электрохимическую коррозию в результате усиления аэрации и концентрации кислорода на металлической поверхности, где происходит скопление микроорганизмов. Склонность микроорганизмов разрушать защитные пленки, образующиеся на поверхности металлов,

способствует ускорению протекания коррозии, при этом обнажается поверхность металла и интенсифицируется электрохимическая и микробиологическая коррозия.

Основную опасность коррозии топливных баков представляет вода, которая присутствует в топливе в виде отдельной фазы, отмечают авторы [70].

В результате проведенных исследований [62] установлено, что с присутствием воды связано возрастание коррозионной агрессивности топлив. В сухом топливе коррозии практически не наблюдается. Легированные стали при нормальной температуре в обводненном топливе начинают корродировать через 2-3 суток, а низколегированные стали уже корродируют через несколько часов.

Значительно ухудшаются противозадирные и противоизносные свойства при наличии в топливе эмульсионной воды. В первом случае имеют место разрывы топливной пленки и возникновение сухого трения, а во втором играет роль снижения вязкости топлива.

В работе [59] установлено, что противоизносные свойства топлив снижаются практически линейно с ухудшением его вязкости и повышением содержания воды в нем. Изменение вязкости дизельных топлив в пределах норм может привести к ухудшению их противоизносных свойств в 3 раза, а увеличение содержания воды до 1% ухудшает их работу в 3 раза.

В ряде работ, проведенных по исследованию износа прецизионных пар топливных насосов высокого давления, установлено, что при увеличении воды в топливе значительно повышается износ распылителей, причиной которого является совместное воздействие трения и электрохимической коррозии [10, 59].

В работах В.А. Дидура и В.В. Дидура [24, 71-73] разработана математическая модель процесса изнашивания плунжерных пар топливной аппаратуры. На основании моделирования авторами обоснованы технические требования к загрязненности дизельного топлива в условиях с/х производства. По мнению авторов работы [72] для обеспечения заданного ресурса плунжерных пар предельная норма загрязнений не должна превышать 25г/т для частиц размером 4...6 мкм, 62 г/т для частиц размером 8...10 мкм и 100 г/т для частиц более 15 мкм. В работе [24] делается вывод, что использование очищенного топлива обеспечивает увеличение срока замены топливных фильтров тонкой очистки с 917 моточасов до 3000 моточасов. Ресурс плунжерных пар ТНВД при этих условиях увеличивается с 960 моточасов до 2370 моточасов. Однако в разработанной математической модели изнашивания плунжерных пар не учитывается износ за счет действия абразивных частиц, размер которых превышает размер зазора между плунжером и втулкой. Как показывает практика эксплуатации такая размерная группа, за счет дробления в районе впускных окон, увеличивает износ в большей степени, чем предполагалось в работах [24, 72]. Наличие данных моделирования о таких явлениях позволит уточнить требования к фильтрам грубой очистки и тонкой очистки топлива.

Анализ литературных источников по принципу построения топливных систем и их надежности [79-85] показал, что существуют различные схемы включения фильтров в систему. Наибольшее распространение получили схемы с последовательным включением, однако на тракторах мощностью 150 кВт и более фильтры тонкой очистки включают параллельно. Например, фирма «Bosch» на дизелях грузовых автомобилей применяет три фильтра: два соединены параллельно и дополнительно (фильтр безопасности) последовательно. Учитывая то, что с/х техника работает в условиях повышенной запыленности воздуха, возникает необходимость в дальнейших исследованиях по повышению надежности топливных систем.

В работах [24, 71-73] на базе трактора Т-150К показано, что использование очищенного топлива увеличивает производительность на пахоте в 1,92 раза с уменьшением погектарного расхода топлива до 1,76 раза.

Из представленного анализа следует, что техническое состояние топливной аппаратуры влияет на эффективную мощность дизеля, а, следовательно, и

производительность машинно-тракторных агрегатов с учетом погектарного расхода топлива, которые оцениваются согласно нормативной документации [74-78].

На основании выполненного анализа влияния механических примесей и воды на ресурс узлов топливной аппаратуры и производительность с/х техники можно сделать следующие выводы. Для повышения эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в условиях повышенной запыленности воздуха и загрязненности топлива необходимы дальнейшие исследования по повышению надежности топливных систем за счет рационального включения новых высокоэффективных фильтров. В математическом моделировании влияния загрязненности топлива на цикловую подачу и эффективную мощность дизелей, что даст возможность установить «опасную» размерную группу загрязнений, а, следовательно, и требования к фильтрам. В теоретической оценке изменения производительности и расхода топлива машинно-тракторными агрегатами в процессе сельскохозяйственного производства при различных уровнях загрязненности топлива.

### 1.3. Анализ методов и средств очистки дизельного топлива

Для удаления воды из топлив в настоящее время наибольшее применение нашли следующие методы обезвоживания: физические, химические и физико-химические [25, 86, 87].

Физические методы обезвоживания делятся на три большие группы: обезвоживание под действием силовых полей, обезвоживание с применением пористых перегородок (фильтрование), а также путем использования теплофизических и массообменных явлений. Принцип действия физических методов обезвоживания в силовых полях (гравитационном, центробежном, электрическом и т.д.) основан на укрупнении микрокапель под действием сил поля и последующее их выпадение из объема или потока топлива [49, 84, 27, 25, 88, 89].

Фильтрационные методы обезвоживания топлив основаны на использовании для отделения воды пористых перегородок, которые могут изготавливаться из водоотталкивающих перегородок, водопоглощающих материалов, а также из сочетания гидрофильных и гидрофобных волокон [28, 68].

Из теплофизических методов обезвоживания топлив наиболее известным является нагревание и последующее выпаривание свободной воды при атмосферном давлении, а иногда под вакуумом (для интенсификации процесса испарения). Иногда применяется метод обезвоживания топлив путем массообмена [90], основанный на явлении динамического равновесия между водой, эмульгированной и растворенной в топливе, и водой, содержащейся в контактирующем с ним газе. При понижении температуры топлива и относительной влажности газа происходит переход влаги из топлива в газ.

Химические методы обезвоживания основаны на химических реакциях, протекающих между содержащейся в топливе водой и выводимыми из них реагентами (карбидами и оксидами металлов), с последующим удалением образующихся при этом шлаков.

Физико-химические методы обезвоживания [91] основываются главным образом на способности некоторых веществ поглощать из топлив эмульгированную и растворенную воду. К этому методу относятся: осушка топлив в цеолитах и обезвоживание в вакууме.

На дизельных двигателях мобильной сельскохозяйственной техники, для обезвоживания топлив нашли применение в основном два метода: гравитационное отстаивание и фильтрация через пористые перегородки [70, 57, 92].

Гравитационное отстаивание является одним из наиболее простых физических способов обезвоживания топлив. Этот способ получил широкое распространение для очистки топлив от воды и механических примесей в резервуарах при хранении [70], а также при грубой очистке топлива в системе топливоподачи дизельных двигателей. Но этот метод недостаточно эффективен, так как при его использовании не соблюдаются требования, предъявляемые к дизельным топливам существующей нормативной документацией.

В настоящее время широко применяется метод обезвоживания топлив пористыми перегородками, как наиболее эффективный и удовлетворяющий требованиям ГОСТ и ДСТУ, предъявляемым к дизельным топливам [4, 12, 16, 93].

Обезвоживание топлив методом фильтрации заключается в пропускании обводненного нефтепродукта через пористую перегородку, на которой отделяются микрокапли свободной воды.

Этот метод широко используется в современных фильтрах-сепараторах и фильтрах-водоотделителях. По своей конструкции они делятся на три типа: одноступенчатые, двухступенчатые и трехступенчатые [4, 12, 16].

Материалы, применяемые в фильтрах-сепараторах и фильтрах-водоотделителях для обезвоживания топлив, делятся на: гидрофильные, обладающие высокой поверхностной энергией и гидрофобные, обладающие незначительной поверхностной энергией. Кроме того, в некоторых случаях применяют материалы, состоящие из смеси гидрофильных и гидрофобных волокон [13, 91, 94].

К гидрофильным материалам относятся все волокна с сильно выраженным молекулярным взаимодействием: хлопок и вискоза, целлюлоза, стекловолокна и бумага (не пропитанная смолами) и т.д. К гидрофобным материалам относятся: тефлон, полиэтилен, хлорин, нитрон, лавсан, капрон, бумага (пропитанная водоотталкивающим составом).

Фильтрационные материалы должны обладать оптимальной смачиваемостью, достаточной, чтобы происходило вытеснение водой топлива с поверхности волокон, умеренным сцеплением волокна с водой, которое позволяло бы каплям отрываться от волокон.

Кроме того, они должны удовлетворять следующим требованиям: обладать температурной стойкостью, не оказывать влияния на свойства топлив и не загрязнять их, иметь малое гидравлическое сопротивление и высокий ресурс работы, изготавливаться из недефицитного сырья.

Удовлетворение всех этих требований обычно не представляется возможным, поэтому для улучшения показателей фильтрующей и коагулирующей перегородки при ее изготовлении применяется сочетание нескольких материалов [94].

В большинстве случаев, в качестве коагулирующей среды в водоотделяющих элементах применяются стекловолокна, обработанные для придания им гидрофобных свойств различными смолами (формальдегидными, меламиновыми, кремнеорганическими и т.д.) [91].

Стекловолоконистые материалы применяются обычно в виде матов или холста, хотя могут использоваться и не связанные стекловолокна.

Волокна различного диаметра (обычно от 1 до 7 мкм) в коагулирующей перегородке располагаются в порядке возрастания этого показателя, по направлению потока топлива. При этом толщина коагулирующей перегородки, как правило, в пределах от 0,8 до 12,1 мм, а ее объемная плотность составляет 0,375-0,5 кг/м<sup>3</sup> [23].

Исследованиями установлено, что перегородки, состоящие из различных волокон, обладают высокими водоотделяющими свойствами при очистке дизельных топлив от воды [95].

Применение фильтрации для обезвоживания топлив получило широкое распространение, так как этот метод обладает многими преимуществами перед другими методами. При помощи фильтрации можно одновременно удалять из топлив свободную воду и твердые частицы загрязнений. При этом используется только кинетическая энергия потока очищаемого топлива и отсутствует необходимость в использовании какой-либо механической или электрической энергии.

Поэтому, в настоящее время фильтры-водоотделители широко используются для очистки топлив от воды и механических примесей на дизельных двигателях и средствах заправки техники [1, 26, 49].

Другие методы обезвоживания топлив (химические и физико-химические) не нашли применения на двигателях и на топливозаправочных колонках в сельском хозяйстве, и используются в нефтеперерабатывающей промышленности.

За последние 20 лет за рубежом и в отечественной практике для тонкой очистки углеводородных жидкостей от механических примесей и воды делались успешные попытки применения интенсивных электрических полей [96-98]. При этом разработано несколько десятков образцов электроочистителей, которые обладают высокой эффективностью по обеспечению тонкой очистки светлых нефтепродуктов от механических примесей и воды [99, 100].

В работах [15, 20, 59] приводятся результаты исследований по обезвоживанию реактивных топлив в квазипостоянном электрическом поле, и делается вывод о принципиальной возможности обезвоживания не только керосина, но и масел.

Анализ публикаций [96-102] по вопросам электроочистки диэлектрических жидкостей показал перспективность данного направления в вопросе практической реализации очистки от механических примесей воды. Основным недостатком такого подхода является высокая пожароопасность.

Из существующих конструкций фильтров грубой очистки, применяемых на тракторных дизелях, наибольшее распространение получили фильтры-отстойники типа ФГ, изготавливаемые в соответствии с ГОСТ 15048-76.

Очистка топлива в нем осуществляется за счет того, что капли воды, попадая вместе с топливом на распределитель, отбрасываются потоком к стенке, а затем опускаются вниз под действием потока и гравитации под усилитель, откуда удаляется во время очередного технического обслуживания. В стационарных условиях фильтр типа ФГ имеет полноту отсева механических примесей 0,3 – 0,4 и воды 0,8 [94].

Недостатком фильтров этого типа является снижение его эффективности при движении трактора за счет колебаний топлива. Кроме того, как показали проведенные исследования, они практически не разделяют тонкодисперсные эмульсии [12].

Капли воды размером менее 150 мкм не осаждаются в фильтрах-отстойниках и поступают дальше в систему питания двигателя, что является существенным недостатком фильтров этого типа. При этом, как показывает опыт эксплуатации, эффективность работы фильтра снижается по мере накопления воды и загрязнений в отстойной зоне [22].

Фильтры типа ФГ широко применяются на двигателях мобильной сельскохозяйственной техники (МТЗ-80/82, Т-150К, СК-6, КСК-100 и т.д.). По такому же принципу работает фильтр-отстойник фирмы «Bosch» [36]. Топливо подводится в верхнюю часть и стекает в нижнюю по конусному отражателю. При движении потока вниз мелкие капли воды собираются в более крупные и при изменении направления потока эти капли оседают под действием сил тяжести в отстойную зону.

Отличительной особенностью этого фильтра-отстойника является наличие горизонтальной перегородки, которая разделяет рабочую и отстойную зоны, в результате чего повышается эффективность его работы вследствие исключения возможности повторного смешивания отстоя с топливом при движении трактора по пересеченной местности (крены, вибрация и т.д.).

Отстойная зона изготовлена из прозрачного оргстекла, поэтому слив воды производится по мере ее накопления. Аналогичную конструкцию и принцип работы имеет отстойник фирмы «CAV», который носит название сепаратор-седиментр [103].

Фирма «Consolidated Metco» выпускает отстойники-сепараторы, которые нашли широкое применение на двигателях. Выпускается семь моделей сепараторов, которые отличаются габаритными размерами и пропускной способностью. Четыре модели с размерами: высота 0,3 м и диаметр 0,14 м. Три другие модели имеют высоту 0,35 м и диаметр 0,19 м. Все модели оборудованы смотровым окном для наблюдения за уровнем воды. Сепаратор работает следующим образом: топливо подается в верхнюю часть на наклонный диффузор, который имеет грубо обработанную поверхность.

Капельки воды, скатываясь по наклонной плоскости, укрупняются и оседают в отстойную зону, откуда периодически сливаются через кран. По данным фирмы эффективность отделения воды около 97%. Сепаратор имеет те же недостатки, что и описанные конструкции фильтров-отстойников [37].

Английская фирма «Lucas CAV» разработала сепаратор, получивший название «Waterstop», которые обеспечивает автоматическую защиту двигателя от воды в момент, когда ее скопление в корпусе достигает опасного уровня [38]. В корпусе сепаратора «Waterstop» установлен вертикальный электродатчик связанный с сигнальным устройством и поплавков с игольчатым клапаном. Датчик находится внутри корпуса и, когда вода достигает его, цепь замыкается и подается сигнал о необходимости спуска воды. При дальнейшем накоплении воды поплавков перекрывает подачу топлива в двигатель.

Сепараторы «Waterstop» нормально работают при угле наклона до 45°. Нижняя часть корпуса выполнена прозрачной, что позволяет визуальное определить уровень воды. Слив отстоя производится через сливную пробку.

Отмеченные недостатки рассмотренных фильтров-отстойников отсутствуют у так называемых лабиринтных отстойниках типа ОЛ, разработанных в ЦНИТА [92]. По результатам лабораторных исследований лабиринтных отстойников типа ОЛ установлено, что они эффективнее фильтров-отстойников типа ФГ в 1,5 – 2 раза при одинаковой пропускной способности.

Определенный интерес представляет использование для грубой очистки топлива гидроциклонов [104]. Однако гидроциклоны из-за низкой эффективности обезвоживания не используются на двигателях, хотя не исключена возможность их использования в качестве дополнительных очистителей перед фильтрами тонкой очистки для повышения их ресурса.

В качестве фильтров грубой очистки используются также фильтры с сетчатыми и хлопчатобумажными фильтрующими элементами.

Эффективность сетчатых фильтрующих элементов по отделению воды не превышает 48%, по полноте отсева механических примесей – 15% [105].

На двигателях семейства ЯМЗ в качестве фильтра грубой очистки применяется фильтр с хлопчатобумажным фильтрующим элементом. Фильтрующий элемент состоит из сетчатого каркаса, на который навит ворсистый хлопчатобумажный шнур. Существенным недостатком этого фильтра является отсутствие отстойной зоны. По мере накопления воды уменьшается рабочая поверхность фильтрующего элемента, что сказывается на его эффективности и ресурсе работы. Низкая эффективность отделения воды объясняется тем, что вода накапливается в элементе, обладающем высокой гигроскопичностью, а затем потоком топлива выталкивается и поступает дальше к фильтрам тонкой очистки.

В настоящее время в зарубежной практике широкое распространение получили фильтры-водоотделители.

Трехступенчатые фильтры-водоотделители, серии FF – фирмы «Racor» (США) впервые были выпущены в 1971 году. Удаление из топлива воды и крупных частиц загрязнений основано на использовании центробежного эффекта и действия сил поверхностного натяжения, в первой ступени, снабженной конической центрифугой с прорезями. Коническая форма центрифуги уменьшает действие центробежных сил в первой ступени, что приводит к снижению турбулизации потока во второй ступени, где происходит отделение и удаление скоагулировавшихся капель воды. В третьей фильтрующей ступени происходит удаление самых мелких частиц загрязнений и воды [33]. Пропускная способность фильтров водоотделителей в моделях 500 FF и 900 FF, соответственно, 4 л/мин, 6 л/мин.

Для небольших дизельных двигателей фирмой «Racor» разработан фильтр-водоотделитель модели 200 FF «Mirko-Mini», пропускная способность 2 л/мин, габариты 0,10×0,13 м. В отличие от других фильтров-водоотделителей фирмы, очистка производится в двух ступенях. В первой ступени топливо очищается от воды и загрязнений с размером частиц более 30 мкм. Во второй ступени от частиц размером до 1 мкм.



Фильтры-водоотделители фирмы «Racor» применяются на дизельных двигателях в таких странах как США, Япония и Англия.

Другой американской фирмой «CR Industries» разработаны и внедрены фильтры-водоотделители, получившие название «Scavenger». Эффективность очистки от частиц размером более 0,45 мкм составляет 97-99%, от воды 99,7% [34].

Основной частью устройства является гидроциклонная камера, попадая в которую, топливо совместно с вращением совершает поступательное движение вниз. Капли воды и твердые частицы под действием центробежных сил собираются на стенках камеры, скользят вниз, а скапливаются в отстойнике. Частично очищенное топливо проходит через гофрированный фильтрующий элемент, окружающий циклонную камеру, и поступает в топливный насос. Фильтр-водоотделитель одинаково хорошо работает при подаче топлива под давлением и во всасывающей системе [34]. Погружной подогреватель повышает температуру топлива с  $-32^{\circ}\text{C}$  до  $7^{\circ}\text{C}$  в течение 10 минут, что значительно облегчает запуск двигателя в холодное время года. Для предотвращения переполнения отстойника водой в устройстве установлен датчик уровня воды.

Представляют интерес фильтры-сепараторы фирмы «Winston», предназначенные для использования на дизельных двигателях «Каминго». Фильтр-сепаратор имеет цилиндрический корпус, в котором установлен многослойный волокнистый коагулирующий элемент из слоев различной пористости. Снаружи элемент окружен слоем обработанной гофрированной бумаги. Действие фильтра основано на постепенной коалесценции капель воды на стекловолокнах. Поток топлива подается в фильтр по центробежной трубе. Адгезия капель на волокнах продолжается до момента насыщения материала, после чего укрупненные капли по наружной поверхности стекают вниз и собираются в отстойнике. Мелкие, не осевшие капли воды, отражаясь от водоотталкивающего экрана, попадают в отстойник, а затем удаляются через сливную пробку. Фильтр-сепаратор можно использовать в системе, как на линии всасывания, так и на линии нагнетания [35].

Анализ методов и средств очистки дизельного топлива позволяет сделать вывод, что наиболее простым и экономически выгодным путем является применение очистки с помощью пористых перегородок. При этом наиболее перспективными устройствами могут быть фильтры-водоотделители вместо фильтров-отстойников. Анализ литературных источников показал, что на протяжении многих лет зарубежные фирмы проводят исследования в направлении фильтров-водоотделителей. Развитие данного направления с целью применения фильтров-водоотделителей при эксплуатации с/х техники возможно при проведении теоретических исследований эффективности очистки и обезвоживания дизельного топлива на с/х технике. Моделирование процесса обезвоживания с помощью пористых перегородок позволит выбрать перспективные материалы для разработки фильтра-водоотделителя с фильтрующими, коагулирующими и водоотталкивающими свойствами.

## Выводы

Проведенным анализом результатов опубликованных исследований установлено, что среднее содержание загрязнений в баке зависит от условий и типа выполняемых сельскохозяйственных работ и составляет: при прикатывании – 0,065% (масс.); посеве зерновых культур и трав – 0,048% (масс.); лушении – 0,038% (масс.) и культивации пара – 0,029% (масс.), размер частиц колеблется от 1 мкм до 500 мкм. При этом, загрязненность топлива в летний период эксплуатации в два раза выше, чем в зимний. Эксплуатационными испытаниями установлено, что в течение одного рабочего дня за счет «дыхания» бака концентрация загрязнений увеличивается с величины 0,009% (масс.) до 0,026% (масс.) с размерами частиц до 70 мкм. Установлено, что кроме механических примесей в топливе содержится вода в различных физических состояниях в концентрации от 0,012% - до 0,060% (масс.). Механические примеси и вода снижают ресурс фильтров тонкой очистки и топливных насосов высокого давления. Более 25% отказов с/х техники приходится на

топливную аппаратуру, что снижает эффективность эксплуатации. Для устранения причин снижения производительности с/х техники необходимо выполнить теоретические исследования эффективности очистки дизельного топлива и на их базе разработать высокоэффективные средства очистки с учетом уровня запыленности в условиях сельскохозяйственного производства.

На основании изложенного целью данной работы является повышение эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в условиях запыленности воздуха технологической средой путем совершенствования средств очистки и обезвоживания дизельного топлива.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Разработать мероприятия уменьшения влияния запыленности воздуха технологической средой при выполнении машинно-тракторными агрегатами полевых работ на загрязненность дизельного топлива в баке.

2. Обосновать наиболее надежную схему соединения элементов топливной системы энергетических средств и средств заправки и изучить, путем моделирования процесса изнашивания плунжерных пар топливного насоса высокого давления, влияние загрязненности топлива на производительность и экономичность МТА.

3. Обосновать требования к фильтрующим, коагулирующим и водоотталкивающим материалам путем моделирования процесса фильтрации и обезвоживания дизельного топлива пористыми многослойными перегородками.

4. Обосновать конструктивно-технологическую схему фильтра-водоотделителя приспособленного для использования как в системе питания энергетического средства МТА, так и в средствах заправки топлива.

5. Провести эксплуатационные испытания эффективности внедрения разработанных средств очистки дизельного топлива и загрязненного технологической средой воздуха, с оценкой ресурса фильтров-водоотделителей и фильтров тонкой очистки, и разработать рекомендации по техническому обслуживанию энергетических средств МТА.

## РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОЦЕССА ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

### 2.1. Исследование загрязненности дизельных топлив технологической средой при выполнении полевых работ

Условия работы мобильной техники в сельскохозяйственном производстве характеризуются повышенной запыленностью технологической средой и влажностью воздуха. Вследствие этого создаются благоприятные условия для накопления механических загрязнений и воды в топливных баках. Уровень загрязненности топлива в баках в значительной степени определяет ресурс работы фильтрующих элементов и прецизионных узлов топливной аппаратуры.

Загрязненность топлив, как было показано в первом разделе, оказывает существенное влияние на надежность топливной аппаратуры дизелей. Анализ литературных источников свидетельствует о том, что практически отсутствуют данные по загрязненности дизельных топлив при заправке и в системах питания тракторов и комбайнов, эксплуатируемых в сельскохозяйственном производстве.

Для исследования массового и дисперсного состава загрязнений дизельных топлив технологической средой в процессе выполнения полевых работ были отобраны пробы топлива при заправке и из систем питания тракторов. Пробы топлива отбирались в хозяйствах АР Крым и Запорожской области в осенний и летний периоды и подвергали анализу, с целью определения массового содержания загрязнений и их дисперсного состава.

Пробы топлива отбирали при заправке (в потоке), из топливного бака (с уровня забора топлива), после фильтров грубой и тонкой очистки (в потоке), а также при сливе отстоя из баков и корпусов фильтров.

В табл. 2.1 показаны пределы загрязненности топлива в системах питания двигателей, а в табл. 2.2 – дисперсный состав загрязнений в баках тракторов в процессе выполнения полевых работ. Как следует из табл. 2.1 и 2.2 содержание загрязнений в топливных баках колеблется в широких пределах, максимальная загрязненность составляет 0,08%, что объясняется высокой запыленностью воздуха технологической средой в процессе выполнения полевых работ.

Загрязненность топлива при заправке объясняется насыщением загрязнениями на всем пути следования топлива – от НПЗ до нефтесклада хозяйства, причем на каждом этапе перевозки их количество практически удваивается. Накопление загрязнений в дизельном топливе происходит в процессе полевых работ за счет выделения воды при перепадах температур и «дыхания» бака, в результате чего технологическая среда попадает в бак.

Анализ дисперсного состава механических загрязнений (табл.2.2) проб дизельного топлива из баков тракторов показал, что в топливе содержится значительное количество частиц с размером до 50 мкм.

На рис. 2.1 и 2.2 представлены гистограммы распределения содержания механических загрязнений и воды в топливных баках тракторов (МТЗ – 80/82, ХТЗ–170, Т-150К), которые эксплуатировались в составе различных машинно-тракторных агрегатов.

Обработка результатов анализов загрязненности дизельного топлива марки Л-0.2-40 показала, что среднее содержание механических примесей при выполнении полевых работ составляет 0,016 % при среднем квадратическом отклонении 0,0054 %, а среднее содержание воды 0,060 %, при среднем квадратическом отклонении 0,0196 %.

Таблица 2.1

## Загрязненность топлив при заправке и в системах питания тракторов в процессе выполнения полевых работ

Хозяйство	Марки тракторов	Характеристика пробы	Место отбора пробы					
			При заправке	Топливный бак	Ф Г О	Ф Т О	После Ф Г О	После Ф Т О
			Содержание загрязнений , % (масс.)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
СПК «Мирный»	MT3-82	С уровня забора	–	<u>0.0050-0.0970</u>	–	–	–	–
			–	<u>0.0040-0.0210</u>	–	–	–	
	XT3-170	Отстой	–	<u>0.0300-0.3800</u>	<u>0.1500-12.00</u>	<u>0.0050-0.2700</u>	–	–
			–	<u>0.0080-0.0600</u>	<u>0.0160-0.6200</u>	<u>0.0700-0.4600</u>	–	–
	T-150K	В потоке	<u>0.0037-0.0590</u>	–	–	–	<u>0.0050-0.0230</u>	<u>0.0030-0.0110</u>
			<u>0.0069-0.0157</u>	–	–	–	<u>0.0030-0.0120</u>	<u>0.0010-0.0090</u>
Агрофирма имени Котовского	MT3-80	С уровня Забора	–	<u>0.0050-0.1160</u>	–	–	–	–
			–	<u>0.0050-0.0280</u>	–	–	–	
	XT3-170	Отстой	–	<u>0.0500-0.3200</u>	<u>0.2000-18.00</u>	<u>0.0050-0.6400</u>	–	–
			–	<u>0.0120-0.0800</u>	<u>0.0210-0.8300</u>	<u>0.0300-0.7100</u>	–	–
	T-150K	В потоке	<u>0.0071-0.0414</u>	–	–	–	<u>0.0050-0.0400</u>	<u>0.0030-0.0130</u>
			<u>0.0048-0.0925</u>	–	–	–	<u>0.0020-0.0150</u>	<u>0.0008-0.0100</u>
Агрофирма «Свиточ»	MT3-80	С уровня забора	–	<u>0.0050-0.1060</u>	–	–	–	–
			–	<u>0.0030-0.0240</u>	–	–	–	
	XT3-170	Отстой	–	<u>0.0050-0.3400</u>	<u>0.0800-15.00</u>	<u>0.0050-0.5000</u>	–	–
			–	<u>0.0100-0.0720</u>	<u>0.0300-0.7300</u>	<u>0.0400-0.4700</u>	–	–
	T-150K	В потоке	<u>0.0054-0.1137</u>	–	–	–	<u>0.0050-0.0360</u>	<u>0.0030-0.0100</u>
			<u>0.0029-0.0396</u>	–	–	–	<u>0.0020-0.0110</u>	<u>0.0010-0.0120</u>

-в числителе – массовое содержание свободной воды в топливе, %.

-в знаменателе – массовое содержание механических примесей в топливе, %.

Таблица 2.2

## Дисперсный состав загрязнений в баках тракторов в процессе выполнения полевых работ

Хозяй- ство	Массовое со- держание за- грязнений, %	Количество частиц загрязнений , шт/мл, по интервалам размеров , мкм.										
		0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ФГ «Алекс»	0.004	3261	896	346	124	43	28	16	10	8	3	-
	0.006	6280	526	260	144	92	46	11	12	10	-	5
	0.008	7642	1577	433	346	115	81	58	35	31	21	17
СПК «Мирн ый»	0.011	11250	3165	856	411	168	110	63	48	24	-	21
	0.015	18240	5770	3116	1500	577	141	101	130	101	58	38
	0.018	23080	3675	2650	1180	623	128	136	142	83	62	41
	0.021	26460	4246	3760	1283	746	242	159	98	114	49	54
Агроф ирма им. Котов- ского	0.005	5039	1404	375	173	105	69	46	35	43	20	18
	0.012	14240	1980	836	624	213	128	83	102	76	51	18
	0.016	16530	3276	1970	1354	683	241	158	83	67	52	28
	0.020	17740	5770	2880	1761	580	415	211	117	106	64	35
	0.022	28560	7630	3890	1890	639	481	256	164	89	59	44
	0.028	34240	8760	4380	2106	946	705	273	146	121	76	57
Агроф ирма «Свит оч»	0.003	5420	1280	305	176	84	35	16	17	-	-	7
	0.010	8760	2654	546	483	129	97	73	61	46	24	11
	0.012	11560	2894	869	279	204	134	101	-	63	-	17
	0.015	17230	4247	2430	1246	561	186	126	105	97	45	29
	0.019	21350	5360	3840	1326	493	234	151	83	87	69	47
	0.021	29480	4840	1926	1631	824	342	128	136	94	83	40
	0.024	24440	9740	4260	1480	964	389	246	153	116	76	53

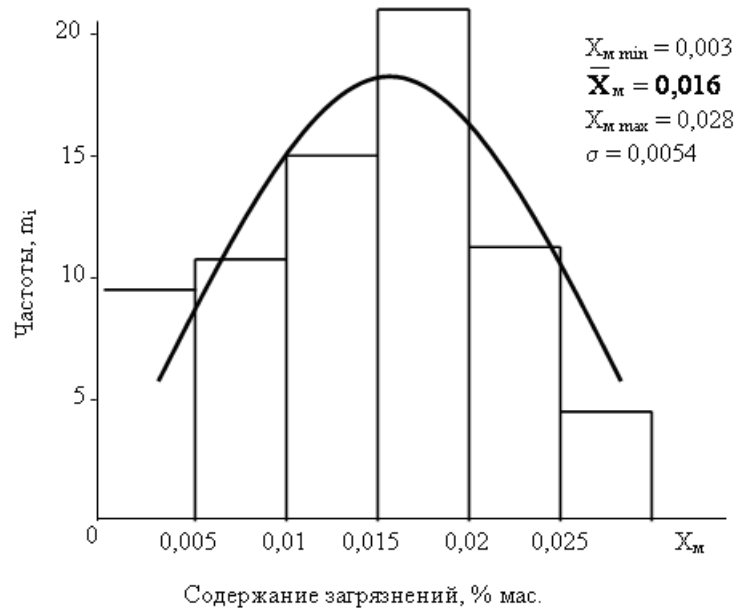


Рис. 2.1. Гистограмма распределения вероятностей содержания загрязнений в топливных баках тракторов в процессе выполнения полевых работ

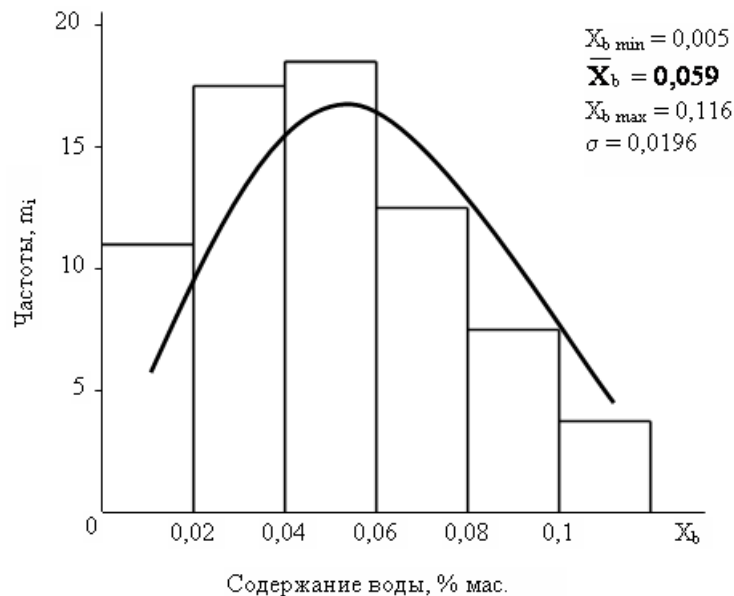


Рис. 2.2. Гистограмма распределения вероятностей содержания воды в топливных баках тракторов в процессе выполнения полевых работ

Отстой из корпусов фильтров грубой и тонкой очистки содержал значительное количество механических примесей (до 0,83 %) и большое количество воды (до 18%). Наличие в отстое топлива значительного количества воды снижает эффективность работы фильтров-отстойников, содержание воды после фильтров грубой очистки достигает 0,04 %. Значительная часть механических примесей поступает в бак через вентиляционное отверстие в пробке бака, за счет эффекта «дыхания» бака.

Для определения количества и дисперсности механических примесей, которые поступают в бак через вентиляционное отверстие были проведены специальные исследования при выполнении полевых работ. Запыленность воздуха исследовали на комбайнах СК-5А «Нива», ДОН-1500, тракторах ЮМЗ-6Л, ХТЗ-170, Т-150К, ДТ-75М, МТЗ-80/82 и К-701. Заливные горловины топливных баков комбайнов и тракторов были оборудованы разъемными пробками с фильтром, рис. 2.3. Диаметр входного отверстия

соответствовал диаметру вентиляционного отверстия крышки, общий диаметр двух выходных каналов, выполненных в корпусе пробки, соответствовал диаметру выходного отверстия пробки, которое заглушено и играет роль сливного при сливе отстоя и капельной воды.

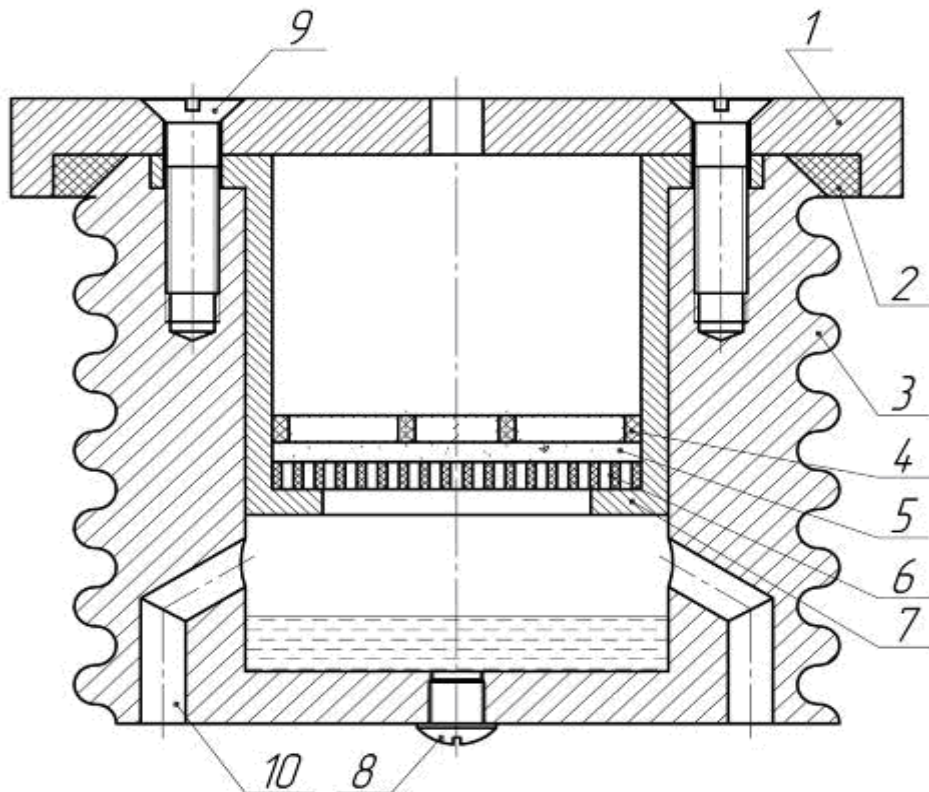


Рис. 2.3. Пробка заливной горловины топливных баков

1 – крышка; 2 – прокладка; 3 – корпус; 4 – кольцо; 5 – фильтрующая бумага; 6 – опора; 7 – стакан; 8 – винт для слива воды; 9 – винт; 10 – воздушный канал

При определении запыленности воздуха в качестве фильтрующей перегородки 5 использовалась бумага марок БФВ-105П, БТ-120 и БТФВ-155. Фильтрующая перегородка 5 устанавливалась в корпус стакана 7 пробки. Загрязненный атмосферный воздух поступал во внутреннюю полость пробки, последовательно проходя отверстие в крышке 1 и фильтрующую перегородку 5. При этом частицы пыли практически полностью задерживаются бумагой.

Перед установкой фильтрующей перегородки 5 в корпус пробки и после окончания испытаний производилась сушка и взвешивание образцов фильтрующей бумаги с точностью до 0,0002 г. Кроме того, в процессе испытаний фиксировалась плотность и количество топлива, израсходованного трактором или комбайном, продолжительность работы (в моточасах) и вид выполняемой производственной операции.

Запыленность воздуха рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{G_{\text{д}} - G_{\text{з}}}{G_{\text{т}}} \cdot \rho_{\text{т}} \quad (2.1)$$

где  $G_{\text{д}}$  и  $G_{\text{з}}$  - масса перегородки соответственно до и после забивки, кг;

$G_{\text{т}}$  - масса израсходованного топлива, кг;

$\rho_{\text{т}}$  - плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi_{\text{в}}$  - запыленность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Определение дисперсного состава загрязнений проводилось счетным методом с помощью автоматического анализатора ПМС фирмы "Millipore" (США).

Используя приведенные выше показатели, определяли запыленность воздуха на уровне заливной горловины, количество пыли, проникающей с воздухом в топливный бак, на

1000 кг израсходованного топлива, а также производили анализ дисперсного состава загрязнений, задержанных пористой фильтрующей перегородкой.

Результаты исследований приведены в табл. 2.3 – 2.6, из которых следует:

- 1) средняя запыленность воздуха при выполнении работ колеблется от 0,0095 до 2,12 г/м<sup>3</sup> для тракторов и от 0,111 до 2,010 г/м<sup>3</sup> для комбайнов.
- 2) запыленность воздуха зависит от вида выполняемых работ: наименьшая запыленность при транспортных работах 0,0095 и максимальная при лушении – 2,120 г/м<sup>3</sup>;
- 3) атмосферная пыль является значительным источником загрязненности топлива в баках тракторов и комбайнов, в зависимости от вида работ на каждые 1000 кг топлива через отверстие в пробке бака может проникнуть до 2,5 г атмосферной пыли;
- 4) дисперсный состав пыли, попадающий в бак в среднем на 96% состоит из частиц размером 1÷20 мкм, но преобладают частицы размером 1÷10 мкм.

**Таблица 2.3**

**Результаты исследования запыленности воздуха технологической средой на уровне заливной горловины топливного бака при выполнении полевых работ**

Вид работы	Количество пыли на 1000 кг топлива, г/1000 кг	Запыленность воздуха, г/м <sup>3</sup>
Лушение	0,222 - 2,496	0,188 - 2,120
Культивация	0,391 - 2,350	0,332 - 2,003
Транспортные работы	0,112 - 2,096	0,0095 - 1,7800
Пахота	0,191 - 2,425	0,162 - 2,075
Уборка зерновых	0,132 - 2,364	0,111 - 2,010

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что при выполнении полевых работ, за счет загрязненности воздуха технологической средой, создаются условия накопления механических примесей в баках тракторов и комбайнов. Это требует повышенной эффективности работы фильтров грубой и тонкой очистки топлива.



