

**Е.А. Улюкина**

# **УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НЕФТЯНЫХ И СМЕСЕВЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ**

Монография

Москва – 2025

УДК 662.7:355.242.4  
ББК 31.353.2  
У51

**Улюкина Е.А.**

**У51** Улучшение эксплуатационных свойств нефтяных и смесевых моторных топлив: монография. – М.: МЭСХ, 2025. – 228 с.  
ISBN 978-5-6053446-0-5

В монографии рассматриваются методы очистки моторных топлив от загрязнений, операции по приготовлению смесевых топлив, описаны технические средства и технология очистки и обезвоживания нефтяных и смесевых моторных топлив при их применении в сельскохозяйственном производстве.

Для инженерно-технических работников сельскохозяйственных предприятий и персонала объектов системы нефтепродуктообеспечения и других специалистов, занимающихся вопросами рационального использования топлив для сельскохозяйственной техники, а также для студентов и аспирантов, специализирующихся в этой области.

*Рецензенты:*

**Нагорнов С.А.** – доктор техн. наук, профессор, гл. научный сотрудник (ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»);

**Девянин С.Н.** – доктор техн. наук, профессор (ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»).

УДК 662.7:355.242.4  
ББК 31.353.2

ISBN 978-5-6053446-0-5

© Улюкина Е.А., 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Состояние вопроса .....</b>	<b>6</b>
1.1. Экологические аспекты применения нефтепродуктов .....	6
1.2. Классификация загрязнений в нефтепродуктах и источники их появления .....	12
1.3. Современные методы очистки топлив и масел .....	13
1.4. Методы контроля чистоты топлив и масел .....	22
1.5. Применение альтернативных топлив .....	23
1.6. Способы и средства подогрева вязких и застывающих жидкостей .....	33
1.7. Оборудование для смешивания жидкостей и приготовления эмульсий .....	36
<b>Глава 2. Повышение чистоты топлива при эксплуатации сельскохозяйственной техники .....</b>	<b>40</b>
2.1. Содержание и структура теоретических исследований .....	40
2.2. Очистка нефтяных топлив от механических загрязнений с использованием ПГС-полимеров .....	41
2.3. Обоснование применения гидродинамических фильтров .....	73
2.4. Теоретические предпосылки процесса удаления углеводородных и гетероорганических загрязнений из нефтепродуктов .....	76
2.5. Механизм восстановления работоспособности фильтроэлементов из ПГС-полимеров .....	79
2.6. Обоснование методов контроля чистоты нефтепродуктов .....	86
<b>Глава 3. Обеспечение проведения операций с биотопливами .....</b>	<b>92</b>
3.1. Особенности транспортно-складских операций с биотопливами на основе растительных масел .....	92
3.2. Исследование процесса обводнения МЭРМ при транспортировании и хранении и зависимость ее от продолжительности хранения .....	92
3.3. Обезвоживание смесевых топлив с помощью ПГС-полимеров .....	99
3.4. Обеспечение температурного режима рапсового масла .....	106
3.5. Теоретические основы создания устройств для смешивания компонентов биотоплива .....	114
3.6. Применение многокомпонентного топлива .....	122
<b>Глава 4. Методика экспериментальных исследований .....</b>	<b>131</b>
4.1. Методика определения фактической загрязненности моторных топлив .....	131
4.2. Методика определения физико-химических показателей дизельного топлива и биотоплива на основе рапсового масла .....	132
4.3. Методика исследования стойкости конструкционных материалов при взаимодействии с биотопливом .....	138

4.4. Методика определения свойств ПГС-полимеров, используемых для очистки топлива .....	142
4.5. Методика определения эксплуатационных свойств влагоотделяющих перегородок .....	148
4.6. Методика определения теплотехнических показателей при подогреве рапсового масла .....	151
4.7. Методика спектрального анализа моторных топлив .....	154
<b>Глава 5. Результаты экспериментальных исследований .....</b>	<b>156</b>
5.1. Исследование фактической загрязненности моторных топлив .....	156
5.2. Исследование физико-химических свойств биотоплива .....	157
5.3. Исследование совместимости биотоплив с конструкционными материалами .....	165
5.4. Исследование эксплуатационных свойств ПГС-полимеров .....	172
5.5. Исследование эксплуатационных свойств влагоотделяющих перегородок .....	179
5.6. Результаты исследования процесса нагрева рапсового масла .....	184
<b>Глава 6. Конструктивные решения обеспечения чистоты моторных топлив и приготовления смесового топлива .....</b>	<b>186</b>
6.1. Разработка конструкции фильтроэлемента из ПГС-полимеров .....	186
6.2. Разработка конструкции самоочищающегося фильтра из ПГС-полимеров .....	187
6.3. Разработка конструкций гидродинамических фильтров .....	189
6.4. Разработка технологического оборудования для приготовления смесового топлива и заправке им сельскохозяйственной техники .....	194
6.5. Совершенствование устройства для очистки воздуха, поступающего в топливный бак .....	202
6.5. Совершенствование устройства для снижения загрязненности топлива при выдаче его из резервуара .....	204
<b>Список литературы .....</b>	<b>206</b>

Ежегодно предприятия России потребляют более 170 млн т моторных топлив. Работоспособность двигателей зависит от загрязненности применяемых при их эксплуатации топлив, масел и рабочих жидкостей. Негативные последствия загрязнения нефтепродуктов необходимо рассматривать в трех аспектах проблемы: во-первых, в эксплуатационном, которое связано с повышением износа сопряженных деталей, забивкой калиброванных отверстий и т.п., что вызывает неисправности и отказы при работе двигателей; во-вторых, в экономическом, которое связано с увеличением затрат из-за ухудшения качества нефтепродуктов, приводящее к повышению их расхода и часто делает невозможным их применение по прямому назначению; в-третьих, необходимо учитывать экологический аспект этой проблемы, так как наличие загрязняющих веществ в топливах и маслах приводит к увеличению содержания токсичных веществ отработавших газов поршневых двигателей, что вызывает загрязнение атмосферного воздуха и отрицательно сказывается на здоровье людей, приводит к угнетению животного мира и растительности.

Химический состав топлива определяется составом исходного нефтяного сырья и в условиях эксплуатации техники невозможно провести его корректировку. Его можно устранить только путем замены нефтяного топлива на продукты, выделяющие при сгорании меньше токсичных веществ.

Повышением чистоты топлив и масел, применяемых при эксплуатации мобильной техники, можно существенно снизить вредное воздействие этих продуктов на окружающую среду. Поддержание необходимого уровня чистоты нефтепродуктов может осуществляться как путём предупреждения попадания в них загрязнений, так и путём очистки загрязнённых нефтепродуктов. Но полностью решить указанную задачу невозможно, поэтому для снижения загрязненности нефтепродуктов необходимо принимать меры восстановительного характера – производить очистку этих продуктов от загрязнений с помощью соответствующего оборудования.

В монографии рассматриваются мероприятия по улучшению эксплуатационных свойств нефтяных и смесевых моторных топлив.

### 1.1. Экологические аспекты применения нефтепродуктов

В работе [1] рассматриваются факторы, вызывающие образование токсичных выбросов: это состав рабочей смеси, равномерность ее макроструктуры и оптимальность микроструктуры, фазовое положение процесса сгорания, выбросы загрязнений в виде твердых частиц, термическое изменение загрязнений в камере сгорания и другие. Они зависят от технического состояния двигателя.

К токсичным веществам, образующимся при работе двигателей, относят несгоревшие углеводороды, оксид углерода (CO), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ), сажу и др. Всего в отработавших газах (ОГ) двигателей содержится около трехсот веществ [2, 3], оказывающих вредное влияние на окружающую среду и здоровье людей.

Углеводороды имеют различное строение, различают более 200 токсичных веществ на основе СН и  $\text{СНО}$ , из которых предельные углеводороды составляют свыше 32 %, непредельные – около 27 %, ароматические – до 4 %, альдегиды – более 2 %. По характеру воздействия на организм человека различают две группы углеводородов: раздражающие и канцерогенные. Раздражающие углеводороды оказывают наркотическое воздействие на центральную нервную систему. К ним относят все предельные и непредельные углеводороды. К канцерогенным углеводородам относятся полиароматические углеводороды (ПАУ): 1,2-бензантрацен  $\text{C}_8\text{H}_{12}$ , 3,4-бетапирен  $\text{C}_{22}\text{H}_{14}$ , 1,2-бензпирен  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ , 3,4-бензфлуорантен  $\text{C}_{20}\text{H}_{14}$  и др. Особенно опасен 3,4-бензпирен, называемый также бенз( $\alpha$ )пиреном и являющийся своего рода индикатором присутствия в смеси других канцерогенных веществ. ПАУ накапливаются в организме до критических концентраций и стимулируют развитие злокачественных опухолей [4–7].

Углеводороды, особенно непредельного ряда и кислородсодержащие, участвуют в образовании смогов, которые вызывают раздражение глаз, горла и носа.

Оксид углерода (II) CO – ядовитый газ, не имеющий цвета и запаха, который в организме человека соединяется с гемоглобином крови и образует устойчивое соединение – карбоксигемоглобин, затрудняющий процесс газообмена в клетках, что приводит к кислородному голоданию. Оксид углерода поражает нервную систему, тормозит функции активных центров образования гемоглобина. При вдыхании воздуха с содержанием этого вещества более 10 ppm (частей на миллион) появляются признаки отравления, а содержание 200 ppm вызы-

вает легкое отравление. Концентрация оксида углерода CO в 2000–2500 ppm приводит к обморочному состоянию, а концентрация CO в количестве 1200–1600 мг/м<sup>3</sup> (0,15–0,18 %) приводит к летальному исходу [1, 8].

Оксиды азота – соединения азота с кислородом (N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). В отработавших газах содержится смесь различных оксидов азота – NO<sub>x</sub>, главным образом это оксид азота (II) NO. Отравление NO<sub>x</sub> носит скрытый характер. Степень воздействия на организм человека NO<sub>x</sub> приблизительно в 10 раз выше, чем CO. Оксид азота NO является кровяным ядом. Окисляясь до диоксида азота NO<sub>2</sub>, он образует с парами воды азотную кислоту, разрушающую ткани бронхов и легких. При концентрации NO 40–80 ppm происходит отек легких [1, 8, 9].

Сернистый газ (SO<sub>2</sub>) в соединении с другими загрязнениями и влагой образует смесь сернистой и серной кислот, которые раздражают слизистую оболочку глаз, носоглотки, горла и легкие человека, а также оказывают негативное влияние на растения, вызывают коррозию металлов и уменьшают прозрачность атмосферы. При среднесуточной концентрации в воздухе более 0,05 мг/м<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> оказывает токсическое воздействие на флору, фауну и человека.

Аэрозоли представляют опасность для организма человека при размерах частиц менее 20 мкм, задерживающихся в атмосфере на длительный срок и попадающих вместе с воздухом в дыхательные пути. Аэрозольные частицы сорбируют на своей поверхности канцерогенные вещества и стимулируют образование злокачественных опухолей [3–11].

Альдегиды в отработавших газах содержатся главным образом в виде формальдегида – газа с резким неприятным запахом, который действует на глаза и дыхательные пути, поражает центральную нервную систему, печень, почки. Другим ядовитым альдегидом является акролеин – газ с острым раздражающим запахом подгоревших жиров и масел.

Сажа является одним из компонентов отработавших газов, придает им черную окраску. Частицы сажи оседают в дыхательных путях, раздражают их и могут являться причиной хронических заболеваний. Главная особенность сажи в том, что на ней адсорбируются канцерогенные вещества, прежде всего ПАУ (1,2-бензантрацен, 3,4-бетапирен, 1,2-бензпирен, 3,4-бензпирен, 3,4-бензфлуорантен и др.)

Суммарная токсичность отработавших газов оценивается индексом токсичности, который приводит экологическую вредность различных веществ по наиболее изученному компоненту – оксиду углерода CO. Индекс токсичности показывает, во сколько раз сравниваемое вещество опаснее оксида углерода, вредность которого принимается за единицу. С учетом относительной токсичности выбросов и со-

става отработавших газов по четырем контролируемым параметрам (оксиду углерода CO, углеводородам, оксидам азота NO<sub>x</sub> и саже) индекс токсичности отработавших газов составляет: для дизеля 642, бензинового двигателя – 584, что опровергает утвердившееся мнение о существенном экологическом преимуществе дизелей [1].

Загрязнения в нефтепродуктах оказывают влияние на работу двигателя и на состояние окружающей среды.

Содержание токсичных компонентов в отработавших газах поршневых двигателей зависит от степени чистоты топлив и масел. При этом содержание оксида углерода, оксидов азота, соединений серы, тяжелых углеводородов, ПАУ, альдегидов и сажи в значительной степени зависит от коэффициента избытка воздуха в рабочей смеси. Обогащение рабочей смеси может произойти из-за присутствия в автомобильном бензине твердых частиц загрязнений и засорении ими жиклеров карбюратора. Однако двигатель может достаточно устойчиво работать, но в отработавших газах значительно возрастает содержание токсичных веществ – оксида углерода CO, тяжелых углеводородов, а также сажи, являющейся продуктом термического разложения углеводородов.

Так, при коэффициенте избытка воздуха 1,1 содержание оксида углерода в отработавших газах не превышает 1,6 %, а при снижении этого коэффициента до 0,7 содержание оксида углерода может превысить 9 %. Использование автомобильных двигателей с электронной системой регулирования подачи топлива может существенно снизить токсичность отработавших газов, однако наличие в топливе загрязнений способно вызвать повышенный износ рабочих органов топливного насоса, нарушить работу клапана, а попадание твердых частиц под клапан электромагнитной форсунки приводит к подтеканию топлива. В результате этих неисправностей происходит переобогащение рабочей смеси, что приводит к повышению содержания оксида углерода и тяжелых углеводородов в отработавших газах [12].

В результате попадания загрязнений в дизельное топливо происходит абразивный износ прецизионных пар топливных насосов высокого давления дизеля, которые имеют высокую степень чистоты поверхности и весьма малые зазоры, так зазор между плунжером и гильзой нового топливного насоса высокого давления составляет от 1,5 до 5 мкм. Наличие в топливе абразивных загрязнений и эмульсионной воды резко ухудшает работоспособность топливной аппаратуры, вызывая износ поверхностей прецизионных пар, и может привести к заклиниванию сопряженных деталей [13].

Снижение давления начала впрыска вызывается засорением фильтра тонкой очистки топлива, накопление загрязнений в сопловом

отверстии форсунки приводит к его забивке, их попадание под иглу форсунки нарушает плотность её посадки в седле распылителя, а проникая в зазор между распылителем и иглой, загрязнения вызывают её заклинивание. Результатом возникновения этих неисправностей является неполное сгорание дизельного топлива, приводящее к увеличению выброса оксида углерода, сажи и тяжёлых углеводородов в атмосферу.

Воздействие абразивных частиц износ сопловых отверстий форсунок приводит к неравномерной подаче топлива, ухудшению процесса его сгорания и увеличению расхода, нарушению режима работы дизеля на холостых оборотах и при малых нагрузках, затруднению пуска дизеля и снижению его мощности, перегреву двигателя. По данным работ [13–16] от 40 до 55 % отказов дизелей связано с неисправностями системы питания, половина которых вызвана загрязненностью топлива, установлено, что от 50 до 90 % всех отказов топливной аппаратуры связано с плунжерными парами.