Таблица 2.4

## Дисперсный состав пыли, поступающей с атмосферным воздухом в топливный бак комбайнов СК-5А

Количество просмотренных полей, шт	10		10		10		10		10		10	
Суммарное количество частиц, шт	839		1080		1430		886		893		2412	
Среднее количество частиц в одном поле, шт	84		108		143		88		89		241	
Интервалы размеров частиц, мкм (X)	К, % *	С, %**	К, %	С, %	К, %	С, %	К, %	С, %	К, %	С, %	К, %	С, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 – 3	41.48	41.48	43.61	43.61	36.22	36.22	37.36	37.36	40.31	40.31	32.83	32.83
3 – 5	20.03	61.51	22.32	65.93	25.67	61.89	23.25	60.61	23.74	64.05	26.08	58.91
5 – 7	11.67	73.18	9.44	75.37	11.33	73.22	9.93	70.54	13.33	77.38	14.85	73.76
7 – 10	8.35	81.53	6.48	81.85	9.30	82.52	8.47	79.01	7.95	85.33	11.85	85.61
10 – 15	5.12	86.65	6.31	88.15	7.06	89.58	8.01	87.02	4.93	90.26	8.63	94.24
15 – 20	3.46	90.11	3.42	91.57	3.50	93.08	3.61	90.63	3.69	93.95	3.07	97.31
20 – 25	1.19	91.30	1.95	93.52	1.47	94.55	3.28	93.91	1.57	95.52	0.87	98.18
25 – 30	2.98	94.28	1.48	95.00	1.74	96.29	0.79	94.70	1.12	96.64	0.87	99.05
30 – 40	2.38	96.66	1.39	96.39	1.33	97.62	1.80	96.50	1.46	98.10	0.58	99.63
50 – 60	0.47	98.21	1.67	98.80	0.84	99.37	0.90	98.87	0.11	99.55	0.13	99.96
60 – 70	0.84	99.05	0.27	99.07	0.28	99.65	0.23	99.10	0.11	99.66	0.04	100.0
70 – 80	0.23	99.28	0.28	99.35	0.21	99.86	0.45	99.55	0.12	99.78	-	-
80 – 90	0.48	99.76	0.46	99.81	0.14	100.0	0.22	99.77	0.11	99.89	-	-
90 – 100	0.24	100.0	0.19	100.0	-	-	0.23	100.0	0.11	100.0	-	-

Таблица 2.5

## Дисперсный состав пыли, поступающей с атмосферным воздухом в топливный бак комбайнов ДОН-1500

Количество просмотренных полей, шт	10		10		10		10		10		10	
Суммарное количество частиц, шт	2743		1240		1232		1422		1213		1157	
Среднее количество частиц в одном поле, шт	274		124		123		142		121		115	
Интервалы размеров частиц, мкм (X)	К, %*	С, %**	К, %	С, %	К, %	С, %	К, %	С, %	К, %	С, %	К, %	С, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 – 3	43.27	43.27	46.61	46.61	33.60	33.60	33.12	33.12	32.73	32.73	24.98	24.98
3 – 5	25.71	68.98	24.04	70.65	25.17	58.87	22.37	55.49	25.64	58.37	21.78	46.76
5 – 7	11.66	80.64	8.38	79.03	10.30	69.07	14.76	70.25	11.29	69.66	16.77	63.58
7 – 10	9.15	89.79	6.29	85.32	9.91	78.98	10.76	81.01	10.97	80.63	11.32	74.85
10 – 15	4.30	94.09	3.79	89.11	9.09	88.07	9.85	90.86	9.31	89.94	9.07	83.92
15 – 20	2.12	96.21	3.55	92.66	3.81	91.88	4.01	94.87	2.56	92.50	4.58	86.52
20 – 25	1.42	97.63	1.29	93.95	1.71	93.59	2.39	97.26	1.81	94.31	2.60	91.10
25 – 30	0.84	98.47	2.02	95.97	1.78	95.37	1.05	98.31	1.32	95.63	2.68	93.78
30 – 40	0.62	99.09	1.45	97.42	1.71	97.08	0.85	99.16	1.32	96.95	3.45	97.23
40 – 50	0.33	99.42	1.37	98.79	1.13	98.21	0.35	99.51	1.07	98.02	1.21	98.44
50 – 60	0.25	99.67	0.40	99.19	0.90	99.11	0.21	99.72	0.66	98.68	0.61	99.05
60 – 70	0.18	99.85	0.16	99.35	0.57	99.68	0.14	99.86	0.25	98.93	0.26	99.31
70 – 80	0.04	99.89	0.09	99.44	-	-	-	-	0.33	99.26	0.34	99.65
80 – 90	0.04	99.93	0.08	99.52	0.24	99.92	0.07	99.93	0.25	99.51	0.08	99.73
90 – 100	0.03	99.96	0.40	99.52	0.08	100.0	0.07	100.0	0.33	99.84	0.17	99.90
100	0.04	100.0	0.08	100.0	-	-	-	-	0.16	100.0	0.09	100.0

К\* и С\*\* - содержание частиц загрязнений соответственно в интервале размеров (%) и суммарное по интервалу (%).



## 2.2. Влияние схем соединения фильтров на надежность топливных систем дизелей машинно-тракторных агрегатов

В топливных системах дизельных двигателей предусмотрена многоступенчатая очистка топлива: предварительная – при заправке топливного бака; грубая – в фильтрах грубой очистки на двигателе; окончательная (тонкая) – в фильтрах тонкой очистки на двигателе. Иногда применяется дополнительная очистка в предохранительных фильтрах форсунок.

По количеству и расположению средств очистки топливные системы дизелей с/х техники можно разделить на три группы: с последовательным расположением фильтрующих элементов, рис. 2.4; с параллельным расположением, рис. 2.5, и комбинированным расположением фильтрующих элементов, рис. 2.6.

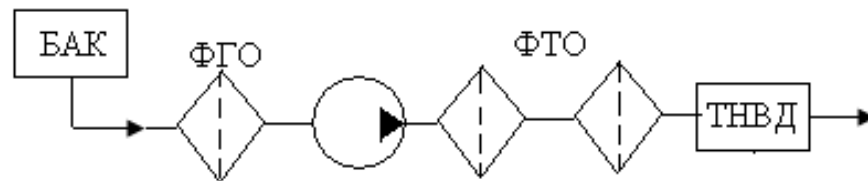


Рис. 2.4. Схема топливной системы с последовательным расположением фильтрующих элементов:  
ФГО – фильтр грубой очистки; ФТО – фильтр тонкой очистки

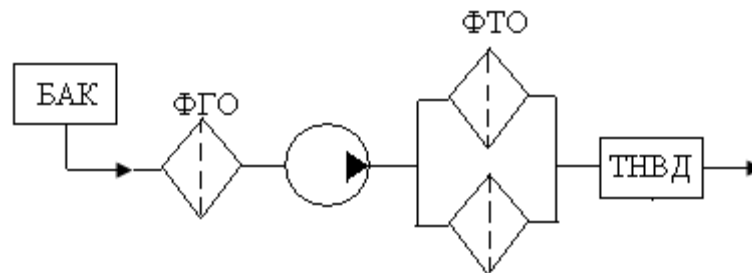


Рис. 2.5. Схема топливной системы с параллельным соединением фильтров тонкой очистки

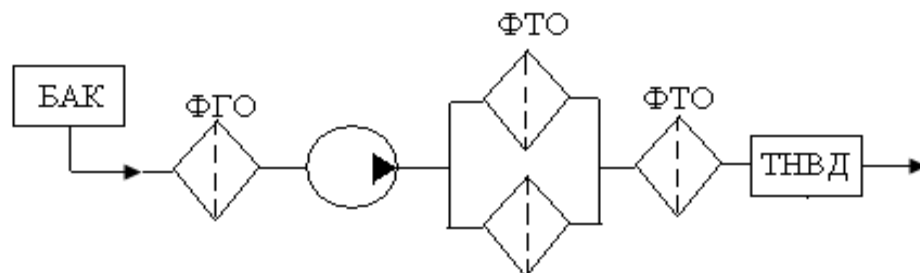


Рис. 2.6. Схема топливной системы с комбинированным расположением фильтров тонкой очистки топлива

К первой группе, рис. 2.4, относятся топливные системы тракторов «Алис-Чалмер Д-17» (США), «Ченто-Феррари» (Италия).

Ко второй группе относятся системы тракторов и зерноуборочных комбайнов фирм «Кейс», «Катерпиллер», «Массей-Фергюсон 250-х», «Массей-Харрис 333», «Зетор-ЗОП», Т-40, МТЗ – 80/82, К – 701.

К третьей группе относятся топливные системы трактора ХТЗ – 150К, зерноуборочных комбайнов Джон-Дир.

Выполним теоретическую оценку надежности различных типов топливных систем, представленных на рис. 2.4 – 2.6.

Топливную систему представим в виде графа состояний, который для рис. 2.4 будет иметь вид, представленный на рис. 2.7.

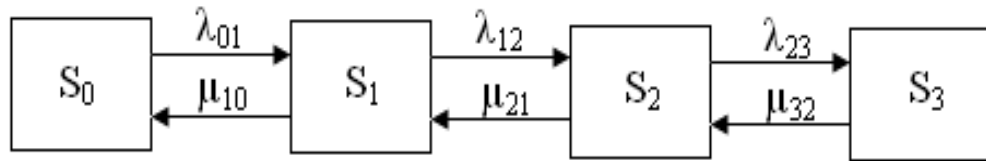


Рис. 2.7. Граф состояний топливной системы с последовательным соединением фильтров тонкой очистки

$S_0$  – исправное состояние топливной системы;

$S_1$  – выход из строя фильтра грубой очистки;

$S_2, S_3$  – выход из строя фильтров тонкой очистки.

Примем, что поток отказов фильтров простейший и время между отказами в этом потоке распределяется по показательному закону и определяется параметрами интенсивности отказов:

$$\lambda = 1/t_\delta, \quad (2.2)$$

где  $t_\delta$  – среднее время безотказной работы фильтра.

По стрелкам вправо систему из состояния в состояние переводят отказы, а по стрелкам влево – ремонты с интенсивностью восстановления:

$$\mu = \frac{1}{t_p}, \quad (2.3)$$

где  $t_p$  – среднее время восстановления исправного состояния заменой фильтра.

Применяя правило Колмогорова [106], запишем систему дифференциальных уравнений вероятностей состояний для рис. 2.7.

$$\begin{aligned} \frac{dp_0}{dt} &= -\lambda_{01} p_0 + \mu_{10} p_1 \\ \frac{dp_1}{dt} &= \lambda_{01} p_0 - \lambda_{12} p_1 + \mu_{12} p_2 - \mu_{10} p_1 \\ \frac{dp_2}{dt} &= \lambda_{12} p_1 - \mu_{21} p_2 - \lambda_{23} p_2 + \mu_{32} p_3 \\ \frac{dp_3}{dt} &= \lambda_{23} p_2 - \mu_{32} p_3 \end{aligned}$$

Полагая левые части равными нулю, получим систему алгебраических уравнений предельных состояний. Используя нормировочное условие:  $p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1$ , а также условие, что при  $t = 0$ ,  $p_0 = 1$ , получим выражения для определения вероятности нахождения топливных фильтров в исправном состоянии:

$$P_{0\Pi} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} + \frac{\lambda_{23}\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{32}\mu_{21}\mu_{10}}}. \quad (2.4)$$

Вероятность отказа фильтра грубой очистки:

$$P_{1П} = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} P_{0П}, \quad (2.5)$$

вероятность отказа фильтра тонкой очистки, фильтр №2:

$$P_{2П} = \frac{\lambda_{12} \lambda_{01}}{\mu_{21} \mu_{10}} P_{0П}, \quad (2.6)$$

вероятность отказа фильтра тонкой очистки, фильтр №3:

$$P_{3П} = \frac{\lambda_{23} \lambda_{12} \lambda_{01}}{\mu_{32} \mu_{21} \mu_{10}} P_{0П}, \quad (2.7)$$

Применяя аналогичный математический аппарат, получим формулы для определения вероятностей состояний топливной системы с параллельным соединением фильтров тонкой очистки, рис. 2.5.

Топливную систему, рис. 2.5, представим в виде графа состояний, рис. 2.8.

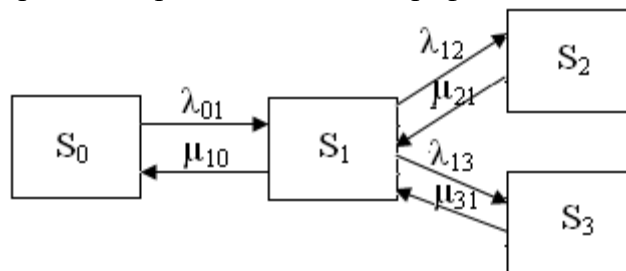


Рис. 2.8. Граф состояний топливной системы с параллельным соединением фильтров тонкой очистки

Опустив математические преобразования, запишем окончательные формулы для определения вероятности нахождения системы в исправном состоянии:

$$P_{0ПР} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{12} \lambda_{01}}{\mu_{21} \mu_{10}} + \frac{\lambda_{13} \lambda_{01}}{\mu_{31} \mu_{10}}}, \quad (2.8)$$

вероятность отказа фильтра грубой очистки:

$$P_{1ПР} = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} P_{0ПР}, \quad (2.9)$$

вероятность отказа фильтров тонкой очистки:

$$P_{2ПР} = \frac{\lambda_{12} \lambda_{01}}{\mu_{21} \mu_{10}} P_{0ПР}, \quad (2.10)$$

$$P_{3ПР} = \frac{\lambda_{13} \lambda_{01}}{\mu_{31} \mu_{10}} P_{0ПР}, \quad (2.11)$$

Для системы с комбинированным расположением фильтров, рис. 2.6, граф состояний представим в виде, рис. 2.9.

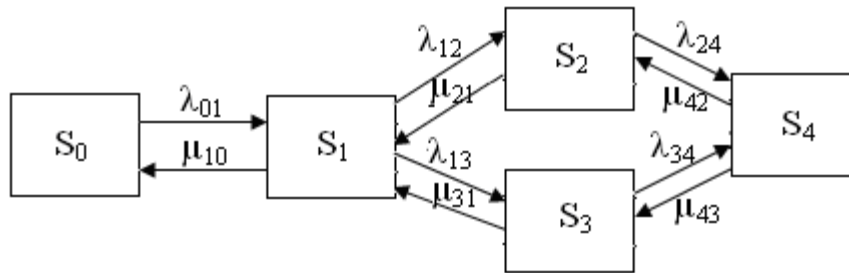


Рис. 2.9. Граф состояний топливной системы с комбинированным соединением фильтров тонкой очистки

Окончательные формулы для определения вероятностей имеют вид.  
Вероятность нахождения в исправном состоянии:

$$P_{0K} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} + \frac{\lambda_{13}\lambda_{01}}{\mu_{31}\mu_{10}} + \frac{\lambda_{24}\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{42}\mu_{21}\mu_{10}}}, \quad (2.12)$$

вероятность отказа фильтра грубой очистки:

$$P_{1K} = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} P_{0K}, \quad (2.13)$$

вероятность отказа фильтров тонкой очистки соединенных параллельно, №2 и №3:

$$P_{2K} = \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} P_{0K}, \quad (2.14)$$

$$P_{3K} = \frac{\lambda_{13}\lambda_{01}}{\mu_{31}\mu_{10}} P_{0K}, \quad (2.15)$$

вероятность отказа фильтра тонкой очистки соединенного последовательно, №4:

$$P_{4K} = \frac{\lambda_{24}\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{42}\mu_{21}\mu_{10}} P_{0K}. \quad (2.16)$$

В качестве альтернативы рассмотрим разветвленную схему соединения дополнительных фильтров тонкой очистки включенных параллельно, которая представлена на рис. 2.10.

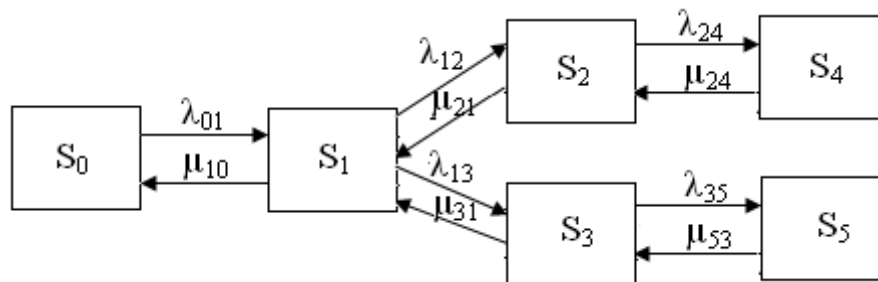


Рис. 2.10. Граф состояний разветвленной топливной системы с дополнительными фильтрами соединенными параллельно

Согласно приведенного графа состояний топливной системы на рис. 2.10 получим следующие формулы.

Вероятность нахождения системы в исправном состоянии:

$$P_{0P} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} + \frac{\lambda_{13}\lambda_{01}}{\mu_{31}\mu_{10}} + \frac{\lambda_{24}\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{42}\mu_{21}\mu_{10}} + \frac{\lambda_{35}\lambda_{13}\lambda_{01}}{\mu_{53}\mu_{31}\mu_{10}}}, \quad (2.17)$$

вероятность отказа фильтра грубой очистки:

$$P_{1P} = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} P_{0P}, \quad (2.18)$$

вероятность отказа фильтров тонкой очистки №2 и №3:

$$P_{2P} = \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} P_{0P}, \quad (2.19)$$

$$P_{3P} = \frac{\lambda_{13}\lambda_{01}}{\mu_{31}\mu_{10}} P_{0P}, \quad (2.20)$$

вероятность отказа фильтра тонкой очистки №4 и №5:

$$P_{4P} = \frac{\lambda_{24}\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{42}\mu_{21}\mu_{10}} P_{0P}, \quad (2.21)$$

$$P_{5P} = \frac{\lambda_{35}\lambda_{13}\lambda_{01}}{\mu_{53}\mu_{31}\mu_{10}} P_{0P}, \quad (2.22)$$

Выполним теоретический расчет вероятностей различных схем топливных систем по формулам (2.1...2.19) при единых начальных условиях:

- сроки замены фильтров один раз в сезон (шесть месяцев), т.е.  $\lambda=1/6$ , при этом интенсивность воздействия на фильтры распределяется неравномерно. Например, для топливной системы на рис. 2.4, фильтр грубой очистки подвергается максимальному воздействию загрязнения, т.е.  $\lambda_{01}=3/6$ , а последующие два фильтра тонкой очистки с интенсивностью  $\lambda_{12}=2/6$ ,  $\lambda_{23}=1/6$ .

Интенсивность восстановления распределяется аналогично:

$$\mu_{32}=1/1=1; \mu_{21}=2/1=2; \mu_{10}=3/1=3,$$

из расчета, что время на замену одного фильтра составляет один час.

Подставляя приведенные интенсивности  $\lambda$  и  $\mu$  в формулы (2.2...2.22), получим вероятности нахождения топливных систем различных схем соединения фильтров, рис. 2.4...2.10, в исправном состоянии  $p_0$  и вероятности выхода из строя фильтров  $p_{1...5}$ .

**Таблица 2.7**

**Результаты расчета вероятностей исправного состояния  $p_0$  и вероятностей отказов фильтров  $p_{1...5}$**

Схема соединения фильтров в топливной системе	Вероятность исправного состояния системы $p_0$	Вероятность отказа ФГО, $p_1$	Вероятность отказа ФТО №1, $p_2$	Вероятность отказа ФТО №2, $p_3$	Вероятность отказа ФТО №3, $p_4$	Вероятность отказа ФТО №4, $p_5$
Последовательное соединение фильтров, рис. 2.1	0,835	0,139	0,023	0,0038	-	-
Параллельное соединение фильтров, рис. 2.2	0,7	0,175	0,058	0,058	-	-
Комбинированное	0,816	0,136	0,022	0,022	0,0036	-



соединение фильтров, рис. 2.3						
Разветвленное соединение с дополнительными фильтрами тонкой очистки, рис. 2.7	0,813	0,135	0,022	0,022	0,0036	0,0036

Результаты расчета представим таблично, таблица 2.7.

Анализ таблицы 2.7 позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальной вероятностью нахождения фильтров в исправном состоянии обладает система с последовательным соединением фильтров, ( $p_0=0,835$ ).

2. Увеличение количества фильтров тонкой очистки и включение их в схему топливоподачи параллельно, не увеличивает вероятности исправного состояния системы, такой путь является мало эффективным.

3. Максимальную вероятность отказа из всех фильтров имеет фильтр грубой очистки, особенно при параллельном соединении фильтров тонкой очистки ( $p_1=0,175$ ), а затем, на порядок меньше, фильтры тонкой очистки.

Исходя из полученных теоретических данных, можно сделать вывод, что наиболее эффективной системой соединения фильтров следует считать последовательное соединение, состоящее из фильтра грубой очистки и двух фильтров тонкой очистки.

При этом необходимо разработать мероприятия по повышению эффективности работы фильтра грубой очистки, увеличив фильтрующие, коагулирующие и водоотталкивающие свойства. Такие мероприятия позволят уменьшить вероятность отказа фильтров тонкой очистки, обеспечив их надежную работу в течение более 1000 моточасов (выполнение ТО-3).

### 2.3. Математическое моделирование влияния загрязненности топлива на функциональные характеристики машинно-тракторных агрегатов

По ГОСТ 305-82 [5], механические примеси в дизельном топливе должны отсутствовать. Однако в процессе доставки дизельного топлива, его хранения в условиях сельскохозяйственного производства, а также заправки тракторов и автомобилей к моменту его выработки в баке концентрация загрязняющих примесей достигает 200...300 г на одну тонну топлива, из которых до 30% нерастворимых примесей: кварц, глинозем, окись железа [11, 20, 21].

Установлено, что существующие топливные фильтры автотракторных дизелей при их эксплуатации в запыленных условиях не обеспечивают достаточной степени очистки топлива от механических примесей (абразива), и пропускают частицы размером до 10 мкм [22, 23].

Ведущим видом изнашивания прецизионных деталей топливоподающей аппаратуры является абразивный, который в свою очередь можно разделить на износ абразивными частицами, размер которых в каждый момент наработки меньше радиального зазора прецизионной пары, и износ в результате защемления абразивных частиц, размер которых несколько больше радиального зазора прецизионной пары с последующим их дроблением между твердыми поверхностями [10, 24].

Существующие работы, посвященные теории износа плунжерных пар далеко не полно раскрывают большое многообразие сложных и скоротечных процессов, которые происходят при износе деталей плунжерных пар. При этом принимаются различные условности, далекие от действительных условий работы плунжерной пары. Так, например, в работах [24, 59] принимается, что причиной основного износа являются абразивные частицы, величина

которых меньше зазора между сопряженными деталями. Но реальная картина местных износов поверхностей плунжерных пар значительно отличается от результатов расчетов величины износа по данной теории.

В.В. Антипов [107], опираясь на исследования, проведенные в Саратовском институте механизации сельского хозяйства, предложил объёмный износ деталей плунжерных пар представить суммой:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad (2.23)$$

где  $G$  - суммарный износ плунжера, мм<sup>3</sup>;

$G_1$  - износ за счет действия абразивных частиц с размерами, несколько меньшими величины зазора, мм<sup>3</sup>;

$G_2$  - износ за счет действия абразивных частиц, размер которых превышает зазор плунжерной пары, мм<sup>3</sup>;

$G_3$  - износ за счет действия гидроабразивного потока, мм<sup>3</sup>.

Величина износа  $G_1$  при этом находится по теории предложенной Гуре-вичем [108], а величины  $G_2$  и  $G_3$  на основании данных экспериментальных исследований принимают:

$$G_2 \sim (0,2...0,85) G_1, \quad G_3 \sim 0,05(G_1+G_2) \quad (2.24)$$

Очевидно, что такое решение задачи довольно условно и не может полно оценить физический процесс изнашивания плунжерной пары частицами, размер которых больше зазора пары, т.е. износ  $G_2$ , а, следовательно, и  $G_3$ .

На основании работ Антипова В.В. и Гуревича Д.Ф. износ плунжерной пары частицами абразива меньшими, чем зазор, можно определить:

$$G_1 = a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{P \cdot S \cdot d_a \cdot N}{H} \cdot K_a, \quad (2.25)$$

где  $a_1$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий изменение размерностей;

$a_2$  – коэффициент формы абразивных частиц;

$P$  – нагрузка на единичную абразивную частицу, Н;

$S$  – путь трения, м;

$d_a$  – диаметр абразивной частицы, мкм;

$N$  – количество подач топлива за час работы;

$H$  – твердость материала плунжера, МПа;

$K_a$  – коэффициент, учитывающий концентрацию абразивных частиц.

Коэффициент формы абразивных частиц согласно работ Тененбаума М.М. [109] определяется по формуле:

$$a_2 = \frac{M(n_i) \cdot M(D_i - d_i)}{M(r_i)}, \quad (2.26)$$

где  $M(n_i)$ ,  $M(D_i - d_i)$ ,  $M(r_i)$  – математическое ожидание соответственно числа вершин у абразивной частицы, разностей диаметров окружностей описанной вокруг и вписанной внутрь зерна, радиусов вершин зерна.

Согласно исследований Тененбаума М.М. [109] для кварцевого песка  $a_2=14...16$ .

Нагрузка в ньютонах на единичную абразивную частицу можно рассчитать по эмпирической формуле [109]:

$$P = 65,8 \cdot HRC^{0,585}, \quad (2.27)$$

где  $HRC$  – твердость плунжера, равная 60...62.

Путь трения  $S$  можно выразить как:

$$S = v \cdot t, \quad (2.28)$$

$v$  – средняя скорость движения плунжера за время топливоподачи, м/с;

$t$  – время 3600 с, т.е. 1 час.

Количество подач топлива за один час работы равно:

$$N = 60 \text{ мин} \cdot 1010 \text{ мин}^{-1} \cdot 4 = 2,42 \cdot 10^5 \quad (2.29)$$

Коэффициент, учитывающий концентрацию абразивных частиц в топливе, можно определить по выражению:

$$K_a = \frac{\Sigma_a \cdot \gamma_a \cdot \rho_T}{\rho_a \cdot V_a}, \quad (2.30)$$

где  $\Sigma_a$  – концентрация абразивных частиц в граммах на 1 тонну топлива;  
 $\gamma_a$  – доля абразивных частиц соизмеримая с зазором (2...6 мкм) в общей массе абразивных частиц;

$\rho_T, \rho_a$  – плотность топлива равная 830 кг/м<sup>3</sup>; плотность абразива равная 2600 кг/м<sup>3</sup>;  
 $V_a$  – объем одной абразивной частицы, который можно определить по формуле:

$$V_a = \frac{\pi \cdot d_a^3}{6}. \quad (2.31)$$

С учетом того, что путь трения  $S$  и количество циклов подачи топлива были выбраны за 1 час эксплуатации, износ плунжерной пары абразивными частицами, диаметр которых меньше радиального зазора (меньше 8 мкм), можно определить по формуле:

$$G_1 = a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{14,52 \cdot 10^5 \cdot P \cdot S \cdot \Sigma_a \cdot \gamma_a \cdot \rho_T}{\pi \cdot d_a^2 \cdot H \cdot \rho_a \cdot t}, \frac{\text{мкм}}{\text{ч}} \quad (2.32)$$

Формула (2.32) позволяет выполнить численное моделирование изменения зазора в плунжерной паре в единицу времени (скорость изнашивания) в зависимости от изменения концентрации абразивных частиц, их массовой доли в общем объеме топлива, диаметра абразивных частиц, при условии, что диаметр абразива меньше радиального зазора плунжерной пары.

Результаты моделирования можно представить в виде зависимостей на рис. 2.11 и рис. 2.12.

Из анализа результатов моделирования следует, что наиболее опасной размерной группой являются частицы диаметром 2...4 мкм, которые будут легко проникать вместе с топливом в зазор и вызывать царапание и пластическое отгеснение материала плунжера и втулки. Чем больше концентрация таких частиц, тем быстрее увеличивается зазор в процессе эксплуатации.

Для определения величины износа  $G_2$  воспользуемся работами [3, 47, 48], в которых предлагается расчет износа частицами абразива, размер которых больше зазора плунжерной пары, определять при защемлении их в изменяющемся зазоре, т.е. при изменении зазора в плунжерной паре, вследствие упругих деформаций втулки под действием давления в надплунжерной полости.

Методика этих расчетов, несмотря на некоторые условности, имеет четкий физический смысл и при расчете износа учитывает основные параметры, как абразивного материала, так и плунжерной пары.

Нами предложено в данную методику расчета величины износа абразивом, размер частиц которого в каждый период износа больше величины зазора плунжерной пары, внести существенное дополнение, а именно, рассчитывать защемление абразивных частиц не только в результате временного увеличения зазора втулки вследствие ее деформаций (рис. 2.13, а), но и принимать во внимание защемление абразивных частиц в зоне впускного окна (рис. 2.13, б).

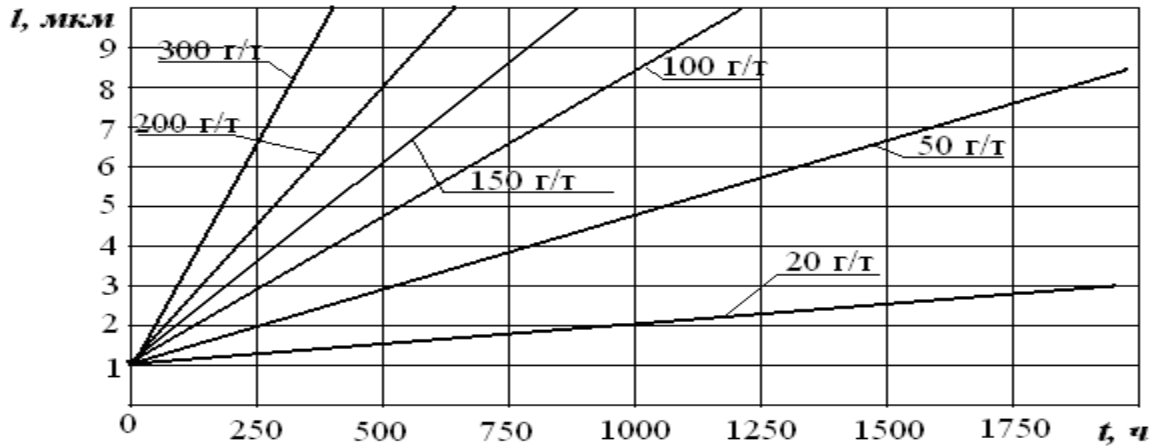


Рис. 2.11. Зависимость изменения зазора в плунжерной паре в процессе эксплуатации при разной концентрации абразива в топливе (диаметр частиц абразива 6 мкм)

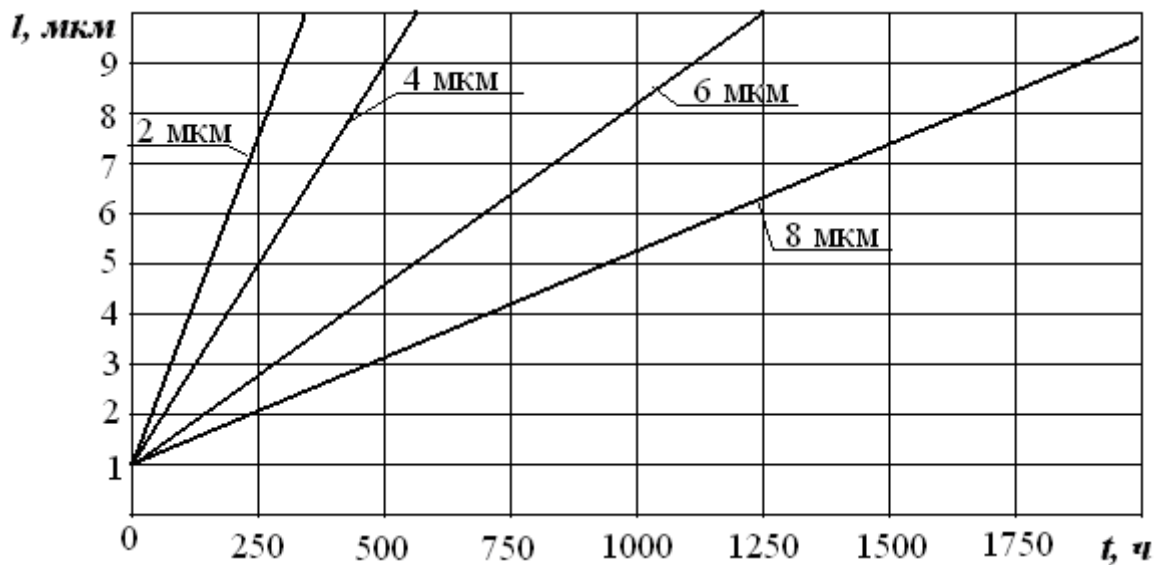


Рис. 2.12. Зависимость изменения зазора в плунжерной паре в процессе эксплуатации для разных размеров абразивных частиц (концентрация частиц 100 г/т)

Анализ круглограмм [3, 47, 48] поверхностей изношенных прецизионных деталей показал, что износ имеет локальный характер. Основные зоны износа расположены в районе впускных окон, причем впадины у плунжера имеют увеличивающуюся глубину по направлению к верхней торцевой поверхности (с неизношенной поверхностью образуют угол  $\gamma_{пл}$  на рис. 2.13, б), а соответствующие впадины у гильзы в этом направлении имеют уменьшающуюся глубину (с неизношенной поверхностью образуют угол  $\gamma_{вт}$  на рис. 2.13, б).

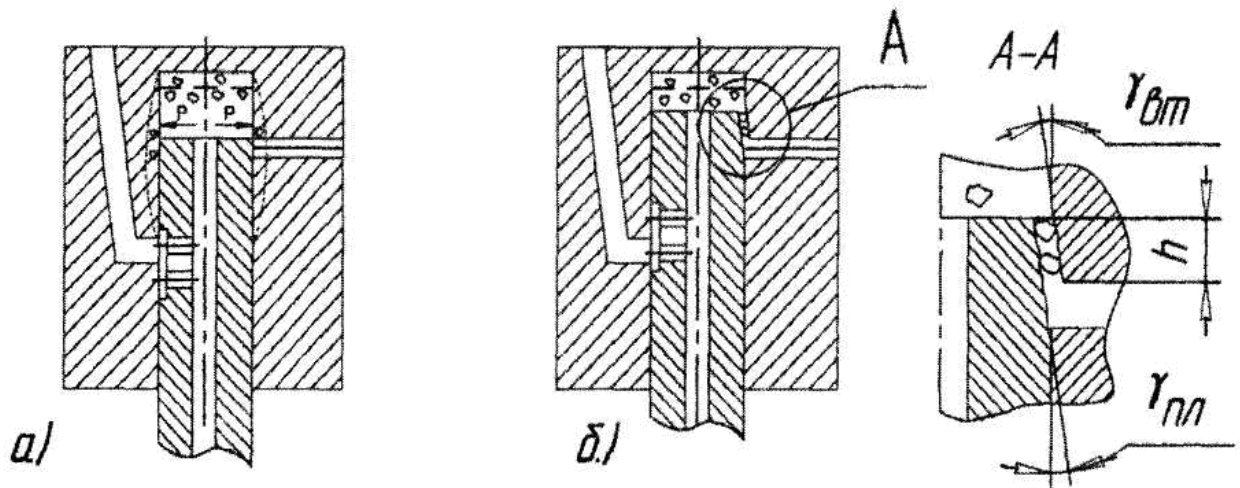


Рис. 2.13. Схемы защемления в зазорах плунжерной пары абразивных частиц, размер которых в каждый период наработки больше зазора пары

Из рис. 2.13 следует, что после перекрытия впускных окон гильзы верхним торцом плунжера при его нагнетательном ходе, в зоне впускных окон происходит уменьшение зазора, ведущее к защемлению абразивных частиц попавших в уменьшающийся зазор вместе с топливом утечек. В районе отсечных окон, вследствие увеличения зазора, защемление абразивных частиц не происходит, износ вызывают только частицы, проходящие с потоком утечки, т.е. частицы, размер которых меньше зазора пары в этом месте.

Зная средний размер абразивных частиц, определяется глубина внедрения частицы, соответствующая моменту ее дробления:

$$h_{др} = (\sigma_{пр.кв} \cdot R_{абр.}) / 2 HB, \quad (2.33)$$

где  $\sigma_{пр.кв}$  - предел прочности кварцевого абразива, критическое напряжение при котором абразивная частица разрушается  $\sigma_{пр.кв} = 206$  МПа [109];

$R_{абр.}$  - средняя величина радиуса абразивных частиц, мкм;

$HB$  - твердость металла.

Общий объем металла  $V_{деф}$ , подвергающийся пластическому и упругому деформированию, рассчитаем из геометрии усеченного конуса, образуемого в результате трения:

$$V_{деф} = \frac{1}{3} \cdot F_{деф} \cdot L_{тр}, \quad (2.34)$$

где  $F_{деф}$  - площадь основания усеченного конуса, соответствующего моменту дробления частицы, мкм<sup>2</sup>;

$L_{тр}$  - путь трения абразивной частицы до начала ее дробления, мкм.

Площадь основания усеченного конуса  $F$  находится по формуле (рис. 2.14):

$$F_{деф} = \frac{d_a}{8} \cdot (\pi \cdot \beta_{др} - \sin \beta_{др}) \cdot h_{др}, \quad (2.35)$$

где  $d_a$  - диаметр абразивной частицы, мкм;

$\beta_{др}$  - угол сегмента сферы внедрения абразива, соответствующий моменту дробления, определяется по формуле:

$$\beta_{др} = 2 \cdot a \cdot \cos \cdot (R_{аб} - h_{др}) / R_{аб} \quad (2.36)$$

где  $R_{аб}$  - радиус абразивной частицы, мкм;

$a$  - длина хорды, определяемая глубиной внедрения и радиусом абразивной частицы (рис. 2.14), мкм.

Путь трения  $L_{mp}$  абразивной частицы до момента ее разрушения, с учетом того, что разрушение происходит при внедрении частицы на глубину  $h_{dp}$  определяется по следующей формуле:

$$L_{mp} = h_{dp} / \sin \gamma, \quad (2.37)$$

где  $\gamma$  – средний угол наклона изношенных поверхностей к неизношенным. Из рис. 2.14,  $\gamma = (\gamma_{вт} + \gamma_{пл})/2$ . Для новой плунжерной пары угол  $\gamma = 0$ . В процессе работы, в результате износа  $G_1$  угол наклона изношенных поверхностей увеличивается пропорционально увеличению среднего зазора:

$$\sin \gamma = (l - l_0) / L_{max}, \quad (2.38)$$

где  $l, l_0$  – текущий и начальный зазор пары на данном участке, мкм;  
 $L_{max}$  – максимальная длина участка износа.

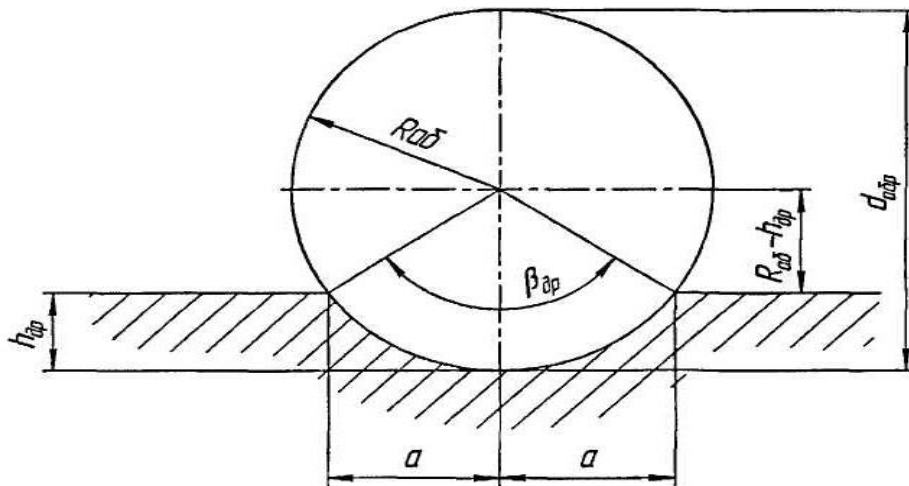


Рис. 2.14. Схема внедрения абразивной частицы в поверхность плунжера (втулки) при зацеплении в зазоре

В случае идентичности по свойствам поверхностей втулки и плунжера абразивная частица внедряется в обе поверхности на величину  $h_{dp}$  (рис. 2.14) и износ при дроблении можно определить по следующему выражению:

$$V_{dp} = \pi \cdot h_{dp}^2 \cdot \left( \frac{d_a}{2} - \frac{h_{dp}}{3} \right) \quad (2.39)$$

где  $V_{dp}$  – внедренный объем при дроблении, мкм<sup>3</sup>.