Загрязнения в топливах и маслах вызывают абразивный износ гильз цилиндров и поршневых колец двигателей, а у изношенного двигателя содержание оксида углерода в отработавших газах увеличивается более чем в три раза по сравнению с новым. Прорыв отработавших газов в картер двигателя через увеличенные вследствие износа зазоры в цилиндропоршневой группе способствует увеличению количества несгоревших углеводородов, а износ сопряжённых поверхностей выпускных клапанов приводит к нарушению их герметичности и попаданию части несгоревшей рабочей смеси через выпускной коллектор в атмосферу.

Наличие загрязнений в топливах и маслах способствуют образованию нагара на стенках камеры сгорания, поршнях и клапанах. Из-за низкой теплопроводности отложений нагара температура в камере сгорания повышается, что способствует более интенсивному образованию оксидов азота. Нагар также увеличивает объём мертвого пространства в камере сгорания, что приводит к повышению концентрации несгоревших углеводородов, выбрасываемых в атмосферу, на 5–10 % через каждые 10 тыс. км пробега автомобиля. Отложения нагара на выпускных клапанах препятствуют их нормальной работе, что приводит к попаданию в систему выпуска газов несгоревшей рабочей смеси и снижению мощности двигателя: уменьшение зазора в клапанах на каждые 0,1 мм вызывает снижение мощности двигателя на 3,5–4 % и увеличение расхода топлива на 2–3 % [12].

Помимо твёрдых частиц загрязнений, отрицательное влияние на полноту сгорания при работе дизельного двигателя оказывает присутствие в топливе эмульсионной воды. Присутствие воды вызывает по-

вышенный износ топливной аппаратуры, а при отрицательных температурах снижает давление впрыска топлива из-за обмерзания фильтров и трубопроводов. Присутствие даже небольшого количества эмульсионной воды в топливе приводит к неравномерному его распылению вследствие изменения поверхностного натяжения капель топлива и увеличения их размеров.

Присутствие воды ухудшает физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики топлива (вязкость, прокачиваемость, смазывающую способность, окислительную стабильность и т.д.), что вызывает повышенный износ деталей топливной аппаратуры, вследствие ухудшения смазывающих и противоизносных свойств топлива [17], рост отложений в цилиндропоршневой группе, неравномерное распыление топлива вследствие изменения поверхностного натяжения его капель при впрыске, вызывающего значительное увеличение размеров этих капель, а при отрицательных температурах снижает давление впрыска топлива из-за обмерзания фильтров и трубопроводов. При понижении температуры топлива до отрицательных величин, образовавшиеся в нем микрокапли воды замерзают, образуя кристаллы льда, оседающие на фильтрующей перегородке.

В обводненном топливе повышается температура помутнения, начала кристаллизации и замерзания, что крайне нежелательно при эксплуатации дизеля в условиях низких температур. Увеличение содержания воды в топливе ухудшает его прокачиваемость и фильтруемость, а при отрицательных температурах приводит к обмерзанию и забивке льдом фильтров, деталей топливной аппаратуры и трубопроводов [17].

В присутствии воды в топливе усиливаются процессы коррозии топливных баков, трубопроводов и других составных частей системы питания дизеля, повышается склонность топлива к окислению, что способствует образованию в нем органических загрязнений, агрегирующихся с твердыми частицами в конгломераты, забивающие фильтры и вызывающие возникновение отложений в топливных насосах и других агрегатах системы питания. Присутствие воды отрицательно влияет на процесс горения топлива, а наличие значительного количества воды в топливе может привести к остановке двигателя. Установлено [18], что при содержании воды в топливе 0,5 % гидравлическая плотность плунжерных пар резко снижается вследствие возникновения центров коррозии в зоне контакта плунжера с гильзой при остановке работы насоса. Испытания фильтров тонкой очистки показали, что независимо от содержания в топливе воды гидравлическое сопротивление фильтра при работе на обводненном топливе растет из-за блокирования микрокаплями воды пор фильтрующей перегородки

и в результате агрегатирования этими каплями органических загрязнений, содержащихся в топливе в виде коллоидного раствора. Одновременно резко ухудшаются прочностные и эксплуатационные свойства фильтроэлемента: при содержании воды 0,44 % штатный фильтроэлемент из бумаги БФДТ снижает тонкость очистки в 7 раз (с 5 до 35 мкм) и значительно теряет прочность.

Увеличение содержания загрязнений резко снижает ресурс плунжерных пар. Так, по данным работы [19] при использовании топлива, содержащего 0,00415 % загрязнений в виде кварцевой пыли, т.е. в два раза больше нормы, ресурс деталей плунжерных пар составлял всего 20–24 ч против 16 тыс. ч при использовании тщательно очищенного топлива.

Помимо загрязнения атмосферы газообразными веществами, образующимися при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания, отрицательное экологическое воздействие на природу оказывают жидкие нефтепродукты, попадающие в окружающую среду в процессе эксплуатации техники. При попадании загрязнений в топливную систему, вызывающем прекращение подачи топлива и остановку двигателя, водитель осуществляет промывку или продувку системы, что связано с проливом значительного количества топлива. Загрязнение моторного масла или жидкости для гидравлических систем приводит к более частой замене этих продуктов, что также часто сопровождается проливом заменяемого продукта, а иногда имеет место несанкционированный слив отработанных нефтепродуктов на грунт.

Попадание нефтепродуктов на почву, в водные источники, водоемы и грунтовые воды приводит к тяжелым последствиям для живых организмов и растений [8, 9, 20]. Загрязнение нефтепродуктами воды, используемой при технологических операциях в процессе производства сельскохозяйственной продукции, может отрицательно сказаться на качестве этой продукции, а образующаяся на поверхности воды стойкая масляная плёнка, препятствует аэрации, что приводит к гибели водной флоры и фауны из-за недостатка кислорода.

Попадая на дно водоёмов, их берега и на почву, нефтепродукты уничтожают растительность, вызывают гибель полезных насекомых и других живых организмов, отравляют грунтовые воды. Поскольку нефтепродукты являются трудноразрушимыми в естественных условиях веществами, их воздействие на окружающую среду носит длительный характер.

Таким образом, можно сделать заключение, что наличие частиц твердых загрязнений и микрокапель свободной воды отрицательно влияет на работоспособность двигателей и одновременно существенно снижает экологическую безопасность при их эксплуатации.

## **1.2. Классификация загрязнений в нефтепродуктах и источники их появления**

В ходе производства, транспортирования, хранения и применения нефтепродуктов их загрязнение происходит непрерывно.

Загрязнения в нефтепродуктах можно классифицировать с учетом систематизации процессов, протекающих на различных этапах жизненного цикла этих продуктов, и анализа внешних факторов, влияющих на указанные процессы. В литературных источниках приводятся различные сведения о типах загрязнений в нефтепродуктах и используются разные подходы для их классификации [21–24].

Загрязнения в нефтепродуктах можно разделить:

- по этапам жизненного цикла: производственные, операционные, эксплуатационные;
- по источникам образования: сырьевые, технологические, атмосферные, контактные, износные, остаточные, инкреторные, микробиологические, пенетратные;
- по фазовому составу: газообразные, жидкие, твердые, пластичные и полужидкие;
- по химическому составу: неорганические (воздух, вода, минеральные вещества); органические (углеводородные и микробиологические).

Производственные загрязнения (сырьевые загрязнения, содержащиеся в сырой нефти, и технологические загрязнения, образующиеся при производстве товарных нефтепродуктах) попадают в нефтепродукты или образуются в них в процессе переработки нефти на нефтеперерабатывающих заводах.

Операционные загрязнения попадают в нефтепродукты или образуются в них при транспортных, нефтескладских и заправочных операциях. К ним относятся: атмосферные загрязнения, попадающие в рабочую жидкость из воздуха (пыль и влага), контактные загрязнения, образующиеся при взаимодействии рабочей жидкости с конструкционными материалами, из которых изготовлено транспортное и нефтескладское оборудование (продукты коррозии металлов, разрушения неметаллических материалов и т.п.), остаточные загрязнения, попадающие в рабочую жидкость из незачищенных емкостей и трубопроводов, и инкреторные загрязнения, образующиеся в рабочей жидкости в результате окислительных, полимеризационных, конденсационных и других процессов (смолы, асфальтены, карбиды и др.). Кроме того, может произойти микробиологическое загрязнение обводненной рабочей жидкости. Вода, поступающая в рабочую жидкость через неплотности неф-

тескладского и транспортного оборудования из-за его негерметичности, относится к пенетрантным (проникающим) загрязнениям.

Эксплуатационные загрязнения в нефтепродуктах могут иметь атмосферное, контактное, остаточное и инкреторное происхождение. К ним относятся также износные загрязнения, которые представляют собой частицы в виде микростружек или микропилок, образующихся в результате фрикционного износа узлов трения механизмов и систем, а при наличии в жидкости твердых частиц – и абразивного износа этих узлов.

Источники загрязнений нефтепродуктов во время транспортных, нефтескладских и заправочных операций можно выявить, анализируя химический состав неорганических загрязнений, приведенный в работе [23]. Причем, как показывают исследования, имеет место устойчивая тенденция к возрастанию количества загрязнений в нефтепродуктах в процессе их транспортирования, хранения, заправки и применения при эксплуатации машин.

### **1.3. Современные методы очистки топлив и масел**

Существуют различные методы для удаления загрязнений из топлив, которые основаны на химических, физико-химических и физических процессах. Твердые механические частицы загрязнений удаляют, как правило, физическими методами.

Физические методы очистки моторных топлив и масел включают очистку в силовых полях под воздействием гравитационных, центробежных, электрических, магнитных, электродинамических и других сил, очистку путем фильтрования топлива через пористые перегородки, а также очистку с помощью комбинации этих методов и обезвоживания с использованием теплофизических процессов.

Химические и физико-химические методы очистки нефтепродуктов применяются главным образом для их обезвоживания, а также для удаления из них асфальтосмолистых, кислотных веществ и других органических загрязнений.

Химические методы обезвоживания основаны на реакциях, протекающих между содержащейся в топливе водой и вводимыми в него реагентами. При этом образуются легко удаляющиеся из топлива вещества. Однако химические методы обезвоживания топлива не нашли широкого применения из-за необходимости утилизировать образующиеся в результате реакции газообразные вещества, и сложности удаления образовавшихся мелкодисперсных твердых продуктов. Химические методы очистки топлива от углеводородных загрязнений связаны с использованием токсичных и агрессивных веществ (концентриро-

ванной серной кислоты, едкого натра, кальцинированной соды и т.п.) и находят применение почти исключительно в заводских условиях на нефтеперерабатывающих предприятиях, главным образом при производстве масел.

Физико-химические методы очистки основаны на процессах коагуляции, адсорбции или селективного растворения загрязнений. Разновидностью адсорбционных технологий является ионообменный процесс. При обезвоживании главным образом используется процесс адсорбции, которая заключается в способности некоторых веществ избирательно поглощать отдельные содержащиеся в нефтепродукте органические и неорганические вещества, в том числе эмульгированную и растворенную воду.

Для адсорбционного обезвоживания топлива используются в основном твердые материалы с высокой пористостью. На практике обычно применяются адсорбенты искусственного происхождения. Хорошие результаты получены при использовании силикагеля, килограмм которого поглощает 0,8 кг воды. Эффективно также применение цеолитов, особенно для удаления мелкодисперсной воды. Недостатком адсорбционных методов обезвоживания топлива является необходимость регенерации адсорбентов после их насыщения водой, что требует использования специального оборудования и определенных энергетических затрат [21].

Физические методы очистки и обезвоживания топлива можно разделить на три группы: под воздействием силовых полей; с применением пористых перегородок; с использованием теплофизических и массообменных явлений (последняя группа методов применяется только для обезвоживания топлива и непригодна для его очистки от твердых частиц).

Самый простой и доступный способ очистки и обезвоживания нефтепродуктов – их отстаивание в гравитационном поле. Осуществляется эта операция в серийно изготавливаемых резервуарах для хранения нефтепродуктов, выполняющих функцию статических отстойников периодического действия, причем одновременно с водой из нефтепродуктов удаляются и твердые частицы. Недостатком этого способа является длительность процесса очистки и обезвоживания нефтепродуктов, эффективность которого существенно снижается при высокой вязкости и плотности продукта.

С более высокой скоростью, чем при отстаивании, очистка и обезвоживание нефтепродуктов может осуществляться в центробежном поле, для создания которого используются аппараты двух типов – неподвижные, в которых вращается поток продукта, и вращающиеся,

в которых продукт вращается вместе с ротором аппарата. Устройства первого типа получили название гидроциклонов, а второго – центрифуг. При воздействии центробежной силы на твердую частицу или микрокаплю воды происходит перемещение этих загрязнений в радиальном направлении с последующим удалением из корпуса аппарата. Недостатком гидроциклонов является низкая эффективность, особенно при обезвоживании, а недостатком центрифуг – сложность конструкции, потребность во внешних источниках энергии, малая пропускная способность.

Достаточно перспективным способом удаления загрязнений из нефтепродуктов является электроочистка. Электроочистители имеют сравнительно небольшие габаритные размеры, в процессе эксплуатации не изменяют пропускную способность и гидравлическое сопротивление, а также позволяют автоматизировать процесс очистки. Однако эти устройства имеют довольно сложную конструкцию, требуют достаточно квалифицированного обслуживания, способны снижать эффективность очистки в случае наведения электрических зарядов в электроизоляции электродов, требуют использования внешних источников высокого напряжения. Эти недостатки сдерживают на данном этапе применение электроочистки топлив и масел в системе нефтепродуктообеспечения.

Очистка нефтепродуктов в магнитном поле ограничивается удалением частиц загрязнений, обладающих ферромагнитными свойствами. При этом могут применяться как постоянные магниты, так и электромагниты, причем первые при одинаковых габаритных размерах способны создать более высокую напряженность магнитного поля. К преимуществам магнитной очистки относится возможность улавливания весьма мелких ферромагнитных частиц (до 0,5 мкм), которые практически не задерживаются другими средствами очистки, но оказывают каталитическое воздействие на процессы окисления нефтепродуктов. Недостаток очистки в магнитном поле – узкая область применения, ограниченная удалением из нефтепродуктов только ферромагнитных загрязнений и агрегированных с ними немагнитных частиц.

Очистка в вибрационном поле заключается в коагуляции частиц загрязнений под действием ультразвуковых волн высокой или низкой частоты, что облегчает последующее удаление этих загрязнений путем отстаивания или фильтрования. Однако при изменении режима работы вибрационного очистителя за счет увеличения длительности воздействия ультразвука, интенсивности поля и т.п., может наблюдаться не коагуляция частиц загрязнений, а обратный процесс – их диспергирование, что затруднит удаление этих частиц из очищаемого

продукта. Применение вибрационной очистки не получило большого распространения из-за недостаточной изученности механизма взаимодействия твердых частиц при воздействии на жидкость ультразвуковых колебаний.