Определив по формуле (2.22) общий объем металла  $V_{деф}$ , подвергающийся деформации и по формуле (2.27) объем металла  $V_{dp}$ , который удаляется с поверхности при дроблении, определяется износ плунжерной пары  $G_2$  за один час работы по формуле:

$$G_2 = a_3 \cdot \left( \frac{V_{деф}}{N_p} + V_{dp} \right) \cdot \frac{\Sigma_a \cdot N}{\pi \cdot D_{пл} \cdot L_{пл}}, \quad (2.40)$$

где  $a_3$  – коэффициент, учитывающий размерность;

$\Sigma_a$  – концентрация абразивных частиц, г/т;

$N$  – количество подач топлива плунжером за один час работы насоса;

$N_p$  – число циклов, приводящих к разрушению материала при пластических деформациях [6, 7]:

$$N_p = t \varepsilon \quad (2.41)$$

где  $t$  – коэффициент усталости при пластических деформациях, для стали  $t = 1,3$ ;

$\varepsilon$  – относительное удлинение материала при разрыве, для стали  $\varepsilon = 21$ ;

$D_{пл}$  – диаметр плунжера, мм;

$L_{пл}$  – рабочий ход плунжера, мм.

Результаты моделирования изменения зазора согласно формулы (2.40) представлены на рис. 2.15 и 2.16.

Как следует из полученных зависимостей более крупные частицы абразива, диаметр которых составляет от 12 до 18 мкм, в меньшей степени влияют на износ, в сравнении с зависимостями рис. 2.11 и рис. 2.12.

Таким образом, расчет величины износа в районе впускных отверстий определяется суммой износа  $G_1$  под действием абразивных частиц, величина которых меньше зазора плунжерной пары и износа  $G_2$  абразивными частицами, защемляемыми в зазоре, размер которых больше величины зазора (определяемого по формуле 2.40). Причем расчет величин обоих видов износа ведется совместно на каждом шаге расчета, так как увеличивающийся в результате этого зазор пары влияет как на  $G_1$ , так и на  $G_2$ .

Увеличение зазора в плунжерной паре увеличивает утечки топлива, а, следовательно, снижает цикловую подачу топлива в цилиндры двигателя.

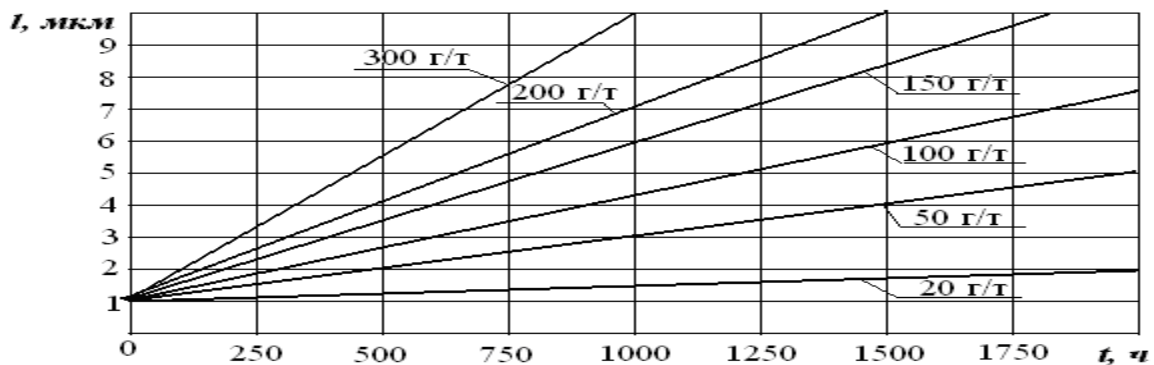


Рис. 2.15. Зависимость изменения зазора в плунжерной паре в процессе эксплуатации при разной концентрации абразива в топливе (диаметр частиц 12 мкм)

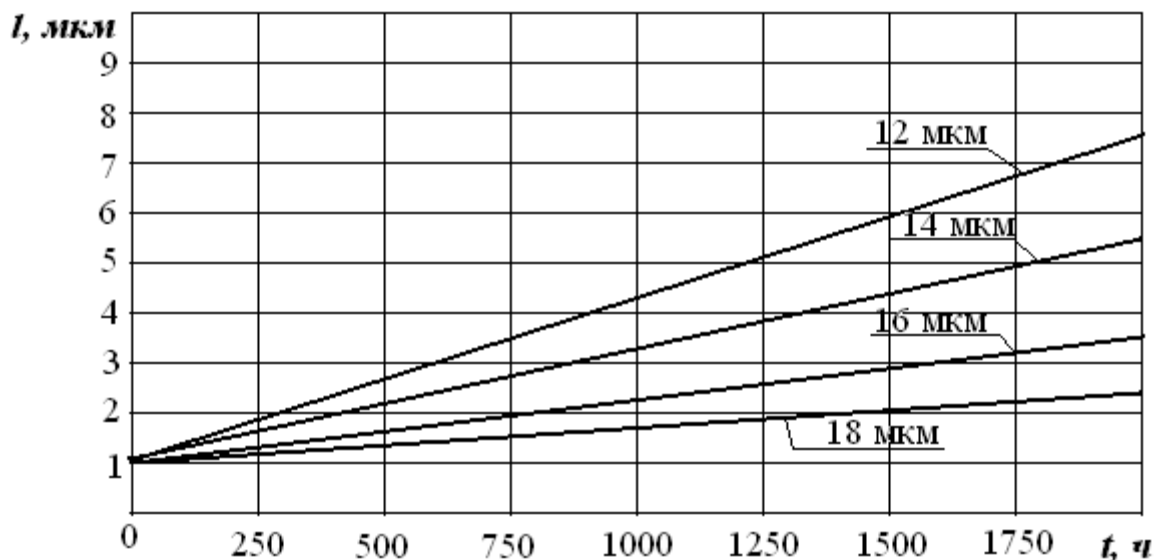


Рис. 2.16. Зависимость изменения зазора в плунжерной паре в процессе эксплуатации для разных размеров абразивных частиц (концентрация частиц 100 г/т)

Величину объемных утечек  $Q_{ут}$  можно определить по формуле, предложенной в работе [110]:

$$Q_{ут} = \frac{\pi \cdot D_{пл} \cdot \Delta P \cdot l^3}{12 \cdot \mu \cdot L_{пл} \cdot \rho_T}, \quad (2.42)$$

где  $D_{пл}$  – диаметр плунжера, мм;

$\Delta P$  – средняя величина разности давлений в полости нагнетания и полости слива топлива, принимаем  $\Delta P = 17,5$  МПа;

$l$  – зазор в плунжерной паре, мм;

$\mu$  – динамическая вязкость дизельного топлива, при температуре 40°C равна 0,024 Па·с.

Формула (2.42) позволяет рассчитать утечки дизельного топлива через зазор, тем самым определить снижение цикловой подачи.

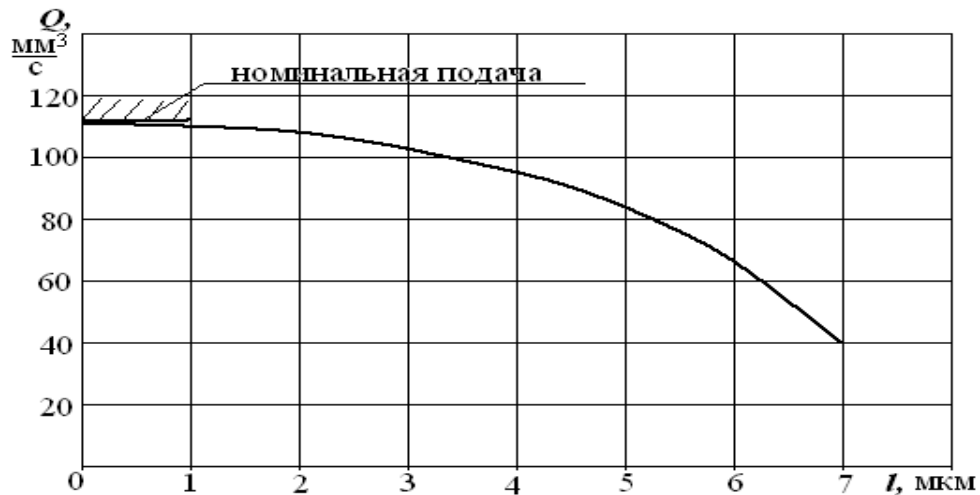


Рис. 2.17. Зависимость уменьшения цикловой подачи топлива одной плунжерной парой при увеличении зазора

Результаты моделирования снижения цикловой подачи топлива одной плунжерной парой с диаметром плунжера 10 мм (номинальная подача 110 мм<sup>3</sup>/с), представлены на рис. 2.17. Из расчетов следует, что при начальном зазоре в 1 мкм утечки составляют 0,20% от номинальной подачи. При зазоре в 5 мкм утечки составляют 22%, а при зазоре в 6 мкм – 38%, что является предельным значением.

Выполним численное моделирование снижения цикловой подачи топлива для дизеля ЯМЗ-236 при наличии абразива  $d_a = 8$  мкм, при различных концентрациях, время эксплуатации 2000 моточасов.

Результаты моделирования позволяют определить снижение суммарной цикловой подачи топлива по всем шести цилиндрам двигателя в единицу времени, т.е. часовой расход топлива  $G_q$ .

Расчетная зависимость  $G_q = f(t)$ , которая аналогична представленной на рис. 2.17, позволяет, с помощью регуляторной характеристики на дизель, получить зависимость  $Ne = f(t)$ , рис. 2.18.



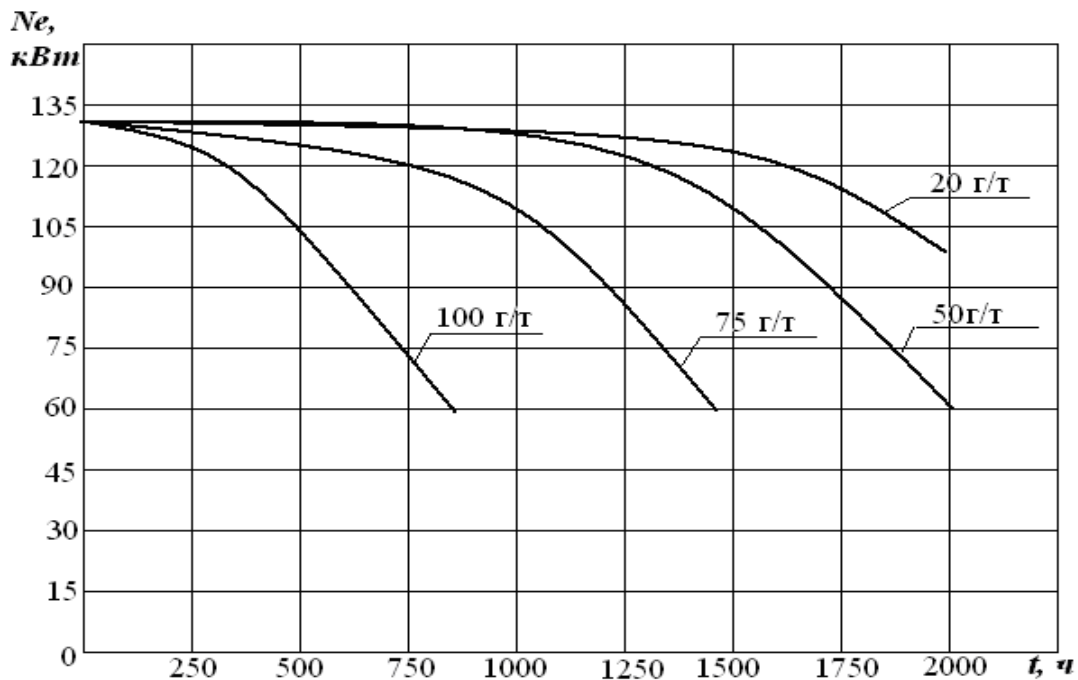


Рис. 2.18. Зависимость снижения эффективной мощности дизеля ЯМЗ-236 при эксплуатации на топливе, содержащем абразив  $d_a = 8$  мкм и различной концентрацией

Разработанная методика численного моделирования позволяет расчетным путем оценить снижение цикловой подачи топлива, а, следовательно, и эффективной мощности двигателя в процессе эксплуатации при содержании в топливе абразивных частиц различной размерной группы и концентрации.

Выполненное моделирование позволяет сделать вывод, что наиболее «опасной» размерной группой абразива являются частицы соизмеримые с максимальным зазором в плунжерной паре, т.е. 6...8 мкм. Концентрация абразивных частиц в дизельном топливе не должна превышать 20 г/т.

На базе данных выводов можно сформулировать требования к степени очистки дизельного топлива. Средства очистки должны обеспечивать удаление абразивных частиц размерной группы 6...8 мкм с высокой эффективностью.

#### 2.4. Теоретическая оценка изменения функциональных характеристик машинно-тракторных агрегатов при различных уровнях загрязненности топлива технологической средой

Теоретический сравнительный анализ изменения производительности и расхода топлива выполним на примере производства ярого ячменя, согласно технологической карты [111], для двух вариантов:

- штатная система очистки топлива, которая допускает наличие в баке и топливной системе механических примесей до 0,016%, воды до 0,059%;
- модернизированная система очистки топлива снижает наличие механических примесей до 0,0012%, воды до 0,0032%.

Приведенные цифры будут подтверждены эксплуатационными испытаниями и представлены в пятом разделе настоящей работы.

Согласно результатов моделирования влияния загрязненности топлива на эффективную мощность дизелей, подраздел 2.3, при наличии механических примесей в топливе 0,01% (100 г/т), эффективная мощность будет изменяться согласно зависимости, представленной на рис. 2.18.

Моделирование производительности комплексов машин и затрат топлива при выполнении технологических операций выполним для трех энергоемких периодов работ:

- основная обработка почвы;
- предпосевная обработка почвы и сев;
- уборка урожая.

Все перечисленные периоды работ связаны с мобильными энергоемкими процессами, где используются различные комплексы машин.

Сравнительный расчет производительности сельскохозяйственных агрегатов и расход топлива при производстве зерна ячменя на площади 100 га выполним на основании изменения эффективной мощности дизеля и удельного тягового сопротивления почвы [78]:

$$W_{ч. Ne} = 0,36 N_{en} \cdot \xi_{Ne} \cdot \eta_{т} \cdot \beta \cdot \tau \frac{1}{k_v}, \text{ (га/ч)} \quad (2.43)$$

где  $N_{en}$  – номинальная мощность дизеля, кВт;

$\xi_{Ne}$  – степень загрузки двигателя от номинальной мощности ([78] стр. 82);

$\eta_{т}$  – тяговый КПД трактора ([78] табл. 3.10);

$\beta$  – коэффициент использования ширины захвата агрегата ([78] табл. 5.3);

$\tau$  – коэффициент использования времени смены ([78] табл. 5.2);

$k_v$  – удельное тяговое сопротивление почвы, кН/м ([78] табл. 3.12; 3.13).

Расчет расхода топлива на единицу выполненной работы по параметру – удельный расход топлива двигателем трактора (комбайна) выполним по формуле:

$$g_{за} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{N_{en} g_{en}}{W_{ч. Ne}}, \text{ кг/га} \quad (2.44)$$

где  $g_{en}$  – удельный расход топлива дизелем, г/кВт·час (определяется по регуляторной характеристике на каждый тип дизеля).

Расчет времени, которое будет потрачено на выполнение технологических операций согласно технологической карты определяется по формуле:

$$T = \frac{F}{W_{ч. Ne}}, \text{ час} \quad (2.45)$$

где  $F$  – объем выполненных работ, га.

Расчет топлива по отдельным технологическим операциям определяем по формуле:

$$G = F \cdot g_{за}, \text{ (кг)} \quad (2.46)$$

Исходные данные для сравнительного расчета производительности техники и расход топлива при производстве зерна ячменя на площади 100 га согласно технологической карты представлены в таблице 2.8.

**Таблица 2.8**

**Энергетические средства и характеристики дизеля**

Марка трактора (комбайна), двигателя	Эффективная номинальная мощность, $N_{en}$ кВт	Эффективная номинальная мощность при наличии загрязнений в топливе, $N_{en}$ кВт	Удельный расход топлива, $g_{en}$ , г/кВт·час	Удельный расход топлива при снижении мощности, $g_{en}$ , г/кВт·час
К-701, двигатель	220	209	227	242

ЯМЗ–240НД				
МТЗ – 80, двигатель Д- 243	59,6	56,6	226	241
ХТЗ–170, двигатель ЯМЗ–236Д	132	125,4	220	231
ДОН – 1500, двигатель ЯМЗ–238АК	173	164,3	220	231

В таблице 2.8 представлены паспортные данные эффективной номинальной мощности и удельного расхода топлива двигателей при использовании дизельного топлива, которое соответствует ДСТУ 3868-99 и данные по эффективной мощности с учетом эксплуатации на топливе, содержащем загрязнения 100 г/т. Корректировка удельного расхода топлива при снижении мощности выполнялась согласно регуляторной характеристики на дизель.

Результаты расчетов по видам технологических операций представлены таблично, табл. 2.9, при использовании топлива, содержащего загрязнения 100 г/т.

В таблицах 2.11 та 2.12 представлены расчеты времени на выполнение комплекса технологических операций, формула (2.55), и суммарного расхода топлива по всем технологическим операциям, формула (2.46).

Из анализа таблиц 2.11 и 2.12 можно сделать вывод, что эксплуатация с/х техники на топливе, содержащем загрязнения, приводит к увеличению времени выполнения технологических операций на 5,1...5,3%. В связи с тем, что увеличивается время выполнения полевых работ, увеличивается расход топлива. Согласно таблицы 2.12, расход топлива увеличивается на 5...6,8% по каждой технологической операции. Из расчета на 100 га обрабатываемой площади расход топлива увеличивается на 283 кг.

**Таблица 2.9**

**Результаты расчетов производительности и расхода топлива при эксплуатации на дизельном топливе без загрязнений**

Технологическая операция	Марка трактора	Марка с/х машины	$N_{ен}$ , кВт	$\xi_{Ne}$	$\eta_T$	$\tau$	$\beta$	$k_v$ , кН/м	$W_{ч.Ne}$ , га/ч	$g_{за}$ , кг/га
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Основная подготовка почвы</b>										
Дискование почвы	К–701	БДС–8,4	220	0,75	0,7	0,81	0,96	5,0	6,46	7,70
Транспортирование удобрений	МТЗ-80	2ПТС–4	59,6	0,70		0,76				
Внесение минеральных удобрений	МТЗ-80	МВД–900	59,6	0,70		0,76	0,62			
Пахота	К–701	ПННО–8–40	220	0,75	0,7	0,81	1,02	$62 \times 0,2$ 2	2,51	19,90
<b>Предпосевная обработка почвы и сев</b>										
Предпосевная культивация с боронованием	ХТЗ–170	АРВ–8,1–01 + БЗСС-	132	0,76	0,62	0,81	0,96	2,6	6,70	4,33

		1,0								
Сев ячменя	МТЗ-80	С 3-3,5	59,6	0,70	0,52	0,71	1,0	1,4	3,96	3,4
Сбор урожая										
Прямое комбайнирование	ДОН – 1500		173	0,72	0,52	0,62	0,96	4,5	3,08	12,36

Таблица 2.10

**Результаты расчетов производительности и расхода топлива при эксплуатации на дизельном топливе, содержащем загрязнения 100 г/т**

Технологическая операция	Марка трактора	Марка с/х машины	$N_{en}$ , кВт	$\xi_{Ne}$	$\eta_T$	$\tau$	$\beta$	$k_v$ , кН/м	$W_{ч.Ne}$ , га/ч	$g_{за}$ , кг/га
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Основная подготовка почвы										
Дискование почвы	К-701	БДС-8,4	209	0,75	0,7	0,81	0,96	5,0	6,14	8,23
Транспортирование удобрений	МТЗ-80	2ПТС-4	56,9	0,70	0,62	0,76				
Внесение минеральных удобрений	МТЗ-80	МВД-900	56,9	0,70	0,62	0,76				
Пахота	К-701	ПННО-8-40	209	0,75	0,7	0,81	1,02	$62 \times 0,2$ 2	2,39	21,16
Предпосевная обработка почвы и сев										
Предпосевная культивация с боронованием	ХТЗ-170	АРВ-8,1-01 + БЗСС-1,0	125,4	0,76	0,62	0,81	0,96	2,6	6,36	4,55
Сев ячменя	МТЗ-80	С 3-3,5	56,6	0,7	0,52	0,71	1,0	1,4	3,76	3,63
Сбор урожая										
Прямое комбайнирование	ДОН – 1500		164,3	0,72	0,52	0,62	0,96	4,5	2,93	12,95

Таблица 2.11

**Расчет времени на выполнение технологических операций**

Параметры работы агрегата	Дискование грунту	Пахота	Предпосевная культивация с боронованием	Сев	Прямое комбайнирование
Время выполнения работы, при использовании дизельного топлива без	15,48	39,84	14,93	25,25	32,47

загрязнений, час					
Время выполнения работы, при использовании дизельного топлива, содержащего загрязнения 100 г/т, час	16,29	41,84	15,72	26,60	34,13
Разница, год ( $\pm$ )	+0,81	+2,00	+0,79	+1,35	+1,66
Процент увеличения, %	5,2%	5%	5,3%	5,3%	5,1%

Таблица 2.12

### Расчет расхода топлива на выполнение технологических операций

Параметры работы агрегата	Дискование грунта	Пахота	Предпосевная культивация с боронованием	Сев	Прямое комбайнирование
Расход дизельного топлива без загрязнений, кг	770	1990	433	340	1236
Расход дизельного топлива содержащего загрязнения 100 г/т, кг	823	2116	455	363	1295
Разница, кг ( $\pm$ )	+53	+126	+22	+23	+59
Процент увеличения, %	6,8%	6,3%	5%	6,7%	4,7%

### Выводы

1. Анализ загрязненности дизельного топлива при заправке в баки и в топливной системе в условиях сельскохозяйственного производства позволил установить, что среднее содержание механических примесей составляет 0,016%, при среднем квадратичном отклонении 0,0054%, а среднее содержание воды 0,059%, при среднем квадратичном отклонении 0,0196%. Анализ дисперсного состава механических загрязнений показал, что в топливе содержатся частицы с размером до 50 мкм.

2. Анализ загрязнений воздуха в районе заливной горловины топливного бака при выполнении различных видов полевых работ показал, что наименьшая запыленность при транспортных работах и соответствует уровню 0,0095 г/м<sup>3</sup>, а максимальная при лушении с уровнем 2,12 г/м<sup>3</sup> израсходованного топлива. Дисперсный состав пыли, попадающей в бак через вентиляционное отверстие, на 96% состоит из частиц размером 1...20 мкм с преобладающей размерной группой 1...10 мкм, что требует повышенной эффективности очистки фильтрами.

3. Теоретические исследования повышения надежности топливных систем дизелей сельскохозяйственной техники позволили установить, что максимальной вероятностью нахождения фильтров в исправном состоянии обладает система с последовательным соединением фильтров. Результаты расчета вероятностей показали, что увеличение количества фильтров и включение их в схему топливоподачи параллельно, является малоэффективным.

4. Анализ вероятностей отказов фильтров показал, что максимальную вероятность отказа имеет фильтр грубой очистки, при любых соединениях фильтров в системах. Для повышения надежности фильтров грубой очистки необходимо разработать мероприятия по повышению фильтрующих, коагулирующих и водоотталкивающих свойств. Применение высокоэффективных фильтров грубой очистки позволит повысить надежность фильтров тонкой очистки и увеличит срок их эксплуатации до замены в пределах 1000 моточасов.

Наиболее эффективной системой соединения фильтров следует считать последовательное соединение, состоящее из фильтра грубой очистки и двух фильтров тонкой очистки.

5. Математическое моделирование влияния загрязненности топлива на цикловую подачу топливного насоса высокого давления и эффективную мощность дизелей позволило получить зависимости снижения мощности дизелей в процессе эксплуатации при содержании в топливе абразивных частиц различных размерных групп и различных концентраций. В процессе моделирования установлено, что наиболее «опасной» размерной группой абразива являются частицы, соизмеримые с максимальным зазором в плунжерной паре, т.е. 6...8 мкм. Концентрация абразивных частиц в топливе не должна превышать 20 г/т. Моделирование снижения эффективной мощности дизеля показало, что при таких концентрациях снижение мощности в течении 2000 моточасов эксплуатации будет происходить на 25%.

6. Теоретическая оценка изменения производительности и расхода топлива с/х техникой при выполнении технологических операций показала, что применение загрязненного дизельного топлива увеличивает сроки полевых работ на 5,1...5,3% при одновременном увеличении расхода топлива на 5...6,8% по каждой технологической операции на 100 га обрабатываемой площади.

### РАЗДЕЛ 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПОРИСТЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

Существует несколько различных методов обезвоживания нефтепродуктов. Однако в хозяйствах агропромышленного комплекса Украины для обезвоживания дизельного топлива применяются в основном два метода: гравитационного отстаивания (из-за простоты и доступности) и фильтрации с помощью пористых перегородок. Создание высокоэффективных средств обезвоживания топлива требует знания физики процесса, факторов и степени их влияния на эффективность обезвоживания топлив.

#### 3.1. Оценка обезвоживания дизельного топлива методом гравитационного отстаивания

Наиболее простым способом обезвоживания топлив является метод отстаивания или седиментации. Удаление свободной воды из нефтепродуктов осуществляется в результате выпадения взвешенных в топливе капель воды под действием гравитационной силы. С помощью этого способа можно удалить из топлива часть свободной воды.

Топлива, содержащие свободную воду, являются, как правило, мало-концентрированными эмульсиями, при разделении которых действуют закономерности, характерные для свободного осаждения микрокапель воды. Можно считать, что в верхних слоях топлива микрокапли воды осаждаются, не соприкасаясь между собой, и на каждую из них действуют сила тяжести, вектор которой направлен вертикально вниз, подъемная сила, вектор которой направлен вертикально вверх, и сила сопротивления среды, действующая также вертикально вверх.

Сила тяжести, действующая на каплю сферической формы:

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 g \rho_{\text{в}}, \quad (3.1)$$

где  $d$  – диаметр капли воды, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

Подъемная сила, действующая на каплю, определяется законом Архимеда:

$$A = \frac{1}{6} \pi d^3 g \rho_T, \quad (3.2)$$

где  $\rho_T$  – плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>.

Сила сопротивления среды зависит главным образом от физических свойств нефтепродукта и режима движения капли. Принимая во внимания, что микрокапли воды в силу своих малых размеров оседают в условиях ламинарного движения, силу сопротивления среды можно рассматривать как сумму сил трения между каплей воды и топливом:

$$R = \frac{\varphi \rho_T \pi d^2 V^2}{8}, \quad (3.3)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сопротивления;

$V$  – скорость осаждения капли, м/с.

При постоянной скорости осаждения капли, когда сила сопротивления будет равна разности сил тяжести и подъемной силы, справедливо равенство:

$$\frac{1}{6} \pi d^3 g (\rho_в - \rho_T) - \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_T \varphi V^2 = 0. \quad (3.4)$$

Экспериментально установлено [70], что при ламинарном режиме осаждения коэффициент сопротивления равен:

$$\varphi = \frac{24}{R_e} = \frac{24 \mu_T}{V d \rho_T}, \quad (3.5)$$

где  $R_e$  – критерий Рейнольдса;

$\mu_T$  – динамическая вязкость топлива, Нс/м<sup>2</sup>.

Подставив значение коэффициента сопротивления (3.5) в уравнение (3.4) можно определить скорость осаждения капли воды в топливе:

$$V = \frac{g d^2 (\rho_в - \rho_T)}{18 \mu_T}. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) является выражением Стокса для случая осаждения сферической капли воды в жидкости с меньшей плотностью, чем вода.

Однако на границе раздела двух жидкостей, вследствие поверхностного взаимодействия между молекулами воды и топлива, будут возникать перемещения воды внутри капли – микротоки, влияющие на скорость осаждения капли, с учетом чего величина силы сопротивления движению микрокапли воды в топливе равна:

$$R = \pi \mu_T V d \frac{2 \mu_T + 3 \mu_в}{\mu_T + \mu_в}, \quad (3.7)$$

где  $\mu_в$  – динамическая вязкость воды, Нс/м<sup>2</sup>.

Если составить уравнение, аналогичное (3.4), то выражение для определения скорости осаждения капли примет вид:

$$V = \frac{g d^2 (\rho_в - \rho_T)}{6 \mu_T} \frac{\mu_T + \mu_в}{2 \mu_T + 3 \mu_в}. \quad (3.8)$$

По сравнению со скоростью осаждения, определенной по формуле (3.6), получаются отклонения до  $\pm 10$  %. Это уравнение не полностью описывает особенности движения микрокапель воды в топливе, поскольку учитывает лишь тормозящее действие, обусловленное подвижностью поверхности осаждающейся капли.

В работе [70] приводится формула, учитывающая поверхностные явления молекулярного характера, в частности поверхностное натяжение на границе раздела фаз. С

учетом электрокинетических явлений, возникающих на поверхности раздела фаз, например эффекта поляризации молекул, уравнение для определения скорости осаждения капли примет вид [45]:

$$V = \frac{gd^2(\rho_g - \rho_T)}{18\mu_T} \frac{(1 + \frac{d}{4\gamma z})(\mu_T + \mu_g) + \frac{\sigma^2}{3\gamma}}{(1 + \frac{d}{4\gamma z})(2\mu_T + 3\mu_g) + \frac{\sigma^2}{\gamma}}, \quad (3.9)$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность электрического заряда капли, Кл/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – удельная электрическая проводимость топлива, См/м;

$Z$  – коэффициент, зависящий от природы электрохимического процесса.

Вследствие принципиальных различий между процессами осаждения в топливе капель воды и твердых сферических частиц скорость осаждения капель значительно меньше теоретически определенной формулами (3.6) и (3.8).

Из этих выражений следует, что самым важным фактором в процессе осаждения воды является диаметр микрокапли, так как скорость осаждения микрокапель изменяется прямо пропорционально квадрату диаметра капли. Другими факторами, влияющими на эффективность осаждения микрокапель, являются вязкость и плотность топлива: чем больше вязкость и плотность, тем меньше скорость осаждения капли.

Зависимость времени осаждения от размера капель воды на глубину осаждения  $h$  выражается формулой:

$$\tau = \frac{18\mu_T h}{gd^2(\rho_g - \rho_T)}, \quad (3.10)$$

где  $\tau$  – время осаждения капли, с;

$h$  – глубина осаждения капли, м.

Из формул (3.6, 3.8 и 3.10) следует, что скорость и время осаждения капли воды определяются напряженностью гравитационного поля, плотностью воды и топлива, вязкостью и диаметром капли. Напряженность гравитационного поля в данном случае постоянна, следовательно, скорость и время осаждения зависят от температуры топлива, диаметра капель воды, а также от конструктивных особенностей фильтров-отстойников.

В мировой и отечественной практике существуют нормы, регламентирующие длительность отстаивания топлив с различной плотностью и вязкостью. Так, для отечественных дизельных топлив длительность отстаивания должна быть не менее 3-х часов на каждый метр высоты слоя топлива в резервуаре.

Как показывает многолетняя практика, применение метода отстаивания, требующего большого резервуарного парка и значительного времени, не обеспечивает требуемой степени очистки топлив от свободной воды и механических примесей.

В связи с этим, практический интерес представляет решение вопроса по оценке эффективности данного метода обезвоживания топлив в зависимости от плотности, вязкости и температуры топлива, а также от размера микрокапель воды. Актуальность данного вопроса еще более повышается, если учесть, что метод отстаивания лежит в основе работы практически большинства технических средств, используемых для обезвоживания топлив (фильтры, сепараторы, отстойники, циклоны, гидроциклоны и т.д.).

Для оценки эффективности обезвоживания дизельных топлив методом гравитационного отстаивания были определены теоретическая скорость осаждения капель воды и их время осаждения в различных топливах с использованием уравнений (3.6) и (3.8).

Скорость осаждения капель воды рассчитана для различных дизельных топлив, выпускаемых в соответствии с ДСТУ 3868-99 в диапазоне температур от 0 до 50 °С.

Результаты теоретических расчетов по определению эффективности обезвоживания топлива методом отстаивания приведены на рис. 3.1 – 3.3.



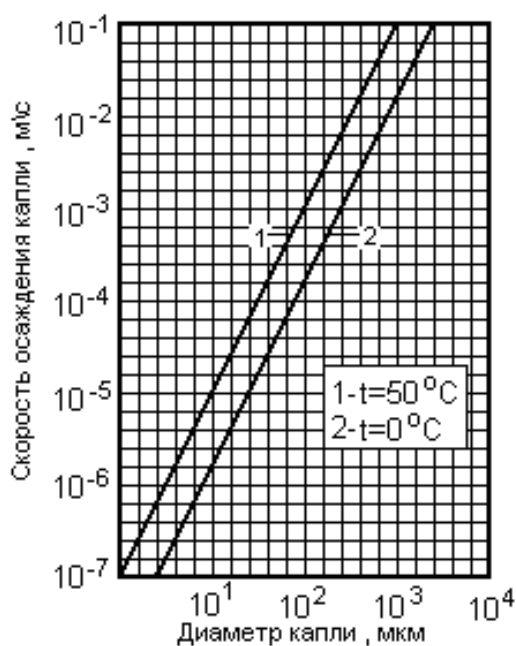


Рис. 3.1. Зависимость скорости осаждения капли от ее диаметра и температуры топлива

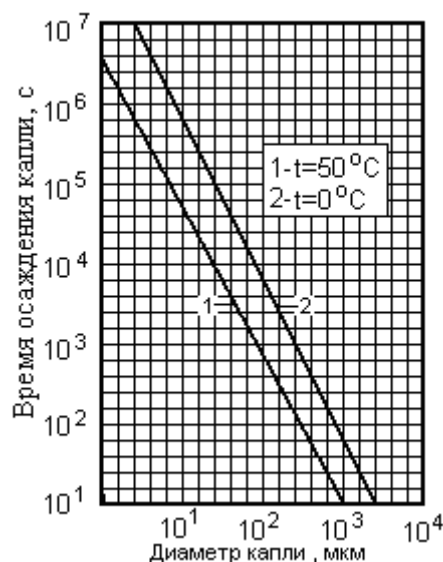


Рис. 3.2. Зависимость времени осаждения капли на 1 м налива топлива от ее диаметра и температуры топлива

Из анализа зависимости изменения скорости осаждения капли воды от диаметра капли и температуры топлива, рис. 3.1, следует, что эффективное осаждение возможно только на диаметрах капель 5...10 мм, при этом увеличение температуры топлива на каждые  $10^\circ\text{C}$  изменяет скорость осаждения в 1,3 раза.

Анализ зависимости времени осаждения от диаметра капли и температуры топлива позволяет утверждать, что с увеличением диаметра капли на порядок, например с 1 мкм до 10 мкм, время осаждения уменьшается в 83 раза. При этом изменение температуры топлива влияет в меньшей степени.

Например, для капли воды диаметром 1 мкм и температуры топлива  $25^\circ\text{C}$  время осаждения составляет 2777 часа, а для капли диаметром 10 мкм время осаждения составляет 33,3 часа.

Теоретическая оценка обезвоживания дизельного топлива методом гравитационного отстаивания позволяет сделать вывод о недостаточной эффективности метода. Обезвоживание таким методом требует времени от 300 до 2700 часов.

В течение суток гравитационным методом можно удалить только капли воды диаметром более 200 мкм.

Кроме того, применение такого метода требует большого резервуарного парка, что в условиях агрохозяйств осуществить трудно.

### 3.2. Математическая модель обезвоживания дизельного топлива с помощью пористых перегородок

Механизм обезвоживания топлив с помощью пористых перегородок частично рассматривается в работах С.С. Воюцкого [91] и Е.Н. Жулдыбина [56].

На основании перечисленных работ приближение и последующее соприкосновение микрокапель воды с волокнами может происходить с помощью перехвата (прямое соприкосновение микрокапель с волокнами), броуновской диффузии и инерционного столкновения.

Эффективность перехвата ( $E_n$ ) может быть рассчитана по формуле [56, 91]:

$$E_n = \frac{1}{2(2 - l_n R_e)} \left[ 2(1 + K_n) \ln(1 + K_n) + \frac{1}{1 + K_n} \right], \quad (3.11)$$

где:  $K_n = \frac{d_k}{d_b}$  - коэффициент перехвата;

$d_b$  - диаметр волокна;

$d_k$  - диаметр капли воды;

$R_e$  - число Рейнольдса.

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$R_e = \frac{\rho_T d_b V_n}{4\mu_T}, \quad (3.12)$$

где:  $V_n$  - скорость потока топлива, м/с.

Эффективность диффузного взаимодействия капель воды и волокон можно оценить по формуле:

$$E_g = 2,16 \left[ \frac{1}{2(2 - \ln R_e)} \right]^{1/3} \left( \frac{D}{V_n d_b} \right), \quad (3.13)$$

где:  $D$  - коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Эффективность инерционного  $E_u$  столкновения капли воды с волокном определяется по формуле:

$$E_u = \frac{K_u^3}{K_u^3 + 1,54K_u^2 + 1,76}, \quad (3.14)$$

где:  $K_u$  - коэффициент инерционной силы.

Коэффициент инерционной силы  $K_u$  можно высчитать по формуле:

$$K_u = \frac{(\rho_g - \rho_T) V_n d_k^2}{9\mu_T d_b}, \quad (3.15)$$

Рассчитать с помощью уравнений (3.11-3.15) общую эффективность взаимодействия

микрокапель с волокнами, образующими пористую перегородку, достаточно сложно. Однако можно отметить, что с увеличением плотности расположения волокон в пористой перегородке эффективность диффузии и особенно перехвата возрастает, при этом эффективность приближения микрокапель воды к волокнам уменьшается. Особенно снижается эффективность инерционного столкновения, т.к. коэффициент инерционных сил изменяется прямо пропорционально плотности воды и топлива и обратно пропорционально вязкости топлива.

На основании работ [12, 16, 50, 52] перехват является основным видом приближения и соприкосновения капли воды с волокном. Инерционное столкновение существенной роли не играет, а диффузия может способствовать столкновению с волокнами очень мелких капель воды.

Адгезия микрокапли воды к волокну может произойти только тогда, когда между ними нет топливной пленки. Для этого капля воды должна вытеснить топливную пленку с волокна и смочить его. Этот процесс зависит от поверхностных свойств волокон. Топливная пленка легко вытесняется с гидрофильных волокон (хлопок, стекло) и значительно труднее – с гидрофобных, обладающих низкой поверхностной энергией (полиэтилен, тефлон).

Процесс адгезии капли воды к поверхности волокон начинается после вытеснения топливной пленки с его поверхности. Адгезия капли воды к поверхности волокон коагулирующей перегородки происходит за счет уменьшения свободной поверхностной энергии на поверхности раздела трех фаз. Для установления влияния различных факторов на адгезию капли воды к поверхности волокон обычно рассматривают этот процесс на плоской, сферической и цилиндрической поверхностях.

Сферическая капля воды после соприкосновения растекается на плоской твердой поверхности и достигает равновесного состояния с краевым углом  $\theta$ , (рис. 3.3). При этом имеет место соотношение:

$$\sigma_{n-t} - \sigma_{n-b} = \sigma_{b-t} \theta, \quad (3.16)$$

где  $\sigma_{n-t}$ ,  $\sigma_{n-b}$ ,  $\sigma_{b-t}$  - межфазное натяжение соответственно на границе раздела "поверхность – топливо", "поверхность – вода", "вода – топливо".