Универсальными устройствами для очистки топлив и масел от твердых загрязнений являются фильтры, эффективность применения которых практически не зависит от свойств частиц и связана исключительно с соотношением этих частиц и размеров пор фильтрующей перегородки. Хотя на работу фильтров существенное влияние оказывают свойства очищаемого продукта (его вязкость, электропроводность, присутствие в нем поверхностно-активных веществ и т.д.), тем не менее, из всех методов очистки нефтепродуктов наибольшее распространение получило их фильтрование через пористые перегородки. По назначению фильтрующие материалы делятся на материалы для грубой очистки (тонкость фильтрования 70–100 мкм), для средней степени очистки (от 20 до 60 мкм), для тонкой очистки (от 1 до 20 мкм) и для ультрафильтрации (менее 0,1 мкм). Такое деление является довольно условным, так как тонкость фильтрования для конкретного продукта зависит от условий его применения.

Фильтрующие материалы различают также по физико-химическим свойствам сырья, из которого они изготовлены, и по технологии изготовления. Гибкие фильтрующие материалы могут изготавливаться путем тkania или плетения из волокон (ткани и сетки), формования из связанных волокон (нетканое текстильное полотно, бумага, картон, войлок, фетр), использования несвязанных волокон (вата, набивка, намотка), формования из связанных глобул порошка (пористый металлопрокат), пробивки калиброванных отверстий в листовом материале механическими, химико-механическими, оптически, ядерными и другими методами. Применяют также гибкие материалы из смеси волокон и глобул одинакового или различного состава. Негибкие фильтрующие материалы, в свою очередь, делятся на жесткие, изготавливаемые из глобул различных порошков путем спекания, прессования или при помощи других видов обработки, и нежесткие из несвязанных глобул порошков, применяемые в насыпных и намывных фильтрах.

К фильтрующим материалам, применяемым для очистки нефтепродуктов, предъявляются различные требования [25–27]. Они должны обладать малым гидравлическим сопротивлением при высокой удельной пропускной способности; обеспечивать необходимую тонкость и полноту фильтрования при высоком ресурсе работы в течение всего времени эксплуатации; кроме того, они должны иметь хорошую



механическую прочность, особенно при воздействии вибрационных и тепловых нагрузок и при продолжительном контакте с фильтруемым продуктом, не ухудшать физико-механические свойства очищаемых продуктов и не загрязнять нефтепродукты частицами, вымываемыми из материала в процессе эксплуатации. Важно, чтобы они были недорогими в производстве и изготавливались из недефицитного сырья, были способны восстанавливать свои фильтрационные и гидравлические свойства при регенерации материала после выработки его ресурса работы, а в случае одноразового использования – возможность утилизации отработанного материала.

В современных фильтрах для очистки нефтепродуктов применяются разнообразные материалы, различающиеся своими фильтрационными показателями, физико-химическими свойствами, химическим составом и геометрическим строением исходного сырья, способом изготовления и т.п.

По принципу работы фильтрующие материалы можно разделить на поверхностные, толщина которых всего в несколько раз толще, чем задерживаемые ими частицы загрязнений и объемные (глубинные), у которых толщина на несколько порядков больше, чем размеры задерживаемых частиц. Предполагается, что у материалов поверхностного действия задержание частиц загрязнений происходит в основном на поверхности, а у материалов объемного действия – в глубине пор. Такая классификация весьма условна, так как большинство применяемых в настоящее время фильтрующих материалов (картон, ткани объемного плетения, нетканые материалы и др.) нельзя однозначно отнести к какому-либо из указанных видов.

В работах [28, 29] дана характеристика разных видов фильтрующих материалов, описаны их физико-химические свойства материалов и принципы работы, и показано, как эти показатели влияют на конструкцию фильтрующего элемента.

Фильтрационные свойства зависят от размеров пор, их геометрического строения, структуры образующего эти поры исходного сырья и т.п. По размерам поры принято делить на макропоры с поперечным размером (диаметром) более 2 мкм, мезопоры с диаметром от 0,2 до 0,03 мкм и микропоры с диаметром менее 0,03 мкм.

Для очистки нефтепродуктов часто используют различные сетки. Металлические проволоочные сетки широко применяются при очистке топлив и масел, так как имеют ряд ценных качеств: высокую прочность, стабильную поровую структуру, способность к регенерации. Неметаллические сетки реже применяются для очистки топлив и масел, хотя они обладают таким важным преимуществом, как коррози-

онная стойкость. Они вырабатываются из различных синтетических полимерных материалов (капрона, лавсана, полипропилена, фторлона и др.) и могут изготавливаться ткаными из моноволокон, имея в этом случае структуру, соответствующую металлическим сеткам. Их недостаток – ухудшение механических свойств вследствие процесса старения полимерных материалов.

Нетканые материалы также находят применение для очистки топлив и масел, они представляют собой слои волокнистой массы толщиной 0,6–0,9 мм с хаотическим расположением волокон, соединенных между собой клеевым или термопластичным способом [30, 31]. В качестве волокнистой массы используются синтетические и натуральные волокна диаметром 10–12 мкм и длиной 35–40 мм. Очистка топлив и масел от загрязнений происходит в порах, образованных переплетением волокон. Эти материалы имеют более низкую стоимость по сравнению с тканями из аналогичных волокон и обладают лучшими фильтрующими свойствами, так как все поровые каналы в них образуются сравнительно тонкими волокнами, составляют около 10 % от всей площади суммарного сечения пор, а остальные 90 % образованы пересечением нитей гораздо большего сечения.

Бумаги [26, 30] для фильтрования топлив и масел изготавливаются обычно из синтетических волокон древесной целлюлозы или высокосортных хлопковых волокон, беспорядочно переплетенных между собой. Бумаги имеют различную плотность (0,2–0,8 г/см<sup>3</sup>), пористость (до 70 %), тонкость фильтрования (1–50 мкм), что позволяет использовать их для изготовления различных по назначению фильтрующих элементов. К недостаткам бумаг следует отнести их низкую механическую прочность. Для увеличения прочности отечественные фильтрующие бумаги пропитывают спиртовым раствором бакелитового лака.

Использование пористой металлокерамики и других аналогичных материалов ограничивается их высокой стоимостью и большой массой. Более легкими, хотя и достаточно дорогими являются металлокерамические прокатные материалы из нержавеющей стали. Выпускаются отечественные материалы из стали X18H15 с различной тонкостью фильтрования (от 2 мкм до 40 мкм). За рубежом наряду с традиционными металлокерамическими материалами выпускаются по такой же технологии композиционные материалы, выполняемые из смеси металлических гранул и волокон.

Пористые полимерные фильтрующие материалы, используемые для очистки нефтепродуктов, изготавливаются путем включения в исходную полимерную композицию газообразующих или водорастворимых компонентов, после разложения или вымывания которых мате-

риал приобретает пористую структуру. Пенопластовые материалы, получаемые с использованием газообразующих веществ, изготавливаются на основе поливинилхлорида, полиуретана, полиэтилена и др. Они изготавливаются из недорого сырья при сравнительно небольших трудозатратах и без применения сложного оборудования, но имеют неравномерную пористую структуру, так как при вспенивании трудно обеспечить одинаковый размер пор.

Более равномерную структуру имеют материалы, получаемые с использованием водорастворимых компонентов (главным образом солей различных металлов). Они изготавливаются путем отливания из раствора, содержащего одновременно полимер и соль, или путем прессования и термической обработки порошка, содержащего смесь полимера с измельченной солью. После этих операций материал обрабатывается водой, в результате чего в нем возникают пористые структуры. Пористость и размер пор зависят от количества и размеров кристаллов соли, применяемой в качестве вспомогательного вещества. Так, хлориды аммония, натрия, калия, магния и стронция образуют в полимерном материале поры размером 10–20 мкм, а хлориды кальция и палладия – поры размером 1 мкм. Фильтрующий материал из пористого фторопласта [32], получают смешением хлорида натрия с порошкообразным политетрафторэтиленом, прессованием этой смеси, спеканием полученной массы и кипячением ее в воде для удаления соли. Выпускается несколько типов пористого фторопласта, имеющих тонкость фильтрования от 5 до 35 мкм. Фторопластовые фильтрующие материалы обладают очень высокой химической стойкостью и находят широкое применение при очистке агрессивных жидкостей, однако для очистки нефтепродуктов они применяются редко из-за высокой стоимости и трудности их утилизации вследствие образования при этом токсичных веществ. За границей находят применение изготовляемые по аналогичным технологиям фильтрующие материалы из тефлона, поливинилхлорида, полиамида и др.

Технологию изготовления полимерных фильтрующих материалов можно значительно упростить, если отказаться от вспомогательных ингредиентов и проводить полимеризацию одновременно с формированием фильтроэлемента, как это делается при производстве новых высокопористых полимерных материалов, имеющих пространственно-глобулярную структуру (ПГС-полимеров). В качестве исходных мономеров могут использоваться различные соединения: резорцин, стирол, винилпиридин, метилметакрилат, акрилонитрил, бутadiен, фенолы, амины, карбамиды, меламина, эпокси́ды и т.д. Технология получения ПГС-полимеров весьма проста, при их изготовлении исполь-

зуется стандартное оборудование для изготовления пластических масс и синтетических смол. При изготовлении ПГС-полимеров не требуется применение наполнителей для придания материалу пористости, так как глобулярная структура образуется в процессе реакции между компонентами, входящими в состав материала, причем размер глобул зависит от режима процесса синтеза полимера [33].

ПГС-полимеры имеют совершенную пористую структуру (пористость от 35 до 90 %) при узком распределении пор по размерам (отклонение не более  $\pm 10\%$ ), что обеспечивает практически любую требуемую степень очистки жидкости от твердых загрязнений и коллоидных частиц (от 0,2 до 20 мкм) при достаточно высокой пропускной способности. За счет синтеза материалов с активными функциональными группами можно придать ПГС-полимерам заданные сорбционные, коалесцентные, ионообменные и другие свойства. У ПГС-полимеров формирование пористой структуры идет одновременно с полимерообразованием, то есть с процессами полимеризации и поликонденсации. В результате образуются полимеры особой пространственной структуры, в которой шарообразные глобулы плотно упакованы в механически прочный пространственный каркас. Метод получения ПГС-полимеров позволяет в широких пределах варьировать размеры микроглобул (от 30 Å до 15 мкм), а также геометрию их упаковки и характер сцепления между ними.

Учитывая наличие значительного количества мономеров, способных образовывать трехмерные полимерные структуры, можно получить широкий спектр ПГС-полимеров, различающихся между собой как по химическому составу, так и по параметрам пористости и физической структуре.

Проведенные исследования ПГС-материалов показали, что их пористая структура определяется условиями синтеза и характеризуется узким распределением пор по размерам. Регулируемая пористость генерируется в процессе полимерообразования в специально создаваемой первоначально гомогенной структуре под воздействием определенных режимных факторов.

ПГС-полимеры легко поддаются механической обработке, технология их производства позволяет получать изделия разной формы – в виде пластин, листов и лент, толстостенных и тонкостенных труб, полых цилиндров и т.д. ПГС-полимеры легко совмещаются с другими материалами: металлическими и пластмассовыми каркасами и сетками, фильтротканями, волокнами, что дает возможность получения композиционных материалов с ценными техническими свойствами. ПГС-полимеры химически стойки и могут эксплуатироваться в широ-

ком диапазоне значений pH. Регенерация ПГС-полимера, осуществляется обратной отдувкой сжатым воздухом или водяным паром, обратной промывкой фильтратом.

Наряду с фильтрующими элементами из пористых материалов для очистки нефтепродуктов находят применение щелевые фильтрующие элементы (пластинчатые, ленточно-навивные, проволочно-навивные и каналные). Подробные сведения о свойствах фильтрующих материалов и конструкции фильтрующих элементов приведены в работе [34].

Фильтрационные методы очистки топлива от механических частиц получили широкое распространение из-за ряда преимуществ фильтров по сравнению с другими устройствами для очистки топлива. Главные из этих преимуществ – стабильная тонкость очистки, отсутствие движущихся частей, простота эксплуатации.

Этот метод находит применение также при обезвоживании топлива. Он основан на использовании для отделения влаги пористых перегородок, которые могут изготавливаться из водоотталкивающих (гидрофобных) материалов, впитывающих (гидрофильных) материалов, а также из сочетания гидрофильных и гидрофобных волокон. Недостатком использования гидрофобных перегородок является блокирование микрокаплями воды пор перегородки, что препятствует прохождению через них очищенного топлива. При использовании гидрофильных перегородок ресурс их работы ограничен временем до полного насыщения перегородки влагой и зависит от габаритных размеров устройства. Коагулирующие перегородки из сочетания гидрофобных и гидрофильных волокон являются многослойными и имеют значительные габаритные размеры, а эффективность их работы в значительной степени зависит от скорости потока топлива, его вязкости и плотности, наличия в нем смолистых веществ и т.п.

Основным недостатком фильтров, затрудняющих их эксплуатацию и обслуживание, является ограниченный ресурс работы, связанный с постепенным закупориванием пор фильтрующего материала частицами загрязнений и возрастающим вследствие этого перепадом давления на фильтре до предельно допустимой величины. Очистка топлива производится главным образом фильтрами периодического действия, которые просты по устройству и могут эксплуатироваться в широком диапазоне рабочих давлений. Недостаток этих фильтров – необходимость их периодического отключения для замены или регенерации фильтрующих элементов.

Применение теплофизических методов обезвоживания топлива основано на использовании теплообменных и массообменных процессов, при которых вода претерпевает физические превращения – испарение

или кристаллизацию. Испарение воды при нагревании топлива неэффективно, так как при повышении температуры увеличивается растворимость воды в топливе, а при последующем охлаждении она опять выделяется из топлива в виде эмульсии. Вымораживание воды из топлива в наземных резервуарах достаточно эффективно и не требует специального оборудования, но применение этого метода носит сезонный характер.

Рассмотрение методов очистки топлив и масел позволяет сделать вывод, что перспективным является использование для этой цели фильтрующих перегородок с обеспечением их периодической или непрерывной регенерации.

#### **1.4. Методы контроля чистоты топлив и масел**

Присутствие в топливах значительного количества загрязнений, которые отрицательно влияют на работу двигателя и экологическое состояние окружающей среды при эксплуатации двигателей, делает необходимым контроль чистоты этих продуктов.

Приборы контроля чистоты жидкостей основаны на оптическом, емкостном, ультразвуковом и других методах [35–39]. Методы контроля содержания механических примесей в жидких топливо-смазочных материалах делятся на методы периодического и непрерывного контроля, которые, в свою очередь, основываются на определении массы загрязнений в жидкостях или на их гранулометрическом анализе с классификацией частиц по размерным фракциям.

Основным методом периодического контроля чистоты топлив и масел является гранулометрический, проводимый согласно ОСТ 1.41144 [40]. Однако этот метод весьма трудоемок и требует достаточно сложного лабораторного оборудования.

Наиболее распространенным методом определения содержания механических примесей в нефтепродуктах является весовой по ОСТ 1.41145, однако он требует больших затрат времени для анализа и является недостаточно точным [41, 42]. При микроскопическом методе по ОСТ 1.41144 применяется микроскоп типа МБС-1 или МБС-2, а также возможно применение любых микроскопов, обеспечивающих соответствующее увеличение (МБИ-6, МБИ-11, МБИ-15, «Биолам М» и другие). Данный метод, так же, как и весовой, довольно субъективен и неточен [42].