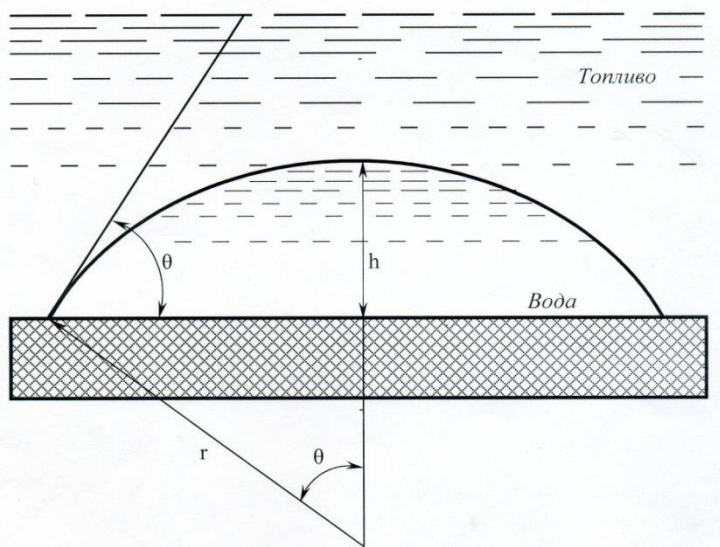


Рис. 3.3. Равновесное состояние капли на плоской поверхности

Свободная поверхностная энергия  $E$  поверхности раздела вода-топливо до адгезии:

$$E_0 = \sigma_{b-t} S_0 + \sigma_{n-t} S_{n-b}, \quad (3.17)$$

после адгезии:

$$E = \sigma_{b-t} S_{b-t} + \sigma_{n-b} S_{n-b}, \quad (3.18)$$

Уменьшение свободной энергии в результате адгезии капли воды к поверхности

можно определить как разность уравнений (3.17) и (3.18):

$$-\frac{\Delta E}{\sigma_{n-t}S_0} = 1 - \frac{1}{2} \left[ 2(1 - \cos \theta)^2 (2 + c \cos \theta) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (3.19)$$

и

$$\frac{S_{b-t}}{S_0} = \left[ \frac{2}{(1 - \cos \theta)(2 + \cos \theta)^2} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (3.20)$$

где:  $-\frac{\Delta E}{\sigma_{n-t}S_0} \frac{S_{b-t}}{S_0}$  - соответственно относительное уменьшение свободной

поверхностной энергии и относительное изменение поверхности раздела "вода-топливо" вследствие его адгезии к поверхности до краевых углов от 0 до 180°.

Из уравнений (3.19) и (3.20) следует, что адгезия капли воды к плоской твердой поверхности определяется лишь свойствами этой поверхности, т.е. величиной краевого угла  $\theta$ .

Уравнения (3.19) и (3.20) также справедливы и для случая адгезии капли на сферической поверхности (рис. 3.4).

Для сферической поверхности уравнения (3.19) и (3.20) имеют вид:

$$-\frac{\Delta E}{\sigma_{b-t}S_0} = \frac{1 - r(2r - y) - Rx \cos \theta}{2r_0^2}, \quad (3.21)$$

и

$$\frac{S_{b-t}}{S_0} = \frac{r(2r - y)}{2r_0^2}, \quad (3.22)$$

где  $r_0$  - относительный радиус капли, м.

Из уравнений (3.21) и (3.22) следует, что адгезия капли воды к сферической поверхности уменьшается с уменьшением диаметра капли и увеличением краевого угла  $\theta$ .

При адгезии капли к цилиндрической поверхности (рис. 3.5) относительное уменьшение свободной поверхности энергии имеет промежуточное значение, находящееся между показателями для сферической и плоской поверхностей.

Из проведенного анализа процесса следует, что:

- эффективность адгезии капли воды к поверхности волокна определяется его поверхностными свойствами (краевым углом  $\theta$ ), и диаметром волокон, а также размером капли воды;
- чем меньше диаметр волокна и больше размер капли, тем быстрее происходит адгезия капли к поверхности волокна.

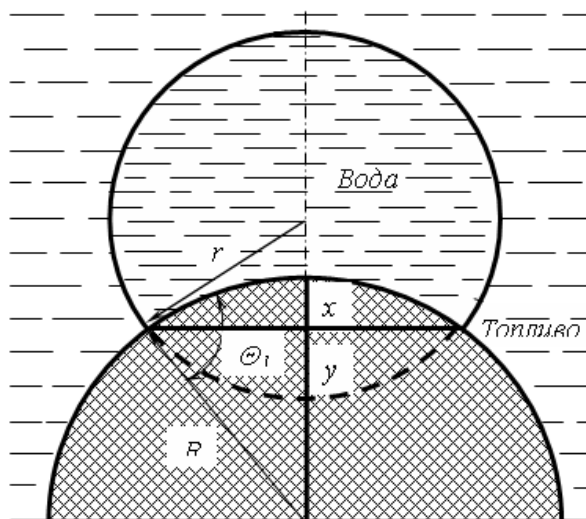


Рис. 3.4. Равновесное состояние капли на сферической поверхности

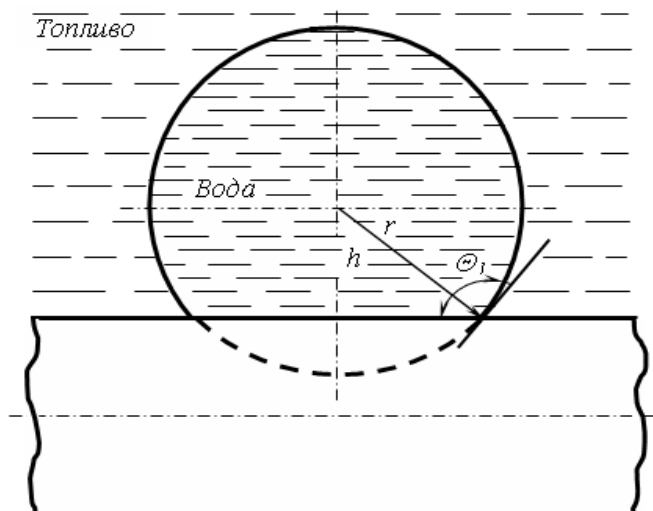


Рис. 3.5. Равновесное состояние капли на цилиндрической поверхности

Таким образом, при разработке коагулирующих элементов для фильтров-сепараторов, необходимо учитывать поверхностные свойства волокон, т.к. от их правильного подбора зависит процесс адгезии и эффективность коалесценции микрокапель воды в коагулирующей перегородке.

Механизм коалесценции капель воды в коагулирующей перегородке зависит от их размера. Поэтому различают два вида эмульсии воды в топливе – первичную, состоящую из микрокапель воды диаметром 10 мкм и более, и вторичную, состоящую из микрокапель диаметром около 1 мкм.

Коалесценция капель первичной эмульсии происходит по двум механизмам. В первом случае капли воды коагулируются на смачиваемой ими поверхности волокнистого материала, образуя жидкую пленку, которая стекает по наружной поверхности перегородки. Во втором случае коалесценция происходит в порах коагулирующей перегородки, в этом случае волокна не смачиваются. Эффективность отделения капель воды первичной эмульсии определяется отношением средних диаметров капель на входе в перегородку и на выходе из нее. Обычно эффективность отделения капель воды выше, если они смачивают волокна. При выборе необходимых волокон основное значение придается структуре волокнистого слоя, поры которого должны быть не меньше размера поступающих капель, т.е. необходимо учитывать возможность дробления капель воды при ударе об волокна.

Большое влияние на процесс коалесценции капель первичной эмульсии оказывают поверхностные свойства топлива. Скорость коалесценции уменьшается с увеличением

вязкости и плотности топлива, а также с уменьшением межфазного натяжения на поверхности раздела вода – топливо.

При оптимизации процесса обезвоживания топлива существенную роль играет правильный выбор пористой волокнистой структуры коагулирующей перегородки.

Коалесценция вторичных эмульсий отличается от первичных, и заключается в том, что вначале происходит адгезия капли к поверхности волокна и лишь затем ее коалесценция с другой каплей. Задача состоит в увеличении размеров капель до такого уровня, при котором их можно рассматривать как первичную эмульсию. Разделение вторичных эмульсий в пористом слое более эффективно в системах с высоким межфазным натяжением и большей разностью плотностей воды и топлива. При этом особенно важен выбор волокон коагулирующей перегородки. Наибольшей эффективностью обладают пористые среды из тонких волокон с большой шероховатостью [50, 52]. С уменьшением диаметра волокон эффективность разделения эмульсий возрастает.

Для каждого типа волокон существует максимальная скорость, при превышении которой продолжительность задерживания капель воды на волокнах будет недостаточной для осуществления их коалесценции, а также оптимальная толщина пористого волокнистого слоя, зависящая от свойств волокон и топлива, превышение которой может привести к повторному дроблению скоагулировавшихся капель воды.

На каплю воды после ее адгезии к волокну и последующей коалесценции с другими каплями действуют силы сцепления с волокном, гидродинамическая сила потока и эффективная сила тяжести [50, 52].

Сила сцепления  $F_c$  капли с волокном, направленная перпендикулярно к поверхности волокна, и равна:

$$F_c = \sigma_{n-g} \cdot l \quad (3.23)$$

где  $l$  – периметр соприкосновения капли с поверхностью волокна, который зависит от диаметра волокна, согласно работы [50] принимают  $l = d_g$ .

Сила отрыва  $F_0$  капли с поверхности волокна равна:

$$F_0 = (\sigma_b - \sigma_t + \sigma_{bt} \cos \theta) \cdot d_g, \quad (3.24)$$

где:  $\sigma_b$ ,  $\sigma_t$  – поверхностное натяжение соответственно воды и топлива.

Для отрыва капли от волокна должно соблюдаться условие  $F_0 \geq F_c$ .

Сила, которая действует на каплю при ее отрыве от поверхности волокна, складывается из гидродинамической силы потока и эффективной силы тяжести.

Гидродинамическая сила горизонтального ламинарного потока в пористой среде равна:

$$F_r = (P_{bk} - P_l)S = \frac{g\mu_T L}{K_n}, \quad (3.25)$$

где:  $P_{bk}$  и  $P_l$  – давление жидкости соответственно на входе в пористый слой и на глубине  $L$ , МПа;

$S$  – поперечное сечение капли, прилипшей к волокну,  $m^2$ ;

$g$  – расход топлива через пористый волокнистый слой,  $m^3/c$ ;

$L$  – расстояние (глубина) от входа в пористый волокнистый слой до места адгезии капли, м;

$K_n = \frac{\Pi}{B}$  – коэффициент проницаемости пористого слоя,  $m^2$ ;

$B$  – коэффициент характеризующий геометрию пор,  $1/m^2$ ;

$\mu_T$  – динамическая вязкость топлива,  $Нс/m^2$ ;

$\Pi$  - пористость слоя.

Поэтому результирующая сила для горизонтального потока равна:

$$F_p = \sqrt{\left(\frac{\nu S_n \mu_T L}{K_n}\right)^2 + V^2 g^2 (\rho_\delta - \rho_T)^2}, \quad (3.26)$$

где:  $S_n$  - среднее поперечное сечение поры, м<sup>2</sup>;

$V = \frac{1}{6} \pi d_\kappa^3$  - объем капли;

Необходимо отметить, что для каждой пористой коагулирующей перегородки существует критический перепад давления ( $\Delta P_{kp}$ ), критическая скорость потока ( $v_{kp}$ ), критический объем капли воды ( $V_{kp}$ ), при достижении которых она отрывается от волокна:

$$\Delta P_{kp} \geq \sqrt{d_\delta^2 (\sigma_b - \sigma_t + \sigma_{bt} \cos \theta)^2 - V^2 g^2 (\rho_\delta - \rho_T)^2}, \quad (3.27)$$

$$v_{kp} \geq \frac{K_n}{\mu_T S_n L} \sqrt{d_\delta^2 (\sigma_b - \sigma_t + \sigma_{bt} \cos \theta)^2 - V^2 g^2 (\rho_\delta - \rho_T)^2}, \quad (3.28)$$

$$V_{kp} \geq \frac{1}{K_n (\rho_\delta - \rho_T) g} \sqrt{d_\delta^2 (\sigma_b - \sigma_t + \sigma_{bt} \cos \theta)^2 - V^2 \mu_T^2 (\rho_\delta - \rho_T)^2}, \quad (3.29)$$

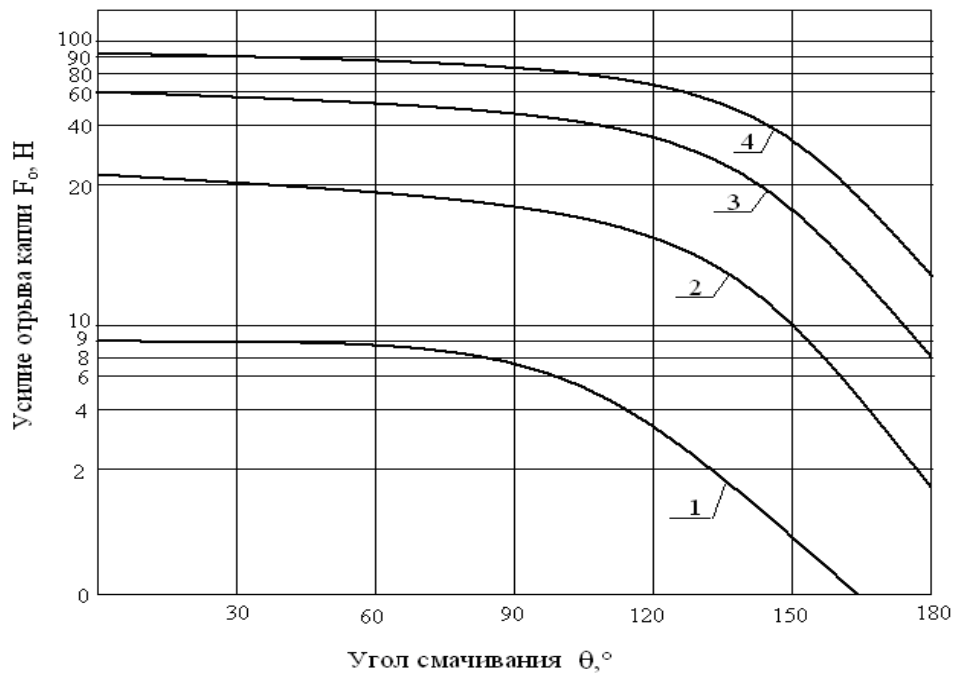


Рис. 3.6. Зависимость усилия отрыва капли воды от различного угла смачивания материала волокна:

1 -  $\sigma_T = 25$  кН/см; 2 -  $\sigma_T = 20$  кН/см; 3 -  $\sigma_T = 15$  кН/см; 4 -  $\sigma_T = 10$  кН/см.

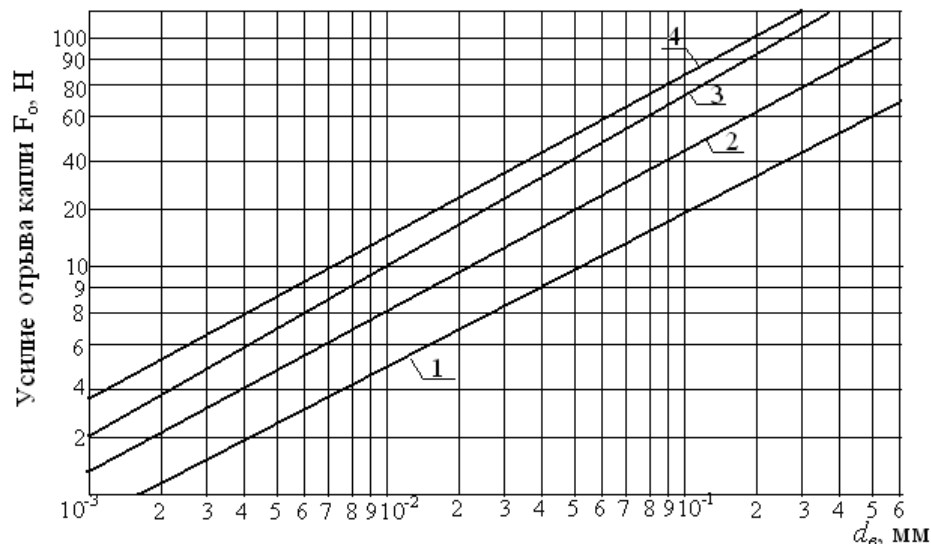


Рис. 3.7. Зависимость усилия отрыва капли воды от различного диаметра волокна:  
 1 –  $\theta = 180^\circ$ ; 2 –  $\theta = 150^\circ$ ; 3 –  $\theta = 90^\circ$ ; 4 –  $\theta = 60^\circ$

Разработанная математическая модель процесса обезвоживания дизельного топлива с помощью пористых перегородок, формулы (3.24 – 3.29) позволяет выполнить моделирование изменения усилия отрыва капли воды с наружной поверхности пористой перегородки фильтра в зависимости от:

- величины поверхностного натяжения топлива  $\sigma_t$ ;
- поверхностных свойств волокон, т.е. материала волокон (угол смачивания  $\theta$ );
- диаметра волокон (периметр соприкосновения капель воды с поверхностью волокна).

Результаты численного моделирования представлены на рис. 3.6 и 3.7.

Результаты моделирования, рис. 3.6 и рис. 3.7, позволяют сделать следующие выводы.

С увеличением угла смачивания и одновременно с увеличением поверхностного натяжения топлива сила отрыва капли воды от поверхности волокна уменьшается, что будет способствовать эффективности работы фильтра.

Уменьшение диаметра волокна фильтрующего материала способствует уменьшению силы отрыва капли воды. При этом, если материал волокна будет обладать большой величиной угла смачивания (гидрофобные свойства), то эффект отталкивания воды будет увеличиваться.

Полученные научные результаты в виде зависимостей на рис. 3.6 и 3.7 позволяют сделать практический вывод, что конструкция фильтра должна состоять из материала, который по отношению к воде имеет максимальный угол смачивания (в пределах  $140...180^\circ$ ) и минимальный диаметр волокна (в пределах  $10...100$  мкм). Как показали результаты моделирования, при таких параметрах материала фильтра будет обладать хорошей эффективностью отделения капель воды от дизельного топлива.

### 3.3. Оценка эффективности обезвоживания дизельных топлив с помощью пористых перегородок

Окончательное разделение водотопливных эмульсий происходит на водоотталкивающей пористой перегородке. Капли воды, не осевшие в отстойник фильтра сепаратора, уносятся потоком топлива на водоотталкивающую пористую перегородку.

Как следует из выводов предыдущего раздела в качестве водоотталкивающих



перегородок выбираются гидрофобные материалы обладающие низкой свободной поверхностной энергией ( $\theta = 140-180^\circ$ ) и минимальным диаметром волокна. Отделение воды от топлива на таких перегородках происходит за счет образования в ее капиллярах топливной пленки, которая легко пропускает топливо, т.к. в этом случае отсутствует поверхность раздела, и задерживает воду. Следовательно, после погружения фильтра в топливо и заполнения пор материала фильтра топливом, изменяются водоотталкивающие свойства пористых перегородок, которые необходимо учитывать при оценке эффективности топливных фильтров.

Для того, чтобы капля воды была продавлена через пористую перегородку, необходимо разрушить сформировавшуюся на поверхности волокон топливную пленку. Это достигается за счет давления топливного потока, которое должно быть не менее критического давления. Это критическое давление  $P_{kp}$  может быть рассчитано по формуле:

$$P_{kp} = \frac{\sigma_{bt} l_n}{S_n}, \quad (3.30)$$

где:  $l_n$  - периметр поры, м;

$S_n$  - площадь поры, м<sup>2</sup>.

Для круглой поры формула (3.30) принимает вид:

$$P_{kp} = \frac{4\sigma_{bt}}{d_n}, \quad (3.31)$$

где:  $d_n$  - диаметр поры, м.

Работоспособность водоотталкивающей пористой перегородки сохраняется при  $P < P_{kp}$ . Как следует из предыдущего подраздела поверхностные свойства пористых перегородок зависят от угла смачивания  $\theta$ . Однако, зависимость этого показателя от поверхностных свойств углеводородных топлив неизвестна. Затруднено и экспериментальное измерение угла смачивания капель воды пористых перегородок находящихся в жидкой топливной среде, где поверхностные свойства волокон и топлива изменяются.

Для продавливания капли воды через пористую перегородку необходимо приложить давление  $H_1$ . При погружении этой перегородки в топливо, в ее порах образуется топливная пленка, которая покрывает поры, образуя барьер, для продавливания через который необходимо приложить давление  $H_2 > H_1$ . Но прежде чем продавить каплю воды через пору, необходимо вначале вытеснить топливную пленку с поверхности поры, для чего требуется затратить работу, численно равную работе адгезии  $W_a$ , затраченной топливом при смачивании периметра поры.

Эта работа адгезии численно равна разности  $H_2$  и  $H_1$ . Но с другой стороны работу адгезии можно рассчитать по уравнению Дюпре [52]:

$$W_a = \sigma_t (1 + \cos \theta), \quad (3.32)$$

Но так как уравнение (3.32) относится к поре с периметром, равным 1 см, то для поры с периметром, отличающимся от единицы, работа адгезии будет равна:

$$W_a = \sigma_t (1 + \cos \theta) l. \quad (3.33)$$

С другой стороны:

$$W_a = (H_2 - H_1) S. \quad (3.34)$$

Приравняв правые части уравнений (3.32) и (3.33) получим:

$$\sigma_t (1 + \cos \theta) l = (H_2 - H_1) S. \quad (3.35)$$

В связи с тем, что количественное определение площади поры представляет большую трудность и связано с большой погрешностью, для расчета  $S$  можно воспользоваться

формулой:

$$S = \frac{\sigma_{bt}l}{P_{kp}}. \quad (3.36)$$

Но  $P_{kp} = H_2$ . Подставив  $S$  в уравнение (3.35), получим:

$$\sigma_t(1 + \cos\theta)l = (H_2 - H_1) \frac{\sigma_{bt}l}{H_2}. \quad (3.37)$$

После преобразования уравнения (3.37), получим:

$$\cos\theta = \frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} - 1, \quad (3.38)$$

или

$$\theta = \arccos\left[\frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} - 1\right], \quad (3.39)$$

Зная, что  $\cos\theta$  может изменяться от  $+1$  до  $-1$ , а  $\theta$  соответственно от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , условия применимости этой формулы можно записать в виде:

$-1 \leq \cos\theta \leq +1$ , при этом,  
 $\cos\theta = -1$  - идеальная гидрофобная поверхность;  
 $\cos\theta = +1$  - идеальная гидрофильная поверхность;

$$-1 \leq \frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} - 1 \leq +1. \quad (3.40)$$

Рассмотрим возможные варианты:

а) 
$$-1 \leq \frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} - 1 \leq +1,$$

при этом:

$$\frac{H_1}{H_2} \leq +1, \quad (3.41)$$

б) 
$$\frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} \leq +1,$$

при этом:

$$\frac{H_1}{H_2} \geq \frac{\sigma_{bt} - 2\sigma_t}{\sigma_{bt}}, \quad (3.42)$$

тогда: 
$$\frac{\sigma_{bt} - 2\sigma_t}{\sigma_{bt}} \leq \frac{H_1}{H_2} \leq 1. \quad (3.43)$$

Известно, что если  $\theta$  находится в пределах от  $0$  до  $90^\circ$  - поверхность гидрофильная; от  $90$  до  $180^\circ$  - поверхность гидрофобная.

Для гидрофобных поверхностей справедливо неравенство:  $-1 \leq \cos\theta < 0$ ,  
при этом:

$$-1 \leq \frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} - 1 < 0, \quad (3.44)$$

или:

$$\frac{\sigma_{bt} - \sigma_t}{\sigma_{bt}} \leq \frac{H_1}{H_2}. \quad (3.45)$$

Условие для гидрофобности поверхности с учетом выражений (3.44) и (3.45) можно представить в виде:

$$\frac{\sigma_{bt} - \sigma_t}{\sigma_{bt}} \leq \frac{H_1}{H_2} \leq 1. \quad (3.46)$$

Выражение для гидрофильной поверхности можно представить в виде:  $0 < \cos\theta \leq 1$ , при этом:

$$0 < \frac{(H_2 - H_1)\sigma_{bt}}{H_2\sigma_t} - 1, \quad (3.47)$$

или:

$$\frac{H_1}{H_2} < \frac{\sigma_{bt} - \sigma_t}{\sigma_{bt}}. \quad (3.48)$$

Условие гидрофильности поверхности с учетом (3.47) и (3.48) выражается неравенством:

$$\frac{\sigma_{bt} - 2\sigma_b}{\sigma_{bt}} \leq \frac{H_1}{H_2} < \frac{\sigma_{bt} - \sigma_b}{\sigma_{bt}}. \quad (3.49)$$

При  $\theta=90^\circ$ ,  $\cos\theta=0$  – граничное условие.

Условие гидрофобности поверхности фильтра, имеющего топливную пленку в порах материала, т.е. водоотталкивающие свойства, определяются выражением (3.46), из которого следует, что на водоотталкивающие свойства пористых перегородок значительное влияние оказывает межфазное натяжение  $\sigma_{bt}$  на границе раздела вода-топливо и поверхностное натяжение топлива  $\sigma_t$ .

Результаты теоретических исследований влияния на водоотталкивающие свойства пористой перегородки, ее поверхностных свойств, межфазного натяжения на границе раздела вода-топливо и поверхностного натяжения топлива  $\sigma_t$  приведены на рис. 3.8 и 3.9.

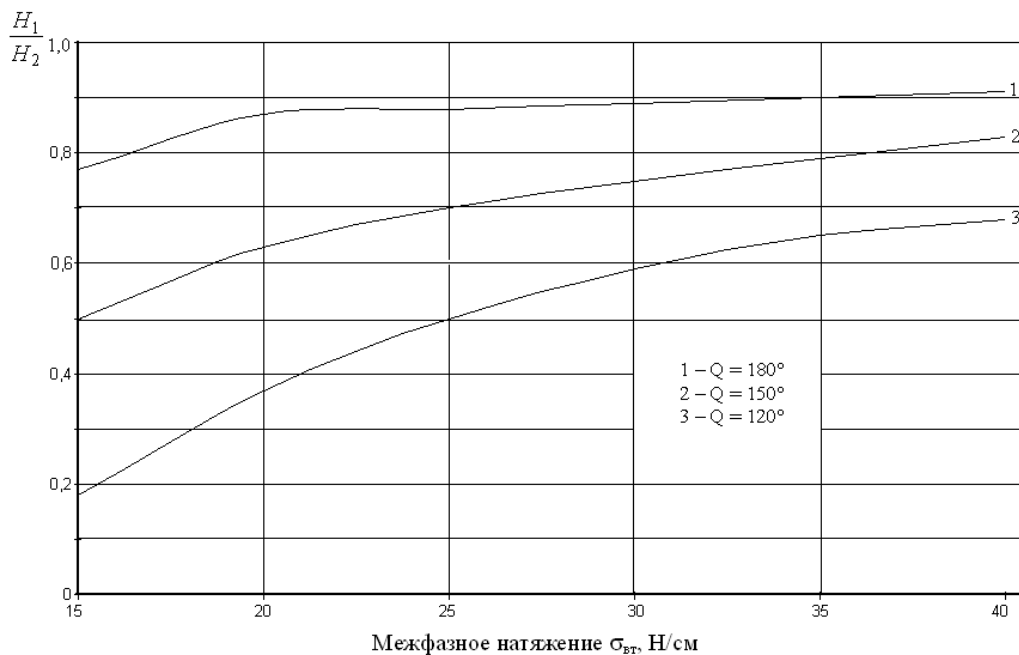


Рис. 3.8. Зависимость изменения водоотталкивающих свойств пористой перегородки от величины межфазного натяжения вода-топливо

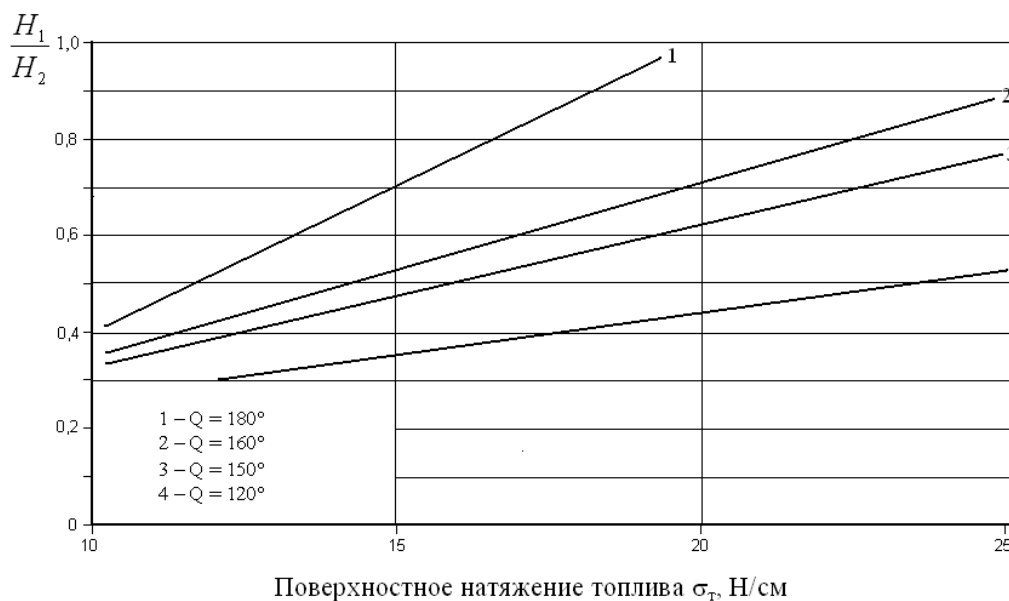


Рис. 3.9. Зависимость изменения водоотталкивающих свойств пористой перегородки от величины поверхностного натяжения топлива

Анализ зависимостей, рис. 3.8 и 3.9 позволяет выполнить коррекцию водоотталкивающих свойств пористых перегородок при наличии топливной пленки в порах материала и на поверхности фильтра.

Водоотталкивающие свойства пористых материалов зависят от поверхностного натяжения топлива и межфазного натяжения на границе раздела вода-топливо. Увеличение указанных параметров приводит к увеличению водоотталкивающих свойств. При этом наибольшими водоотталкивающими свойствами будут обладать фильтрующие материалы с углом смачивания от  $140^\circ$  до  $180^\circ$ .

Полученные зависимости необходимо учитывать при выборе новых материалов для фильтрации дизельного топлива.

## Выводы

1. Теоретическая оценка обезвоживания дизельного топлива методом гравитационного отстаивания позволяет сделать вывод о недостаточной эффективности метода. Обезвоживание таким методом требует времени от 300 до 2700 часов. В течение суток гравитационным методом можно удалить только капли воды диаметром более 200 мкм. Кроме того, применение такого метода требует большого резервуарного парка, что в условиях агрохозяйств осуществить трудно.

2. Полученные зависимости в виде усилия отрыва капли воды с поверхности фильтрующего волокна позволяют сделать вывод, что конструкция фильтра должна состоять из материала, который по отношению к воде имеет максимальный угол смачивания (в пределах  $140...180^\circ$ ) и минимальный диаметр волокна (в пределах  $10...100$  мкм). Как показали результаты моделирования, при таких параметрах материала фильтр будет обладать хорошей эффективностью отделения капель воды от дизельного топлива.

3. Анализ результатов моделирования изменения водоотталкивающих свойств пористых перегородок при наличии топливной пленки в порах материала и на поверхности фильтра позволяет выполнить коррекцию эффективности работы фильтра.

Водоотталкивающие свойства пористых материалов зависят от поверхностного натяжения топлива и межфазного натяжения на границе раздела вода-топливо. Увеличение указанных параметров приводит к увеличению водоотталкивающих свойств.

Полученные зависимости необходимо учитывать при выборе новых материалов для фильтрации дизельного топлива.

## РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ, КОАГУЛИРУЮЩИХ И ВОДООТТАЛКИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ ПЕРЕГОРОДОК

### 4.1. Нормативная документация, методы и методики проведения экспериментальных исследований

При выполнении данной работы были использованы как стандартные, так и вновь разработанные методики исследований, структурная схема которых представлена на рис. 4.1.

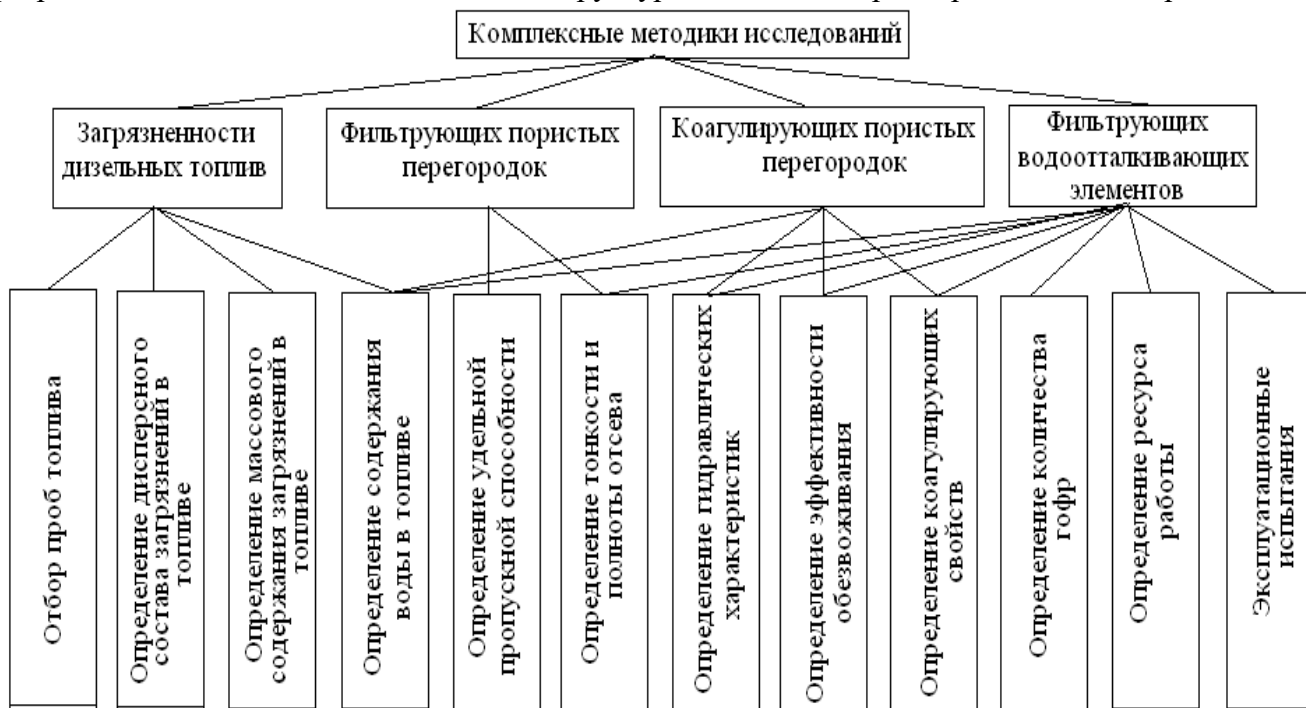


Рис. 4.1. Структурная схема методов исследования

Исследования проводились на специально изготовленном стенде.

Для исследования фильтрующих, коагулирующих и водоотталкивающих материалов был разработан стенд, рис.4.2, состоящий из системы подготовки и подачи эмульсий и суспензий, модельного фильтра-водоотделителя, рис. 4.3, и комплекта контрольно-измерительных приборов.

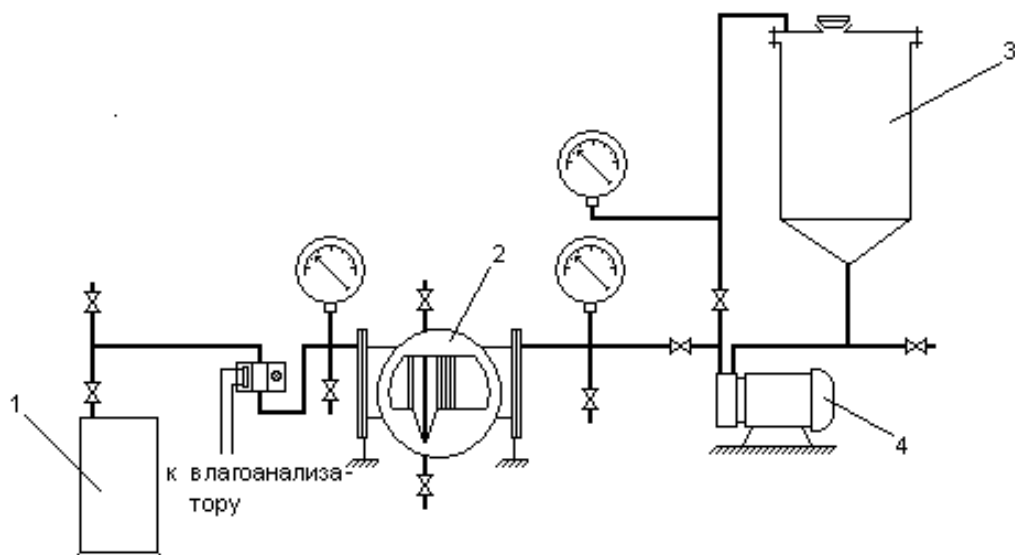


Рис. 4.2. Стенд для исследования процесса обезвоживания нефтепродуктов:  
1 – сливной бак; 2 – модельный фильтр-сепаратор; 3 – бак; 4 – насос.

Система подготовки эмульсий и суспензий включает резервуар с теплообменником, насос с электроприводом, термостат для поддержания заданной температуры топлива, трубопроводы и запорную аппаратуру.

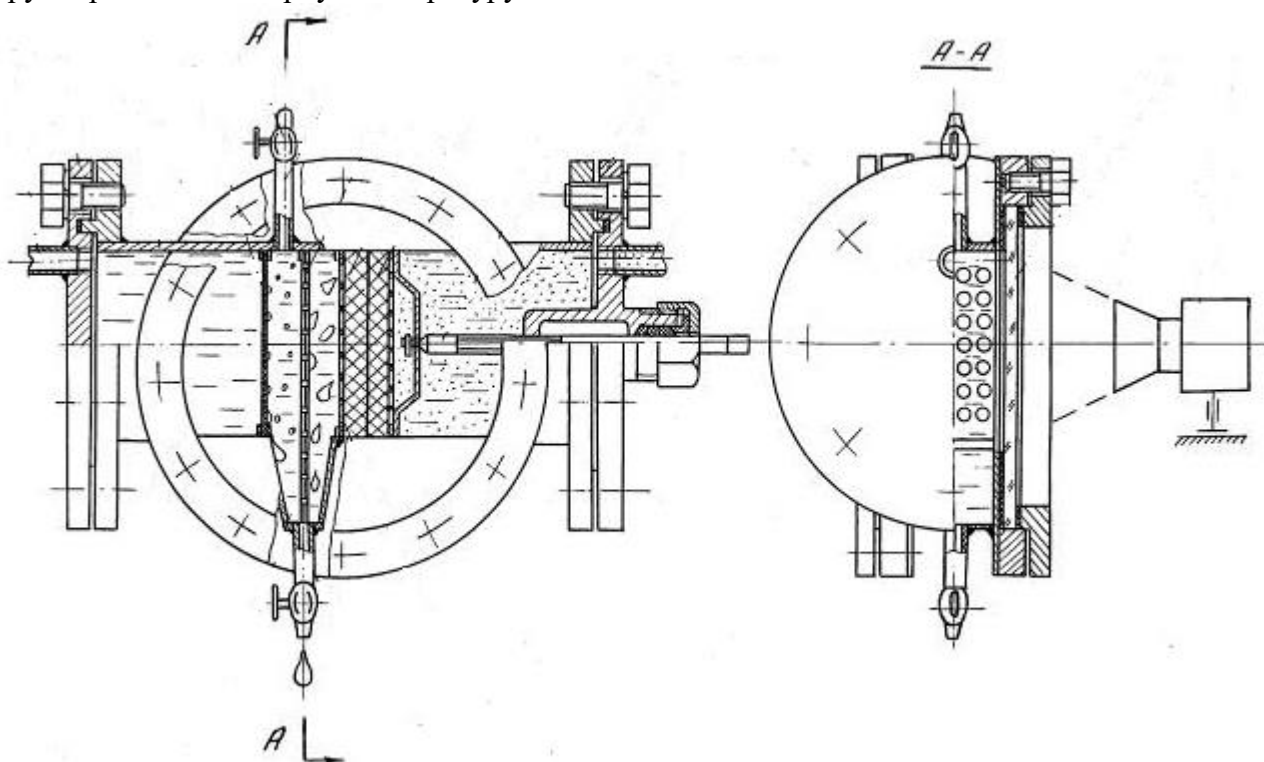


Рис. 4.3. Модельный фильтр-водоотделитель

Модельный фильтр-водоотделитель, рис.4.3, имеет корпус из нержавеющей стали со стеклянными боковыми стенками, в нижней части которого находится отстойник со спускным краном. На задней стороне стеклянной боковой стенки нанесена миллиметровая сетка, предназначенная для 3 амера капель воды, срывааемых с наружной стороны коагулирующей перегородки и продавливаемых через водоотталкивающую перегородку при различных скоростях потока.

К контрольно-измерительным приборам относятся образцовые манометры для измерения давления, ротаметр для измерения расхода жидкости, контактный термометр. Отбор проб топлива проводили в соответствии с ГОСТ 2517. Пробы топлива отбирались до и после средств очистки.

При исследовании загрязненности топлива в баках тракторов и комбайнов, пробы отбирали либо из отстойника после слива отстоя, либо из среднего (нижнего) слоя топлива через заливную горловину бака [112].