За рубежом фирмами Millipore США, MetalsResearch (Англия), Leitz и Opton (Германия), Sakura (Япония) для гранулометрического анализа применяются телевизионные микроскопы и автоматизированные анализаторы ПМС (США), Quantimet 720 (Англия), Microvideomat и Classimat (Германия) и другие [43].

На базе отечественной техники созданы телевизионные микроскопы МТ-2, МТ-3, МТ-6 [44] и телевизионные анализаторы КТА-1, АТА-1, полуавтоматические и автоматические анализаторы оснащены сложной оптико-электронной аппаратурой, которая требует квалифицированного обслуживания.

Микроскопический, микрофотографический методы и метод телевизионного сканирования связаны с отбором проб и подготовкой контрольных фильтров в лабораторных условиях. Применение голографической микроскопии является перспективным методом анализа, но он не получил развития из-за отсутствия надежных и доступных по цене установок.

Разработанные в России ультразвуковые приборы типа УЗИС, ЗАС, УЗК, УЗИП, ИК имеют низкую чувствительность, что ограничивает их применение для контроля чистоты топлива. Прибор для контроля чистоты жидкостей, основанный на изменении их диэлектрической постоянной в присутствии загрязнений не нашел применения из-за недостаточной чувствительности.

Одним из распространенных методов измерения дисперсионного состава загрязнений жидкостей является метод рассеяния света, который применяется для определения концентрации диспергированных частиц в дисперсных системах. Но из-за значительных габаритных размеров и массы большинство созданных на базе этого метода приборов не могут быть применены для контроля чистоты топлива.

Из рассмотренных лабораторных методов наиболее пригоден для контроля чистоты топлива седиментационный (турбодинамический) метод с регистрацией результатов фотоколориметрическим способом, который можно использовать для определения загрязнений в топливе.

### 1.5. Применение альтернативных топлив

В разделе 1.1 рассмотрены токсичные вещества, образующиеся в двигателях внутреннего сгорания при использовании нефтяных топлив. Одним из отрицательных последствий применения нефтяных топлив является выброс в атмосферу при их сгорании большого количества диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , который непосредственно не оказывает влияния на организм человека, но создает в атмосфере так называемый «парниковый эффект», являющийся причиной глобального потепления, что способно вызвать непредсказуемые изменения климата и такие катаклизмы мирового масштаба, как таяние ледников и связанное с этим повышение уровня мирового океана, тайфуны, наводнения, засухи и т.п. В настоящее время парниковый эффект от избыточного содержания диоксида углерода дает эффективный нагрев поверхности

на уровне  $2,45 \text{ Вт/м}^2$  [45], что сопоставимо с теми изменениями уровня солнечного излучения, которые приводили в геологическом прошлом к существенным климатическим изменениям.

В настоящее время мировое потребление невозобновляемых ресурсов в год составляет по разным данным 12–15 млрд т условного топлива, из них более 50 % составляет нефть и газ. Во всем мире добывается более 3 млрд т нефти в год, причем более 1,5 млрд т приходится на бывший СССР, США, Венесуэлу и более 1 млрд т – на страны Ближнего Востока и Африки. По запасам нефти (20 млрд т) Россия занимает второе место в мире после Саудовской Аравии. Запасы природного газа оцениваются в 300–500 трлн  $\text{м}^3$ , главным образом в России (более 40 % мировых запасов газа), а также в Ираке, Саудовской Аравии, Алжире, Ливии, Нигерии, Венесуэле и др. [45].

Среди альтернативных топлив первое место в мире по потреблению на транспорте занимают сжиженные нефтяные газы, а также топлива, получаемые из газового сырья, угля и сланцев [46–54]. Реальным резервом моторных топлив являются газовые конденсаты, запасы которого в республиках бывшего СССР оцениваются в 1,2 млрд т, однако широкое применение газового конденсата сдерживается неэффективностью сбора и транспортирования небольших его количеств, к тому же возникают трудности при перекачке газового конденсата [51, 55, 56, 57].

Из возобновляемых ресурсов достаточно перспективно использование энергии биомассы, т.е. всех видов веществ растительного и животного происхождения, продуктов их жизнедеятельности и органических отходов. Из отходов можно получать биогаз, технология его производства очень проста: сырье закладывается в герметичный сосуд, где разлагается при отсутствии кислорода. В результате получается биогаз и сухой остаток – эффективные удобрения. Такие установки широко используются в Китае, США, Индии. В России также начали строить подобные установки. В российском животноводстве и птицеводстве в год образуется около 150 млн т органических отходов. При их переработке в биогазовых установках можно ежегодно получать дополнительно 95 млн т условного топлива, что эквивалентно 190 млрд кВт·ч электроэнергии [46]. Этой энергии достаточно, чтобы обеспечить электроэнергией весь агрокомплекс России. Теплота сгорания биогаза  $20,95 \text{ МДж/м}^3$  ( $5000 \text{ ккал/м}^3$ ). Его можно использовать для отопления домов, сушки зерна, из него можно синтезировать углеводороды и использовать в качестве горючего для автомобилей, тракторов, стационарных двигателей внутреннего сгорания [54].

В последнее время получает развитие использование в качестве топлива для автомобильных двигателей продукта переработки мета-

на – диметилэфира (ДМЭ). Для его получения можно использовать метан любого происхождения: природный газ, биогаз, а также газ, получаемый в результате гидрогенизации каменного угля. ДМЭ по своим свойствам полностью соответствует сжиженному нефтяному газу (смеси пропана и бутана), но имеет более высокое цетановое число, характеризующее способность топлива к воспламенению от сжатия. Это позволяет сжигать ДМЭ с более высоким коэффициентом полезного действия, чем при использовании сжиженного газа [2, 58, 59].

При сгорании ДМЭ не образуются соединения серы, а содержание в отработавших газах оксидов азота меньше, чем в других газообразных топливах за счет более низкой температуры горения. Благодаря более полному сгоранию в двигателе не образуется нагар и частицы сажи, снижается шум при его работе. Однако из-за невысокой плотности и теплотворной способности ДМЭ, а также вследствие низкой температуры его кипения и малой вязкости, топливная аппаратура дизелей при использовании этого продукта требует существенной модернизации. Кроме того, отмечено разрушение прокладок из резины и других уплотнительных материалов при контакте с ДМЭ. И цена ДМЭ превышает цену традиционных видов топлива [59]. Все это сдерживает широкое применение ДМЭ при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.

В настоящее время проведены многочисленные исследования, в результате которых предложен ряд моторных топлив для двигателей внутреннего сгорания, имеющих значительные экологические преимущества по сравнению с традиционными видами горючего [48, 51, 54, 60, 61] и др.

Использование в качестве моторного топлива продуктов из органического (растительного) сырья целесообразно с точки зрения возобновляемости сырьевых ресурсов [60–71]. Эти продукты не содержат соединений серы и образуют при сгорании гораздо меньше таких вредных веществ, как оксид углерода, многоатомные углеводороды, сажа, оксиды азота. Выделяющееся при их сгорании количество диоксида углерода численно равно количеству этого соединения, поглощенного при развитии растений, служащих сырьем для получения топлива, то есть общее количество диоксида углерода в атмосфере не увеличивается. Поэтому наиболее перспективным направлением замещения нефтяных топлив альтернативными продуктами представляется использование в качестве горючего для двигателей внутреннего сгорания топлив, получаемых из биологического сырья.

Вопросам использования моторных топлив биологического происхождения посвящены работы И.Г. Голубева, С.Н. Девянина,

О.И. Жигалина, А.Н. Зазули, А.Ю. Евдокимова, А.П. Картошкина, Н.В. Краснощекова, С.А. Нагорнова, Е.Г. Пономарева, Г.С. Савельева, В.Г. Спиркина, А.П. Уханова, В.Ф. Федоренко, И.Г. Фукса и многих других ученых. В указанных работах рассмотрены физико-химические свойства различных биотоплив, технологии их получения, эксплуатационные характеристики дизелей при работе на этих топливах [46, 54, 60, 66–81]. Однако такие топлива неравноценны по энергетическим, экономическим и эксплуатационным показателям, поэтому выбор оптимального вида биотоплива, исследование целесообразности его использования в качестве моторного топлива и возможности осуществления транспортно-складских и заправочных операций при обеспечении мобильной техники этим топливом является актуальной научной задачей, имеющей важное практическое значение.

Биотопливо первого поколения производится из крахмалосодержащих (кукуруза, зерновые, маниока), сахаросодержащих (сахарный тростник, сахарная свекла, сорго) и масличных культур (рапс, подсолнечник, соя и др.). Жидкое биотопливо второго поколения производится из лигноцеллюлозной биомассы (лес, древесные отходы, растительные остатки и др.), а также из микроводорослей. Сырье для биотоплива первого поколения – пищевые культуры, для выращивания которых требуются плодородные земли, удобрения, вода для полива и т.п. Для производства лигноцеллюлозы не требуется плодородных земель, значительно меньше нужно удобрений и ядохимикатов, а поскольку целлюлоза – основной компонент растения, то можно использовать все растение целиком. К тому же эмиссия парниковых газов при получении этанола из лигноцеллюлозы на 20–30 % меньше, чем при использовании этанола из сахарной свеклы или зерновых [46, 81].

История использования этанола в качестве моторного топлива началась еще в 1880 г. – первый автомобиль, собранный Генри Фордом, работал на этиловом спирте [45]. В 1902 г. на выставке в Париже были представлены 70 различных карбюраторных двигателей, работающих на спирту или спирто-бензиновых смесях.

Этанол и сейчас считается самым распространенным видом топлива из растительного сырья, что объясняется простотой его получения. В настоящее время мировым лидером в производстве биотоплива из зерна являются США. Очень широко этиловый спирт применяется в качестве моторного топлива в Бразилии, где для его получения используют отходы сахарного тростника, эта отрасль развивается там с 1975 г. Бразилия, занимающая первое место в мире по производству сахарного тростника, экспортирует и биоэтанол, и технологии по его производству [45]. На Западе получили распространение спирто-

бензиновые смеси Е85 (с содержанием спирта 85 %) и Е10 (с содержанием спирта 10 %). Смесь Е85 требует модернизации топливной системы автомобиля, а для смеси Е10 такой переделки не нужно, хотя добавка 10 % снижает содержание в ОГ оксида углерода в среднем на 15 %, увеличивает октановое число, уменьшает выбросы парниковых газов почти на 20 %.

Исследования смесевых топлив на основе этанола проводились и в России [45, 81–86], однако широкого распространения такие топлива пока не получили. Наряду с положительными сторонами использование этилового спирта в качестве автомобильного топлива имеет ряд недостатков. К ним относятся необходимость переделки топливной системы двигателя, а также высокая токсичность спирта, особенно метилового, проявляющаяся при попадании в организм человека, что сопровождается заболеваниями сердца, печени, желудочно-кишечного тракта и других внутренних органов, отражается на работе головного мозга. Отмечена коррозионная активность и агрессивность спиртовых топлив по отношению к алюминиевым сплавам, резинам и другим конструкционным материалам [87].

Перспективным является использование в качестве топлива растительных масел [61, 86, 88, 89], которые могут использоваться как в чистом виде, так и в смеси с дизельным топливом, и получаемых из них продуктов [50, 61, 81, 88, 89]. Сырьем для биотоплива служат растительные масла, которые не требуют для своего изготовления сложного оборудования, их можно получать путем прессования без химической обработки. Вырабатываемые из семян масличных растений масла нетоксичны и неогнеопасны, не содержат соединений серы, их применение не вызывает выделения избыточных парниковых газов в атмосферу. Растительные масла имеют достаточно высокую теплоту сгорания, сопоставимую с теплотой сгорания дизельного топлива [51, 90].

Теоретически в качестве биотоплива могут использоваться разнообразные растительные масла: рапсовое, кукурузное, льняное, хлопковое, соевое, пальмовое, арахисовое, оливковое и т.д. [50, 54, 61]. Всего в мире насчитывается свыше 150 видов масленичных растений. Сравнительные данные о физико-химических свойствах некоторых масел растительного происхождения и аналогичных свойствах дизельного топлива приведены в табл. 1.1 [61, 91].

Наиболее перспективным сырьем для приготовления биотоплива в условиях России является рапс, обладающий рядом достоинств как сельскохозяйственная культура. Рапс почти не требует ухода при возделывании, дает стабильно высокий урожай, является ценной промежуточной культурой при выращивании других растений, например,

пшеницы. При посевах рапса улучшается структура почвы, и накапливаются в ней питательные вещества. Получаемые при отжиме рапсового масла из семян отходы являются ценным кормовым продуктом для сельскохозяйственных животных [88, 91].

Таблица 1.1

**Физико-химические показатели дизельного топлива и некоторых растительных масел**

Показатели	Дизельное топливо	Растительное масло				
		Рапсовое	Хлопковое	Соевое	Подсолнечное	Арахисовое
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	820	915	916	923	924	917
Вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3–6	77,0	84,0	25,0	63,2	81,5
Теплота сгорания, МДж/кг	43,0	37,2	34,0	39,0	36,981	37,023
Цетановое число, ед.	45,0	36,0	41,0	27,0	33,4	36,6
Температура, °С:						
помутнения	–5,0	–9,0			–6,7	
застывания	–10,0	–18,0	–4,0	–11,0	–16,0	–3,3
Кислотность, мгКОН/100 мл	5,0	6,1				
Содержание фактических смол, мг/100 мл	20	175				

Самым простым способом использования рапсового масла в качестве моторного топлива является применение его в чистом виде. В этом случае процесс получения биотоплива осуществляется с минимальными затратами. Однако применение чистого рапсового масла в качестве топлива для дизелей требует доработки двигателя и его адаптации для работы на этом продукте. Необходимость усовершенствований системы питания дизеля связана с различиями физико-химических свойств рапсового масла и дизельного топлива.

У рапсового масла более продолжительный период задержки воспламенения, теплота сгорания на 7–10 % меньше по сравнению с дизельным топливом, цетановое число ниже на 5–7 единиц, а вязкость при температуре 20 °С выше в 15 раз. При пониженном цетановом числе топлива рабочий процесс дизеля протекает более жестко и сопровождается сильным шумом, а повышенная вязкость рапсового масла затрудняет его подачу и ухудшает качество его распыления в цилиндрах двигателя. Кроме того, при использовании чистого рапсового масла увеличивается нагарообразование на поршнях и стенках камеры сгорания [61, 89, 91].

По сравнению с дизельным топливом у чистого рапсового масла плотность больше на 9 %, вязкость выше в 20 раз, содержание серы меньше в 10 раз, температура застывания выше на 17 °С по сравнению с зимним топливом и на 10 °С ниже летнего дизельного топлива. Смесевое топливо по физико-химическим показателям занимает промежуточное положение.

Большая вязкость чистого рапсового масла осложняет его применение в двигателях в условиях низких температур окружающего воздуха, однако при повышении температуры топлива до 70–90 °С его вязкость снижается до значений, обеспечивающих фильтруемость и прокачиваемость в топливной системе низкого давления. Указанный диапазон температур соответствует диапазону температур охлаждающей жидкости у двигателя после его прогрева, что и используют для подогрева смесового топлива. Возможен подогрев биотоплива от отработавших газов двигателя.

В Германии несколько лет действовала программа испытаний тракторов, работавших на чистом рапсовом масле холодного отжима. В результате испытаний выявлено, что не все тракторы могут успешно работать на чистом масле: выявлены неисправности по нагарообразованию в камерах сгорания, на выпускных клапанах, потери мощности, проблемы при холодном пуске. Следует отметить, что использование альтернативных топлив может сопровождаться как улучшением, так и ухудшением экологических показателей [54, 92–95].

Одним из наиболее простых и экономичных методов получения биотоплива на основе рапсового масла с необходимыми эксплуатационными свойствами является его смешение с дизельным топливом. В этом случае не требуется модернизации двигателя, а физико-химические свойства смесового топлива зависят от соотношения в нем рапсового масла и дизельного топлива. Смешение этих двух продуктов позволяет получить моторное топливо со значительно меньшей вязкостью, чем у исходного рапсового масла, с достаточно низкой температурой застывания, с высокой теплотой сгорания и т.д. [61, 86, 91, 96]. Физико-химические свойства смесового биотоплива на основе рапсового масла с различным соотношением входящих в его состав компонентов приведены в табл. 1.2.

Применение смесового биотоплива является наиболее малозатратным способом использования рапсового масла в качестве моторного топлива для мобильной техники, так как его изготовление может осуществляться непосредственно в сельскохозяйственных предприятиях.

Однако следует отметить, что при изготовлении смесового биотоплива на основе рапсового масла необходимо осуществить ряд до-

полнительных операций: масло необходимо очистить от загрязнений растительного происхождения, попавших при отжиме семян, а также от твердых частиц и микрокапель воды; его необходимо нагревать для снижения вязкости, позволяющей производить перекачку масла и его смешение с дизельным топливом.

Таблица 1.2

**Физико-химические показатели смесевых биотоплив из рапсового масла и дизельного топлива**

Показатели	Дизельное топливо	Смесь рапсового масла и дизельного топлива в соотношении, %			Рапсовое масло
		75:25	50:50	33:67	
Вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3–6	38,2	16,8	11,2	90,7
Теплота сгорания, МДж/кг	43,0	39,59	40,386	40,927	37,023
Цетановое число, ед.	45,0	36,75	39,5	41,37	34,0
Температура, °С: помутнения застывания	–5,0 –10,0	–9,0 –16,0	–7,0 –14,0	–6,5 –12,0	–9,0 –18,0
Кислотность, мгКОН/100 мл	5,0	5,825	5,550	5,363	6,1
Содержание фактических смол, мг/100 мл	20	125	100	75	178

В настоящее время, по нашему мнению, одним из перспективных видов альтернативных моторных топлив для сельскохозяйственной техники является метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ), который по своим физико-химическим свойствам и эксплуатационным характеристикам довольно близок к дизельному топливу (табл. 1.3), при его использовании не нужен подогрев топлива, а отложений в цилиндрах двигателя образуется гораздо меньше, чем при использовании чистого рапсового масла и смесового биотоплива [61, 87, 89, 96].

МЭРМ получается при взаимодействии рапсового масла с метиловым спиртом в присутствии катализаторов – веществ, ускоряющих химическую реакцию. В качестве катализатора реакции используется гидроксид калия КОН, или гидроксид натрия NaOH (в виде кристаллов), а также натрийметилат в виде 30 % раствора в метаноле.

Кроме того, в результате взаимодействия рапсового масла с метиловым спиртом наряду с МЭРМ получается глицерин, который широко используется в медицине, косметической промышленности и других отраслях.

МЭРМ получают взаимодействием рапсового масла с метанолом, при этом образуется побочный продукт – глицерин. МЭРМ как топливо широко применяют в различных странах Западной Европы [95–99].

Таблица 1.3

**Физико-химические свойства образцов дизельного топлива  
и метилового эфира рапсового масла (МЭРМ)**

Показатели	Вид топлива	
	Дизельное	МЭРМ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	826	877
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,83	8,0
Цетановое число, ед.	45	48
Температура, °С:		
воспламенения	60	56
застывания	–10	–8
Коксуемость остатка, %	0,5	0,3
Содержание, %:		
серы	0,2	0,02
зола	0,02	0,02
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,5	37,1

Особенно широко применяется МЭРМ в Германии, где его производят 3,5 млрд л в год 12 централизованных заводов и 80 нецентрализованных, этот вид топлива отпускают более чем на 800 заправок станциях [61]. Используется также и смесевое топливо Bio-Diesel, которое представляет собой 95 % дизельного топлива и 5 % МЭРМ, при этом содержание МЭРМ планируется довести до 10 % [99]. На втором месте по производству биодизеля – Италия (1,2 млрд л), далее Франция (1 млрд л). В России потребление биодизеля весьма мало, продукция завода по производству биодизеля, построенного компанией ЛУКОЙЛ, продается за рубеж, главным образом в Финляндию.

В США биотопливо производится в основном из соевого масла, там еще в 1990-х годах начали продавать биодизельное топливо из возобновляемых ресурсов [100]. В ближайшее время в США планируется на 20 % заменить обычное топливо биодизельным и использовать его на морских судах, городских автобусах и грузовых автомобилях [101]. В Малайзии производят биотопливо из пальмового масла, его метиловый эфир применяют как топливо для городских автобусов фирмы Mercedes-Benz [102].

Представляет несомненный интерес изучение экологических свойств биотоплив. Фирмой Фольксваген (Германия) испытывался серийный четырехцилиндровый дизель мощностью 40 кВт, который последовательно работал на дизельном топливе и МЭРМ [103]. Исследования показали, что при переводе дизеля с дизельного топлива на МЭРМ концентрация оксида углерода в ОГ снижается на 20 %, концентрация углеводородов – на 55 %, в том числе полициклических

ароматических углеводородов (ПАУ) – более чем в два раза, дымность ОГ – на 2 ед. по шкале Боша. Наряду с этим отмечалось повышение выбросов оксидов азота на 17,5 %, но в целом работа дизеля на МЭРМ характеризуется низкой суммарной токсичностью отработавших газов.

А по данным фирмы Порше [104] при работе автотракторных и стационарных двигателей на МЭРМ выбросы оксидов азота снижаются. Отмечается, что при работе МЭРМ эффективная мощность и крутящий момент дизеля снижаются незначительно по сравнению с работой на дизельном топливе. При использовании МЭРМ не обнаружено повышенного изнашивания деталей двигателя и повышенного отложения углеродистых соединений в камере сгорания.

В работе [105] приводятся данные по эксплуатации дизеля фирмы Изуцу (Япония) на МЭРМ, отмечено значительное снижение выбросов оксида азота с отработавшими газами. Испытания грузового дизельного автомобиля с двигателем мощностью 60 кВт показали, что расход МЭРМ составил 6,3 л на 100 км при расходе дизельного топлива 6,1 л на 100 км.

Исследования работы дизеля СМД-31 (64Н12/14), проведенных в Харьковском политехническом институте [106], показали, что характеристики работы дизеля несколько ухудшаются: объемный эффективный расход топлива увеличивается на 6 %, а эффективный коэффициент полезного действия снижается на 2,5 %.

Таким образом, анализ рассмотренных данных показывает, что имеется необходимость широкого развития производства альтернативных топлив, в первую очередь из биологического сырья. Очевидно, одновременно будет развиваться производство различных видов биотоплива, что зависит от множества факторов и определяться состоянием ресурсов и ценой сырья, наличием производственных мощностей и оборудования, сложностью технологических процессов, ценой на нефтепродукты и т.д.

Изложенное позволяет сделать вывод, что смесевое биотопливо и МЭРМ являются перспективными топливами для дизелей, имеющими на данном этапе ряд преимуществ по сравнению с другими альтернативными топливами, в том числе изготавливаемыми из биологического сырья [107–116]. Для обеспечения рационального применения смесового биотоплива и МЭРМ в качестве топлива для дизеля следует изучить их свойства и особенности при осуществлении транспортных, складских и заправочных операций с перспективным моторным топливом.

Перспективным направлением развития производства биотоплива является использование в качестве сырья для него биомассы микроводорослей, которая как энергетическое сырье по своим характеристикам



превосходит другие сырьевые биоресурсы [116]. В работе рассмотрены вопросы совершенствования технологии получения биодобавок из энергонасыщенной биомассы высокой продуктивности, к которой относят штаммы микроводорослей, продуктивность которых по липидам в 100 раз превышает аналогичные показатели масляных культур.

### 1.6. Способы и средства подогрева вязких и застывающих жидкостей

В разделе 1.5 показана перспективность использования в качестве альтернативных топлив продуктов на основе рапсового масла (РМ), однако операции с ним требуют подогрева. Необходимость подогрева при операциях с РМ обусловлена высокой вязкостью этого продукта и приготовленных на его основе смесевых биотоплив.

В настоящее время в различных отраслях техники применяются разнообразные методы подогрева жидкостей. Классификация подогревательных устройств, принцип действия которых основывается на различных методах подогрева жидкостей, представлена на рис. 1.1 [117, 118].

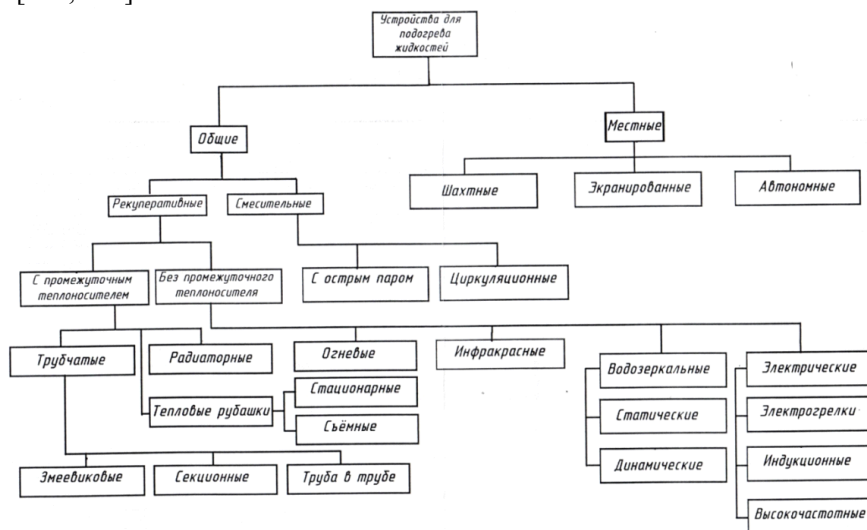


Рис. 1.1. Классификация подогревателей вязких и застывающих жидкостей

По характеру воздействия на нагреваемую жидкость эти методы делятся на общие (предназначенные для повышения температуры всей массы находящегося в емкости продукта) и локальные, или местные (предназначенные для повышения температуры сравнительно небольшой части находящегося в емкости продукта).

По способу переноса тепла методы подогрева делятся на рекуперативные или поверхностные (в которых тепло передается от греющей среды к нагреваемому продукту через твердую поверхность или границу раздела фаз) и смесительные (в которых теплообмен происходит при непосредственном контакте греющей среды и нагреваемого продукта).

Рекуперативные методы подогрева могут осуществляться с использованием промежуточного теплоносителя или без его применения.

Резервуары сравнительно небольшой вместимости могут оборудоваться наружной тепловой оболочкой (рубашкой нагрева), которая монтируется на обечайке резервуара и имеет с наружной стороны теплоизоляцию для сокращения тепловых потерь. Использование таких устройств связано со значительным удельным расходом теплоносителя, так как условия теплообмена у них хуже, чем у теплообменников, расположенных внутри резервуара.

Наряду со стационарными тепловыми рубашками для разогрева жидкости в резервуарах, не оборудованных подогревательными устройствами, можно применять эластичную тепловую оболочку из водонепроницаемой ткани, которая крепится на резервуаре с помощью системы ремней. Внутри оболочки расположены пароподводящие перфорированные трубы, отверстия которых направлены на нагреваемую поверхность. При этом пар полностью конденсируется на этой поверхности, что обеспечивает достаточно высокую интенсивность нагрева (рис. 1.2).

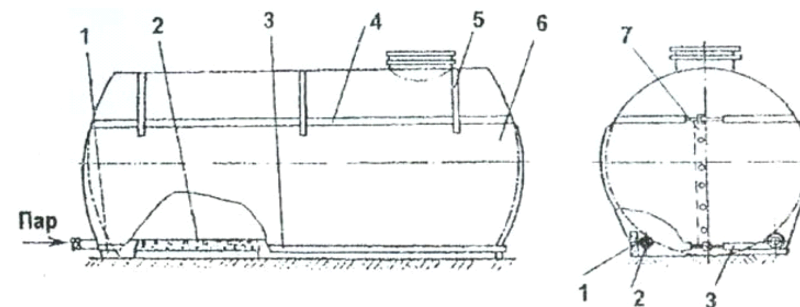


Рис. 1.2. Эластичная тепловая оболочка для подогрева масел в резервуаре:

1 – каркас; 2 – перфорированная труба; 3,4 – нижний и верхний стяжные ремни; 5 – поддерживающий ремень; 6 – оболочка; 7 – клапан

Преимуществами эластичной оболочки являются пригодность ее для быстрой установки на серийных горизонтальных резервуарах, не оборудованных внутренними подогревателями, и возможность последовательного подогрева с помощью одной оболочки нескольких резервуаров. Это значительно удешевляет операции по подогреву за

счет снижения капитальных затрат на оборудование резервуаров стационарными подогревателями и компенсирует более высокие тепловые потери при использовании эластичных оболочек [119].

В качестве теплоносителей для подогревателей поверхностного типа используются горячие газы (топочные и выхлопные), горячая вода, водяной пар, высокотемпературные органические теплоносители (термические жидкости).

Водяной пар является весьма эффективным теплоносителем, получившим наиболее широкое распространение вследствие ряда преимуществ, к которым относятся: легкость получения; высокое теплосодержание; большой коэффициент теплоотдачи; транспортабельность; постоянная температура подогрева, обеспечивающая простоту регулирования этого процесса; пожаробезопасность; экологичность.

Термические жидкости на основе органических, кремнийорганических, хлорсодержащих и других соединений обладают весьма высокими теплофизическими показателями, но имеют ряд недостатков: довольно высокая стоимость, токсичность и экологическая опасность в случае нарушения герметичности системы подогрева.

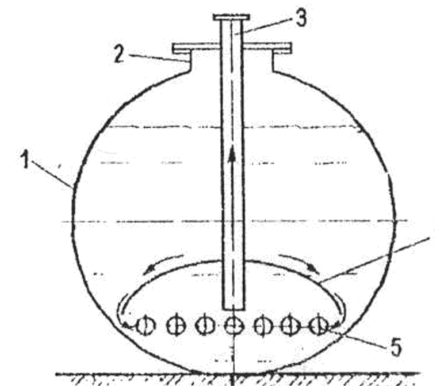
Общие подогреватели поверхностного типа, используемые без применения промежуточных теплоносителей, включает устройства для водозеркального, электрического и инфракрасного подогрева.

К местным подогревателям, обеспечивающим подогрев только части разогреваемой жидкости и предназначенным для ускорения выдачи жидкости из резервуара, относятся шахтные, экранированные и автономные подогреватели.