Отбор проб из системы питания дизеля осуществлялся на установившемся скоростном режиме работы двигателя на частоте вращения 700 об/мин.

Для определения размера и количества частиц механических примесей используются различные методы [113-116]. В настоящей работе определение дисперсного состава загрязнителей дизельного топлива проводилось счетным методом с помощью автоматического анализатора ПМС фирмы "Millipore" (США), рис. 4.4.

Прибор состоит из нескольких блоков, которые можно группировать разнообразными способами для определения характерных размеров частиц.

Для получения более достоверных результатов просматривали 10 полей на одном образце, чтобы суммарное количество измеренных частиц было не менее 5000 шт. Массовое содержание механических примесей в пробе топлива определялось по ГОСТ 6370. Массовое содержание свободной воды в дизельном топливе определяли по ГОСТ 2477.

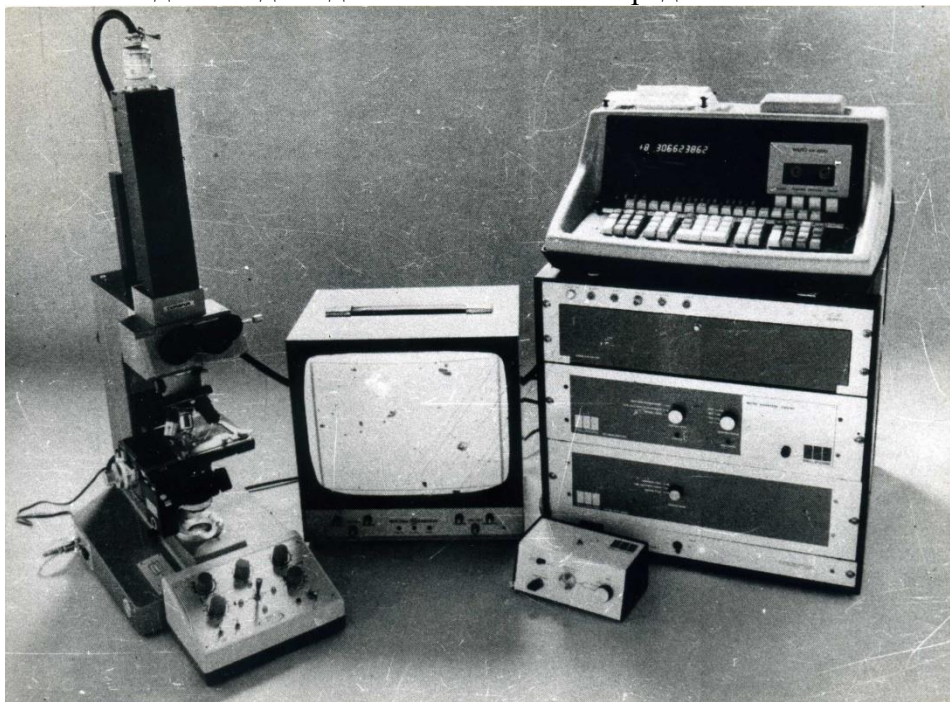


Рис. 4.4. Автоматический анализатор ПМС

Оценка фильтрующих свойств пористых перегородок производилась на лабораторной экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 4.5.

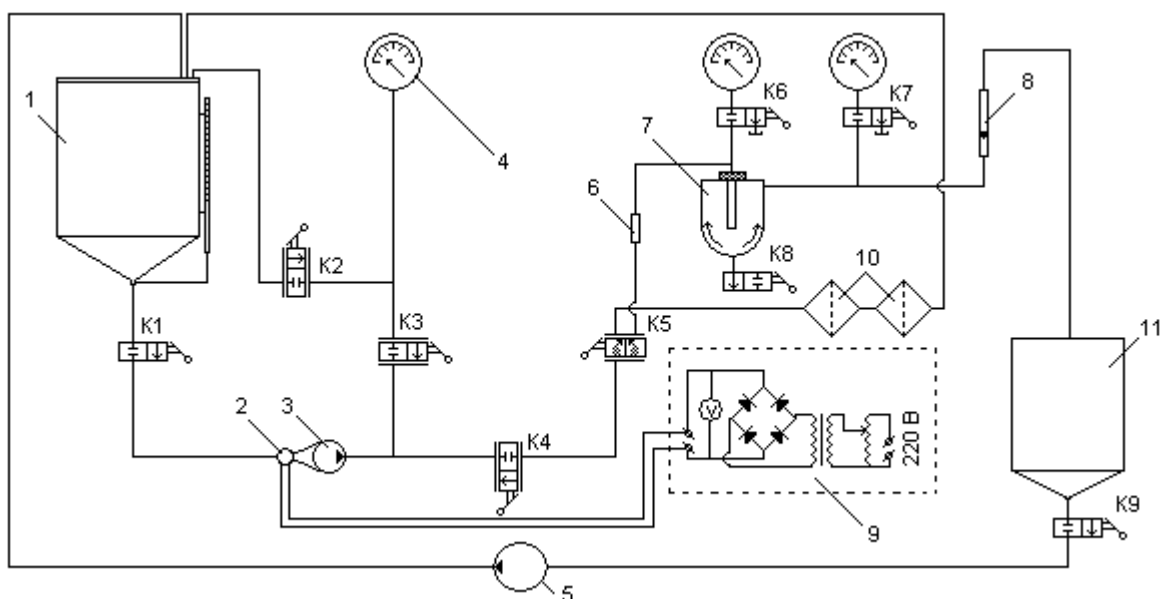


Рис. 4.5. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – расходный бак; 2 – электродвигатель; 3 – центробежный насос; 4 – манометр; 5 – насос; 6 – термометр; 7 – фильтр-коагулятор; 8 – ротаметр; 9 – блок управления ЭД; 10 – блок технологических фильтров; 11 – сливной бак.

На лабораторной установке определяли следующие показатели: удельную пропускную способность, полноту и тонкость отсева механических примесей и воды.

Удельная пропускная способность – это количество топлива, проходящего через единицу поверхности материала в единицу времени ( $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ).

Удельную пропускную способность определяли на чистом топливе марки Л ДСТУ 3868-99 при постоянном перепаде давления на испытуемой пористой перегородке 50 кПа.

Среднее значение определяется по результатам 3 параллельных определений. Относительная ошибка составляет не более 5%.

Для определения полноты и тонкости отсева через испытуемую пористую перегородку продавливают при перепаде давления 50 кПа топливо, содержащее 0,005 % кварцевой пыли, с удельной поверхностью  $5600 \text{ см}^2$  ГОСТ 8002-74. В процессе продавливания загрязненного топлива через испытуемый образец отбирают пробы до и после него и определяют эффективность очистки топлива [112].

Полнота отсева механических примесей показывает, какая доля загрязнений, содержащихся в топливе, задержана фильтрующей перегородкой и определяется по формуле:

$$X_M = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

где  $G_1, G_2$  – содержание загрязнений в топливе соответственно до и после фильтрования,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

При оценки эффективности обезвоживания топлива в ходе испытаний отбираются по 3 параллельных пробы до и после пористой перегородки. Определение эффективности обезвоживания топлив с помощью пористых перегородок определяется по формуле:

$$\eta = \frac{X_\delta - X_n}{X_\delta} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

где  $X_\delta, X_n$  – содержание свободной воды в топливе соответственно до и после пористой перегородки, % масс.

Коагулирующие свойства пористой перегородки определяются на образце площадью  $2,5 \text{ см}^2$ , помещенном в корпусе модельного фильтра – водоотделителя, рис. 4.3, путем



прокачки через него водо-топливной эмульсии концентрацией от 0,05 до 1,2 % масс. при различных пропускных способностях и последующем определении свободной воды в пробах топлива, отобранных до и после перегородки.

Наиболее точными методами определения водоотталкивающих свойств пористых перегородок являются методы, основанные на определении угла смачивания, который для водоотталкивающих перегородок теоретически может достигать угла до  $180^\circ$ .

В отечественной и мировой практике отсутствуют методы, которые позволили бы нам определить этот показатель для пористых перегородок и учитывать влияние топлив на величину этого показателя.

Поэтому, для количественного определения угла смачивания водоотталкивающих перегородок была использована формула (3.39), полученная при теоретических исследованиях механизма обезвоживания топлив с помощью пористых перегородок, а именно:

$$\theta = \arccos \cdot \left[ \frac{(H_2 - H_1) \cdot \delta_{bt}}{H_2 \cdot \delta_{bt}} - 1 \right]. \quad (4.3)$$

Для определения водоотталкивающих свойств пористых перегородок был разработан прибор, рис. 4.6.

Методика определения водоотталкивающих свойств пористых перегородок заключается в следующем: из пористой перегородки вырезают образец 3 и устанавливают его герметично в зажимной патрон 5. Если же в качестве водоотталкивающей перегородки применяют латунные сетки, покрытые фторопластовой пленкой, то их тщательно промывают в ацетоне, а затем в дистиллированной воде и устанавливают. После этого открывают кран 7 и подают в измерительный сосуд 1 воду. Постепенно увеличивая высоту столба воды в измерительном сосуде 1, следят за появлением первой капли воды на наружной поверхности образца. Фиксируют давление (высоту столба  $H_1$ ), при котором продавливается первая капля воды через образец.

После этого образец 3 вынимают из зажимного патрона 5 и высушивают на воздухе. Затем этот образец погружают в топливо. Вынув образец из топлива, снова устанавливают его в зажимной патрон 5. Подавая постепенно в измерительный сосуд 1, воду, следят за появлением первой капли воды с наружной стороны образца 3. Фиксируют давление (высоту столба  $H_2$ ), при котором с наружной поверхности отрывается первая капля воды. Подставляя значение в формулу (3.39), рассчитывают угол смачивания  $\theta$ .

С целью получения более точных результатов, подачу воды в измерительный сосуд 1 необходимо производить с интервалом не более 5 минут, а для испытаний брать не менее трех образцов материала.

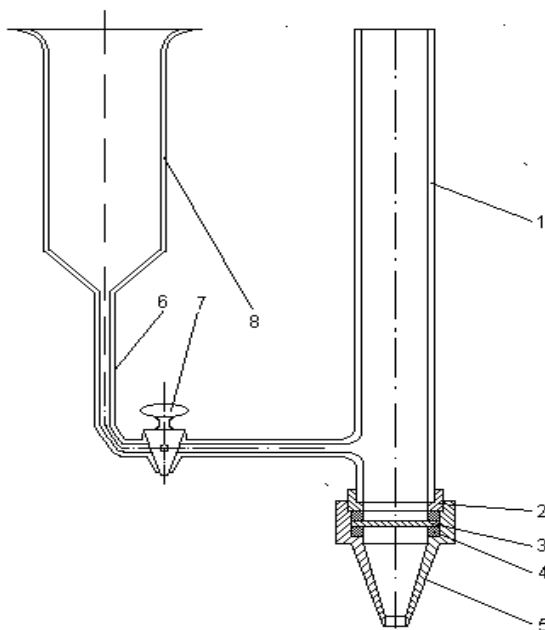


Рис. 4.6. Прибор для определения водоотталкивающих свойств пористых перегородок:

1 – измерительный сосуд; 2,4 – прокладка; 3 – испытуемый образец пористой перегородки; 5 – зажимной патрон; 6 – трубка; 7 – кран; 8 – емкость с водой.

Гидравлическая характеристика фильтрующего материала представляет собой зависимость его удельной пропускной способности, т.е. количества жидкости, проходящей через единицу поверхности материала в единицу времени, от перепада давления на фильтрующем материале.

Определение гидравлических характеристик проводится на чистых, не бывших в эксплуатации пористых перегородках на экспериментальной установке, рис. 4.5. В качестве жидкости в процессе всех испытаний используется не содержащее загрязнений дизельное топливо. Температура топлива при этом должна быть  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

При определении гидравлических характеристик топливо предварительно прокачивается через фильтр с тонкостью фильтрования 10-15 мкм.

Определение гидравлических характеристик проводится путем постепенного увеличения скорости потока от 0 до 1 см/с для коагулирующей перегородки, от 0 до 9 см/с для водоотталкивающей и от 0 до 1,5 см/с для фильтрующей перегородки, а затем уменьшения его пропускной способности от максимального значения до 0 с одновременной фиксацией перепадов давления.

В процессе экспериментальных исследований проводили статистическую обработку данных для выявления вида взаимосвязи исследуемых показателей. С этой целью был проведен корреляционно-регрессионный анализ, который выполняется по следующему алгоритму. Определяли коэффициент линейной корреляции, корреляционное отношение, их ошибки и значимость по  $t$ -критерию Стьюдента [117, 118]. О близости регрессионной зависимости к линейной судили по величине и значимости коэффициента линейной корреляции  $r$ .

При значимости  $r$  на 5 % уровне зависимость считали линейной. Считалось, также, что при  $r < 0,3$  корреляционная зависимость между признаками слабая, при  $r = 0,3 \dots 0,7$  – средняя, а при  $r > 0,7$  – сильная [117, 118].

Поиск оптимальной аппроксимации нелинейных регрессий проводили последовательно с параболической, степенной, логарифмической, гиперболической, экспоненциальной, показательной функциями. Оптимальной считалась аппроксимация, когда квадратичное отклонение [117, 118] теоретических и экспериментальных функций было минимальным. В случае, если для каких-либо уравнений эти отклонения оказывались равными, то выбиралось любое из них.

## 4.2. Экспериментальные исследования фильтрующих свойств пористых перегородок

Для подбора пористых материалов для фильтрующих перегородок были исследованы как серийные, так и опытные образцы нетканых материалов и фильтровальных бумаг. При исследовании фильтрующих материалов в качестве критериев отбора принимались показатели по тонкости фильтрации и удельной пропускной способности. Работы проводились на экспериментальной установке при перепаде давления 50 кПа. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль с удельной поверхностью 5600 см<sup>2</sup> ГОСТ 8002-74. Результаты исследований приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1

### Эксплуатационные характеристики фильтрующих бумаг

Фильтрующий материал	Т У	Топливо ДСТУ 3868-99	Удельная пропускная способность, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> с	Тонкость фильтрации, мкм
Бумага БТ-3п	ТУ 81-04-478-77	Л-0.2-40	0,052	5 – 10
Бумага БТ-5	ТУ 80-04-572-80	Л-0.2-40	0,034	1 – 5
Бумага БТ-10	ТУ 81-04-568-80	Л-0.2-40	0,086	5 – 10
Бумага БТ-150	ТУ 81-04-568-80	Л-0.2-40	0,076	10 – 15
Бумага БТ-120	ТУ 81-07-05-79	Л-0.2-40	0,422	35 – 40
Бумага БТ-70	ТУ 13-04-626-82	Л-0.2-40	0,612	45 – 60
Бумага БТ-170	ТУ 13-730-001-752-87	Л-0.2-40	0,667	15 – 20
ДРКБ (нетканый)	ТУ 81-04-178-78	Л-0.2-40	0,612	40 – 60

Анализ данных, приведенных в таблицах 4.1 и 4.2, показал, что в качестве фильтрующих перегородок для фильтроэлементов с номинальной тонкостью фильтрации 1 – 10 мкм могут быть рекомендованы следующие фильтрующие материалы:

- фильтровальная бумага БТ-10 по ТУ 81-04-568-80;
- фильтровальная бумага БТ-3п по ТУ 81-04-478-77;
- фильтровальная бумага БТ-5 по ТУ 80-04-572-80.

В качестве фильтрующих перегородок для фильтроэлементов с номинальной тонкостью фильтрации до 20 мкм могут быть рекомендованы следующие фильтрующие материалы:

- фильтровальная бумага БТ-170 по ТУ 13-730-001-752-87;
- одноосновный иглопробивной нетканый материал (70 % лавсан, 30 % пропилен) по ТУ 17-21-318-79.

Таблица 4.2

### Фильтрующие характеристики иглопробивных нетканых материалов

Пористый материал (волокно)	Т У	Толщина до обжатия, мкм	Степень обжатия (раз)	Тонкость фильтрации, мкм
Хлориновое (30%) + вискозное (70%) вол.	Опытное	6.36	1.0	15-20
То же	То же	4.24	1.0	30-35
То же	« »	2.12	1.0	35-40
То же	« »	2.76	1.0	40-45

То же	« »	3.35	1.0	30-35
Хлориновое (50%) + вискозное (50%) вол.	« »	2.53	1.0	35-40
То же	« »	4.96	1.0	30-35
То же	« »	3.27	1.0	50-60
Хлориновое (70%) + вискозное (30%) вол.	« »	3.46	1.0	35-40
То же	« »	4.46	1.0	35-40
То же	« »	3.42	1.0	35-40
Вискозное	« »	2.5	1.0	50-60
Хлориновое	« »	3.5	1.0	50-60
Триацетатное	« »	4.0	1.0	50-60
Нитроновое	« »	8.0	1.0	50-60
Полипропиленовое	« »	5.0	1.0	20-25
Одноосновный игло- пробивной нетканый материал (70% лавса на + 30% пропилена)	Т У 17-21- -318-79	2.12	1.0	15-20

В качестве фильтрующих перегородок для фильтроэлементов с номинальной толщиной фильтрации 40 мкм могут применяться следующие фильтрующие материалы:

- ДРКБ (нетканый) по ТУ 81-04-178-78;
- фильтровальная бумага БТ-120 по ТУ 81-07-05-79;
- фильтровальная бумага БТ-70 по ТУ 13-04-626-82.

На основании экспериментальных исследований по подбору материалов пористых перегородок для фильтрующих элементов было установлено, что наиболее эффективной перегородкой является перегородка, состоящая из 2-х фильтровальных бумаг, располагаемых в направлении потока в порядке уменьшения размера пор, при этом: увеличивается грязеемкость перегородки, повышается ресурс ее работы и улучшаются гидравлические характеристики.

Для комплексной оценки влияния тонкости фильтрации первого ( $X_1$ ) и второго ( $X_2$ ) слоев фильтрующих элементов на качественные показатели очистки топлива проводились исследования с использованием методов математического планирования эксперимента по матрице В-оптимального плана второго порядка для двух факторов.

Уровни факторов и интервал их варьирования для изучения фильтрующих свойств пористых перегородок приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

#### Уровни и интервал варьирования факторов

Уровни варьирования	Тонкость фильтрации 1-го слоя, мкм $X_1$	Тонкость фильтрации 2-го слоя, мкм $X_2$
Верхний (+)	60	30
Основной (0)	40	20
Нижний (-)	20	10
Интервал варьирования	20	10

В качестве функции отклика принята удельная пропускная способность фильтрующей перегородки ( $Y$ ). В результате экспериментальных исследований пористых перегородок с различной тонкостью фильтрации и их комбинаций получено регрессионное уравнение:

$$Y=0,67 + 0,22X_1 + 0,12X_2 + 0,05X_1X_2 + 0,13X_1^2 + ,010X_2^2. \quad (4.4)$$

Анализ уравнения показал, что наибольшее влияние на удельную пропускную способность фильтрующей перегородки оказывают тонкость фильтрации первого слоя, а затем второго слоя.

По результатам проведенных исследований была разработана пористая перегородка, состоящая из двух фильтрующих бумаг БТ-120 и БТ-170, располагаемых в направлении потока топлива в порядке уменьшения размера пор, что способствует повышению ресурса ее работы, увеличению грязеемкости и улучшению гидравлических характеристик.

#### 4.3. Экспериментальные исследования коагулирующих свойств пористых перегородок

Одним из элементов в конструкции фильтра-водоотделителя является коагулирующая перегородка. Теоретические исследования показали, что обезвоживание дизельного топлива существенно зависит от свойств коагулирующей перегородки, ее гидравлической характеристики, структурного состава и толщины. В качестве коагулирующей перегородки могут применяться различные пористые материалы.

Для исследований коагулирующих материалов после предварительных оценок были выбраны стекловолокна и пенополиуретаны, так как они обладают наиболее высокими гидравлическими и коагулирующими свойствами. Были исследованы серийные и опытные образцы материалов, физические свойства которых приведены в табл. 4.4.

С целью определения рационального структурного состава пористой коагулирующей перегородки, обладающей высокими гидравлическими характеристиками и коагулирующими свойствами, были исследованы однослойные и многослойные перегородки. Исследования материалов перегородок проводили в два этапа: на первом - определяли гидравлические характеристики; на втором - коагулирующие свойства перегородок.

Таблица 4.4

**Физические свойства стекловолокнистых материалов**

Материал	Средний диаметр волокна (ячейки) мкм	Толщина мкм	Поверхностные свойства	Температурная область применения °С	Т У, ГОСТ
Супертонкое стекловолокно	1.5 – 2.0	20	Гидрофильное	-60...+450	ТУ 18-16-84-82
Прокладка теплоизоляционная	3.0	13	Гидрофобное	-60...+450	ТУ21РСФСР-459-75
Стекловолокно СТВ	4 – 6	30	то же	-60...+200	ГОСТ 22031-76
Пенополиуретан ППУ ЭО-111	0.9	-	то же	-45...+100	Опытное
Пенополиуретан ППУ-ЭО-130	0.9	-	то же	-50...+100	Опытное
Пенополиуретан ППУ-35-08	0.8	-	то же	-45...+100	ОСТ-6-05-407-75

Гидравлические характеристики определяли при температуре 20 °С на дизельном топливе марки Л - 0.2 – 40, не содержащем свободной воды и механических примесей. Испытания проводились на экспериментальном стенде (рис. 4.2). Образец пористой перегородки устанавливался в модельный фильтр-водоотделитель (рис. 4.3) и при различных перепадах давления определялась удельная пропускная способность коагулирующей перегородки, т.е. количество топлива, проходящего через единицу поверхности в единицу времени.

Характеристики однослойных пористых коагулирующих перегородок, из шести различных материалов, различающихся исходной толщиной и степенью обжатия, представлены в табл. 4.5. Степень обжатия – это отношение исходной толщины перегородки до обжатия к толщине перегородки после обжатия.

Гидравлические характеристики однослойных коагулирующих перегородок представлены на рис. 4.7 – 4.12. Номера на кривых соответствуют номеру перегородки в таблице 4.5. Из представленных зависимостей следует, что гидравлические характеристики в пределах исследованной пропускной способности имеют линейный характер, что свидетельствует о ламинарном течении дизельного топлива через перегородки, обуславливая наиболее экономичный режим очистки.

Таблица 4.5

## Характеристики однослойных пористых коагулирующих перегородок

№ образца	Материал перегородки	№ перегородки											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Супертонкое стекловолокно	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{20}{2}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{15}{4}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{20}{4}$	$\frac{15}{6}$	$\frac{20}{6}$
2	Теплоизоляционная прокладка	$\frac{13}{2}$	$\frac{13}{4}$	$\frac{26}{2}$	$\frac{13}{6}$	$\frac{26}{4}$	$\frac{39}{2}$	$\frac{52}{2}$	$\frac{26}{6}$	$\frac{39}{4}$	$\frac{52}{4}$	$\frac{39}{6}$	$\frac{52}{6}$
3	Стекловолокно СТВ	$\frac{10}{2}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{20}{2}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{15}{4}$	$\frac{20}{4}$	$\frac{15}{6}$	$\frac{20}{6}$	-	-	-
4	Пенополиуретан ППУ ЭО-130	$\frac{10}{1}$	$\frac{15}{1}$	$\frac{20}{1}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{20}{2}$	$\frac{15}{4}$	$\frac{20}{4}$	-	-	-
5	Пенополиуретан ППУ ЭО-111	$\frac{5}{2}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{15}{1}$	$\frac{20}{1}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{20}{2}$	-	-	-	-
6	Пенополиуретан ППУ 35-08	$\frac{5}{1}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{15}{1}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{20}{1}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{20}{2}$	-	-	-

-в числителе – исходная толщина (до обжатия) перегородки (\* $10^{-3}$  м);

-в знаменателе – степень обжатия перегородки.

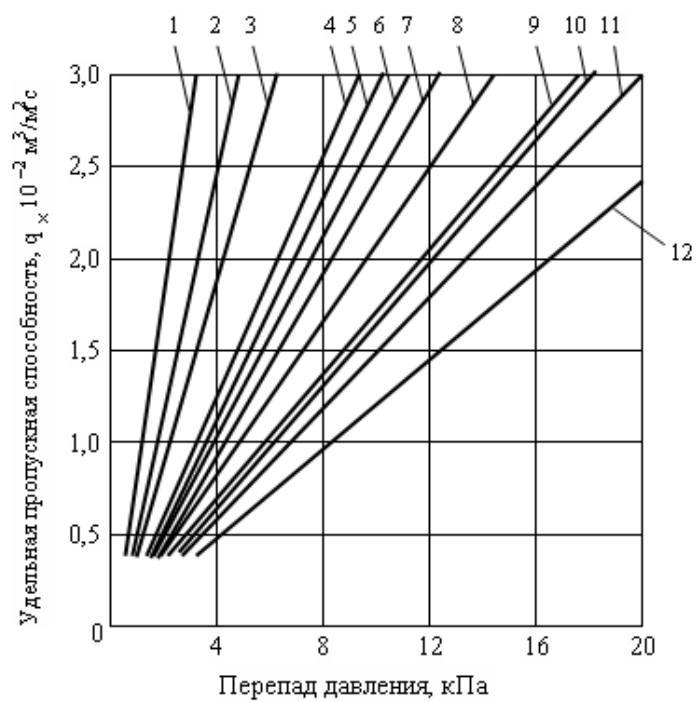


Рис. 4.7. Гидравлические характеристики перегородок из супертонкого стекловолокна

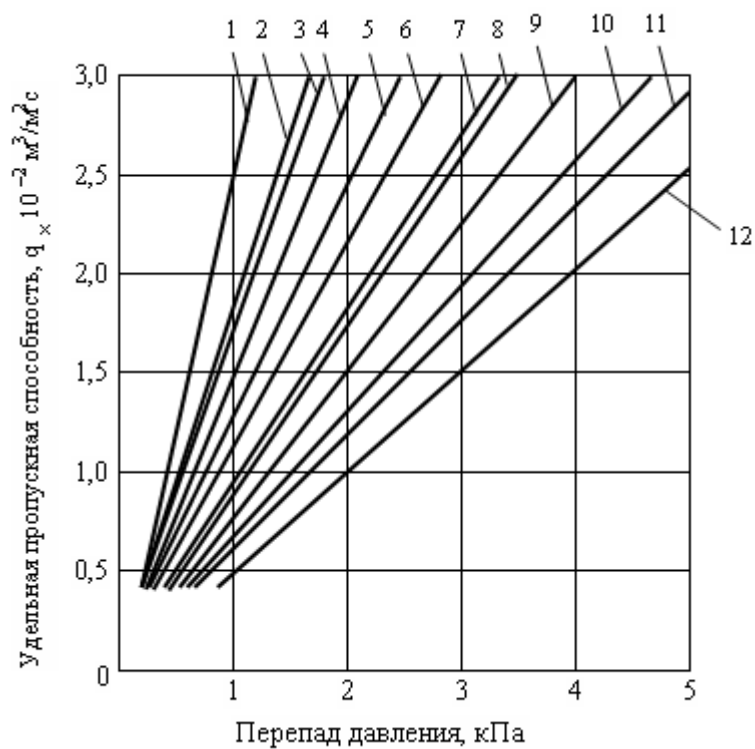


Рис. 4.8. Гидравлические характеристики перегородок из теплоизоляционной прокладки

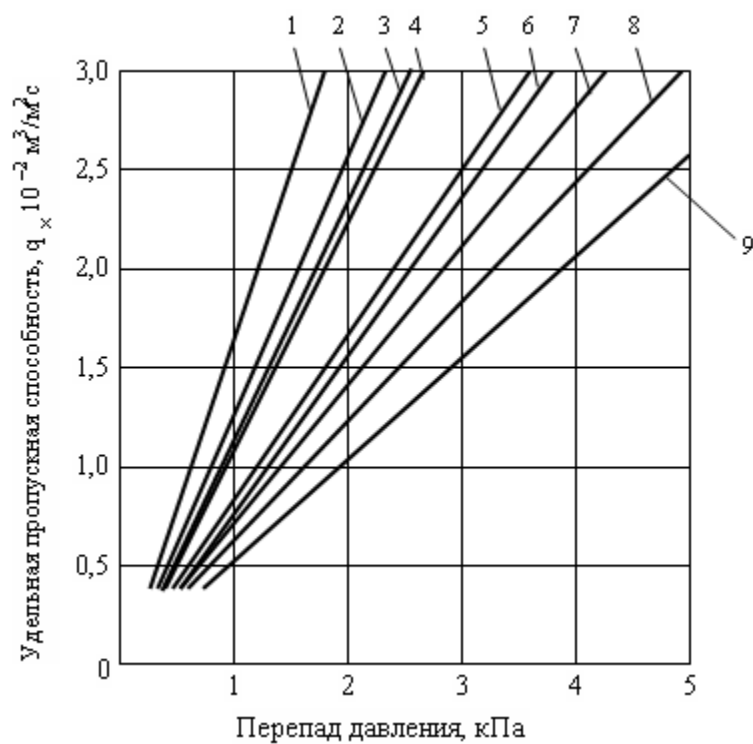


Рис. 4.9. Гидравлические характеристики перегородок из стекловолокна СТВ

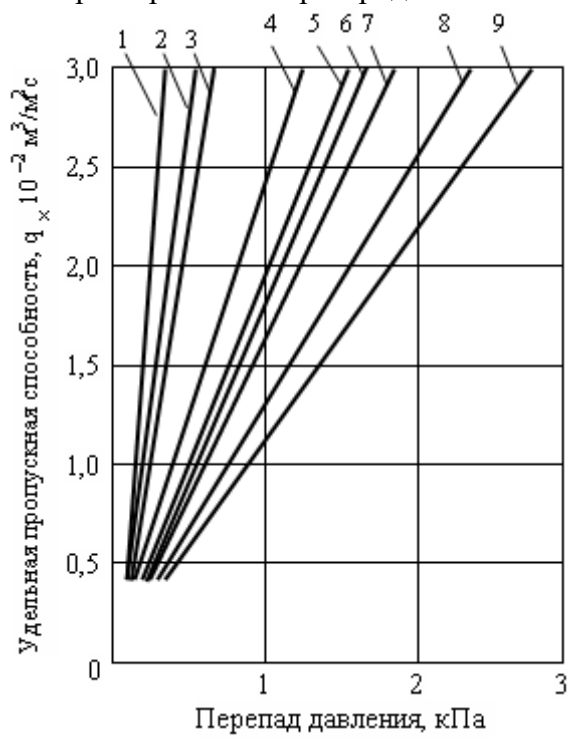


Рис. 4.10. Гидравлические характеристики перегородок из пенополиуретана ППУ-ЭО-



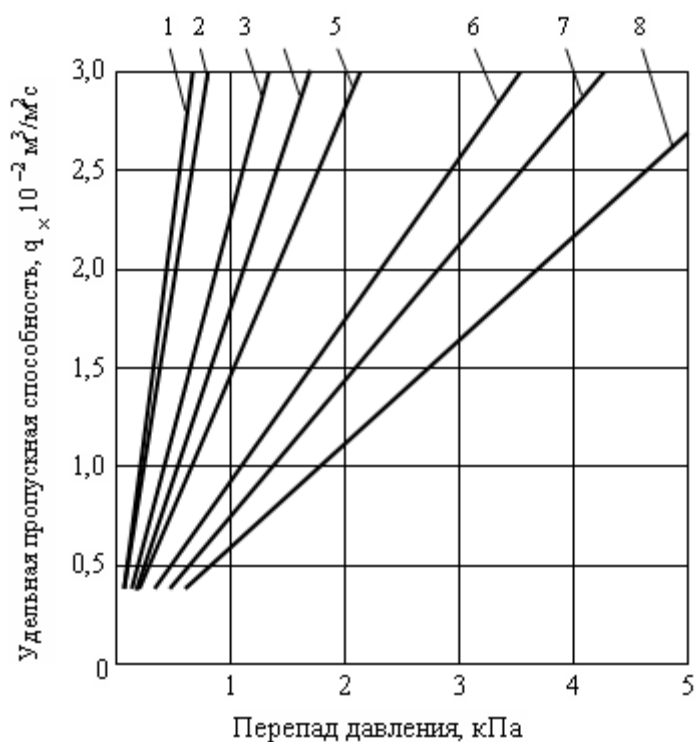


Рис. 4.11. Гидравлические характеристики перегородок из пенополиуретана ППУ-ЭО-

111

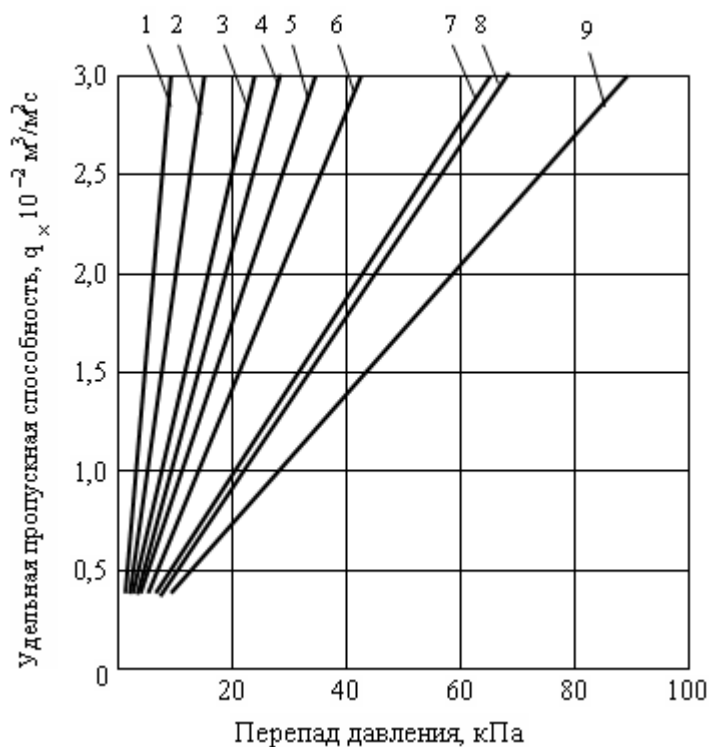


Рис. 4.12. Гидравлические характеристики перегородок из пенополиуретана ППУ-35-0,8

Из рис. 4.7– 4.12 следует, что все перегородки из стекловолокон обладают высокими гидравлическими характеристиками. Так у перегородок из супертонкого стекловолокна при удельной пропускной способности  $0,0075 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ с}$  гидравлические потери составляют  $0,8 - 6,0$  кПа, а у теплоизоляционной прокладки и стекловолокна СТВ они равны, соответственно  $0,3 - 1,6$  кПа и  $0,3 - 1,5$  кПа.

Следовательно, чем меньше диаметр волокон, тем выше гидравлические потери в перегородке. Гидравлические потери образцов 1, 2 и 3 практически равнозначны, это

объясняется сравнительно одинаковой их пористостью. На величину потерь оказывает влияние толщина перегородки, степень обжаривания и поверхностные свойства. С увеличением толщины перегородки, при одинаковой степени обжаривания, гидравлические потери возрастают в 3-4 раза. В то же время, с увеличением степени обжаривания, при постоянной толщине, потери возрастают примерно в 2 раза. Вследствие этого при разработке коагулирующей ступени фильтра-водоотделителя необходимо учитывать эти факторы.

На рис. 4.10 – 4.12 представлены гидравлические характеристики пенополиуретанов. Образцы 4 и 5 обладают высокими гидравлическими свойствами, их потери составляют, соответственно 0,15 – 0,8 кПа и 0,2 – 1,4 кПа, а гидравлические потери образца 6 при этом составляют 4 – 23 кПа, при одинаковой удельной пропускной способности – 0,0075 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с. Это можно объяснить разницей в технологии их получения. Образцы 4 и 5 получены двухстадийным способом – открытопористые, а образец 6 одностадийным способом – закрытопористый, в результате этого они значительно отличаются пористостью, которая и определяет их гидравлические свойства.

Следовательно, гидравлическая характеристика однослойной пористой перегородки зависит от ее толщины, степени обжаривания и диаметра волокон. По результатам проведенных исследований, для определения комплексного влияния этих факторов на перегородки, были использованы образцы 1, 2 и 4.

Для исследования гидравлических характеристик пористых перегородок при комплексном взаимодействии вышеуказанных факторов был реализован план полного факторного эксперимента (ПФЭ) – 2<sup>n</sup>.

Анализ результатов серии экспериментов и априорной информации позволил определить уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 4.6). В качестве функции отклика был принят перепад давления ( $\Delta P$ ), характеризующий величину гидравлических потерь в пористой перегородке.

Для определения дисперсии, характеризующей воспроизводимость эксперимента, были поставлены параллельные опыты. Чтобы исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями, порядок проведения опытов рандомизирован с помощью таблицы случайных чисел [117, 118].

Реализация матрицы планирования проводилась следующим образом. Вначале были выполнены эксперименты на нижнем и верхнем уровне с пятикратной повторностью, в ходе которых определены статистические характеристики гидравлических потерь в пористых перегородках. Максимальная величина коэффициента вариации составила 9,8 %.

Обработка результатов исследований произведена статистическими методами. Проверка воспроизводимости эксперимента и значимости коэффициентов уравнения регрессии, установление адекватности моделей - производились при уровне значимости равном 0,05.

Таблица 4.6

## Уровни факторов и границы варьирования

Факторы	Материал перегородки (№ образца)	Границы варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
X <sub>1</sub> -исходная толщина Перегородки, *10 <sup>-3</sup> м	Супертонкое стекловолокно (образец 1)	5 - 15	5	10	15
X <sub>3</sub> -степень обжаривания Перегородки		2 – 6	2	4	6
X <sub>1</sub> -исходная толщина Перегородки, *10 <sup>-3</sup> м	Теплоизоляционная прокладка (образец 2)	13 – 39	13	26	39
X <sub>3</sub> -степень обжаривания Перегородки		2 – 6	2	4	6
X <sub>1</sub> -исходная толщина	Пенополиуретан	10 – 20	10	15	20

перегородки, *10 <sup>-3</sup> м X <sub>3</sub> -степень обжатия перегородки	ППУ-ЭО-130 (образец 4)	2 – 4	2	3	4
X <sub>2</sub> -удельная пропускная способность, *10 <sup>-2</sup> м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> с	Для всех образцов	0,75 – 2,50	0,75	1,625	2,50

В результате обработки экспериментального материала получены регрессионные модели, определяющие величину гидравлических потерь от исследуемых факторов (кПа):

- для перегородки из супертонкого стекловолокна (образец № 1):

$$\Delta P_1 = 5,88 + 1,95X_1 + 3,15X_2 + 2,33X_3 + 1,03X_1X_2 + 0,7X_1X_3 + 1,3X_2X_3, \quad (4.5)$$

- для перегородки из теплоизоляционной прокладки (образец № 2):

$$\Delta P_2 = 1,51 + 0,63X_1 + 0,79X_2 + 0,43X_3 + 0,33X_1X_2 + 0,19X_1X_3 + 0,22X_2X_3, \quad (4.6)$$

- для перегородки из пенополиуретана (образец № 4):

$$\Delta P_4 = 1,01 + 0,24 X_1 + 0,49 X_2 + 0,43 X_3. \quad (4.7)$$

Полученные уравнения регрессии можно использовать как интерполяционные выражения для расчета гидравлических потерь при любых значениях факторов. Анализ уравнений регрессии показывает, что наибольшее влияние на гидравлические потери для всех образцов оказывает удельная пропускная способность.

Существенное влияние на гидравлические потери образца № 1 оказывает также степень обжатия перегородки, а для образцов № 2 и № 4 толщина перегородки оказывает более существенное влияние, чем их степень обжатия. Последнее объясняется вероятнее всего тем, что с увеличением толщины этих перегородок резко усложняются линии потока топлива.

С уменьшением диаметра волокон гидравлические потери возрастают, так как пористость при одинаковой исходной толщине выше у перегородок с большим диаметром волокон.

Исследование коагулирующих свойств однослойных перегородок проводилось при удельной пропускной способности 0,0075 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с и содержании свободной воды в топливе от 0,1 до 0,3 % мас. При этом использовались материалы приведенные в табл. 4.4. Исследования проводились на стенде, рис. 4.2.

Коагулирующие свойства оценивались по содержанию свободной воды за пористой перегородкой в конце испытаний. Результаты исследований коагулирующих свойств пористых перегородок представлены в табл. 4.7 – 4.9.

Эффективность обезвоживания перегородок из супертонкого стекловолокна диаметром 1,5 - 2,0 мкм, толщиной 5 и 15 мм находится соответственно в пределах 80 - 90 % и 88 - 93 %, а содержание свободной воды после перегородок соответственно 0,020 - 0,043 и 0,013 - 0,027 % мас. (табл. 4.7).

Следовательно, с увеличением толщины перегородки эффективность обезвоживания возрастает. Содержание свободной воды за перегородкой снижается приблизительно в 1,5 раза. С увеличением степени обжатия и толщины перегородки эффективность обезвоживания также повышается, но при этом возрастают гидравлические потери в 1,3 - 2,5 раза. При увеличении содержания свободной воды в исходном топливе гидравлические потери также возрастают, и при этом увеличивается содержание свободной воды после перегородки.

**Таблица 4.7**

**Эффективность обезвоживания дизельного топлива перегородками из супертонкого стекловолокна**

№ пере- рого- родки	Толщина перегородки, 10 <sup>-3</sup> м		Перепад давления, кПа	Содержание свободной воды, % масс.		Эффективность обезвоживания, %
	до обжатия	после обжатия		до перегород- ки	после перегородки	

1	5	2,5	1,6/2,1	0,148	0,021/0,03	86/80
			2,0/2,4	0,285	0,032/0,043	89/85
2	5	1,2	2,2/2,8	0,153	0,015/0,024	89/84
			2,3/3,2	0,306	0,026/0,037	91/88
5	5	0,8	2,5/3,6	0,132	0,012/0,02	91/85
			3,0/4,0	0,283	0,018/0,027	94/90
4	15	7,5	2,4/2,8	0,150	0,011/0,017	94/88
			2,7/3,4	0,291	0,018/0,027	94/81
8	15	3,7	3,5/4,2	0,146	0,08/0,015	95/90
			3,7/4,8	0,30	0,012/0,023	96/92
11	15	2,5	5,7/7,0	0,156	0,006/0,013	96/92
			6,2/8,0	0,298	0,009/0,020	97/93

Номера перегородок даны в соответствии с табл. 4.5. В числителе приведены данные в начале испытаний, а в знаменателе – в конце.

Таблица 4.8

**Эффективность обезвоживания дизельного топлива перегородками из теплоизоляционной прокладки**

№ перегородки	Толщина перегородки, 10 <sup>-3</sup> м		Перепад давления, кПа	Содержание свободной воды, % масс.		Эффективность обезвоживания, %
	до обжата	после обжата		до перегородки	после перегородки	
1	13	6,5	1,0/1,2	0,153	0,035/0,043	77/72
			1,3/1,6	0,283	0,051/0,065	82/77
1	13	3,2	1,8/2,0	0,150	0,029/0,034	81/77
			2,1/2,6	0,275	0,046/0,060	83/78
4	13	2,2	2,4/3,0	0,152	0,021/0,029	86/81
			2,8/3,7	0,316	0,039/0,051	88/84
3	26	13	1,1/1,3	0,143	0,024/0,030	83/79
			1,4/1,9	0,289	0,042/0,058	85/80
5	26	6,5	2,4/2,7	0,147	0,016/0,022	89/85
			2,6/3,6	0,280	0,031/0,048	89/83
8	26	4,3	3,0/3,4	0,160	0,013/0,019	91/88
			3,9/5,2	0,312	0,023/0,040	93/87

Номера перегородок даны в соответствии с табл. 4.5. В числителе приведены данные в начале испытаний, а в знаменателе – в конце.

Таблица 4.9

**Эффективность обезвоживания дизельного топлива перегородками из стекловолокна СТВ**

№ перегородки	Толщина перегородки, 10 <sup>-3</sup> м		Перепад давления, кПа	Содержание свободной воды, % масс.		Эффективность обезвоживания, %
	до обжата	после обжата		до перегородки	после перегородки	
1	10	5	1,0/1,3	0,142	0,042/0,056	70/61
2	10	2,5	1,3/1,9	0,136	0,031/0,043	77/68
5	10	1,7	2,2/2,6	0,141	0,025/0,036	82/74
3	15	7,5	1,3/1,6	0,143	0,041/0,050	71/65
6	15	3,7	2,0/2,5	0,145	0,028/0,039	80/73
8	15	2,5	2,4/2,8	0,126	0,024/0,030	81/76

4	20	10	1,6/2,5	0,132	0,033/0,040	75/70
7	20	5	2,4/3,3	0,132	0,023/0,032	83/76
9	20	3,5	2,8/3,9	0,136	0,020/0,027	85/80

Номера перегородок даны в соответствии с табл. 4.5. В числителе приведены данные в начале испытаний, а в знаменателе – в конце.

Эффективность обезвоживания теплоизоляционной прокладки из волокон диаметром 3 мкм, толщиной 13 и 26 мм находится в пределах 72 - 84% и 78 - 87%, а содержание свободной воды после перегородок соответственно 0,029 – 0,065 и 0,019 – 0,058 % мас. (табл. 4.8).

С увеличением степени обжатия и толщины перегородок эффективность обезвоживания повышается, при этом возрастают гидравлические потери, они возрастают также при увеличении содержания свободной воды в топливе. Так для перегородки № 1 с увеличением содержания свободной воды в топливе гидравлические потери возросли с 1,2 до 1,6 кПа, а содержание свободной воды после перегородки увеличилось с 0,043 до 0,065 % мас. Следовательно, наблюдается прямо-пропорциональная зависимость между показателями.

Из табл. 4.9 следует, что эффективность обезвоживания перегородок из стекловолокон СТВ толщиной 10, 15 и 20 мм находятся в пределах 61 - 74, 65 - 76 и 70 - 80 %, а содержание свободной воды после перегородок соответственно 0,036 - 0,056; 0,030 - 0,050 и 0,027 - 0,040 % мас.

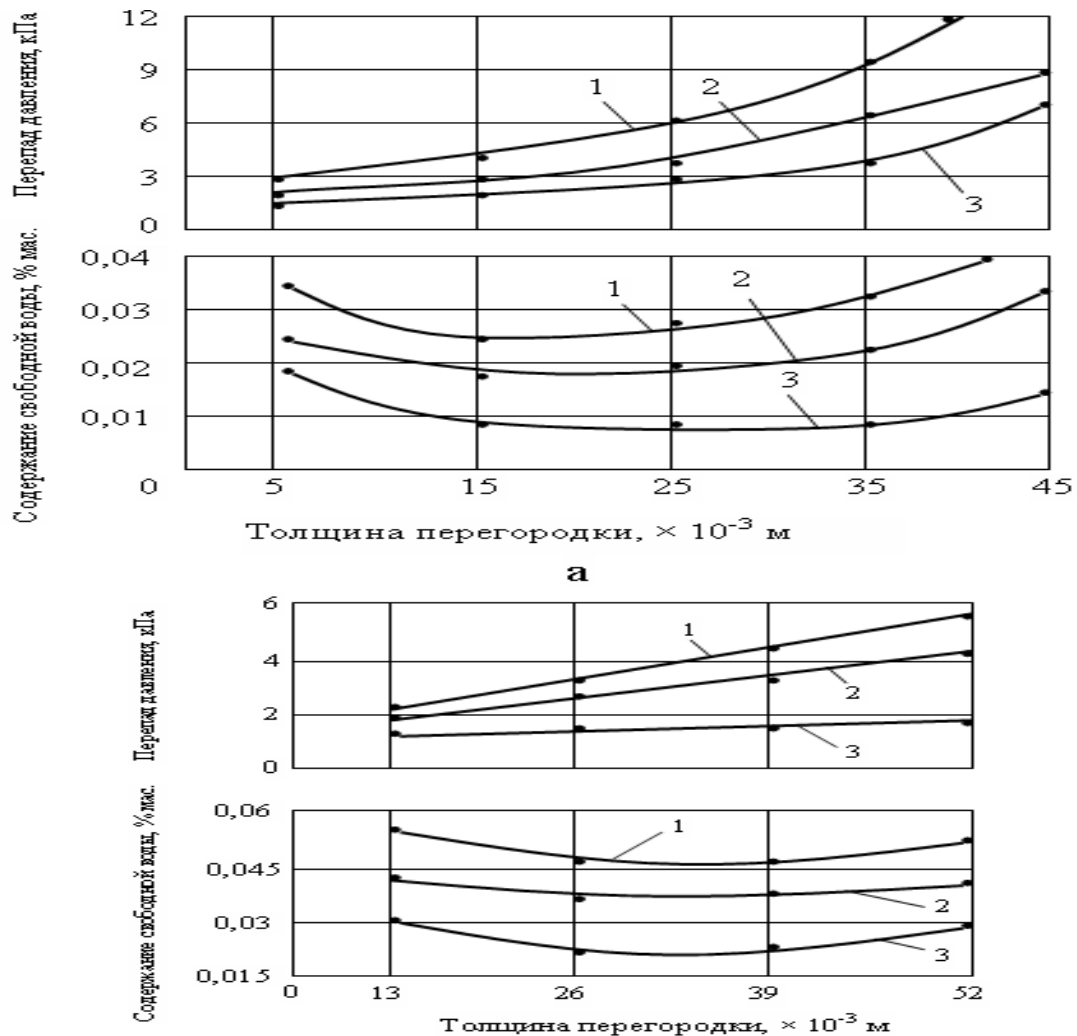


Рис. 4.13. Зависимость гидравлических и коагулирующих свойств толщины перегородок:

- а – супертонкое волокно (образец 1);  
 б – теплоизоляционная прокладка (образец 2).  
 1 –  $q = 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$ ; 2 –  $q = 0,007 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$ ; 3 –  $q = 0,003 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$ .

Очевидно, что при выборе пористой коагулирующей перегородки необходимо учитывать не только эффективность обезвоживания, но и гидравлические потери, зависящие от ее толщины и удельной пропускной способности.

Зависимости влияния толщины перегородки и удельной пропускной способности на коагулирующие и гидравлические свойства стекловолокнистых материалов приведены на рис. 4.13. Исследования проводились при удельной пропускной способности  $0,003 - 0,010 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$  и содержании свободной воды  $0.15\% \text{ мас.}$  Степень обжата перегородки – 2.

Из рис. 4.13 (а, б) следует, что с увеличением удельной пропускной способности коагулирующие свойства ухудшаются во всем диапазоне исследуемой толщины перегородок.

Оптимальной для супертонкого волокна (образец № 1), рис. 4.13, является перегородка толщиной 10 – 15 мм, так как при дальнейшем увеличении ее толщины коагулирующие свойства улучшаются незначительно, а гидравлические потери возрастают. Для теплоизоляционной прокладки (образец № 2), рис. 4.13, толщина перегородки не должна превышать 26 мм, так как при дальнейшем ее увеличении ухудшаются коагулирующие и гидравлические свойства.

**Таблица 4.10**

**Эффективность обезвоживания дизельного топлива перегородками из пенополиуретанов**

№ перегородки	Толщина перегородки, $10^{-3} \text{ м}$		Перепад давления, кПа	Содержание свободной воды, % масс.		Эффективность обезвоживания, %
	до обжата	после обжата		до перегородки	после перегородки	
<b>ППУ-ЭО-130</b>						
1	10	10	0,5/0,6	0,153	0,136/0,141	11/8
3	10	5	0,7/0,8	0,148	0,128/0,134	14/9
5	10	2,5	1,2/1,4	0,158	0,122/0,132	20/13
2	15	15	0,8/0,9	0,148	0,126/0,130	15/12
6	15	3,75	1,0/1,2	0,138	0,114/0,120	17/13
8	15	2,5	1,2/1,4	0,142	0,110/0,118	22/17
4	20	20	0,9/1,0	0,143	0,118/0,126	17/22
7	20	10	1,1/1,4	0,138	0,112/0,118	19/44
9	20	5	1,4/1,6	0,141	0,103/0,112	24/20
<b>ППУ-ЭО-111</b>						
2	10	10	1,0/	0,146	0,132/	10/
3	10	5	1,4/1,6	0,139	0,123/0,129	12/7

Номера перегородок даны в соответствии с табл. 4.5. В числителе приведены данные в начале испытаний, а в знаменателе – в конце.

Необходимо учитывать, что увеличение толщины перегородки не всегда повышает ее коагулирующие свойства, это происходит в результате повторного диспергирования воды. Перегородки толщиной 35 – 45 мм при  $q = 0,007 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$  менее эффективны, чем перегородки толщиной 10 – 15 мм.

Следовательно, для каждой пористой перегородки имеются рациональные: толщина и пропускная способность, при которых она наиболее эффективна в процессе обезвоживания дизельного топлива.

Проведенные исследования перегородок из пенополиуретанов ППУ-ЭО-130 и ППУ-ЭО-111 (образец №3), табл. 4.10, показали, что они практически не обладают коагулирующими свойствами. Эффективность обезвоживания для перегородок толщиной 10,

15 и 20 мм находится в пределах 8 - 13, 12 - 17 и 12 - 20 %, а содержание свободной воды после перегородок соответственно 0,132 – 0,141, 0,118 – 0,130 и 0,112 – 0,126 % мас.

Однако пенополиуретаны могут использоваться в многослойных перегородках (ввиду пористой структуры) для увеличения размеров капель воды, вышедших из коагулирующей стекловолоконистой перегородки и предотвращения вымываемости волокон из перегородок.

Таким образом, в результате исследований установлено, что наиболее высокими коагулирующими свойствами обладают образцы 1, затем 2 и 3. Следовательно, с увеличением диаметра волокон коагулирующие свойства снижаются, что подтверждает теоретические выводы, сформулированные в разделе 3.

Анализ результатов исследований показывает, что при обезвоживании дизельного топлива после однослойных перегородок содержится значительное количество воды (0,013 – 0,065 % мас.). Ввиду этого, добиться высокой эффективности обезвоживания с помощью однослойных перегородок из стекловолокон невозможно.

При исследовании коагулирующих перегородок, состоящих из двух и более слоев, гидравлическую характеристику определяют именно для этих условий, так как перепад давления нескольких слоев материала не равнозначен сумме перепадов давлений через каждый слой отдельно.

Поэтому на стенде (рис. 4.2) были исследованы гидравлические характеристики многослойных перегородок на дизельном топливе Л-0.2-40, не содержащем свободной воды и механических примесей при температуре 20<sup>0</sup>С.

На рис. 4.14. и 4.15. представлены гидравлические характеристики многослойных коагулирующих перегородок, из которых следует, что все перегородки обладают высокими гидравлическими свойствами и имеют линейный характер. Это обуславливает наиболее экономичный режим фильтрации. При удельной пропускной способности – 0,0075 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с, гидравлические потери составляют соответственно 1 - 4 кПа для образца 1 и 1,2 - 4 кПа для образца 2. Следовательно, эти образцы имеют практически одинаковые характеристики. На величину гидравлических потерь оказывает влияние толщина перегородки, степень обжатия и удельная пропускная способность.

Для комплексной оценки влияния этих факторов на величину потерь в многослойной перегородке результаты экспериментов обрабатывались по матрице плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) – 2<sup>3</sup>.

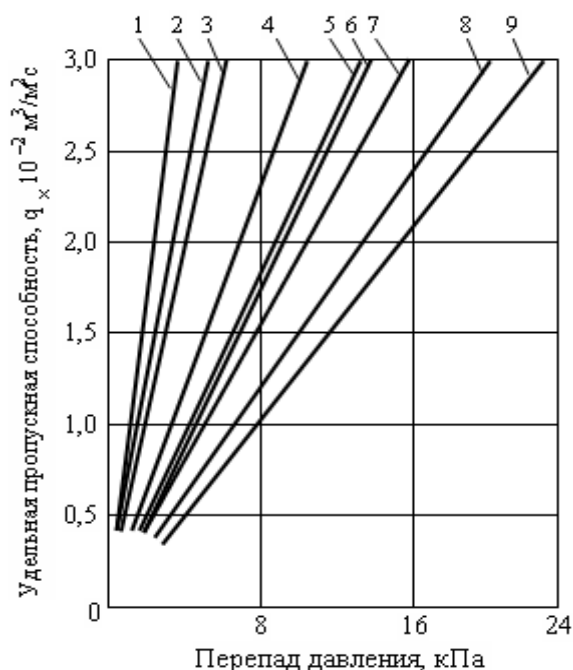


Рис. 4.14. Гидравлические характеристики многослойных перегородок (образец 1)

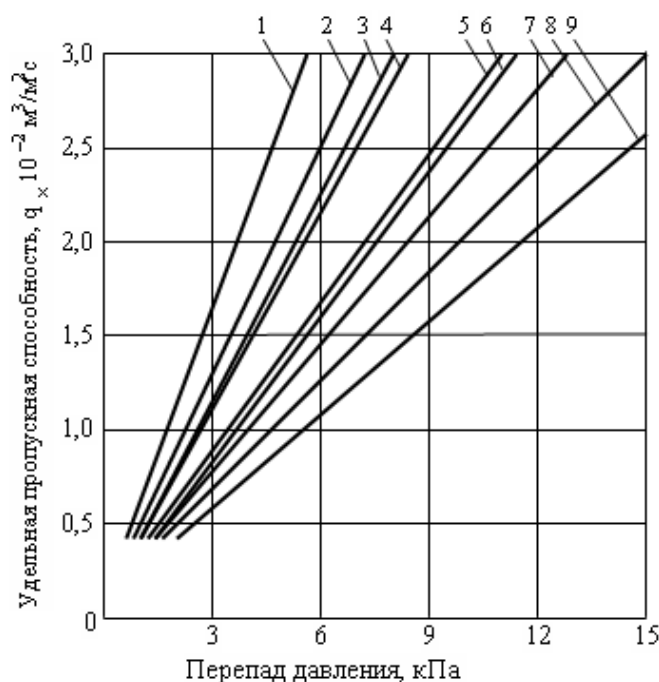


Рис. 4.15. Гидравлические характеристики многослойных перегородок (образец 2)  
Характеристики многослойных перегородок представлены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

### Характеристики коагулирующих многослойных перегородок

№ образца	Структурный состав перегородки	№ перегородки								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Супертонкое стекловолокно	$\frac{10}{2}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{15}{4}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{15}{6}$
	Прокладка теплоизоляционная	$\frac{13}{2}$	$\frac{13}{4}$	$\frac{26}{2}$	$\frac{26}{2}$	$\frac{13}{6}$	$\frac{26}{4}$	$\frac{26}{4}$	$\frac{26}{6}$	$\frac{26}{6}$
2	Супертонкое стекловолокно	$\frac{5}{2}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{15}{4}$	$\frac{15}{6}$	$\frac{10}{6}$
	Прокладка теплоизоляционная	$\frac{13}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{13}{4}$	$\frac{13}{4}$	$\frac{13}{6}$	$\frac{13}{4}$	$\frac{13}{6}$	$\frac{13}{6}$
	Пенополиуретан ППУ-ЭО-130	$\frac{10}{2}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{10}{6}$

- в числителе приведена толщина перегородки до обжатия,  $\cdot 10^{-3}$  м,

- в знаменателе – степень обжатия.

В табл. 4.12 представлены уровни факторов и интервалов варьирования для образца № 2.

Таблица 4.12

### Уровни факторов и границы варьирования

Структурный состав перегородки	Факторы	Границы варьирования	Уровни факторов		
			-I	0	I
Супертонкое стекловолокно	$X_1$ – исходная толщина перегородки, $10^{-3}$ м	28-38	28	33	8
Теплоизоляционная	$X_2$ – удельная	0,75-2,5	0,75	1,625	



прокладка	пропускная способность, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$				,5
Пенополиуретан ППУ-ЭО-130	$X_3$ – степень обжатия перегородки	2-6	2	4	

Толщина перегородок из теплоизоляционной прокладки и пенополиуретана ППУ-ЭО-130 была постоянной и равнялась соответственно 13 и  $10 \cdot 10^{-3}$  м.

Толщина перегородки из супертонкого стекловолокна оказывает наибольшее влияние на гидравлические потери в многослойной перегородке. Поэтому при исследовании ее толщину изменяли в пределах  $(5 - 15) \cdot 10^{-3}$  м.

В качестве функции отклика принят перепад давления ( $\Delta P$ ). Обработка результатов экспериментов проводилась статическими методиками [117, 118].

В результате обработки эксперимента получена регрессионная модель, представляющая собой регрессионное уравнение:

$$\Delta P = 5,5 + 0,85 X_1 + 2,9 X_2 + 1,77 X_3 + 0,45 X_1 X_2 + 0,92 X_2 X_3 \quad (4.8)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что наиболее существенное влияние на гидравлические потери оказывает удельная пропускная способность, а затем степень обжатия перегородки. Наименьшее влияние на гидравлические потери оказывает толщина перегородки. Поэтому, для коагулирующей ступени фильтра-водоотделителя необходимо использовать перегородки со степенью обжатия равной 2 - 4.

Результаты исследований гидравлических характеристик использовались при подборе многослойных перегородок для модельных элементов.

Для определения структурного состава многослойной коагулирующей перегородки, обладающей высокими коагулирующими и гидравлическими свойствами, использовались перегородки, состоящие из стекловолокнистых материалов и пенополиуретана. Его применение в составе перегородки обусловлено тем, что он способствует значительному укрупнению капель воды на выходе из нее.

В ходе исследований необходимо оценить влияние толщины волокнистых слоев, диаметра волокон, расположения в слоях различных компонентов, сочетания стекловолокнистых материалов, волокна которых обладают различной поверхностной энергией на коагулирующие свойства перегородки.

На дизельном топливе Л-0,2-40 было испытано 3 вида коагулирующих перегородок при содержании свободной воды на входе 0,21 %. Результаты испытаний приведены в приложении А, табл. А1, анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

1. Для повышения коагулирующих свойств, перегородки должны быть многослойными и состоять из волокон различного диаметра, располагаемых по потоку топлива в порядке увеличения их диаметра. Нарушение этой последовательности приводит к ухудшению коагулирующих свойств и возрастанию гидравлических потерь.

2. В качестве коагулирующей среды в перегородках должны применяться гидрофобные волокна, обладающие поверхностной энергией. Лишь первый слой может состоять из гидрофильных волокон.

3. Наибольшими коагулирующими характеристиками обладает коагулирующая перегородка №1. При скорости потока 1 см/с и обводненности дизельного топлива более 0,2 % масс, обеспечивается практически 100% удаления свободной воды. При этом ее гидравлические потери при степени обжатия от 10 до 20 не превышает  $0,36 \text{ кгс}/\text{см}^2$ .

4. Увеличение толщины слоя коагулирующих перегородок не всегда приводит к повышению коагулирующих свойств. Благодаря более сильному сжатию можно повысить эффективность обезвоживания до 100% (обр.№1), но гидравлические потери при этом увеличиваются в 2 раза и более.

С целью упрощения структурного состава перегородок при сохранении их коагулирующих свойств были проведены исследования по созданию коагулирующих

перегородок, состоящих из двух стекловолокнистых материалов и поролона, результаты приведены в приложении А, табл. А2.

Применение в составе коагулирующей перегородки поролона обусловлено тем, что он способствует заметному укрупнению капель воды на выходе из нее. Для исследований было отобрано 3 марки поролона:

открытопористый ППУ-ЭО-111 толщиной 7,14 и 20 мм;

открытопористый ППУ-ЭО-130 толщиной 4,10,15 и 20 мм;

закрытопористый ППУ-35-0,8 толщиной 8 и 14 мм.

Исследования проведены на топливе Л-0,2-40 при различной скорости потока и содержании свободной воды 0,10...0,30 % мас.

Результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы:

1. С увеличением скорости топливного потока до  $8,1 \cdot 10^{-10}$  м/с размер капель воды, срываемых с наружной поверхности коагулирующей перегородки, возрастает, а при скорости потока выше этой величины – уменьшается.

2. Наиболее высокими коагулирующими свойствами обладает перегородка №6 с использованием открытопористого поролона ППУ-ЭО-111 толщиной 7 мм. Но в связи с тем, что этот поролон серийно отечественной промышленностью не выпускается, для дальнейших исследований был взят поролон марки ППУ-ЭО-130 толщиной 10 мм (перегородка №3).

Для определения рациональных параметров многослойных коагулирующих перегородок были проведены исследования с использованием методов математического планирования эксперимента по матрице плана В<sub>2</sub>, основанием для выбора которого послужили результаты предварительных экспериментов.

В качестве исследуемых факторов были приняты: X<sub>1</sub> – скорость потока топлива, X<sub>2</sub> – содержание свободной воды в топливе до перегородки.

Параметром функции отклика служил размер капель воды, скрывааемых гидродинамическими силами потока с наружной стороны коагулирующей перегородки.

В результате обработки экспериментальных данных была получена регрессионная модель, определяющая характер зависимости функции отклика от исследуемых факторов:

$$Y = 4,30 - 1,90X_1 - 0,30X_2 + 0,20 X_1 X_2 - 2,50X_1^2 - 1,90X_2^2 . \quad (4.9)$$

Анализ уравнения (4.9) показал, что наибольшее влияние на коагулирующие свойства перегородки оказывает скорость потока, а за тем содержание свободной воды до перегородки.

Проведенные исследования показали, что поролон не обладает коагулирующими свойствами, а служит для укрупнения уже скоагулировавшихся капель воды. При этом закрытопористый поролон ППУ-35-0,8 снижает эффективность обезвоживания перегородок (появляется эмульсия).

Таким образом, наиболее эффективной является коагулирующая пористая перегородка в состав которой входят волокна СТВ с диаметром 1,5 до 3,0 мкм и серийно выпускаемый открытопористый поролон ППУ-ЭО-130.

#### 4.4. Экспериментальные исследования водоотталкивающих свойств перегородок

Из анализа зарубежных и отечественных источников известно, что в мировой практике в качестве водоотталкивающих материалов широко применяются однослойные пористые перегородки, обладающие сильными гидрофобными свойствами. Как правило, это бумаги, пропитанные силиконовыми растворами, или металлические сетки, покрытые тефлоновой пленкой.

В отечественной практике в качестве водоотталкивающих материалов применяется капрон и нетканый материал ДРКБ, пропитанные кремнеорганической жидкостью ГКЖ-94 в толуоле.

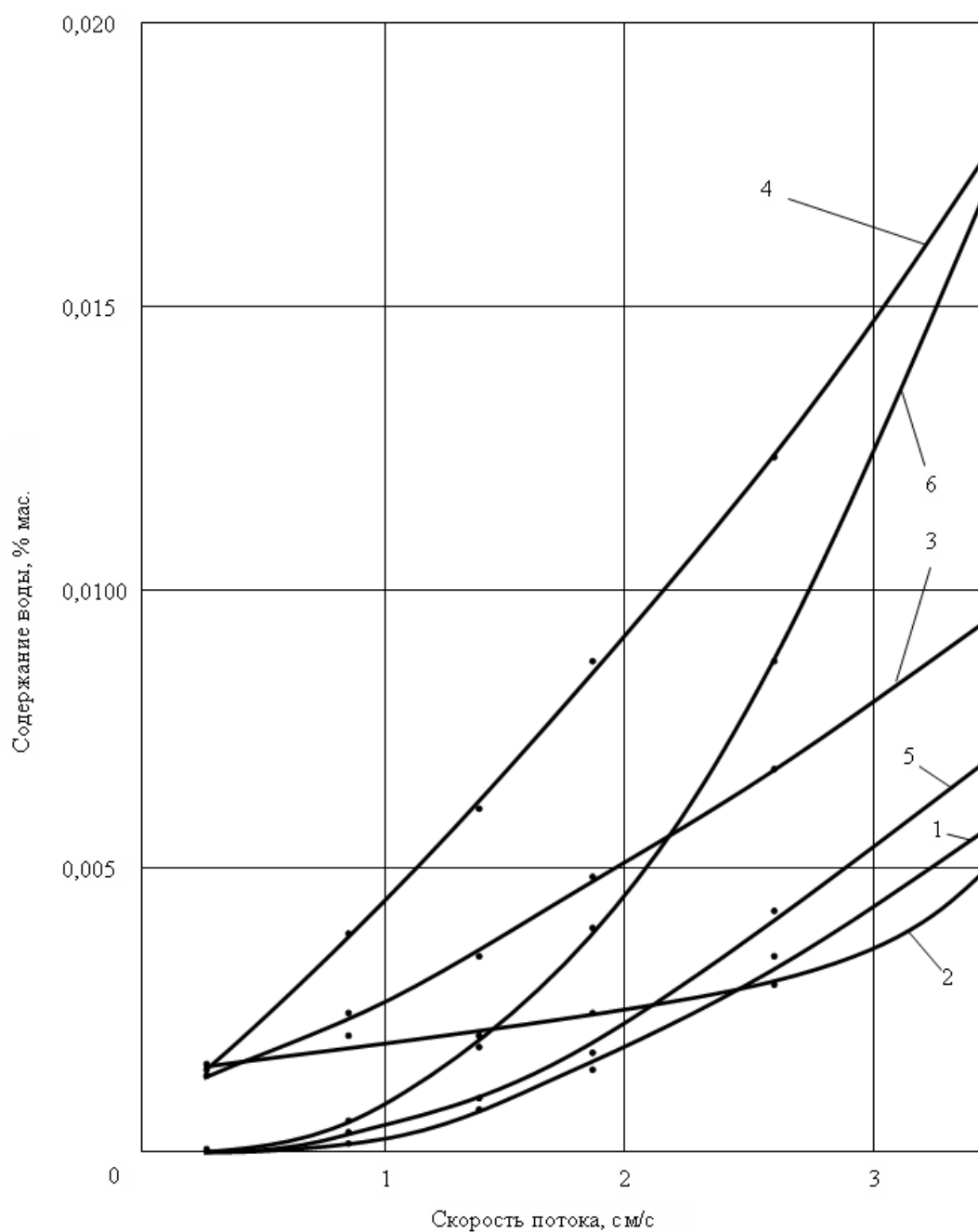


Рис. 4.16. Зависимость содержания воды в топливе после водоотталкивающей перегородке от скорости потока:

1 – сетка с тефлоновым покрытием; 2 – иглопробивной нетканый материал; 3 – лавсан; 4 – капрон с пропиткой фторалкилкрилатом и кремнеорганической смолой; 5 – нетканый материал; 6 – капрон с кремнеорганической пропиткой.

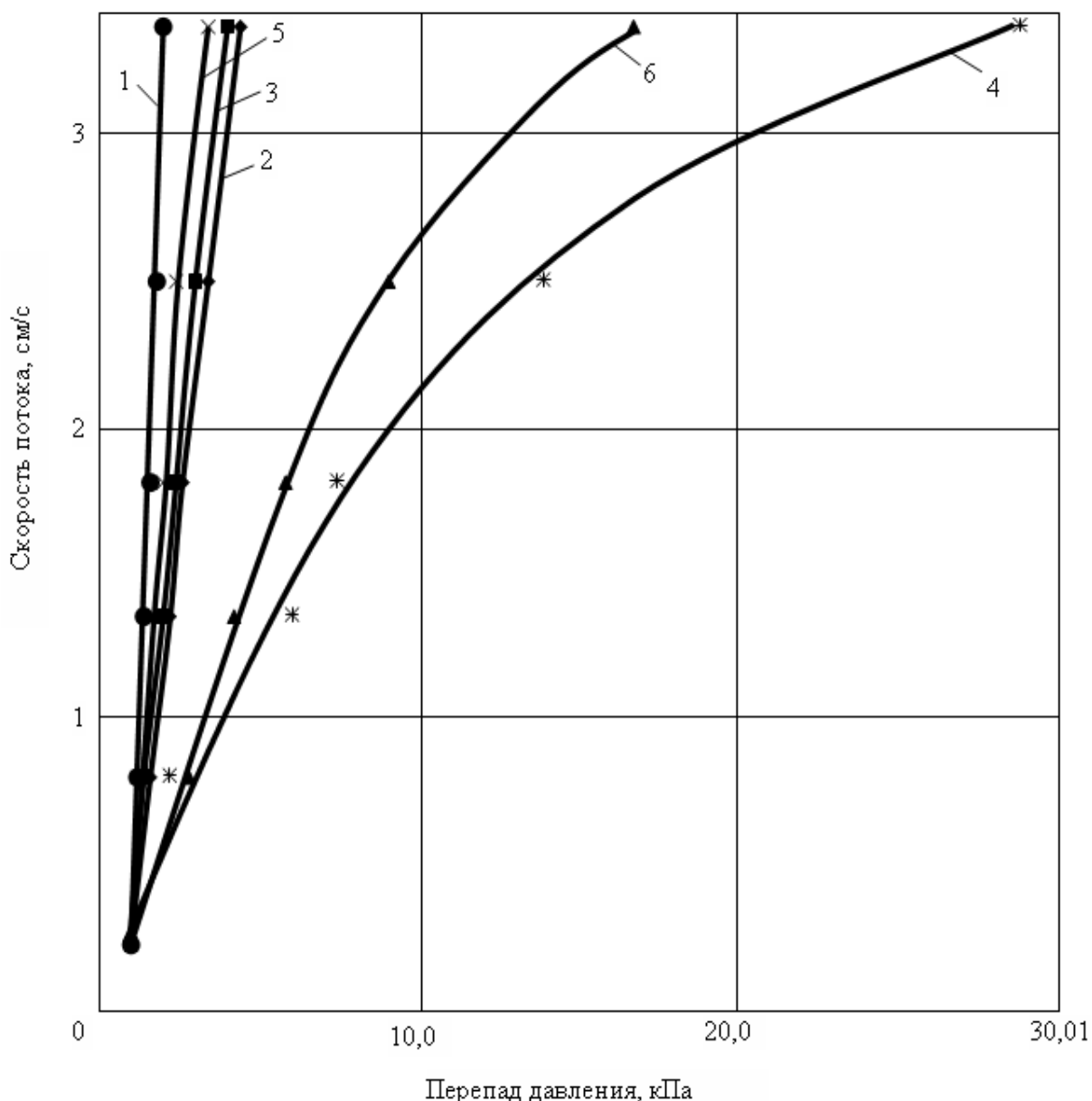


Рис. 4.17. Гидравлические характеристики водоотталкивающих перегородок: 1 – сетка с тефлоновым покрытием; 2 – иглопробивной нетканый материал; 3 – лавсан; 4 – капрон с пропиткой фторалкилкрилатом и кремнеорганической смолой; 5 – нетканый материал ДРКБ с кремнеорганической пропиткой; 6 – капрон с кремнеорганической пропиткой.

Для исследований были отобраны образцы серийно выпускаемых отечественной промышленностью пористых материалов:

- иглопробивного нетканого материала, состоящего из 30 % лавсана и 70 % пропилена (размер пор 25 мкм);
- лавсана (размер пор 40 мкм);
- капрона (размер пор 15 мкм);
- нетканого материала ДРКБ (размер пор 50 мкм);
- капрона (размер пор 30 мкм), пропитанного раствором кремнеорганической жидкости ГКЖ-94 в толуоле.

Из перечисленных материалов образцы первых трех были последовательно обработаны раствором эмульсии фторакрила и эмульсии кремнеорганической смолы. Для сравнения водоотталкивающих свойств в исследованиях использованы также образцы перегородки, применяемой в фильтрах-сепараторах фирмы "Фауди" (Германия),

выполненной в виде металлической сетки (размер 60 мкм) с нанесенной на нее тефлоновой пленкой.

Исследования проводились на топливе Л-0,4-40, содержанием 0,1 % (мас.) свободной воды.

Из результатов исследования, приведенных на рис. 4.16, 4.17 и в табл. А3, приложения А, можно сделать следующие выводы.

1. Наилучшими гидравлическими характеристиками обладают сетка (обр. №1), покрытая тефлоном и нетканый материал ДРКБ (обр. №5), гидравлические потери которых при скорости потока до 1,5 м/с не превышают 0,03 кгс/см<sup>2</sup>.

2. С возрастанием скорости потока с 0,1 до 1,5 см/с содержание свободной воды в топливе возрастает после водоотталкивающих перегородок за счет прохождения через них небольших капель. Наилучшими водоотталкивающими свойствами обладает иглопробивной материал (обр. №2) и сетка (обр. №1): содержание воды в топливе после этих перегородок составляет соответственно 0,0008 и 0,0023 % мас., при скорости потока через коагулирующий элемент 0,8 см/с.

Более низкими водоотталкивающими свойствами обладает перегородка из лавсана (обр. №3). С возрастанием скорости потока с 0,1 до 1,5 см/с через эти перегородки продавливаются капли воды размером от 0,5 до 1,1 мм.

Таким образом, лучшими водоотталкивающими показателями обладают сетка, покрытая тефлоном и нетканый материал ДРКБ, пропитанный неорганической жидкостью ГКЖ-94, который, однако, по ряду эксплуатационных свойств, а также по ресурсу работы все же уступает сетке.

#### **4.5. Выбор оптимального структурного состава фильтрующей и коагулирующей перегородок, обоснование конструктивной схемы фильтров-водоотделителей**

При выборе оптимального структурного состава фильтрующих перегородок руководствовались следующими требованиями, основанными на результатах экспериментальных исследований.

1. Перегородки должны обладать требуемой тонкостью очистки в зависимости от места их установки. При выдаче топлива через заправочные колонки (ТРК) должны применяться перегородки с тонкостью очистки 15-20 мкм; В фильтрах-отстойниках (ФГО) тракторов и комбайнов – 30-40 мкм.

2. Перегородки должны обладать высокой грязеемкостью. Для этого целесообразно применять перегородки, состоящие из 2-х пористых материалов, обладающих различной тонкостью очистки: при выдаче через ТРК перегородки, должны состоять в направлении потока топлива из материалов с тонкостью очистки 30-40 мкм и 15-20 мкм; в системе питания дизеля – с тонкостью очистки 40-60 мкм; и 35 – 40 мкм. В качестве фильтрующих перегородок, применяемых при выдаче, могут применяться фильтрующие перегородки состоящие из следующих материалов: бумага БТ-120 (ТУ 1304 04-604-81) и бумага БТ-170 (ТУ 13730 . 001 – 752 –87); в фильтре – водоотделителе для топливной системы двигателя бумага ДРКБ по ТУ 81-04-178-78 и БТ –120 ТУ 1304-04-604-81.

3. С целью повышения грязеемкости и, следовательно, ресурса работы фильтрующие перегородки должны применяться в гофрированном виде.

При выборе оптимального структурного состава коагулирующей перегородки руководствовались следующим: перегородка должна быть проста по составу и технологична при изготовлении коагулирующего элемента.

Экспериментально установлено, что перегородка должна состоять по ходу топливного потока из следующих материалов: мата из СТВ с диаметром волокон 1,5/2,0 мкм и толщиной 60 мм, теплоизоляционной прокладки из волокон СТВ диаметром 3 мкм и толщиной 26 мм,

поролон ППУ – ЭО –130 толщиной 7 мм. Применение поролон ППУ – ЭО – 130 обусловлено тем, что он выпускается серийно, а поролон ППУ – ЭО – 111 – опытный.

Коагулирующая перегородка приведенного состава применяется как для фильтров-водоотделителей в системе питания двигателя и для фильтров-водоотделителей ТРК.

Для повышения эффективности работы фильтра, исходная толщина коагулирующей перегородки уменьшается путем обжатия в 8-10 раз.

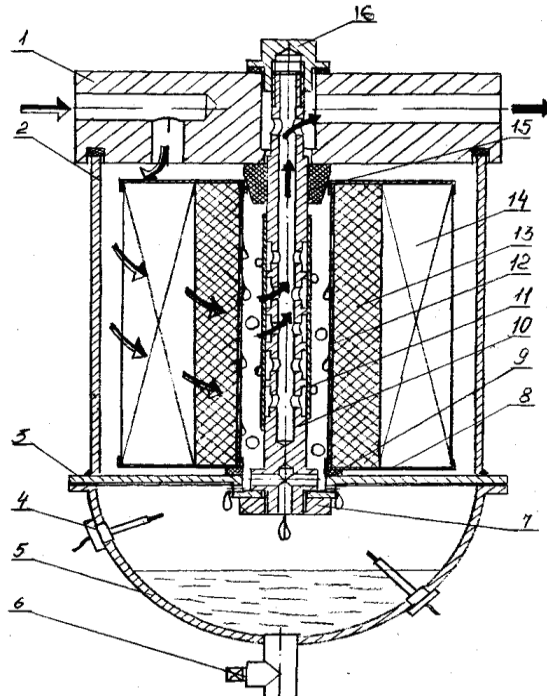


Рис. 4.18. Схема работы фильтра-водоотделителя:

1-крышка; 2-стакан; 3-опорная перегородка; 4-датчик вода; 5-отстойник; 6-сливной кран; 7-стягивающая гайка; 8-кршка; 9-прокладка; 10-выходная трубка; 11-водоотталкивающая перегородка; 12-перфорированный цилиндр; 13-коагулирующая перегородка; 14-фильтрующая перегородка; 15-коническая резиновая прокладка; 16-стягивающая гайка.

Разработанный фильтр-водоотделитель, предназначенный для очистки топлива в системе питания двигателя, имеет конструкцию, представленную на рис. 4.18.

Основным сменным узлом фильтра-водоотделителя является фильтрующий водоотделяющий элемент, который по ходу топливного потока снаружи вовнутрь состоит из трех пористых перегородок: фильтрующей (14), коагулирующей (13) и водоотталкивающей (11), рис. 4.18.