Наиболее простыми разновидностями шахтного подогревателя являются змеевики в виде цилиндрической спирали или пучки прямых труб, расположенные вокруг заборной трубы резервуара. Более совершенный – шахтный подогреватель, состоящий из теплоизолированного кожуха, внутри которого находится конец заборной трубы и подогревательной устройством в виде змеевика или пакетов прямолинейных труб.

Экранированные местные подогреватели состоят из трубчатого подогревателя секционного типа и расположенного над ним криволинейного экрана, изготовляемого из теплопроводных материалов, выпуклость которого направлена вверх. В подэкранном пространстве расположен конец заборной трубы. При подаче теплоносителя в трубчатый подогреватель жидкость в подэкранном пространстве разогревается и через заборную трубу выдается из резервуара, а застывший продукт, находящийся над экраном, приобретает текучесть и опускается по криволинейной поверхности экрана к зазорам между экраном

и нижней образующей поверхности резервуара, через которые поступает в подэкранное пространство (рис. 1.3) [117].



**Рис. 1.3. Схема горизонтального резервуара с экраном-отражателем:**  
1 – обечайка; 2 – горловина; 3 – раздаточная труба; 4 – экран-отражатель;  
5 – паровые подогреватели типа «труба в трубе»

Использование экрана, отделяющего зону подогрева от общего объема разогреваемого продукта, позволяет значительно сократить сроки начала выдачи продукта из резервуара и не требует крупных капиталовложений. В качестве материала для экрана может использоваться листовая алюминий.

Автономный местный подогреватель представляет собой теплообменный аппарат, вмонтированный в боковую стенку вертикального резервуара и обеспечивающий локальный подогрев продукта в районе заборного устройства этого резервуара.

Анализ способов подогрева различных жидкостей и применяемых для этой цели подогревательных устройств показывает, что для подогрева рапсового масла и, при необходимости, его смесей с дизельным топливом наиболее пригодны местные подогревательные устройства, обеспечивающие значительное сокращение продолжительности операций по подогреву продукта. Из местных подогревателей наиболее перспективным представляется экранированное устройство, простое по конструкции и хорошо адаптирующееся к горизонтальным резервуарам, широко применяемым в сельскохозяйственном производстве.

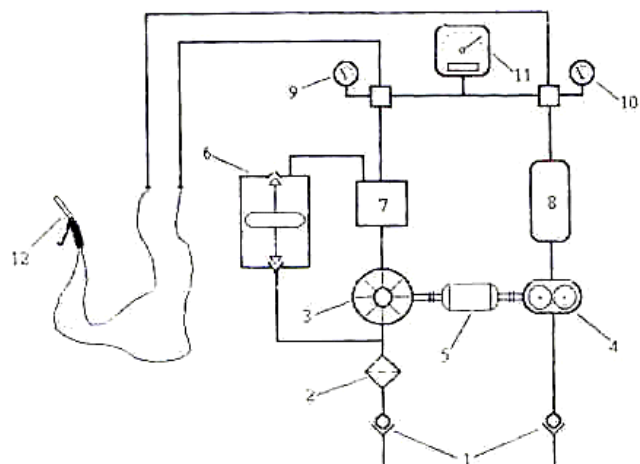
### **1.7. Оборудование для смешивания жидкостей и приготовления эмульсий**

Для приготовления смесового биотоплива на основе рапсового масла необходимо обеспечить эффективное смешение двух компонентов этого продукта – дизельного топлива и рапсового масла.

Устройства для приготовления эмульсий широко используется в химической промышленности и других отраслях экономики. На практике наибольшее распространение получило механическое перемешивание, осуществляемое путем использования лопастных, турбинных, пропеллерных и специальных мешалок [120–123], при помощи которых смесь заблаговременно готовится в отдельных емкостях и расходуются по мере необходимости.

Из всего разнообразия устройств для перемешивания жидкостей наибольшее распространение получили лопастные мешалки, они имеют довольно простое устройство и недороги в изготовлении. Разновидностью лопастных мешалок являются якорные мешалки, форма лопастей которых близка к внутренней форме емкости для смешивания, что обеспечивает устранение застойных зон в этой емкости.

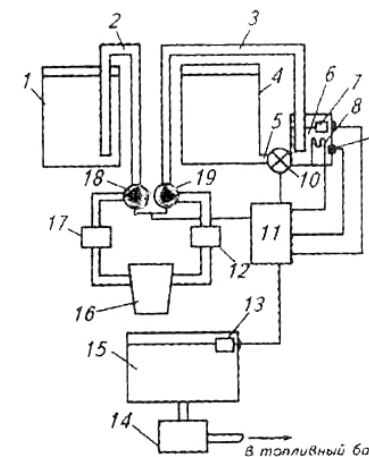
Смешивание жидкостей в устройствах, обеспечивающих выдачу потребителям двухкомпонентной смеси с заданным соотношением компонентов производится в смесераздаточных колонках, предназначенных для заправки двухтактных карбюраторных двигателей, не имеющих автономной масляной системы. Схема смесераздаточной колонки представлена на рис. 1.4 [124].



**Рис. 1.4. Принципиальная гидравлическая схема смесераздаточной колонки:**

- 1 – обратный клапан; 2 – фильтр; 3 – топливный насос; 4 – масляный насос;  
5 – электродвигатель; 6 – поплавковая камера; 7 – газоотделитель;  
8 – промежуточный резервуар; 9 – счетчик топлива; 10 – счетчик масла;  
11 – счетное устройство; 12 – раздаточный кран

Другим примером такого устройства, разработанного специально для получения смесового биотоплива из рапсового масла и дизельного топлива, служит устройство, представленное на рис. 1.5 [125].



**Рис. 1.5. Схема устройства для получения смесового биотоплива:**

- 1 – бак для ДТ; 2 – трубопровод для ДТ; 3 – трубопровод для РМ; 4 – бак для РМ;  
5 – патрубок; 6 – подогреваемая емкость; 7 – датчик уровня; 8 – нагревательное устройство; 9 – датчик температуры; 10 – запорный вентиль; 11 – блок управления;  
12 – дозатор РМ; 13 – датчик уровня биотоплива; 14 – топливораздаточная колонка; 15 – бак биотоплива; 16 – смеситель; 17 – дозатор ДТ; 18 – насос для ДТ; 19 – насос для РМ

Подобные устройства осуществляют приготовление смеси непосредственно перед заправкой техники, что предотвращает возможное расслоение биотоплива при достаточно продолжительном хранении, однако имеют довольно сложную конструкцию и требуют высокой степени точности дозирующего оборудования.

Аналогичных результатов можно добиться при перемешивании жидкостей с помощью соплового аппарата, соединенного с циркуляционным насосом. Струя жидкости, вытекающая из сопла, передает часть своей кинетической энергии прилегающим слоям жидкости, при перемешивании которых возникает зона разрежения и происходит подсасывание жидкости в эту часть пространства. Этот процесс протекает непрерывно и многократно, обеспечивая высокую степень перемешивания жидкости, после чего насос может быть переключен на выдачу смеси потребителю.

Рассмотрение различных способов приготовления жидких смесей показывает, что наиболее экономичным и достаточно эффективным способом приготовления смесового биотоплива является заблаговременное смешивание его компонентов с помощью механических мешалок и последующая выдача в топливные баки машин. Однако в литературе отсутствуют данные о стабильности полученного биотоп-

лива при достаточно продолжительном хранении в условиях как высоких, так и низких температур. Поэтому наряду с исследованием возможности приготовления и хранения смесового биотоплива на топливных складах сельскохозяйственных предприятий следует изучить возможность раздельного хранения рапсового масла и дизельного топлива, осуществляя приготовление биотоплива непосредственно перед заправкой техники.

## **Глава 2. ПОВЫШЕНИЕ ЧИСТОТЫ ТОПЛИВА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

### **2.1. Содержание и структура теоретических исследований**

В главе 1 на основании анализа факторов, влияющих на работоспособность и техническое состояние мобильной техники, показано, что к этим факторам относятся технические неисправности двигателя и химический состав нефтяных топлив, являющиеся причиной выбросов в атмосферу токсичных веществ. Показано, что одной из весомых причин указанных неисправностей является наличие в топливе загрязнений в виде механических частиц и микрокапель эмульсионной воды. Таким образом, снижение загрязненности нефтепродуктов, применяемых при эксплуатации мобильных машин, может существенно улучшить их техническое состояние и, следовательно, снизить отрицательное воздействие на окружающую среду. Однако существующие средства очистки не обеспечивают требуемого уровня чистоты нефтепродуктов. В то же время при использовании нефтяных топлив существенное загрязнение окружающей среды происходит даже при полностью исправном двигателе, что обусловлено химическим составом этих веществ.

Поэтому исследования по улучшению эксплуатационных свойств моторных топлив следует вести в двух направлениях:

- улучшение технического состояния мобильной техники путем снижения загрязненности применяемых при ее эксплуатации топлив;
- замещение нефтяных топлив альтернативными продуктами, не уступающими применяемым топливам по своим эксплуатационным характеристикам, но имеющим более высокие экологические показатели.

В свете реализации первого из указанных направлений в разделе 1.3 рассмотрены эксплуатационные свойства нового класса пористых полимерных материалов – ПГС-полимеров и сделан вывод о целесообразности исследований применимости этих материалов для изготовления фильтроэлементов вновь разрабатываемых эффективных технических средств очистки топлив. Для решения связанных с этим задач следует разработать математические модели взаимодействия ПГС-полимеров с содержащимися в очищаемом топливе загрязнениями – твердыми неорганическими частицами и микрокаплями эмульсионной воды, а также продуктами химических и физико-химических превращений нефтяных топлив, образующихся в результате их окисления, полимеризации, конденсации, пептизации и т.п. Необходимо также рассмотреть механизм регенерации фильтроэлементов из ПГС-полимеров после выработки ими ресурса работы для повторного использования их по назначению.

Для осуществления второго направления исследований в разделе 1.5 проанализированы литературные данные по применению альтернативных топлив при эксплуатации сельскохозяйственной техники и установлено, что для климатических условий нашей страны наиболее перспективными в этом плане являются биотоплива на основе рапсового масла – смесевое биотопливо и МЭРМ. Отмечается, что вопрос применения этих продуктов в качестве моторного топлива для тракторов и других самоходных сельскохозяйственных машин успешно решаются, однако специфические свойства этих продуктов выдвигают ряд требований к техническим средствам хранения, транспортирования и заправки. Эти вопросы требуют изучения.

Для обеспечения транспортно-складских и заправочных операций с биотопливами, учитывая их физико-химические свойства и технологию использования, необходимо теоретически обосновать способ подогрева РМ и предложить физическую модель этого процесса, исследовать механизм создания гомогенной эмульсии при приготовлении смесового биотоплива путем смешения РМ и ДТ, рассмотреть процесс обводнения МЭРМ, получить математические зависимости обводненности этого продукта от температуры и продолжительности хранения.

## 2.2. Очистка нефтяных топлив от механических загрязнений с использованием ПГС-полимеров

В разделе 1.3 указывалось, что фильтроэлементы, изготовленные из ПГС-полимера, могут иметь любую заранее заданную геометрическую форму, которая зависит от конфигурации, применяемой при синтезе этого материала пресс-формы. Наиболее широко распространены фильтроэлементы цилиндрической формы, которые хорошо сочетаются с цилиндрическими корпусами, применяемыми при проектировании и изготовлении технологического оборудования для очистки нефтепродуктов на объектах системы нефтепродуктообеспечения. Цилиндрическая форма корпуса выбирается из технологических соображений и прочностных требований. Поэтому при построении модели очистки нефтепродуктов от механических частиц методом фильтрования через фильтроэлемент из ПГС-полимера рассмотрим закономерности этого процесса применительно к полуму толстостенному вертикальному пористому цилиндру, очищаемый продукт к которому поступает снаружи.

Течение жидкости в цилиндрической пористой перегородке имеет отличия от аналогичного процесса в плоской перегородке, так как средняя скорость потока продукта (скорость фильтрования) изменяется в радиальном направлении и для каждого цилиндрического сечения зависит от радиуса этого сечения.

При построении модели течения жидкости через вертикальный цилиндрический фильтроэлемент принимаем ряд допущений:

- поток жидкости имеет ламинарный характер;
- жидкость является однородной по своим физическим свойствам, которые не изменяются на всем протяжении от наружной до внутренней поверхности фильтроэлемента;
- поток жидкости является одномерным, т.е. перемещается в радиальном направлении, а вертикальные и тангенциальные ее перемещения вдоль наружной стенки фильтроэлемента и внутри пористой перегородки отсутствуют;
- давление жидкости на наружную стенку фильтроэлемента одинаково по всей его высоте.

Расчетная схема приведена на рис. 2.1.

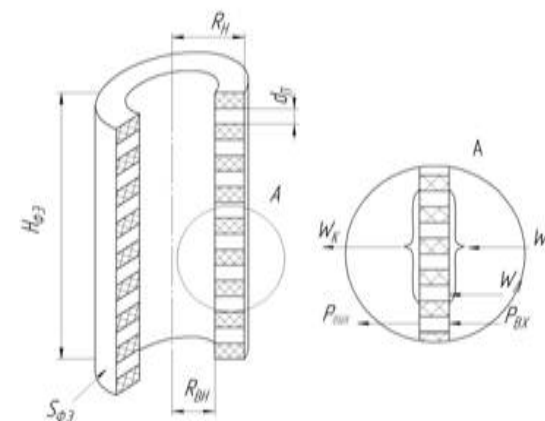


Рис. 2.1. Схема течения жидкости через цилиндрическую перегородку из ПГС-полимера, где  $R_{вн}$  и  $R_н$  – соответственно внутренний и наружный радиус цилиндрической перегородки, м;  $H_ф$  – высота, м;  $d_n$  – диаметр поры, м;  $W_н$  и  $W_к$  – соответственно начальная и конечная скорость потока (скорость фильтрования), м/с

При математическом описании процесса фильтрования потока жидкости через пористую перегородку следует использовать уравнение неразрывности потока, уравнение закона Дарси и учитывать граничные условия.

Уравнение неразрывности для радиального одномерного потока в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{dW_R}{dR} + \frac{W_R}{R} = 0, \quad (2.1)$$

где  $W_R$  – фиктивная скорость потока (скорость фильтрования), м/с, в цилиндрическом сечении радиуса  $R$ , м.

Уравнение Дарси в общем виде может быть представлено выражением:

$$q = K_{\Pi} \frac{\Delta P}{\mu H}, \quad (2.2)$$

где  $q = \frac{Q}{S}$  – удельная пропускная способность пористой перегородки,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $Q$  – пропускная способность фильтроэлемента,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S$  – площадь фильтроэлемента,  $\text{м}^2$ ;  $K_{\Pi}$  – коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta P$  – перепад давления на пористой перегородке, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость масла,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $H$  – толщина пористой перегородки, м.

Перейдя к цилиндрическим координатам и продифференцировав уравнение (2.2), имеем:

$$W_R = \frac{K_{\Pi}}{\mu} \frac{dP_R}{dR}, \quad (2.3)$$

где  $P_R$  – давление, Па, в цилиндрическом сечении радиуса  $R$ , м.