Фильтрующий коагулирующий элемент по ходу топливного потока снаружи вовнутрь состоит из следующих материалов:

- фильтровальной бумаги ДРКБ (ТУ 81-04) с номинальной тонкостью очистки 40...50 мкм;
- фильтровальной бумаги БТ-120 (ТУ-1304-04-604-81) с номинальной тонкостью очистки 30 . . . 40 мкм;
- канвы вышивальной хлопчатобумажной (ОСТ 17-748-78);
- мата из супертонкого стекловолокна СТВ (ТУ 16-04-16-50-87) диаметром 1,5...2 мкм, толщиной 60 мм;
- теплоизоляционной прокладки из супертонких стекловолокон СТВ (ТУ-РСФСР – 459-75) диаметром 3...4 мкм и толщиной 26 мм;
- открытопористого эластичного пенополиуретана (поролон) ППУ-30-130 (ТУ-05-221-710-85) толщиной 10 мм.

В водоотталкивающем элементе в качестве водоотталкивающей среды применяется латунная сетка с размером ячейки 71 или 80 мм (ГОСТ 3584-73), покрытая пленкой из фторопласта Ф-4Д. Размер ячейки после покрытия фторопластом 56 мкм.

Для увеличения поверхности фильтрования бумаги применяются в фильтровальном элементе в гофрированном виде. С целью предотвращения склеивания между гофрами установлена канва вышивальная хлопчатобумажная.

Такая конструкция и структурный состав фильтрующего элемента позволяет значительно повысить грязеемкость фильтрующей перегородки и, следовательно, ресурс работы самого фильтроэлемента.

При расчете пропускной способности фильтра-водоотделителя необходимо исходить из скорости потока топлива, при которой фильтрующая перегородка обеспечивает наибольшую эффективность очистки от загрязнений и низких гидравлических потерь. Это требование обуславливается тем, что фильтр-водоотделитель устанавливается на всасывающей линии подкачивающего насоса.

Согласно мировому и отечественному опыту фильтрующие перегородки с толщиной очистки 40...50 мкм обеспечивают эффективную очистку при скорости потока более 1 м/с, коагулирующие перегородки при обезвоживании дизельных топлив – до 1,0 см/с, водоотталкивающие перегородки при обезвоживании дизельных топлив – до 0,8 м/с.

При расчетах поверхностей отдельных ступеней фильтра-водоотделителя необходимо исходить из номинальной пропускной способности, определяемой всасывающей способностью насоса и допустимой скоростью потока через ту или иную пористую перегородку.

Поверхность  $S_p$  каждой ступени фильтра-водоотделителя рассчитывается по формуле:

$$S_p = \frac{Q}{V}, \quad (4.10)$$

где  $Q$  – номинальная пропускная способность, равная 3,3 л/мин;

$V$  – скорость потока, равная при обезвоживании дизельного топлива 0,8 см/с.

Таким образом, поверхность каждой из трех ступеней (фильтрующей, коагулирующей и водоотталкивающей) фильтра-водоотделителя должна быть не менее:

$$S_p = \frac{3,3 \text{ л} \cdot \text{с}}{\text{мин} \cdot 0,8 \text{ см}} = \frac{3300 \text{ см}^3 \cdot \text{с}}{60 \text{ с} \cdot 0,8 \text{ см}} = 70 \text{ см}^2 = 0,007 \text{ м}^2. \quad (4.11)$$

Расчет фильтрующей перегородки фильтрующего коагулирующего элемента.

Данные для расчета:

Наружный диаметр фильтрующей перегородки – 110 мм;

внутренний диаметр фильтрующей перегородки – 60 мм;

высота рабочей поверхности перегородки – 110 мм.

Фильтрующая перегородка с такими габаритными размерами позволяет получить фильтрующую штору со следующими характеристиками:

- количество гофр ( $n$ ) – 70
- высота шторы ( $H$ ) – 110 мм
- высота гофры ( $h$ ) – 23 мм

Площадь фильтрования  $S_p$  рассчитывается по формуле:

$$S_p = 2 \cdot h \cdot n \cdot H = 2 \cdot 23 \cdot 70 \cdot 11 = 3542 \text{ см}^2 = 0,3542 \text{ м}^2. \quad (4.12)$$

Таким образом, поверхность фильтрования разработанного фильтра-водоотделителя в 50,6 раза выше расчетной.

Следовательно, грязеемкость разработанной фильтрующей перегородки будет не менее в 12,4 раза выше, чем у штатного фильтрующего элемента.

Расчет коагулирующей перегородки фильтрующего коагулирующего элемента.

Данные для расчета:

- внутренний диаметр коагулирующей перегородки  $d=30$  мм;

- наружный диаметр коагулирующей перегородки  $D=58$  мм;
- высота перегородки  $H=110$  мм.

Для расчета коагулирующей поверхности воспользуемся формулой:

$$S=\pi \cdot D \cdot H. \quad (4.13)$$

Расчетная площадь по внутреннему диаметру элемента:

$$S_d=3,14 \cdot 3 \cdot 11 = 103,6 \text{ см}^2. \quad (4.14)$$

Расчетная площадь по наружному диаметру перегородки:

$$S_d=3,14 \cdot 6,8 \cdot 11 = 200,3 \text{ см}^2. \quad (4.15)$$

Принимая во внимание, что оптимальная скорость топливного потока в коагулирующих перегородках, как правило, не более 1,0 м/с, расчетная поверхность коагулирующей перегородки должна быть:

$$S_p = \frac{Q}{V_p} = \frac{3300 \text{ см}^3 \cdot \text{с}}{60 \text{ с} \cdot \text{см}} = 55 \text{ см}^2. \quad (4.16)$$

Таким образом,  $S_p$  меньше  $S_d$  в 1,88 раза, а  $S_d$  – в 3,64 раза.

Принимая во внимание, что скорость потока на входе в коагулирующую перегородку  $V_p$  равна:

$$V_p = \frac{Q}{S_p} = \frac{3300 \text{ см}^3}{60 \text{ с} \cdot 200,3 \text{ см}^2} = 0,375 \text{ см/с}, \quad (4.17)$$

а на выходе из нее  $V_d$ :

$$V_d = \frac{Q}{S_d} = \frac{3300 \text{ см}^3}{60 \text{ с} \cdot 103,6 \text{ см}^2} = 0,53 \text{ см/с}, \quad (4.18)$$

можно с уверенностью предположить, что при таких скоростях потока коагулирующая перегородка будет обладать высокими коагулирующими свойствами.

Расчет водоотталкивающего элемента.

Данные для расчета:

Диаметр – 18 мм;

высота – 110 мм.

Рассчитываем рабочую поверхность водоотталкивающего элемента:

$$S_p = \pi D H = 3,14 \cdot 1,8 \cdot 11 = 45,2 \text{ см}^2. \quad (4.19)$$

Эксплуатационная скорость топливного потока через водоотталкивающую перегородку будет равна:

$$V_s = \frac{Q}{S} = \frac{3300 \text{ см}^3}{60 \text{ с} \cdot 45,2 \text{ см}^2} = 45,2 \text{ см}^2. \quad (4.20)$$

Таким образом, водоотталкивающая перегородка будет работать при скорости топливного потока значительно меньшей критической скорости.

Проведенные расчеты показывают, что фильтр-водоотделитель, разработанный для систем питания двигателя с пропускной способностью 3,3 л/мин, будет работать при скоростях потока топлива значительно ниже критических значений. Это позволяет сделать вывод о том, что в условиях эксплуатации фильтр-водоочиститель будет эффективно удалять из топлива воду и механические примеси, а фильтрующий коагулирующий элемент будет иметь высокий ресурс работы.

Конструкция фильтра-водоочистителя для ТРК представлена на рис. 4.19. Основным узлом фильтра-водоотделителя является сменный фильтрующий водоотделяющий элемент состоящий из разъемного типа фильтрующего (7) коагулирующего (8) и водоотталкивающего (9) элементов, располагаемых последовательно в направлении потока изнутри наружу, рис. 4.19.



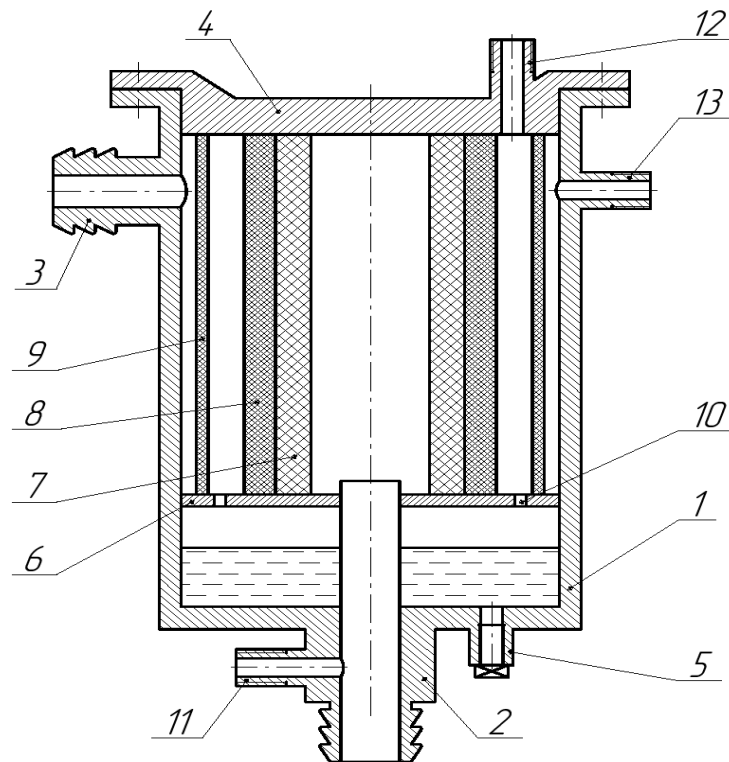


Рис. 4.19. Схема фильтра-водоотделителя ТРК

1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – крышка; 5 – пробка слива воды; 6 – опорная перегородка; 7 – фильтрующий элемент; 8 – коагулирующий элемент; 9 – водоотталкивающий элемент; 10 – отверстие для отвода воды.

За основу при расчете габаритных размеров были взяты следующие номинальные скорости потока, установленные в ходе экспериментальных исследований для фильтрующих, коагулирующих и водоотталкивающих перегородок:

- для фильтрующих перегородок – до 0,25 см/с;
- для коагулирующих перегородок – до 0,8 см/с;
- для водоотталкивающих перегородок – до 7 см/с.

С целью достижения максимально возможной поверхности и внесения минимальных конструктивных изменений в конструкцию фильтра, высота фильтрующего, коагулирующего и водоотталкивающего элементов была выбрана равной 170 мм.

Рассчитываем теоретически необходимую поверхность каждого из элементов по формуле:

- для фильтрующего элемента она должна быть:

$$S_{\text{р.ф.}} = \frac{40 \text{ л / мин}}{0,25 \text{ см / с}} = \frac{40000 \text{ см}^3}{60 \text{ с} \cdot 0,25 \text{ см}} = 0,267 \text{ м}^2, \quad (4.21)$$

- для коагулирующего элемента:

$$S_{\text{р.к.}} = \frac{40 \text{ л / мин}}{0,8 \text{ см / с}} = \frac{40000 \text{ см}^3}{60 \text{ с} \cdot 0,8 \text{ см}} = 0,083 \text{ м}^2, \quad (4.22)$$

- для водоотталкивающего элемента:

$$S_{\text{р.в.}} = \frac{40 \text{ л / мин}}{7 \text{ см / с}} = \frac{40000 \text{ см}^3}{60 \text{ с} \cdot 7 \text{ см}} = 0,0095 \text{ м}^2. \quad (4.23)$$

Рассчитываем поверхности разработанных элементов:

1. При расчете фильтрующей поверхности за основу принимаются следующие параметры:

- наружный диаметр ( $d_n$ ) – 121 мм;
- внутренний диаметр ( $d_b$ ) – 75 мм;
- высота гофр ( $h$ )-23 мм;
- количество гофр ( $n$ ) – 70;
- высота шторы ( $H$ ) - 170 мм.

Фильтрующая поверхность рассчитывается по формуле:

$$S = 2 h n H = 2 \cdot 23 \cdot 70 \cdot 170 = 0,547 \text{ м}^2. \quad (4.24)$$

Таким образом, поверхность разработанного фильтрующего элемента практически в два раза превосходит расчетную.

2. При расчете коагулирующей поверхности за основу принимаются следующие параметры:

- наружный диаметр ( $d_n$ ) – 160 мм;
- внутренний диаметр ( $d_b$ ) – 135 мм;
- высота перегородок ( $H$ ) – 170 мм.

Коагулирующая поверхность рассчитывается по формуле:

$$S = \pi d_n H. \quad (4.25)$$

Расчетная площадь по наружному диаметру  $S_{d.n}$  равна:

$$S_{d.n} = 3,14 \cdot 160 \cdot 170 = 0,085 \text{ м}^2. \quad (4.26)$$

По внутреннему диаметру  $S_{d.b}$ :

$$S_{d.b} = 3,14 \cdot 130 \cdot 170 = 0,075 \text{ м}^2. \quad (4.27)$$

Таким образом, поверхность коагулирующего элемента соответствует расчетной.

3. При расчете водоотталкивающей поверхности за основу принимаются следующие параметры:

- внутренний диаметр ( $d_b$ ) – 170 мм;
- высота ( $H$ ) – 170 мм.

Водоотталкивающая поверхность равна:

$$S = \pi d_b H = 3,14 \cdot 170 \cdot 170 = 0,091 \text{ м}^2 \quad (4.28)$$

Таким образом, водоотталкивающая поверхность элемента в 10 раз превышает расчетную.

На разработанные конструкции фильтров получены патенты на изобретения: UA 5544; UA 6038; UA 66522A.

Внешний вид фильтров представлен на рис. 4.20.



Рис. 4.20. Внешний вид фильтров

## Выводы

1. Определен комплекс методов исследования, который включает оценку загрязненности дизельного топлива, оценку фильтрующих, коагулирующих и водоотталкивающих свойств перспективных материалов и их сочетаний для применения в фильтрующих системах.

2. На основании экспериментальных исследований по выбору материалов пористых перегородок для фильтрующих элементов установлено, что наиболее эффективно удаляет механические примеси перегородка из 2-х фильтровальных бумаг, располагаемых в направлении потока в порядке уменьшения размера пор, при этом, увеличивается грязеемкость перегородки и улучшаются гидравлические характеристики.

3. Экспериментальные исследования коагулирующих свойств пористых материалов позволили установить, что для каждой пористой перегородки имеются рациональная толщина и пропускная способность, при которых наиболее эффективно происходит обезвоживание дизельного топлива. Установлено, что при обезвоживании однослойными перегородками в топливе содержится значительное количество воды (0,03 – 0,065% масс.), что говорит о низкой эффективности таких конструкций.

4. Установлено, что для повышения коагулирующих свойств, перегородки должны быть многослойными и состоять из волокон различного диаметра, располагаемых по потоку топлива в порядке увеличения диаметра. Нарушение такой последовательности приведет к ухудшению коагулирующих свойств и возрастанию гидравлических потерь. Экспериментально установлено, что в качестве коагулирующей среды в перегородках должны применяться гидрофобные материалы с углом смачивания  $\theta = 160^\circ - 180^\circ$ , что является подтверждением выводов математического моделирования, выполненного в третьем разделе.

5. Экспериментальные исследования водоотталкивающих свойств позволили выбрать группу материалов, которые обеспечивают эффективное удаление воды из топлива до значений 0,0008 – 0,0023% масс.

6. По результатам проведенных исследований и выбранных материалов разработаны конструкции фильтров-водоотделителей топливной системы дизеля и топливораздаточной колонки.

Разработанные конструкции фильтров защищены пятью патентами на изобретения..

## РАЗДЕЛ 5

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ТОПЛИВА

#### 5.1. Результаты эксплуатационных испытаний воздушных фильтров заливной горловины топливных баков тракторов и комбайнов

Запыленность воздуха исследовали на комбайнах СК-5А «Нива», ДОН-1500, тракторах ЮМЗ-6Л, Т-150К, ДТ-75, МТЗ-80/82 и ХТЗ-170, косилке КПС-5Г. Заливные горловины топливных баков комбайнов и тракторов были оборудованы разъемными пробками с фильтром (рис. 2.3).

При определении запыленности воздуха в качестве фильтрующей перегородки использовалась бумага марок БФВ-105П, БТ-120 и БТФВ-155. Фильтрующая перегородка устанавливалась в корпус пробки.

Перед установкой фильтрующей перегородки в корпус пробки заправочной горловины и после окончания испытаний производилась сушка и взвешивание на аналитических весах ВЛР-200 образцов фильтрующей бумаги с точностью до 0,0002 г. Кроме того, в процессе испытаний фиксировалась плотность и количество топлива, израсходованного трактором или комбайном, продолжительность работы (в моточасах) и вид выполняемой производственной операции.

Используя приведенные показатели в подразделе 2.1, определяли запыленность воздуха на уровне заливной горловины, количество пыли, проникающей с воздухом в топливный бак, на 1000 кг израсходованного топлива, а также производили анализ дисперсного состава загрязнений, задержанных пористой фильтрующей перегородкой.

На рис. 5.1 в вероятностных логарифмически нормальных координатах дан дисперсный состав пыли, поступающей в топливный бак МТА (кривая 1). Измерения проводились при общей разрешающей способности анализатора ПМС, равной 1 мкм. Для сравнения на рис. 5.1 представлен дисперсный состав кварцевой пыли с удельной поверхностью  $\rho = 5600 \text{ см}^2/\text{г}$  ГОСТ 8002-74 (кривая 2).

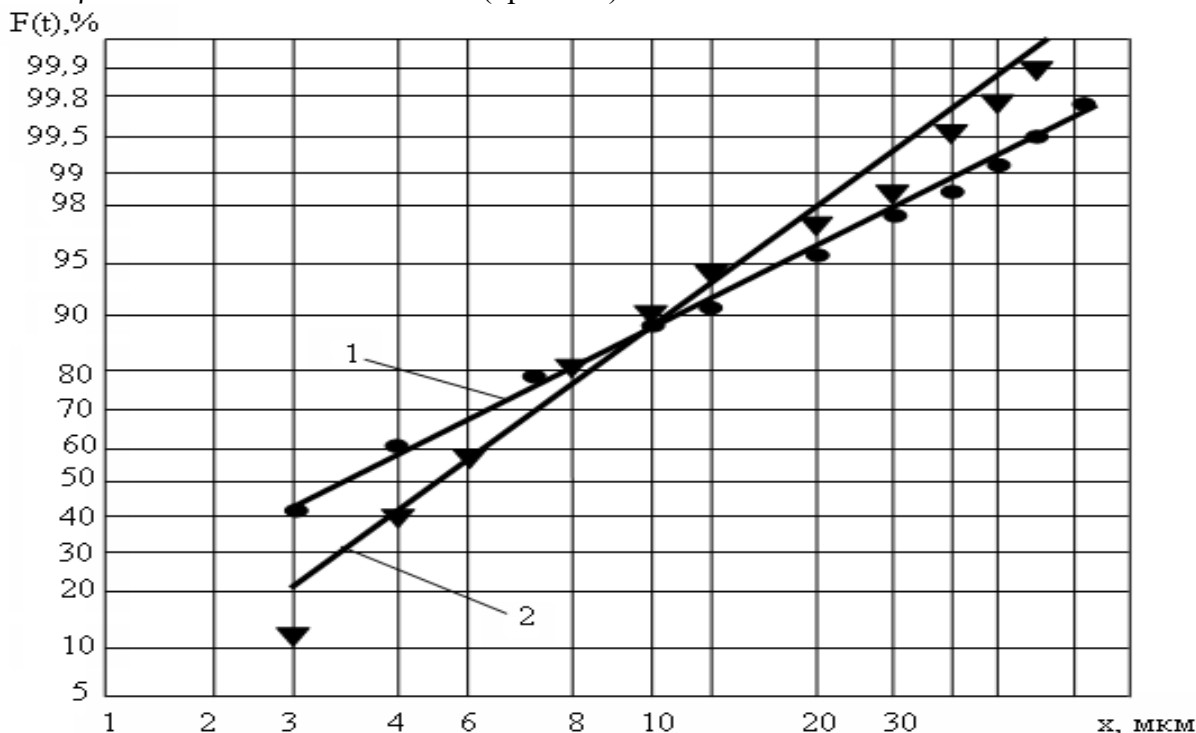


Рис. 5.1. Дисперсный состав пыли, поступающей в топливный бак (1) и кварцевой пыли (2) с  $\rho = 5600 \text{ см}^2/\text{г}$  ГОСТ 8002-74

В табл. 5.1 представлены параметры логнормального (ЛНР) и статистического распределений размеров частиц пыли. Из данных таблицы следует, что пыль, поступающая в топливный бак трактора в условиях сельскохозяйственного производства, имеет по сравнению со стандартной пылью с  $\rho = 5600 \text{ см}^2/\text{г}$  ГОСТ 8002-74 близкий средний размер частиц  $\sigma$ , однако дисперсия статистического распределения в два раза превышает значение  $D_x$  у стандартной пыли. Это свидетельствует о большей полидисперсности естественной пыли.

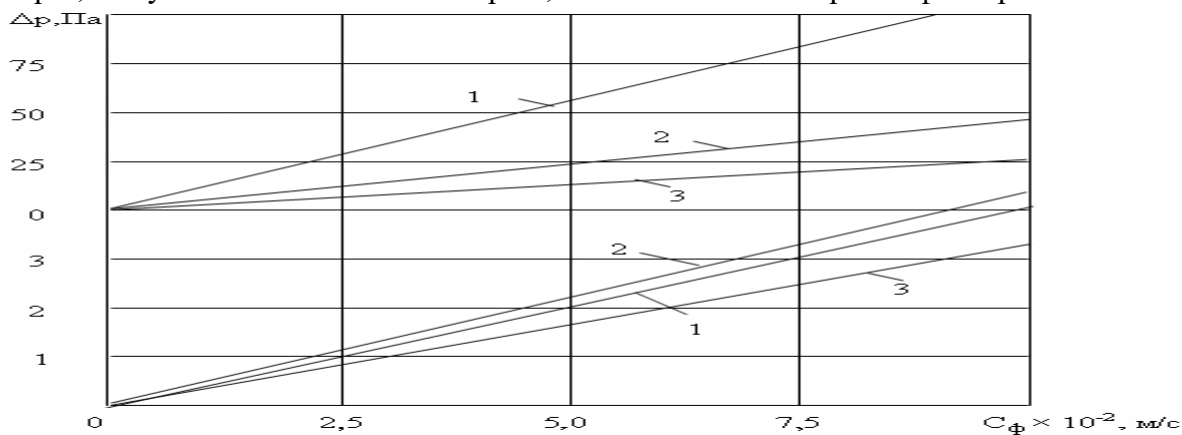
**Таблица 5.1**  
**Параметры логнормального (ЛНР) и статистического распределений размеров частиц пыли.**

Тип пыли	Параметры ЛНР				Параметры статического распределения	
	Медианный размер	Логарифм медианного размера частиц	Среднеквадратичное отклонение размера частиц	Коэффициент корреляции с ЛНР	Средний размер частиц $\sigma$ , мкм	Дисперсия $D_x$
1. Кварцевая $\rho = 5600 \text{ см}^2/\text{г}$ ГОСТ 8002-74	3,62	9,56	0,32	0,99	4,63	14,24
2. Поступившая в топливный бак трактора (комбайна)	2,29	0,36	0,47	0,99	4,28	28,04

Было изготовлено восемь пробок, которые испытаны на тракторах Т и комбайнах. Расход топлива составил 998 - 12488 кг, а общая наработка 162 - 490 ч. При этом ФЭ фильтра было задержано 0,3 - 2,5 г пыли.

На рис. 5.2 представлены гидравлические характеристики фильтрующих перегородок до и после испытаний. Для сравнительной оценки брались фильтрующие перегородки, наиболее загрязненные после испытаний.

Из данных рис. 5.2 видно, что гидравлические характеристики фильтрующих перегородок после испытаний резко ухудшились. Так, при скорости воздушного потока  $C_\phi = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$  перепад давления  $\Delta P$  возрос на перегородке из фильтрующей бумаги БТФВ-155 в 36 раз, из бумаги БФВ-105П - в 103 раза, а из нетканого материала фильтра 330 - в 139 раз.



**Рис. 5.2.** Гидравлические характеристики фильтрующих перегородок: а и б - до и после испытаний: 1, 2, 3 – соответственно из фильтрующих бумаг БТФВ 155 ( $G = 0,26 \text{ кг/м}^2$ ); БФВ-105П ( $G = 0,31 \text{ кг/м}^2$ ) и нетканого материала 330 ( $G = 0,55 \text{ кг/м}^2$ ).

Принимая во внимание, что фильтрующая перегородка в условиях эксплуатации работает при скоростях потока воздуха в 10 - 15 раз меньших, чем приведенная выше скорость, то перепад давления на фильтрующих перегородках фактически возрос менее чем в 80 раз и составил 0,1 кПа.

В связи с тем, что разрежение в топливном баке может достичь 5 кПа, фильтрующие перегородки имеют ресурс работы, значительно превышающий достигнутый в ходе испытаний.

На основании проведенных эксплуатационных испытаний материалом для фильтрующей перегородки была выбрана фильтрующая бумага БФВ-105П, имеющая более высокие характеристики. Таким образом, испытанные фильтрующие перегородки из бумаги БФВ-105П могут эксплуатироваться без замены в течение года и более.

## 5.2. Эксплуатационные испытания фильтров-водоотделителей

Эксплуатационные испытания фильтров-водоотделителей проводились в хозяйствах Запорожской области: СПК «Мирный», ФХ «Алекс», агрофирма им. Котовского.

Цель эксплуатационных испытаний определить эксплуатационные характеристики фильтров-водоотделителей, а также их ресурс работы и влияние на надежность агрегатов и узлов топливной аппаратуры и двигателя в целом.

Испытаниями установлено, что применение фильтров-водоотделителей на тракторах и комбайнах позволило практически в два раза повысить ресурс фильтров тонкой очистки (рис. 5.3). Ресурс фильтров тонкой очистки оценивали по допустимому перепада давления на элементе, с которого снимали гидравлическую характеристику через каждые 300 моточасов. Допустимый перепад давления равен 130-150 кПа.

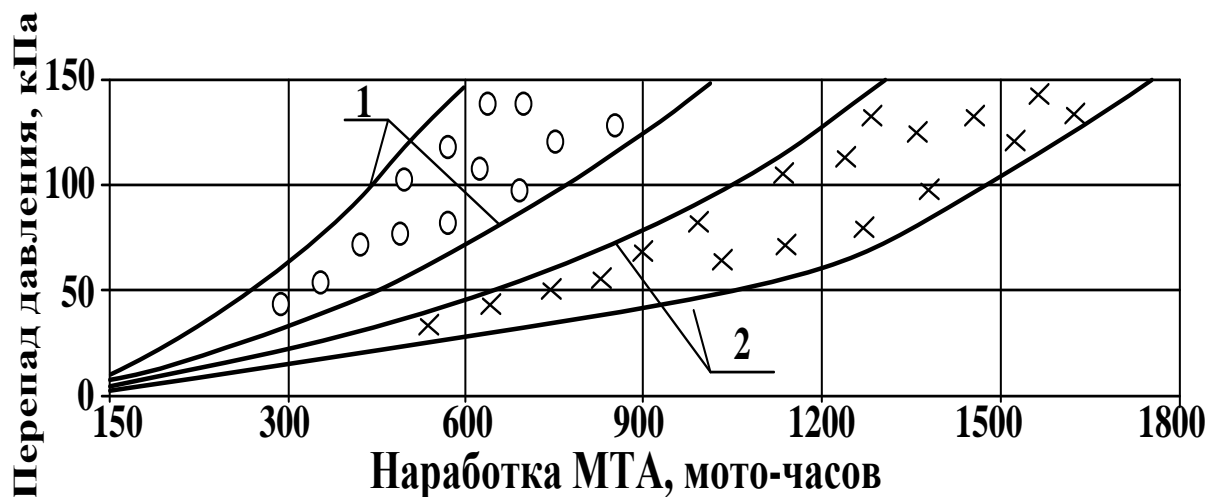


Рис. 5.3. Зависимость перепада давления на фильтре тонкой очистки от его наработки: 1 – с серийной системой очистки; 2 – с опытной системой очистки

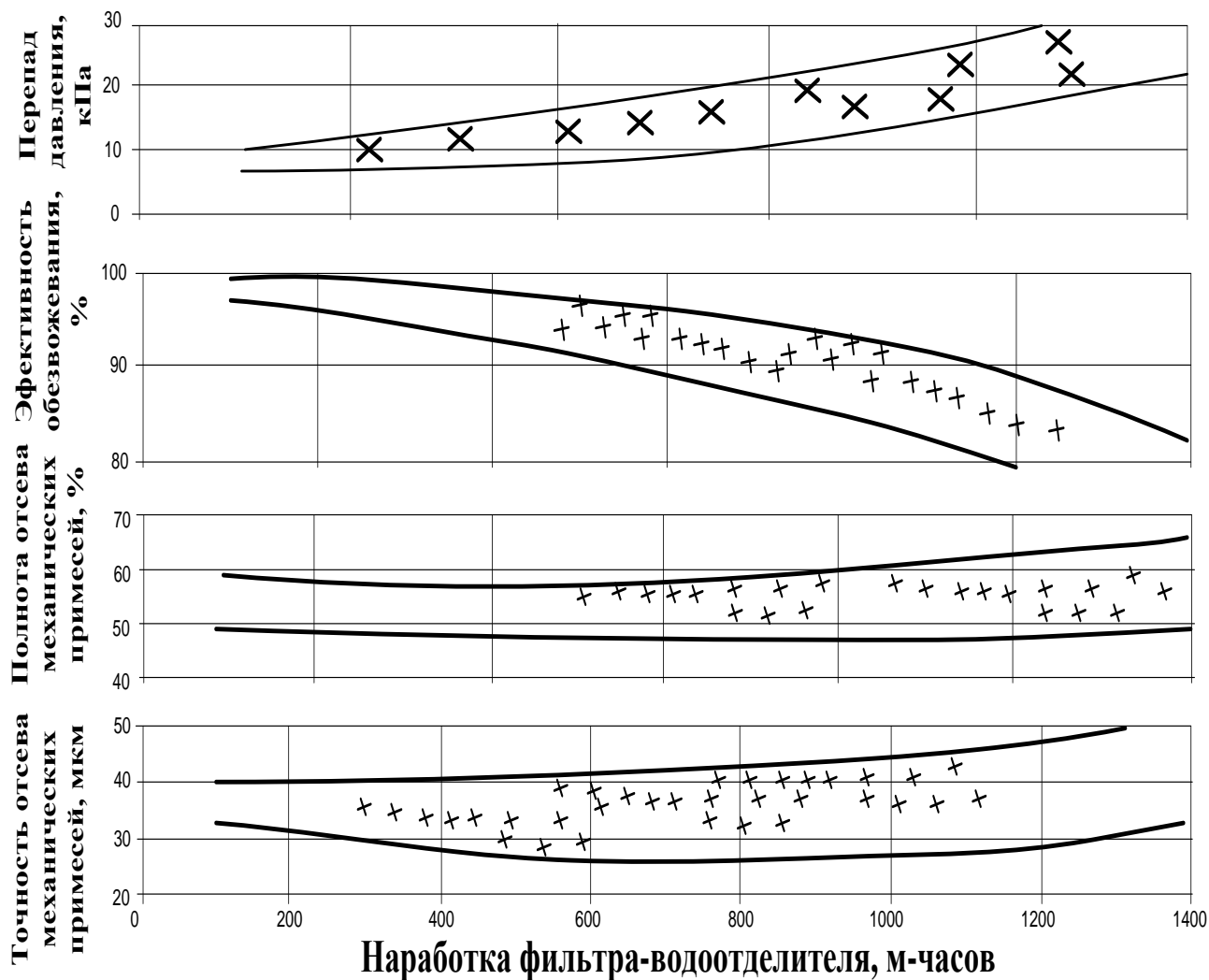


Рис. 5.4. Зависимость эксплуатационных характеристик разработанных фильтров-водоотделителей от их наработки

В процессе испытаний отбирали пробы топлив и определяли загрязненность (табл. 5.2). После установки фильтрующей бумаги в пробку бака и разработанного фильтра в систему топливоподачи перед фильтром тонкой очистки среднее содержание свободной воды в баке с уровня забора снизилось до 0,32%, а механических примесей до 0,12% по сравнению с серийной системой очистки (табл. 2.1-2.2). Содержание свободной воды после фильтров-водоотделителей не превышало 0,006%, а после ФТО – отсутствие.



Таблица 5.2

## Загрязненность топлив в системах питания тракторов с опытной системой очистки топлива

Хозяйство	Марки тракторов	Характеристика пробы	Место отбора пробы				
			Топливный бак	ФВ	ФТО	После ФВ	После ФТО
			Содержание загрязнений в топливе, % масс.				
СПК «Мирный»	МТЗ-80/82 Т-150К	С уровня забора	$\frac{0,003 - 0,048}{0,002 - 0,012}$	-	-	-	-
		отстой	$\frac{0,03 - 0,29}{0,005 - 0,03}$	$\frac{0,45 - 30}{0,029 - 0,87}$	$\frac{0,001 - 0,06}{0,03 - 0,32}$	-	-
		в потоке	-	-	$\frac{0,001 - 0,005}{0,003 - 0,010}$	<i>отсутствие</i> $\frac{0,002 - 0,005}{0,002 - 0,005}$	
Агрофирма им. Котовского	МТЗ-80/82 Т-150К	С уровня забора	$\frac{0,003 - 0,070}{0,004 - 0,018}$	-	-	-	-
		отстой	$\frac{0,05 - 0,26}{0,010 - 0,05}$	$\frac{0,29 - 34}{0,021 - 0,63}$	$\frac{0,002 - 0,10}{0,03 - 0,36}$	-	-
		в потоке	-	-	$\frac{0,002 - 0,006}{0,002 - 0,010}$	<i>отсутствие</i> $\frac{0,0008 - 0,006}{0,0008 - 0,006}$	

В числителе содержание свободной воды в топливе, % масс., а в знаменателе – твердых загрязнений, % масс.

Фильтры-водоотделители показали стабильные эксплуатационные характеристики в процессе всего периода эксплуатации, которые значительно превышали требования, предъявляемые к фильтрам грубой очистки по ГОСТ 165048-76 (рис. 5,4).

Ресурс фильтрующего-коагулирующего и водоотделяющего элементов определяли по критическому перепаду давления, который равен 25-30 кПа и зависит от характеристик топливоподкачивающих насосов, а для ТРК этот перепад давления составляет 15-20 кПа, причем замена водоотделяющего и коагулирующего элементов необходима лишь в случае их механического повреждения.

За время испытаний у тракторов и комбайнов с фильтрами-водоотделителями отказов по топливной аппаратуре не зафиксировано, при этом отмечены простои техники с серийными фильтрами.

Во время эксплуатационных испытаний проводился хронометраж операций технического обслуживания фильтров-водоотделителей.

Как следует из проведенных эксплуатационных испытаний, рис. 5.3 и рис. 5.4, ресурс фильтров тонкой очистки увеличился с 750 моточасов до 1500 моточасов. Время замены фильтров тонкой очистки определялось по достижению перепада давления на фильтре равного 150 кПа.

Используя полученные значения можно оценить вероятность исправного состояния топливной системы  $p_0$ , вероятность отказа фильтра грубой очистки  $p_1$  и тонкой очистки  $p_2$ ,  $p_3$ , которые соединены последовательно.

Для расчета вероятностей воспользуемся полученными формулами в подразделе 2.2.

Исходные данные для расчета.

Интенсивность восстановления (замены) фильтров  $\mu$  не изменилась, так как не изменилось время на демонтаж и монтаж фильтров, следовательно,  $\mu_{32}=1$ ;  $\mu_{21}=2$ ;  $\mu_{10}=3$ .

Интенсивность отказов изменилась, так как время безотказной работы увеличилось в 2 раза:

$$\lambda_{10}=3/12; \lambda_{12}=2/12; \lambda_{23}=1/12.$$

Подставляя полученные значения в формулу (2.4) получим вероятность нахождения фильтров в исправном состоянии:

$$P_{0П} = \frac{1}{1 + \frac{0,25}{3} + \frac{0,25 \cdot 0,166}{3 \cdot 2} + \frac{0,125 \cdot 0,166 \cdot 0,083}{3 \cdot 2 \cdot 1}} = 0,922$$

Вероятность отказа фильтра грубой очистки, формула (2.5):

$$P_{1П} = \frac{0,25}{3} 0,922 = 0,0765,$$

вероятность отказа фильтра тонкой очистки, фильтр №2, формула (2.6):

$$P_{2П} = \frac{0,25 \cdot 0,166}{3 \cdot 2} 0,922 = 0,00063,$$

вероятность отказа фильтра тонкой очистки, фильтр №3, формула (2.7):

$$P_{3П} = \frac{0,25 \cdot 0,166 \cdot 0,083}{3 \cdot 2 \cdot 1} 0,922 = 0,000529.$$

Как следует из приведенных расчетов применение разработанного фильтра грубой очистки увеличивает вероятность исправного состояния топливной системы с значения 0,835 (таблица 2.7) до значения 0,922.

Рекомендовано в нормативной документации на ТО установить сроки замены фильтроэлементов в ФВ и ФТО системы питания энергетического средства при ТО-3, замена

водоотталкивающего элемента обуславливается только его механическим повреждением, необходимость слива воды с отстойника контролируется специальными датчиками.

### 5.3. Техничко-экономическая оценка эффективности совершенствования системы очистки топлива

Расчет годового экономического эффекта от использования машинно-тракторных агрегатов в составе тракторов МТЗ – 80/82 и Т – 150К с модернизированной системой очистки топлива производится по методике [81].

$$\mathcal{E}_Г = \mathcal{Z}_1 \cdot \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} - \frac{(I_1 - I_2) - E_n(K_1 - K_2)}{P_2 + E_n} - \mathcal{Z}_2, \quad (5.1)$$

где  $K_1, K_2$  – сопутствующие капитальные вложения потребителя, соответственно при серийном отстойнике и опытном фильтре-водоотделителе, грн;

$\mathcal{Z}_1, \mathcal{Z}_2$  – приведенные затраты соответственно при серийном отстойнике и опытном фильтре водоотделителя, грн;

$B_1, B_2$  – наработка двигателя соответственно до и после внедрения фильтра-водоотделителя, мото-ч;

$I_1, I_2$  – эксплуатационные затраты у потребителя при использовании двигателя соответственно с серийным и опытным фильтром-водоотделителем, грн;

$P$  – величина обратная сроку службы двигателя, равна 0,125;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,  $E_n = 0,15$ .

Так как при модернизации системы очистки отсутствуют капитальные вложения, и производительность трактора остается прежней, то формула имеет вид:

$$\mathcal{E}_Г = \frac{I_1 - I_2}{P_2 + E_n} - \mathcal{Z}_2 \quad (5.2)$$

Годовые затраты на выполнение операций технического обслуживания:

$$I_{mo} = t_{mo} \cdot P_{чм} \cdot K_{дон} \cdot K_{соц} \cdot K_n \quad (5.3)$$

где  $t_{mo}$  – трудоемкость технического обслуживания, чел-час;

$P_{чм}$  – часовая тарифная ставка тракториста-машиниста, грн/час;

$K_{дон}, K_{соц}$  – коэффициенты, учитывающие дополнительную зарплату и отчисления на социальное страхование;

$K_n$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Таблица 5.3

#### Исходные данные для расчета годового экономического эффекта

№ п/п	Показатели	Марка трактора (комбайна)			
		Т – 150К		МТЗ – 80/82	
		базовый	опытный	базовый	опытный
1	Годовая наработка трактора, м.ч.	1250	1250	1100	1100
2	Периодичность технического обслуживания:				
	ТО – 1			60	60
	ТО – 2	240	480	240	480
	ТО – 3	960	1200	1000	1200
3	Ресурс фильтрующего водоотделяющего элемента, м.ч.	-	0	-	0

4	Ресурс фильтров тонкой очистки, м.ч.	720	1500	720	1500
5	Стоимость топлива, грн/л	7,50	7,50	7,50	7,50
6	Трудоемкость технического обслуживания агрегатов очистки, ч.час/год	176	150	123	104
7	Тарифная ставка тракториста-машиниста, грн/час	12,0	12,0	12,0	12,0
8	Стоимость фильтра-водоотделителя	78	78	65	65
9	Затраты связанные с простоем тракторов по техническим причинам, грн/год	39,0	-	42,0	-

Таблица 5.4

**Количество и трудоемкость обслуживаний (по данным хронометражного наблюдения)**

№ п/п	Показатели	Марка трактора (комбайна)			
		Т – 150К		Т – 150К	
		базовый	базовый	базовый	базовый
1	Слив отстоя из фильтра грубой очистки	5,2	5,2	18,3	18,3
		0,084	0,084	0,29	0,29
2	Промывка корпуса ФГО (фильтра-водоотделителя)	1,3	1,3	1,15	1,15
		0,195	0,26	0,21	0,17
3	Слив отстоя из ФТО	5,2	2,6	4,58	2,29
		0,5	0,19	0,14	0,05
4	Замена фильтра тонкой очистки	1,3	0,87	1,15	0,76
		0,46	0,30	0,23	0,15
5	Заполнение системы питания топлива	5,2	2,6	5,2	2,6
		0,52	0,26	0,36	0,18
6	Замена фильтрационного водоотделяющего элемента	-	2	-	2
		-	0,40	-	0,2
7	Общая трудоемкость технического обслуживания, чел.-час/год	1,76	1,50	1,23	1,04

В числителе количество технических обслуживаний (по операциям) шт/год, а в знаменателе трудоемкость технического обслуживания, чел./год.

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора Т-150К

- по базовому варианту

$$I_{то} = 176 \cdot 0,72 \cdot 1,068 \cdot 1,044 \cdot 1,5 = 212 \text{ грн/год}$$

- по опытному варианту

$$I_{то} = 15 \cdot 0,72 \cdot 1,068 \cdot 1,044 \cdot 1,5 = 180 \text{ грн/год}$$

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ – 80/82

- по базовому варианту

$$I_{mo1} = 124 \cdot 0,72 \cdot 1,068 \cdot 1,044 \cdot 1,5 = 149 \text{ грн/год}$$

- по опытному варианту

$$I_{mo2} = 104 \cdot 0,72 \cdot 1,068 \cdot 1,044 \cdot 1,5 = 125 \text{ грн/год}$$

Затраты на фильтрационные элементы тонкой очистки, расходуемые за год работы трактора

$$I_{фто} = C_{фто} \cdot K_{эл} \cdot П, \quad (5.4)$$

где  $C_{фто}$  – оптовая цена элемента, грн/год;

$K_{эл}$  – количество элементов в комплексе, шт;

$П$  – количество замен элементов в год.

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора Т – 150К

- по базовому варианту

$$I_{фто1} = 78 \cdot 3 \cdot 1,7 = 398 \text{ грн/год}$$

- по опытному варианту

$$I_{фто2} = 78 \cdot 3 \cdot 0,83 = 194 \text{ грн/год}$$

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ – 80/82

- по базовому варианту

$$I_{фто4} = 65 \cdot 3 \cdot 1,7 = 332 \text{ грн/год}$$

- по опытному варианту

$$I_{фто2} = 65 \cdot 3 \cdot 0,73 = 142 \text{ грн/год}$$

Затраты на фильтрационные водоотделяющие элементы, расходуемые за год работы трактора (комбайна).

$$Z_2 = I_{фв} = C_{фв} \cdot П, \quad (5.5)$$

где  $C_{фв}$  – оптовая цена фильтрующего водоотделяющего элемента, грн;

$П$  – количество замен в год.

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора Т – 150К (по опытному варианту)

$$Z_2 = I_{фв} = 44 \cdot 2 = 88 \text{ грн/год}$$

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ – 80/82 (по опытному варианту)

$$Z_2 = I_{фв} = 34,5 \cdot 2 = 69 \text{ грн/год}$$

Эксплуатационные затраты у потребителя

$$I = I_{mo} + I_{фто} + I_{пр}, \quad (5.6)$$

где  $I_{пр}$  – затраты связанные с простоем трактора, грн/год.

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора Т – 150К

- по базовому варианту

$$I = 212 + 398 + 235 = 845 \text{ грн/год};$$

- по опытному варианту

$$I = 180 + 194 = 374 \text{ грн/год.}$$

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ – 80/82

- по базовому варианту

$$I = 149 + 184 + 257 = 600 \text{ грн/год};$$

- по опытному варианту

$$I = 125 + 142 = 267 \text{ грн/год.}$$

Годовой экономический эффект

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора Т – 150К

$$\mathcal{E}_Г = \frac{845 - 374}{0,125 + 0,15} - 88 = 1624 \text{ грн/год.}$$

Для машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ – 80/82

$$\mathcal{E}_Г = \frac{600 - 267}{0,125 + 0,15} - 69 = 1141 \text{ грн/год.}$$

Приведенные расчеты показывают, что годовой экономический эффект от внедрения разработанных мероприятий составляет 1141...1642 грн в год на один машинно-тракторный агрегат или комбайн.

### Выводы

1. На основании проведенных эксплуатационных испытаний материалом для фильтрующей перегородки пробки заливной горловины топливного бака была выбрана фильтрующая бумага БФВ-105П, имеющая более высокие характеристики. Испытанные фильтрующие перегородки из бумаги БФВ-105П могут эксплуатироваться без замены в течение года и более.

2. Эксплуатационные испытания разработанных конструкций пробки бака и фильтров-водоотделителей позволили установить увеличение ресурса штатных фильтров тонкой очистки в два раза. При эксплуатации тракторов и комбайнов с опытной системой очистки топлива среднее содержание воды в баке снизилось до 0,0032%, а механических примесей до 0,0012%. Содержание свободной воды после фильтра-водоотделителя не превышало 0,0006%, после ФТО – отсутствие. Фильтры-водоотделители показали стабильные эксплуатационные характеристики в течение 1500 моточасов, которые значительно превышали требования, предъявляемые к фильтрам грубой очистки по ГОСТ 165048-76. Рекомендовано в нормативной документации на ТО установить сроки замены фильтроэлементов в ФВ и ФТО системы питания энергетического средства при ТО-3, замена водоотталкивающего элемента обуславливается только его механическим повреждением, необходимость слива воды с отстойника контролируется специальными датчиками.

3. Выполнена технико-экономическая оценка эффективности модернизации системы очистки топлива. Приведенные расчеты показывают, что годовой экономический эффект от внедрения разработанных мероприятий составляет 1141...1624 грн. в год на один машинно-тракторный агрегат или комбайн.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В данной работе представлено теоретическое обоснование и новое решение научной задачи повышения эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в условиях запыленности воздуха технологической средой путем математического моделирования и разработкой новых средств очистки. Это позволит повысить ресурс фильтров тонкой очистки, топливных насосов высокого давления, что устраняет причины снижения производительности и увеличения расхода топлива энергетическими средствами в условиях сельскохозяйственного производства.

1. Установлено, что при использовании серийных средств очистки топлива среднее содержание механических примесей в топливном баке составляет 0,016%, при среднем квадратическом отклонении – 0,0054%, а среднее содержание воды – 0,059% , при среднем квадратическом отклонении – 0,0196%. Загрязненность воздуха около заливной горловины топливного бака технологической средой минимальная – при транспортных работах – 0,0095 г/м<sup>3</sup>, а максимальная – при лушении – 2,12 г/м<sup>3</sup>. Дисперсный состав пыли состоит на 96% из частиц размером 1...20 мкм.

2. Установлено, что максимальную надежность ( $p = 0,835$ ) имеет система питания с последовательной схемой соединения фильтров. В этой системе минимальную надежность имеет ФГО ( $p = 0,175$ ). Замена ФГО на ФВ, который имеет высокие фильтрующие, коагулирующие и водоотталкивающие свойства увеличивает надежность системы питания на 10,4%, вероятность исправного состояния  $p = 0,922$ .

3. Установлено снижение мощности двигателя энергетического средства на 25% на протяжении 2000 моточасов эксплуатации, возникает главным образом из-за наличия в топливе механических примесей и воды, что приводит к увеличению сроков полевых работ на 5,1...5,5% при одновременном увеличении расхода топлива на 5,0...6,8% по каждой технологической операции на 100 га площади. Наиболее «опасной» размерной группой механических примесей являются частицы размером 6...8 мкм при концентрации 20 г/т.

4. Обоснована конструктивно-технологическая схема фильтра-водоотделителя, пригодного для использования как в системе питания энергетического средства МТА, так и в средствах заправки топлива. Эта схема должна включать пористые перегородки, удовлетворяющие требованиям: краевой угол смачивания 140<sup>0</sup>-180<sup>0</sup> – для водоотталкивающего элемента; диаметр волокон 1,5-10,0 мкм – для коагулирующего элемента; для фильтрующего – два слоя бумаги с толщиной фильтрации 30...40 мкм, которые устанавливаются в направлении потока в порядке уменьшения размера пор.

5. Установлено, что очистка дизельного топлива методом гравитационного отстаивания в условиях сельскохозяйственного производства неэффективна, поскольку требует много времени, от 300 до 2700 часов. Для таких условий наиболее технологичной является очистка дизельного топлива путем его фильтрации через пористые перегородки в составе ФВ, которые имеют высокие фильтрующие, коагулирующие и водоотталкивающие свойства. Материалами для таких перегородок рекомендуются использовать: для фильтрующих – бумаги БТ-120 и БТ-170; для коагулирующих – волокна СТВ, теплоизоляционную прокладку и поролон ППУ-30-130; для водоотталкивающих – латунную сетку, покрытую фторопластом Ф-4Д с размером пор 56 мкм; для пробки заливной горловины топливного бака – фильтрующую бумагу БФВ-105П.

6. Установлено, что при эксплуатации МТА и комбайнов с опытной системой очистки топлива среднее содержание воды в баке снизилось с 0,059% до 0,0032%, а механических примесей – с 0,016% до 0,0012%. Содержание свободной воды после фильтра-водоотделителя – 0,0006%, а после ФГО – отсутствие.

7. Эксплуатационные испытания МТА и зерноуборочных комбайнов с применением разработанных конструкций пробки заливной горловины топливного бака, фильтров-

водоотделителей системы питания энергетического средства и средств заправки позволили увеличить ресурс фильтров тонкой очистки системы питания с 750 до 1500 моточасов.

8. По результатам проведенных исследований и выбранных материалов для пористых перегородок разработаны конструкции фильтров-водоотделителей для системы питания энергетического средства и средств заправки, которые обеспечивают эффективную очистку дизельного топлива при выполнении полевых работ МТА и комбайнов. Новизна технических решений защищена патентами Украины на изобретения: UA5544; UA6038; UA66522A. Установлено, что годовой экономический эффект от внедрения разработанных мероприятий составляет 1141...1624 грн. в год на один машинно-тракторный агрегат или комбайн по ценам на 01.01.2010 г.

9. Рекомендовано сменить сроки замены фильтроэлементов в ФВ и ФТО в топливной системе энергетического средства с 500 на 1000 моточасов при проведении ТО-3, замена водоотталкивающего элемента обуславливается только его механическим повреждением, необходимость слива воды с отстойника контролируется специальными датчиками. Для ФВ в системе средств заправки необходимость замены элементов контролируется по перепаду давления по каждому из них в отдельности.



**ПРИЛОЖЕНИЯ**

Таблица А1

## Коагулирующие свойства многослойных перегородок при обезвоживании дизельного топлива Л – 0, 2-40

Структурный состав перегородки	Толщина перегородки, мкм		Степень сжатия, раз	Удельный расход, л/мин·с	Содержание свободной воды, %, масс.		Эффект водоотделения, %	Перепад давления, кПа
	до сжатия	после сжатия			До перегородки	После перегородки		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Мат из волокон СТВ диаметром 1,5-2,0 мкм первоначальной толщиной 40 мм, теплоизоляционная прокладка из стекловолокна СТВ диаметром 3 мкм (гидрофобная), толщиной 13 мм, прокладка из стекловолокна СТВ диаметром 6 мкм (гидрофобная) толщиной 27 мм.	80	8	10	20	0,986	0,0036	96	0,1
				40	0,986	0,0028	97	0,07
				60	0,986	0,0041	96	0,21
	7	7	11,4	20	0,1081	отсутст.	109	0,14
				40	0,1081	отсутст.	100	0,26
				60	0,1081	отсутст.	100	0,36
				20	0,1219	отсутст.	100	0,14
				40	0,1219	отсутст.	100	0,26
				60	0,1219	отсутст.	100	0,26
	8	8	10	20	0,2039	отсутст.	100	0,14
				40	0,2039	отсутст.	100	0,20
				60	0,2039	отсутст.	100	0,27
	5	5	16	20	0,2015	отсутст.	100	0,16
				40	0,2015	отсутст.	100	0,22
				60	0,2015	отсутст.	100	0,29
4	4	20	20	0,1963	отсутст.	100	0,17	
			40	0,1963	отсутст.	100	0,26	
			60	0,1963	отсутст.	100	0,33	
2. Мат из стекловолокон СТВ, диаметром 1,5-2,0 мкм первоначальной толщиной 80 мм, теплоизоляционная прокладка из волокон д.3 мкм (гидрофобная), толщиной 27 мм, теплоизоляционная прокладка из стекловолокна СТВ д. 3 мкм (гидрофобная) толщиной 13 мм.	120	18	6,7	20	0,963	0,0041	96	0,120,24
				40	0,963	0,0089	91	0,35
				60	0,963	0,0187	80	

Таблица А2

**Результаты исследований коагулирующих свойств перегородок с применением поролона**

Структурный состав перегородки	Степень обжатия перегородки	Скорость потока $10^{-3}$ м/с	Перепад давления, кПа	Исходное содержание воды, %, масс.	Максимальный размер капель воды на выходе из перегородки, мкм
1	2	3	4	5	6
1. Мат без связующего из стекловолокон СТВ диаметром 1,5-2,0 мкм, толщиной 20мм, теплоизоляционная прокладка из волокон СТВ диаметром 3 мкм, пропитанной гидрофобным составом, толщиной 26 мм.	3,0	1,125	0,5	0,1525	1,1
		3,67	1,6	0,1525	2,1
		6,03	4,2	0,1525	3,1
		8,10	4,64	0,1525	3,4
		11,16	7,52	0,1525	2,0
		14,81	10,88	0,1525	1,7
2. Состав, аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-130 толщиной 4 мм.	3,0	1,125	0,8	0,1431	2,0
		3,67	4,1	0,1431	2,9
		6,03	6,1	0,1431	3,6
		8,10	7,5	0,1431	5,0
		11,16	12,5	0,1431	3,4
		14,81	16,0	0,1431	2,0
3. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-130 толщиной 10 мм.	3,0	1,125	0,8	0,1461	2,0
		3,67	4,1	0,1461	2,8
		6,03	6,5	0,1461	3,9
		8,10	8,3	0,1461	5,0
		11,16	23,8	0,1461	2,5
		14,81	18,0	0,1461	2,0
4. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-130 толщиной 15 мм.	3,0	1,125	0,8	0,2246	1,5
		3,67	4,3	0,2246	2,2
		6,03	7,0	0,2246	3,0
		8,10	9,1	0,2246	5,0
		11,16	15,1	0,2246	3,8
		14,81	21,1	0,2246	3,0

Продолжение табл.А2

5. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-130 толщиной 20 мм.	3,0	1,125	0,8	0,2233	2,4
		3,67	5,0	0,2233	3,2
		6,03	8,3	0,2233	4,2
		8,10	11,2	0,2233	4,8
		11,16	17,3	0,2233	3,5
		14,81	23,1	0,2233	2,8
6. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-111 толщиной 7 мм.	3,0	1,125	0,8	0,2282	1,5
		3,67	4,1	0,2282	2,5
		6,03	7,1	0,2282	5,0
		8,10	9,1	0,2282	5,3
		11,16	13,0	0,2282	3,0
		14,81	16,2	0,2282	2,6
7. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-111 толщиной 14 мм.	3,0	1,125	0,8	0,2666	2,0
		3,67	4,9	0,2666	3,5
		6,03	7,5	0,2666	4,8
		8,10	9,5	0,2666	5,0
		11,16	13,1	0,2666	3,5
		14,81	16,28	0,2666	3,0
8. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-ЭО-111 толщиной 20 мм.	3,0	1,125	0,4	0,2004	2,0
		3,67	4,95	0,2004	2,5
		6,03	8,1	0,2004	3,8
		8,10	9,9	0,2004	4,8
		11,16	14,1	0,2004	3,0
		14,81	17,5	0,2004	1,5
9. Состав аналогичный образцу №1 и паралон ППУ-35-08 толщиной 6 мм.	3,0	1,125	0,32	0,1725	0,1 и водотопливная эмульсия
		3,67	4,42	0,1725	0,3
		6,03	8,32	0,1725	0,8
		8,10	12,47	0,1725	1,0
		11,16	26,4	0,1725	0,3
		14,81	47,2	0,1725	0,1

Таблица А3

## Результаты исследований водоотталкивающих свойств пористых перегородок

Структурный состав пористой перегородки	Скорость потока в перегородках $\cdot 10^{-3}$		Перепад давления на водоотталкивающей перегородке	Содержание свободной воды, %, масс.		Эффективность обезвоживания, %	Размер капель воды, продавливаемых через перегородку, мм
	водоотталкивающей	коагулирующей		до водоотталкивающей перегородки	после водоотталкивающей перегородки		
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Сетка из нержавеющей стали, покрыта тефлоновой пленкой, размер ячеек 60×60 мкм (из фильтра-водоотделителя фирмы «Фауди»)	2,6	1,125	0,10	0,1015	0	100	-
	8,05	3,76	0,96	0,1015	0,0003	99,7	-
	14,05	6,03	1,12	0,1015	0,0007	99,3	-
	18,4	8,11	1,44	0,1015	0,0008	99,2	-
	26,05	11,16	1,76	0,1015	0,001	99,0	-
	34,7	14,36	1,92	0,1015	0,0012	98,8	-
	40,8	18,01	2,24	0,1015	0,0012	98,8	-
	42	20,25	2,88	0,1015	0,0015	98,5	0,1
	51,1	23,4	3,36	0,1015	0,0017	98,3	0,1
2. Иглопробивной нетканый материал (70% пропилен и 30% лавсана), обработанных последовательно растворами эмульсий фторалкрилата и кремнеорганической смолы, размер пор 25 мкм.	2,65	1,125	0,8	0,0856	0,0017	98,3	0,1
	8,55	3,7	1,6	0,0856	0,002	97,7	0,2
	14,05	6,03	1,92	0,0856	0,002	97,7	0,3
	18,9	8,11	2,24	0,0856	0,0023	97,3	0,4
	26,05	11,16	3,36	0,0856	0,0035	95,9	0,6
	34,75	14,81	4,8	0,0856	0,0055	93,9	0,7

Продолжение табл. А3

3. Лавсан, арт. 5352-69, обработанный эмульсиями, аналогично образцу №1, размер пор 30 мкм.	2,65	1,125	0,8	0,0725	0,0013	98,2	0,
	8,05	3,67	1,12	0,0725	0,0024	96,7	0,2
	14,05	6,03	1,6	0,0725	0,0034	95,2	0,4
	13,6	8,11	1,92	0,0725	0,0048	93,4	0,5
	26,05	11,16	2,88	0,0725	0,0068	90,6	0,8
	32,2	14,81	4,0	0,0725	0,0095	86,9	1,0
4. Капрон, арт. 5632, обработанный эмульсиями аналогично №1 размером 15 мкм	2,65	1,125	1,12	0,1018	0,0013	98,7	0,2
	8,55	3,67	2,4	0,1018	0,0038	96,9	0,4
	14,05	6,03	6,08	0,1018	0,0059	94,2	0,5
	18,9	8,10	7,52	0,1018	0,0087	91,5	0,6
	26,05	11,16	14,08	0,1018	0,0177	82,6	1,1
5. Нетканый материал ДРКБ, пропитанный кремнеорганической жидкостью ГКЖ-09 в толуоле	2,65	1,125	0,8	0,0942	0	100	-
	8,05	3,62	0,96	0,0942	0,0005	99,5	-
	14,05	6,03	1,28	0,0942	0,001	98,9	0,2
	18,9	8,11	1,76	0,0942	0,0017	98,2	0,4
	26,05	11,16	2,21	0,0942	0,0043	95,4	0,5
	34,7	14,81	3,36	0,0942	0,0066	92,9	0,66
6. Капрон, пропитанный кремнеорганической жидкостью ГКЖ-99 в толуоле.	2,65	1,125	0,8	0,0798	0,0002	99,7	-
	8,05	3,62	2,88	0,0798	0,0005	99,4	-
	14,05	6,03	4,16	0,0798	0,0019	97,6	0,2
	18,9	8,11	5,6	0,0798	0,0039	95,1	0,3
	26,05	11,16	9,12	0,0798	0,0087	89,1	0,6
	32,2	14,81	16,8	0,0798	0,0171	78,6	0,98

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Григорьев М.А. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания / М.А Григорьев, Г.В. Борисова. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
2. Григорьев М.А. Распределение размеров частиц загрязнений в рабочих жидкостях / М.А. Григорьев, Н.Н. Понамарев // Автомоб. промышленность. – 1981. – № 10. с. 23-24.
3. Григорьев М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей/ М.А. Григорьев, Н.Н. Понамарев. – М.:Машиностроение, 1976. – 248 с.
4. Григорьев М.А. Фильтры для очистки топлива и масла автомобильных и тракторных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н. Понамарев // Автомобильные двигатели и топливная аппаратура. – М., 1979.
5. Григорьев М.А. Обеспечение надежности двигателей / М.А. Григорьев, В.А. Долецкий. – Издательство стандартов, 1977 – с. 324.
6. Емельянов Л.А. Фильтрация дизельного топлива – Л: Mashgiz, 1962 – 107 с.
7. Селиванов А.И. Дизельная топливная аппаратура. – М.: Сельхозгиз, 1954. – 534с.
8. Рыбаков К.В. Прибор для автоматического контроля за содержанием воды в нефтепродуктах / К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, В.М. Туголуков // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1967. – № 6. – 31с.
9. Рыбаков К.В., О механизме обводнения дизельных топлив в баках транспортных машин / К.В. Рыбаков, Э.И. Удлер, В.П. Шевченко // Сборник научных трудов МИИСП. – М., 1981. – с.18-21.
10. Рыбаков К.В. Влияние степени загрязнения топлива на работоспособность плунжерных пар / К.В. Рыбаков, Э.И. Удлер, М.Е. Кузнецов //Техника в сельском хозяйстве. – 1983. – №10. – с.46-47.
11. Рыбаков К.В. Загрязненность нефтепродуктов: проблемы, предложения / К.В. Рыбаков, В.П. Коваленко //Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 3 – с.37-38.
12. Рыбаков К.В. Водоотделяющие элементы используемые при обезвоживании дизельных топлив/ К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, А.Н. Семернин //Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1982. – №6, с.30-32.
13. Рыбаков К. В. Авиационные фильтры для топлив, масел, гидравлических жидкостей и воздуха/ К.В. Рыбаков, И.И. Дмитриев, А.С. Поляков. – М.: Машиностроение, 1982. – 104с.
14. Рыбаков К.В. Фильтрация авиационных топлив. – М.: Транспорт. 1973. – 164с.
15. Рыбаков К.В. Повышение чистоты нефтепродуктов / К.В. Рыбаков, Т.Н. Карпенкина. – М.:, Агропромиздат, 1986. – 112 с.
16. Рыбаков К.В. Использование коагулирующих пористых перегородок для обезвоживания дизельных топлив/ К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, А.Н. Семернин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. –1982. –№5, с.27-30.
17. Рыбаков К.В., Жулдыбин Е.Н., Семернин А.Н. Методика определения свободной воды в дизельном топливе/ К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, А.Н. Семернин // Сборник научных трудов МИИСП. 1982.
18. Чертков Я.Б. Предотвращение загрязнений и очистка топлив / Я.Б. Чертков, К.В. Рыбаков, В.Н. Зрелов. – М.: ЦНИИТнефтегаз, 1963. – 100с.
19. Чертков Я.Б. Современные и перспективные углеводородные, реактивные и дизельные топлива. – М: Химия, 1969 – 356с.
20. Чертков Я.Б., Рыбаков К.В. Зрелов В.Н. Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив/ Я.Б. Чертков, К.В. Рыбаков, В.Н. Зрелов. – М.: Химия, 1970. – 240 с.
21. Карпекина Т.П. Исследование загрязненности и фильтрации дизельного топлива в связи с проблемой повышения надежности автомобилей: Дис... канд. техн. наук. МАДИ-М: 1970. – 149с.
22. Карпекина Т.П. О причинах и источниках загрязнения дизельного топлива в системах питания автомобилей / Т.П. Карпенкина, Н.В. Рыбаков, Л.С. Васильева // Труды семинара по очистке воздуха, масла и топлива с целью увеличения долговечности двигателя. – 1970. – вып.10. – с.18-25.

23. Рыбаков К.В. Повышение чистоты нефтепродуктов / К.В. Рыбаков, Т.П. Карпекина. – М.: Агропромиздат, 1986 – Ш с.:ил.-(За экономию и бережливость).
24. Дидур В.А., Прогнозирование ресурса топливной аппаратуры дизелей в зависимости от загрязнённости топлива / В.А. Дидур, Г.И. Иванов, В.В. Дидур // В Кн.: Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип. 1. Том 3, Мелітополь. 1999. – с. 3-15.
25. Коваленко В.П. Основы техники очистки жидкостей от механических примесей / В.П. Коваленко, А.А. Ильинский. – М.:Химия, 1982. – 272с.
26. Коваленко В.П. Средства очистки нефтепродуктов от механических загрязнений / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1984. – 68 с.
27. Путинцев С.В. Исследование динамики загрязнения и процесса очистки топлива в дизелях тракторного типа: Автореф.Дис.канд.техн.наук – Омск, 1968. – 25с.
28. Дубский Ю.В. Исследование путей повышения надежности бумажных фильтрующих элементов тонкой очистки топлива тракторных дизелей: Дис...канд.техн.наук. – Саратов,1974 – 180с. – (Саратов СХИ).
29. Большаков Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. – Л.: Недра, 1974. – 315с.
30. Большаков Г.Ф. Экспресс методы определения загрязненности нефтепродуктов / Г.Ф. Большаков, В.Ф. Тимофеев, И.И. Сибарова. – Л.:Химия, 1977. – 168с.
31. Руденко А.И. О фильтрации дизельного топлива / А.И. Руденко, К.В. Рыбаков // Техника в сельском хозяйстве. – 1983. – №9. – с.66-68.
32. Руденко А.И. Нефтехозяйство колхозов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.:Колос, 1975 – 224с.
33. Filter/Seporators wiht improved efficiensy.-Diesel and Gas Turbine Progr. 1978, v.44, №8, p.19.
34. Fuef/Water Coalesser Produkt line completed. – Diesel and Gas Turbine Progr. 1978, v.44, №12, p.40-44.
35. Fuel/Water Seporators uses hydrocyclonic action.-Diesel and Gas Turbine Progr. 1978, v.44, №8, p.32-33.
36. Bosch Kraftstoff-Boxfilter fur Dieselmotoren. – Stuttgart, 1972, 13s.
37. Fuel/Water Seporator Finding Incrcasing Use.-Diesel and Gas Turbine Progr. 1979, v.45, №10, p.69.
38. Diesel Filters bars Water Intake.-Automotive engineering. 1979, v.87, №3, p.98-99.
39. P. Ieater, E. Rushot and G.A. Davies. Coalescence in Fibre Beds.-Filtration and Separation, 1980, March/April, v.17, №26 p.129-133.
40. Hazlett R.N. Fibrous bed coalescence of water Steps in the coalescence process. "Industrial and Engineering chemistry", 1969, v.61, s.11.
41. Ramskill E.A., Andersen W.L. The inertial Mechenism in the Mechanical Filtration of Aerosols.- Journ. Colloid. Sci., 1951, v.6, №5, p.416.
42. Landahl H.D. Herrmenn R.G. Sampling of liquid aerosols by wares, cylinders, and the efficiency of impaction of the Droplets. – Journ. Colloid. Sci., 1941, v.4, №4, p.103.
43. Dorman T.Q. Aerosol Science, Chad. VIII, Academis Press, New York, 1966, p.195-221.
44. Hartland S. The coalescence of a liquid drop at liquid – liquid interface.-Trans. Inst. Chem. Eng., 1967, v.46, №1, p. t-97, №2, p. t-102.
45. Lawson G.V. Coalescence processes.-Chem. Process Eng., 1967, v.48, №5, p.45.
46. Исследование загрязненности нефтепродуктов при контейнерных перевозках / Васильев Ю.М., Бычков В.Е., Коваленко, В.П. Третьяков В.А. // Химия и технология топлив и масел. – 1979. – № 6. – с.11-13.
47. Баширов Р.М. Надежность топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей / Р.М. Баширов, В.Г. Кислов, В.А. Павлов, В.Я. Попов – М.: Машиностроение, 1988 – 184 с.
48. Свиридов Ю.Б. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. / Ю.Б. Свиридов, Л.В. Малявский, Т.М. Вихерт. – Л.:Машиностроение, 1978 – 177 с.
49. Архипов А.М. Загрязненность и очистка топлива // Техника в сельском хозяйстве. – 1978. – №6. – с.70-71.



50. Рыбаков К.В. Обезвоживание авиационных горюче смазочных материалов/ К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, В.Л. Коваленко. – М: Транспорт, 1979. – 184с.
51. Мансютинский П.Ф., Черненко Ж.С., Василенко В.Т. Исследование дисперсности устойчивых водно-топливных эмульсий. Сборник научных трудов. – Вопросы надежности гидравлических систем. 1970, вып. У1, с.106-109.
52. Сычев В.П. Расчет эффективности водоотделения в дизельных топливных отстойниках.//Двигателестроение. – 1980 – №4.
53. Логинов В.И. Обезвоживание и обессоливание нефтей. М.: Химия, 1979. – 216с.
54. Власов П.А. Особенности эксплуатации дизельной топливной аппаратуры – М.: Агропромиздат, 1987 – 127 с.
55. Гулин Е.И. Справочник по горюче смазочным материалам в судовой технике / Е.И. Гулин, В.А. Семов, И.М. Чегот. – Л.:Судостроение, 1961 – 320с.
56. Жулдыбин Е.Н. Очистка светлых нефтепродуктов от механических примесей и воды / Е.Н. Жулдыбин, В.П. Коваленко, Л.В. Кустова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1979. – №4. с.28-33.
57. Алиев Р.Л. Повышение чистоты дизельных топлив// Химия и технология топлив и масел. – 1981. – №1 – с.52-54.
58. Шитова Э.М. Коррозионная агрессивности водных отстоев из донной части топливных емкостей/ Э.М. Шитова, В.П. Батраков //Химия и технология топлив и масел. – 1975. – №5, с.16-19.
59. Серегин Е.П. и др. Исследование противоизносных свойств дизельных топлив//Химия и технология топлив и масел. – 1976. – №5 – с.21.
60. Вихерт М.М. Топливная аппаратура автомобильных дизелей / М.М. Вихерт, И.Б. Мазин. – М.:Машиностроение, 1978. – 177 с.
61. Горобец В.В. Повышение эксплуатационной надежности топливной аппаратуры дизельных автомобилей путем улучшения качественной очистки топлива при заправке: Дис... канд. наук, МАДИ – М.:1979. – 196с.
62. Соски Г.Л. Исследование коррозионных повреждений прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей. Труды Таллинского политехнического института. – Таллинн, 1960. – № 181 – с. 2.
63. Ючас П.И. Обеспечить надежность эксплуатации топливных насосов / П.И. Ючас, К.В. Гедра // Техника в сельском хозяйстве. – 1984. – №2. – С. 40-41.
64. Ючас П.И. Надежность топливных фильтрующих элементов / П.И. Ючас, Г.А. Лабецкая, В.И. Вилькавичус // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – №2. – С. 38-39.
65. Карташевич А.Н. Классификация и основные направления развития систем автоматической защиты топливной аппаратуры дизелей от воды / А.Н. Карташевич, В.К. Кожушко, Л.И. Крепс // Двигателестроение. – 1989. – №7. – С. 38-41.
66. Бездольная Е.И. Исследование фильтруемости дизельных топлив при положительных температурах по шкале Цельсия: Автореф. Дисс... канд. тех. наук. – М: 1976. – 20с.
67. Лосиков Б.В. и др. Топливо для стационарных и судовых газовых турбин: – М: Химия, 1970. – 310с.
68. Чесаков С.П. Исследование и разработка путей повышения работоспособности фильтров тонкой очистки топлива тракторных дизелей: – Автореф. Дис... канд. техн. наук. – Саратов, 1976. – 27с.
69. Энглин Б.А. Применение жидких топлив при низких температурах. – М: Химия, 1980. – 208с.
70. Архипов А.М. Исследование очистки дизельного топлива методом отстаивания / А.М. Архипов, К.В. Рыбаков // Труды ГОСНИТИ. – М.: 1971, т.39, с.65-75.
71. Дидур В.В. Моделирование процесса удаления воды из жидких нефтепродуктов. // Труд. ТГАТА. Отраслевое машиностроение, темат. научн.-техн. сб. Вып. 2. Т. 4. Мелитополь. – 1998. – с. 74-81.

72. Дидур В.В. Обоснование технических требований к чистоте дизельного топлива / В.В. Дидур, В.Н. Кюрчев // *Механіка та машинобудування* – АН ВШУ, ХДПУ м. Харків. – 2000. – №1. – с. 54-59.
73. Дидур В.В. Исследование математической модели электростатического фильтра с рабочей поверхностью в виде сферы из диэлектрика // *Праці ТДАТА, наук. фах. вид. Вип. 1. Т. 17.* – Мелітополь: – 2000. – с. 56-65.
74. ГОСТ 24055-88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки. Общие положения. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.
75. ГОСТ 24056-88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки машин на этапе проектирования. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 9 с.
76. ГОСТ 24057-88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки машинных комплексов, специализированных и универсальных машин на этапе испытаний. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 8 с.
77. ГОСТ Р 52778-2007. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно-технологической оценки. – Введ. 2008-07-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 27 с.
78. В.І. Пастухов. Довідник з машиновикористання у землеробстві / За ред. В.І. Пастухова. – Харків, «Веста», 2001. – 347 с.
79. Шлугер М.А. и др. Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургия, 1981. – 216с.
80. Кугель Р.В. Эксплуатационная надёжность тракторов. – М.: Агропроиздат. 1990. – 114 с.
81. Методические указания по оценке, прогнозированию и нормированию ресурса и безотказности сельскохозяйственной техники. – М.: ГОСНИТИ, 1975. – 28с.
82. Глыбин А.И. Автотракторные фильтры. – Л.:Машиностроение. Ленинградское отделение. – 1960. – 181с.
83. Тракторы зарубежных фирм на международной выставке "Союзсельхозтехника - 78": Обзор. – М. – 1979, вып. 2. – 154с.
84. Кондратов В.В. К вопросу о выборе схемы системы фильтрации дизельного топлива тракторных двигателей. – Труды ЦНИТА, 1963. – №18, с.60-65.
85. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: [Справочник]. – Л.:Машиностроение, – 1974. – 264с.
86. Байбигов В.Ю. Электроочистка топлива в системе питания тракторного дизеля: Автореф.дис.канд.техн.наук. – М.:МИМСИ. 1989. – 23с.
87. Жужиков В.А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий. – М.:Химия, 1980. – 400с.
88. Коваленко В.П., Очистка нефтепродуктов от загрязнений / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. – Л.: Недра, 1990. – 160 с.
89. Никитин Г.А. Исследование возможности очистки дизельного топлива от механических примесей силами электрического поля / Г.А. Никитин, В.А. Дидур, В.Ю. Байбигов // *Науч. труды Укр. с.- х. акад.* – 1979. – Вып. 227. – с. 15-19.
90. Скарлыкин А.Н. О массообменном методе обезвоживания нефтепродуктов // *Проблемы сельского хозяйства и пути их решения.* – Пенза: РИО ПГСХА, 2001. – с. 32-36.
91. Воюцкий С.С. Физико-химические основы пропитывания, и импрегнирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров. – Л.: Химия, 1969. – 336с.
92. Соколов Ю.Я. Лабиринтные отстойники с набором ячеек. – Труды ЦНИТА, 1974. – вып. 61. – с.43-49.
93. ГОСТ 15046-76. Дизели. Фильтры грубой очистки топлива. – М.:Стандартиздат, 1977. – 9с.
94. Соколов Ю.А. Лабораторные испытания новых фильтров глубокой очистки топлива/ Ю.А. Соколов, В.В. Кондратов // *Труды ЦНИТА.* – 1967. – вып. 34. – с.30-36.
95. Грушевский А.И. Исследование фильтрации бензина и обоснование периодичности обслуживания фильтров в системах питания автомобильных карбюраторных двигателей. Автореф. Дис... канд. техн. наук. – Москва, 1970. – 18с.

96. Грановский М.Г. Электрообработка жидкостей/ М.Г. Грановский, И.С. Лавров, О.В. Смирнов. – Л.: Химия, 1976. – 216 с.
97. Дейнега Ю.Ф. Угледородные дисперсные системы в электрических полях. // Химия и технология топлив и масел. // Киев. ин-т коллоид. химии АН УССР. – 1982. – №12. – с. 15-17.
98. Дейнега Ю.Ф. Влияние сильных электрических полей на реологические свойства угледородных дисперсных систем / Ю.Ф. Дейнега, К.К. Попко, Н.Д. Ковганич. – К.: Наук. думка, Вып. 10. – 1978. – с. 85-98.
99. Пат. UA 7B03C5/00 Электричний фільтр і спосіб його регенерації; Дідур В.В. та ін. – № 1771-III; Заявл. 20.03.2000; Опубл. 16.04.2001; Бюл. № 3.
100. Карабцов Г.П. Разработка электроочистителя реактивных топлив от загрязнений. Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: КИИГА, 1982. – с. 24.
101. Зубченко А.Н. и др. О выборе конфигурации рабочей части электросепаратора авиационных ГСМ. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1983. – с. 61-64.
102. Кравченко В.Г. Разработка электроочистителя с наполнителем из гранул конденсаторной керамики для очистки авиационных топлив и масел: Дис. канд. техн. наук. – К.: КИИГА, 1987. – 196 с.
103. Калугин К.П. Топливные фильтры фирмы SAU / К.П. Калугин, Э.И. Кайданский – Труды ЦНИТА, 1975. – вып. 65. – с.76-79.
104. Соколов Ю.П. К вопросу использования гидроциклов для топлива на тракторных дизелях / Ю.П. Соколов, Л.И. Кербунова. – Труды ЦНИТА, 1974. – вып. 64. – с.46-49.
105. Пименов А.М. О фильтрах грубой очистки топлива тракторных дизелей / А.М. Пименов, Н.А. Михайлов // Тракторы и сельхозмашины. – 1962. – №9. – с.20-21.
106. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
107. Антипов В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристики топливной аппаратуры дизелей / В.В. Антипов. – 2-е изд. –М.: Машиностроение, 1992. – Т.1. – 816 с.
108. Гуревич Д.Ф. Основы теории износа плунжерных пар / Д.Ф. Гуревич // Автомобильная промышленность. – 1968. – № 2. – с. 20-24.
109. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
110. Ломоносов Д.А. Теоретическое обоснование способа определения работоспособности плунжерных пар ТНВД / Д.А. Ломоносов // Материалы и технологии XXI века: Сб. науч. Тр. / Пензенская ГСХА. – Пенза: 2004. – с. 157-160.
111. Технологічні карти на витрати та вирощування сільськогосподарських культур з різним ресурсним забезпеченням / За ред. Д.І. Мазоренко, Г. Є. Мазнева. – Харків: ХНТУСГ. – 2006. – 725с.
112. ГОСТ 2517-69. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб. – М.: Стандартиздат. 1977. – 20с.
113. Рыбаков К.В. Определение дисперсного состава загрязнений в светлых нефтепродуктах / К.В. Рыбаков, М.Н. Иноземцева, Л.Г. Резник // Химия и технология топлив и масел. – 1967. – №2. – с.60-62.
114. Зрелов В.Н. Усовершенствование метода определения содержания механических примесей в дизельных топливах / В.Н. Зрелов, Н.Г. Постникова, Л.В. Красная // Транспорт и хранение нефтепродуктов и угледородного сырья. – 1980. – №4. – с.33-35.
115. Рыбаков К.В. Приборы для определения содержания свободной воды и механических примесей в нефтепродуктах / К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1968. – 50с.
116. Соколов Ю.Я. Уточненная методика лабораторных испытаний фильтров грубой очистки топлива // Труды ЦНИТА, 1969. – вып. 41. – с.39-42.
117. Завадский Ю.А. Планирование эксперимента в задачах автомобильного транспорта. – М.:МАДИ, 1978. – 156с.
118. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.:Наука, 1976. – 297с.

Научное издание

**ВОРОНОВСКИЙ**  
**Игорь Богданович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ В УСЛОВИЯХ  
ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

**Монография**