Радиальная скорость в каждом цилиндрическом сечении связана с радиусом этого сечения соотношением:

$$W_R = W_H \frac{R_H}{R}, \quad (2.4)$$

где  $W_H$  – фиктивная скорость потока (средняя скорость фильтрования) на наружной поверхности фильтроэлемента,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $R_H$  – наружный радиус фильтроэлемента, м.

Решая совместно уравнения (2.2) и (2.3), получим в дифференциальной форме зависимость давления потока жидкости от радиуса цилиндрического сечения, к которому приложено это давление [126]:

$$\frac{d^2 P_R}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dP_R}{dR} = 0 \quad (2.5)$$

или

$$\frac{d}{dR} \left( R \frac{dP_R}{dR} \right) = 0. \quad (2.5a)$$

Проинтегрировав это уравнение, получим:

$$P_R = c_1 \ln R + c_2, \quad (2.6)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные, определяемые из граничных условий:

- на наружной поверхности фильтроэлемента, т.е. при  $R = R_H$ ,  $P_R = P_{\text{вх}}$  – давление на входе в фильтроэлемент;
- на внутренней поверхности фильтроэлемента, т.е. при  $R = R_{\text{вн}}$ ,  $P_R = P_{\text{вых}}$  – давление на выходе из фильтроэлемента.

После подстановки этих граничных условий в уравнение (2.6), получим:

$$P_{\text{вх}} = c_1 \ln R_H + c_2;$$

$$P_{\text{вых}} = c_1 \ln R_{\text{вн}} + c_2.$$

$$\text{Откуда } c_1 = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{\ln \frac{R_H}{R_{\text{вн}}}} \text{ и } c_2 = P_{\text{вых}} - \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{\ln \frac{R_H}{R_{\text{вн}}}} \ln R_{\text{вн}}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (2.6), получим:

$$P_R = P_{\text{вых}} + \frac{\Delta P}{\ln \frac{R_H}{R_{\text{вн}}}} (\ln R - \ln R_{\text{вн}}), \quad (2.7)$$

где  $\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$  – перепад давления на фильтроэлементе, Па.

Путем совместного решения уравнений (2.3) и (2.7) получим значения скорости потока жидкости (скорости фильтрования) на входе в цилиндрический фильтроэлемент и на выходе из него:

$$W_H = \frac{K_{\Pi}}{\mu R_H} \frac{\Delta P}{\ln \frac{R_H}{R_{\text{вн}}}}; \quad (2.8)$$

$$W_{\text{вн}} = \frac{K_{\Pi}}{\mu R_{\text{вн}}} \frac{\Delta P}{\ln \frac{R_H}{R_{\text{вн}}}}. \quad (2.9)$$

Выражения (2.7)–(2.9) справедливы при условии, что соблюдается допущение об однородности фильтруемой жидкости во всей исследуемой области. Нефтепродукты являются суспензиями, содержащими наряду с жидкой фазой твердые частицы, которые по мере прохождения продукта через пористую перегородку будут задерживаться в порах, что вызовет изменения значений параметров, определяемых с помощью выражений (2.7)–(2.9). Период, за который значение перепада давления на фильтроэлементе достигнет максимально допустимой величины или значение скорости фильтрования – минимально допустимой величины, является ресурсом работы фильтроэлемента, выраженным в единицах времени.

Процесс фильтрования суспензии, содержащей твердые частицы, может протекать при постоянном перепаде давления на фильтроэлементе или при постоянной скорости фильтрования, а также при переменном перепаде давления и скорости фильтрования. Соответственно будут иметь место зависимости:

$$W = f(\tau) \text{ при } \Delta P = \text{const}; \quad (2.10)$$

$$\Delta P = f(\tau) \text{ при } W = \text{const}; \quad (2.11)$$

$$W = f(\tau), \Delta P = \psi(\tau) \quad (2.12)$$

Если нефтепродукты перекачиваются насосами объемного типа, что имеет место при перекачке масел шестеренными и винтовыми насосами или при перекачке топлив пластинчатыми насосами топливораздаточных колонок при заправочных операциях, то процесс фильтрации протекает при постоянной фиктивной скорости потока продукта в каждом сечении фильтроэлемента согласно выражению (2.11). Хотя при использовании для перекачки нефтепродуктов лопастных (центробежных и вихревых) насосов, которые повсеместно применяются при сливо-наливных операциях и внутрискладских перекачках топлив процесс фильтрации осуществляется при переменных фиктивной скорости и перепаде давления согласно выражению (2.12), в этом случае нормальным считается уменьшение подачи топлива не более 10–15 % за время достижения допустимого перепада давления на фильтре, поэтому с некоторым допущением можно считать, что и в этом случае процесс фильтрации протекает при постоянной скорости в соответствии с выражением (2.11).

Выражение (2.11) можно преобразовать к виду:

$$\Delta P = f(V_{уд}) \text{ при } W = \text{const}, \quad (2.13)$$

где  $V_{уд} = \frac{V_m}{S}$  – удельный объем продукта,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;  $V_m$  – объем продукта,  $\text{м}^3$ , прошедший через фильтроэлемент за промежуток времени  $\tau$ , с.

В этом случае ресурс работы фильтроэлемента выражается в единицах объема отфильтрованного продукта.

Конкретный вид зависимостей (2.11) и (2.13) определяется характером взаимодействия частиц загрязнений и пористой перегородки, от которого зависит механизм удаления указанных частиц из нефтепродукта при фильтрации. Известны четыре основных вида такого взаимодействия [127]:

- фильтрация с полным закупориванием пор частицами загрязнений, размеры которых больше диаметра пор или равны ему;
- фильтрация с частичным закупориванием пор частицами загрязнений, имеющими размеры меньше диаметра пор и отлагающимися на внутренних поверхностях стенок пор;
- фильтрация промежуточного вида с образованием над входом в поры сводиков из частиц, имеющих размеры меньшие, равные или большие диаметра пор;
- фильтрация с образованием осадка на поверхности фильтрующего материала из частиц, имеющих размеры меньшие, равные или большие диаметра пор.

Вследствие полидисперсности содержащихся в рабочей жидкости загрязнений эти процессы могут происходить по двум или не-

скольким из перечисленных видов. Ввиду того, что в топливах и маслах загрязнения присутствуют в сравнительно небольших количествах, т.е. эти жидкости являются малоконцентрированными суспензиями, можно считать, что взаимодействие содержащихся в них частиц загрязнений с порами фильтрационного материала происходит по первым двум видам – с полным или частичным закупориванием пор, а образование сводиков и отложение осадка, характерные для высококонцентрированных суспензий, можно исключить из рассмотрения.

Основную роль в процессе этого взаимодействия играют гранулометрический состав загрязнений и поровая структура фильтрующего материала.

Гранулометрический состав загрязнений можно описать функцией распределения частиц по размерам. В работе [128] предложена однопараметрическая функция определения частиц загрязнений по размерам, которая адекватна логарифмически-нормальному распределению, но имеет более простую математическую форму; эта функция в интегральном виде описывается выражением:

$$F(d_q) = 1 - (1 + ad_q)e^{-ad_q}, \quad (2.14)$$

а в дифференциальном виде – выражением:

$$f(d_q) = \frac{dF(d_q)}{d(d_q)} = ad_q e^{-ad_q}, \quad (2.15)$$

где  $d_q$  – размер частиц,  $\text{мкм}$ ;  $a = \frac{1,679}{d_{q0,5}}$  – параметр счетного распре-

деления частиц по размерам;  $d_{q0,5}$  – медиана счетного распределения частиц по размерам,  $\text{мкм}$ .

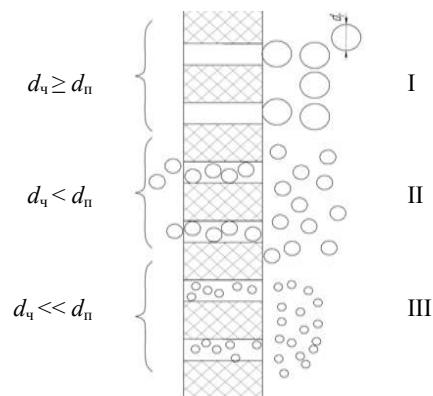
Эти зависимости можно использовать при нахождении закономерностей процесса фильтрации твердых частиц загрязнений через пористую перегородку.

Известно [129], что пористые материалы типа ПГС-полимеров имеют довольно узкий диапазон распределения пор по размерам (отклонения составляют не более  $\pm 10\%$  от номинального значения), поэтому при определении ресурса работы этих материалов можно принять допущения, что поры распределены по сечению материала равномерно, размеры всех пор материала (длина и диаметр) равны между собой, т.е. его структура является однородной, а диаметр пор не изменяется по толщине материала.

В связи с этим твердые загрязнения в нефтепродукте будем рассматривать как полидисперсную систему, состоящую из частиц, размер которых колеблется в широком диапазоне, а фильтрующий материал – как однородную пористую структуру с фиксированным разме-



ром пор. Следовательно, влияние твердых частиц загрязнений на гидравлические и ресурсные свойства фильтрующего материала зависят от размеров этих частиц, все многообразие которых с достаточной степенью достоверности можно разделить на три группы, как показано на рис. 2.2.



**Рис. 2.2. Схема взаимодействия частиц загрязнений с пористой перегородкой:**

I – частицы с размерами, превышающими размер пор или равными ему ( $d_q \geq d_n$ );  
II – частицы с размерами, меньшими размера пор ( $d_q < d_n$ ); III – частицы с размерами, значительно меньшими размера пор ( $d_q \ll d_n$ )

Можно считать, что частицы загрязнений первой группы задерживаются фильтрующим материалом по механизму простого отсеивания, когда одна частица полностью закупоривает одну пору. Частицы загрязнений второй группы, механизм задержки которых носит более сложный характер, оседают внутри пор, частично перекрывая их живое сечение. Будем считать, что частицы третьей группы практически не задерживаются в порах фильтрующего материала ввиду их крайне малых размеров, поэтому их влиянием на гидравлические и ресурсные свойства материала можно пренебречь.

С учетом сделанных допущений суммарный эффект задержки частиц загрязнений фильтрующим материалом представляет собой в общем случае совокупность эффектов полного закупоривания пор частицами (механизм отсеивания) и задержки частиц внутри пор (механизм частичного закупоривания пор). В первом случае имеют место зависимости:

$$N = f(\tau); d_n = \text{const}, \quad (2.16)$$

а во втором – зависимости:

$$N = \text{const}; d_n = f(\tau) \quad (2.17)$$

где  $N$  – количество открытых пор фильтрующего материала на единицу его поверхности в момент времени  $\tau$ , шт./м<sup>2</sup>.

Нахождение суммарного влияния двух параллельно осуществляемых механизмов задержки частиц загрязнений на процесс фильтрования вызывает значительные трудности, которые можно исключить, если рассмотреть специфику технологических операций при очистке нефтепродуктов на объектах системы нефтепродуктообеспечения. Поступающие на нефтесклад или заправочный пункт топлива и масла в обязательном порядке фильтруются через фильтр предварительной очистки, в котором задерживаются наиболее крупные частицы. Выбрав тонкость предварительной очистки продукта таким образом, чтобы частицы загрязнений, размеры которых превышают размер пор фильтроэлемента из ПГС-полимера или соизмеримы с этим размером, задерживались фильтром предварительной очистки, можно сделать допущение, что в процессе очистки топлива и масла полное закупоривание пор фильтроэлемента из ПГС-полимера не происходит, а наблюдается только постепенное закупоривание пор частицами загрязнений, размер которых меньше размера пор фильтроэлемента.

При движении через пористую перегородку частиц, размер которых меньше размера ее пор, на эти частицы действуют различные силы, в результате чего проявляются механические и физико-химические эффекты: захват (зацепление) частицы глобулами материала; инерционное столкновение частицы со стенками пор, вызванное кривизной линии тока; гравитационное осаждение частицы; диффузия частицы в результате броуновского движения; адгезия частицы к стенкам пор; электростатическое взаимодействие частицы со стенками пор и т.п. Ввиду сложности анализа этих явлений процесс фильтрования нефтепродукта через пористую перегородку целесообразно рассматривать, как вероятностный, определяемый соотношением размеров твердых частиц загрязнений и пор фильтрующего материала.

Коэффициент отфильтровывания частиц  $i$ -го размера для случая, когда все поры фильтрующего материала имеют одинаковый размер, может быть определен при использовании вероятностной формулы:

$$\varphi_i = 1 - \frac{n_i}{N} P_{(i)}, \quad (2.18)$$

где  $\varphi_i = \frac{n_{i0} - n_{i\phi}}{n_{i0}}$  – коэффициент отфильтровывания частиц  $i$ -го размера;

$n_{i0}$  и  $n_{i\phi}$  – количество частиц загрязнений  $i$ -го размера соответственно до и после фильтроэлемента, шт.;  $P_{(i)}$  – вероятность прохода частиц  $i$ -го размера через поры фильтроэлемента.

Вероятностная оценка эффекта задержки частиц загрязнений пористой перегородкой производится на основании вероятности прохода



частиц через пору, которая принимается в зависимости от соотношения размеров поры и частицы (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Вероятность прохода частиц через пору**

Соотношение размеров поры и частицы, $\frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{п}}}$	$> \frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$< \frac{1}{3}$
Вероятность прохода частиц $i$ -го размера через пору, $P_{(i)}$	0	0,75	1

В работе [130] показано, что коэффициенты отфильтровывания удовлетворительно аппроксимируются логарифмически нормальным распределением, и после ряда математических преобразований получена зависимость:

$$\varphi_i = \Phi \left( \frac{\lg d_{\text{чи}} - \lg d_{\text{п}}}{\lg \beta} \right); \quad (2.19)$$

где  $\Phi \left( \frac{\lg d_{\text{чи}} - \lg d_{\text{п}}}{\lg \beta} \right)$  – табулированная функция;  $\lg \beta$  – параметр распределения.

Выражение (2.19) позволяет определить коэффициент отфильтровывания любой фракции частиц загрязнений размером  $d_{\text{чи}}$  при известном значении параметра  $\lg d_{\text{п}}$ . Для определения параметра распределения  $\lg \beta$  найдено корреляционное уравнение [130].

$$\lg \beta = 0,5018 - 0,18951 \lg d_{\text{п}} \quad (2.20)$$

Подставив это значение в формулу (2.19), полагая  $\varphi_i = 0,95$  и найдя табличное значение для функции  $\Phi$ , имеем:

$$\frac{\lg d_{\text{п}} - \lg d_{\text{п}}}{0,959 - 0,344 \lg d_{\text{п}}} = 1,65, \quad (2.21)$$

откуда  $d_{\text{п}} = 0,144 d_{\text{п}}^{1,253}$ ,

где  $d_{\text{п}}$  – номинальная толщина фильтрования пористого материала, мкм.

Для определения ресурса работы фильтроэлемента рассмотрим изменение величин перепада давления на пористой перегородке, связанное с постепенным закупориванием ее пор частицами загрязнений.

Как указывалось выше, полагаем, что процесс очистки нефтепродукта происходит при постоянной подаче насоса, и, следовательно, при постоянной скорости продукта. Следует найти истинную (поровую) скорость потока продукта, т.е. его скорость в порах фильтроэлемента. В соответствии со сделанными допущениями поры имеют одинаковый постоянный диаметр, и распределены в каждом сечении материала равномерно. Тогда поровая скорость, в отличие от фиктивной скорости, не будет изменяться по толщине пористой перегородки и

будет связана с фиктивной скоростью на входе в фильтрующий элемент отношением:

$$W_{\text{п}} = \frac{W_{\text{н}}}{\Pi'}, \quad (2.22)$$

где  $\Pi' = \frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{фэ}}}$  – просветность пористой перегородки,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{фэ}}$  – площадь поверхности фильтроэлемента,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{п}}$  – площадь поперечного сечения всех сквозных пор фильтроэлемента,  $\text{м}^2$ .

Подставив в это выражение значение скорости на входе в фильтроэлемент из формулы (2.8), получим:

$$W_{\text{п}} = \frac{K_{\text{п}} \Delta P}{\mu R_{\text{п}} \Pi' \ln \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вн}}}}, \quad (2.23)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ .

Для пористых перегородок, имеющих поры одинакового размера и формы, определение коэффициента проницаемости может производиться по формулам [131]:

$$K_{\text{п}} = \frac{d_{\text{ш}}^2 (\Pi')^2}{96(1 - \Pi')} \quad (2.24a)$$

или

$$K_{\text{п}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^4 N}{128}, \quad (2.24b)$$

где  $d_{\text{ш}}$  – диаметр сферической частицы, м;  $d_{\text{п}}$  – диаметр поры, м;  $N$  – количество пор на единицу поверхности, шт./ $\text{м}^2$ ;  $\Pi = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{фэ}}}$  – пористость

перегородки;  $V_{\text{п}}$  – объем пор,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{фэ}}$  – объем фильтроэлемента,  $\text{м}^3$ .

Поскольку в пористой перегородке, изготовленной из ПГС-полимера, определить прямыми измерениями размер составляющих ее сферических частиц (глобул) не представляется возможным, воспользуемся формулой (2.24б), что при сделанных нами допущениях вполне правомерно. Тогда

$$W_{\text{п}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^4 N \Delta P}{128 \mu \Pi' R_{\text{п}} \ln \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вн}}}}, \quad (2.25)$$

Выразим величину просветности перегородки через размер пор и их количество на единицу поверхности:

$$\Pi' = \frac{\pi}{4} d_{\text{п}}^2 N$$

и, подставив это значение в выражение (2.25), получим:

$$W_{\Pi} = \frac{d_{\Pi}^2 \Delta P}{256 \mu R_{\Pi} \ln \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вн}}}}. \quad (2.26)$$

В процессе фильтрования происходит постепенное закупоривание пор фильтроэлемента и возрастание перепада давления на нем до некоторого критического значения, которое и определяет ресурс работы фильтроэлемента. В начальный период:

$$d_{\Pi} = \left( \frac{256 \mu W_{\Pi} R_{\Pi} \ln \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вн}}}}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.27)$$

Соответственно после выработки ресурса фильтроэлементом:

$$d_{\text{Пкр}} = \left( \frac{256 \mu W_{\Pi} R_{\Pi} \ln \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вн}}}}{\Delta P_{\text{пред}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.28)$$

где  $\Delta P_{\text{пред}}$  – предельно допустимая величина перепада давления на фильтроэлементе, Па.

Объем отложившихся в поре загрязнений:

$$\begin{aligned} V_{\text{отл}} &= \frac{\pi d_{\text{Пкр}}^2}{4} (R_{\Pi} - R_{\text{вн}}) - \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} (R_{\Pi} - R_{\text{вн}}) = \\ &= 68 \mu W_{\Pi} R_{\Pi} (R_{\Pi} - R_{\text{вн}}) \ln \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вн}}} \left( \frac{1}{\Delta P_{\text{пред}}} - \frac{1}{\Delta P} \right); \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$V_{\text{отл}} = V_{\text{м}} \chi_{\text{отл}}, \quad (2.30)$$

где  $V_{\text{м}}$  – объем нефтепродукта, прошедший через пору, м<sup>3</sup>;  $\chi_{\text{отл}} = \chi_{\text{вх}} - \chi_{\text{вых}}$  – отношение объема отложений к объему отфильтрованного нефтепродукта;  $\chi_{\text{вх}}$  и  $\chi_{\text{вых}}$  – относительное объемное содержание загрязнений в продукте на входе в фильтроэлемент и на выходе из него.

Обозначив постоянную для данного процесса очистки величину

$$C = 68 \mu W_{\Pi} R_{\Pi} (R_{\Pi} - R_{\text{вн}}) \ln \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вн}}}$$

и решив совместно уравнения (2.29) и (2.30) относительно  $\Delta P_{\text{пред}}$ , имеем:

$$\Delta P_{\text{пред}} = \frac{\Delta P C}{C + V_{\text{м}} \chi_{\text{отл}} \Delta P}. \quad (2.31)$$

В случае если предельно допустимый перепад давления на фильтроэлементе задан, можно определить ресурс работы данного элемента, как количество очищенного продукта, решив выражение (2.31) относительно  $V_{\text{ж}}$ :

$$V_{\text{ж}} = \left( \frac{1}{\Delta P_{\text{пред}}} - \frac{1}{\Delta P} \right) \frac{C}{\chi_{\text{отл}}} \quad (2.32)$$

или, подставив  $V_{\text{ж}} = Q\tau$ , определить ресурс работы в единицах времени:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_{\text{м}}} 100, \quad (2.33)$$

где  $Q$  – пропускная способность фильтроэлемента, м<sup>3</sup>/с.

Все величины, входящие в выражения (2.31)–(2.33), могут быть найдены расчетным или экспериментальным путем.

По полученным зависимостям можно оценить основные параметры, характеризующие эффективность очистки нефтепродуктов от твердых частиц загрязнений с помощью ПГС-полимеров. Это дает возможность выбора фильтрующего материала с заданным размером пор, являющегося основной структурной характеристикой пористой перегородки, и определения ресурсных показателей этой перегородки.

Для нахождения закономерностей фильтрования нефтепродуктов через цилиндрические фильтроэлементы из полимерных материалов с пористой глобулярной структурой. Рассмотрим процесс фильтрования топлив и масел через пористую перегородку толщиной  $\delta$ , однородную по размерам пор. Начальная концентрация твердых загрязнений в суспензии равна  $c_{\Pi}$ , начальная пористость перегородки  $\Pi_{\Pi}$ , начальный коэффициент проницаемости  $K_{\Pi\Pi}$ . Движение через перегородку нефтепродуктов с динамической вязкостью  $\mu$  описывается уравнением Дарси согласно формуле (2.2). Для фильтрационного материала, имеющего поры одинакового размера и формы, входящий в уравнение Дарси коэффициент проницаемости может быть найден по уравнению (2.24б).

В процессе фильтрования в порах фильтрационного материала происходит задержка частиц загрязнений, что приводит к изменению концентрации загрязнений в потоке нефтепродукта и к увеличению их количества в единице объема порового пространства фильтрационного материала. Увеличение количества загрязнений в пористой перегородке приводит к уменьшению порового пространства и соответственно к уменьшению проницаемости фильтрационного материала.

Для определения ресурса работы фильтроэлемента необходимо найти закономерности изменения концентрации загрязнений в потоке жидкости, изменения количества задержанных пористой перегород-

кой загрязнений и изменения параметров гидродинамической характеристики этой перегородки в зависимости от продолжительности процесса фильтрации. Математически искомые закономерности должны описываться уравнением материального баланса, кинетики и гидродинамики этого процесса.

Такие закономерности предложены в работе [132], однако описывающие их уравнения получены для случая фильтрации жидкости через плоскую тонкостенную перегородку. Для фильтрации нефтепродуктов в сфере сельскохозяйственного производства предлагается использовать в качестве первой ступени фильтроэлементы, имеющие пористую перегородку в виде полого толстостенного цилиндра, что требует учета специфических особенностей процесса, протекающего в цилиндрических координатах.

Течения жидкости через цилиндрическую перегородку при отсутствии загрязнений описывается уравнениями (2.8) и (2.9). Эти выражения, как и послужившее их основой уравнение Дарси, справедливы при условии, что жидкость является однородной, однако нефтепродукты являются суспензиями, содержащими наряду с жидкой фазой твердые частицы загрязнений, концентрация которых изменяется, что может быть описано уравнением материального баланса.

Для вывода уравнения материального баланса будем считать, что в любой момент времени градиент концентрации загрязнений по толщине пористой перегородки пропорционален их количеству, проходящему через единицу поверхности цилиндрического сечения перегородки в единицу времени:

$$\left(\frac{dc}{dR}\right)_\tau = -\alpha g_R = -\alpha W_R c, \quad (2.34)$$

где  $g_R$  – элементарное количество загрязнений, проходящее через единицу поверхности сечения перегородки (цилиндра с радиусом  $R$ ) в единицу времени, г/м<sup>2</sup>с;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, 1/м<sup>2</sup>;  $W_R$  – фиктивная скорость потока жидкости в цилиндрическом сечении с радиусом  $R$ , м/с.

Знак « $\leftarrow$ » в выражении (2.34) означает, что векторы  $W = \frac{100V_O M}{NV_{OM} m_M}$  и  $V_O = V_t \frac{P_a - P_\Pi}{(1 - \alpha T) P_O}$  имеют противоположные направления.

Количество загрязнений, которое войдет в элементарный объем цилиндрического фильтроэлемента  $dV_{\phi(R)}$ , будет равно:

$$dG_{3(R)} = g_R 2\pi R dh d\tau, \quad (2.35)$$

а количество загрязнений, которое выйдет из рассматриваемого объема, будет равно:

$$dG_{3(R-dR)} = g_{(R-dR)} 2\pi(R-dR) dh d\tau, \quad (2.36)$$

где  $dV_{\phi(R)} = \pi dh dR (2R - dR)$  – элементарный объем фильтроэлемента с наружным радиусом  $R$ , м<sup>3</sup>;  $dh$  – высота элементарного объема, м;  $dR$  – толщина элементарного объема, м.

Соответственно количество загрязнений, задержанных в рассматриваемом элементарном объеме, будет равно:

$$dG_3 = dG_{3(R)} - dG_{(R-dR)} = 2\pi dh d\tau (g_{(R)} - g_{(R-dR)}) dR. \quad (2.37)$$

Разложив функцию  $g_{(R-dR)}$  в ряд Тейлора и ограничившись двумя членами этого ряда, получим выражение:

$$X = \frac{(m_2 - m_1) 100}{V}. \quad (2.38)$$

После подстановки полученного значения (2.38) в выражение (2.37) получим:

$$dG_3 = -\frac{\partial g_{(R)}}{\partial R} dR 2\pi dh d\tau = -\frac{\partial g_{(R)}}{\partial R} dV_\phi d\tau. \quad (2.39)$$

Определим соотношение между количеством загрязнений, задержанных в элементарном объеме фильтроэлемента, и их количеством в единице объема этого фильтроэлемента:

$$dG_3 = \left(\frac{\partial m_3}{\partial \tau}\right)_\tau dV_\phi d\tau, \quad (2.40)$$

где  $m_3$  – количество загрязнений, задержанных в единице объема пористой перегородки за время  $\tau$ , г/м<sup>3</sup>.

Тогда уравнение материального баланса можно представить:

$$\frac{\partial m_3}{\partial \tau} = -\frac{1}{\alpha} \left(\frac{d^2 c}{dR^2}\right)_\tau. \quad (2.41)$$

Продифференцировав уравнение (2.34) и подставив полученный результат в выражение (2.39), получим:

$$\frac{\partial m_3}{\partial \tau} = -W_{\text{вх}} \left(\frac{\partial c}{\partial R}\right). \quad (2.42)$$

Отсюда количество загрязнений, задержанных за время за время  $\tau$ , в единице объема пористой перегородки, будет равно

$$m_3 = \frac{\partial}{\partial R} \left( \int_0^\tau W_{\text{вх}} c d\tau \right). \quad (2.43)$$

При нахождении закономерностей, описывающих кинетику процесса фильтрации через пористую цилиндрическую перегородку,

воспользуемся допущениями, сделанными ранее. Тогда поровая скорость жидкости не будет зависеть от формы фильтроэлемента, в отличие от фиктивной скорости потока, которая будет увеличиваться от значения  $W_{вх}$ , определяемого по формуле (2.8) до значения  $W_{вых}$ , определяемого по формуле (2.9).

При постепенном закупоривании пор фильтроэлемента количество загрязнений, задержанных в единице объема порового пространства, и концентрация загрязнений в потоке нефтепродукта изменяется во времени.

Распределение концентрации загрязнений в потоке и количества задержанных загрязнений в единице объема пористой перегородки в любой момент времени описывается уравнениями (2.34) и (2.43). Из этих выражений следует, что градиент концентрации загрязнений в потоке рабочей жидкости и количество задержанных загрязнений в поровом пространстве фильтроэлемента пропорциональны самим этим величинам. Общий коэффициент пропорциональности после интегрирования уравнения (2.8) можно представить в виде:

$$\beta = \alpha W_{\phi} = - \frac{\ln \frac{c_{вх}}{c_{вых}}}{R_{н} - R_{вн}}, \quad (2.44)$$

где  $c_{вх}$  и  $c_{вых}$  – концентрация загрязнений в потоке соответственно на входе в фильтроэлемент и на выходе из него, г/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент кинетики фильтрования;  $W_{\phi} = \frac{W_{вх} + W_{вых}}{2}$  – средняя фиктивная скорость потока жидкости в пористой перегородке, м/с.

Подставим в выражение (2.44) значение коэффициента полноты фильтрования:

$$\beta = - \frac{\ln(1 - \phi)}{R_{н} - R_{вн}}, \quad (2.45)$$

где  $\phi = - \frac{c_{вх} - c_{вых}}{c_{вх}}$  – коэффициент полноты фильтрования.

Уравнения, описывающие кинетику задержки загрязнений в пористой перегородке при фильтровании жидкости, будут иметь вид:

$$\left( \frac{\partial c}{\partial R} \right)_{\tau} = -\beta c; \quad (2.46)$$

$$\left( \frac{\partial m_3}{\partial R} \right)_{\tau} = -\beta m_3. \quad (2.47)$$

В начальный период процесса фильтрования коэффициент кинетики этого процесса можно определить по начальному значению коэффициента полноты фильтрования:

$$\beta_0 = - \frac{\ln(1 - \phi_0)}{R_{н} - R_{вн}}. \quad (2.48)$$

В процессе фильтрования происходит заполнение порового пространства фильтроэлемента частицами загрязнений, сопровождающееся уменьшением просветности пористой перегородки, что приводит к увеличению поровой скорости, которая связана с просветностью соотношением:

$$W_{п} = \frac{W_{\phi}}{\Pi'}, \text{ при } \Pi' = f(\tau), \quad (2.49)$$

где  $\Pi' = \frac{S_{п}}{S_{\phi\phi}}$  – просветность пористого материала;  $S_{п}$  – площадь поперечного сечения пор фильтрационного материала, м<sup>2</sup>;  $S_{\phi\phi} = 2\pi R_{\phi} h$  – площадь рабочей поверхности цилиндрического фильтроэлемента, м<sup>2</sup>;  $h$  – высота фильтроэлемента, м.

С увеличением поровой скорости уменьшается вероятность задержки частиц загрязнений в порах. При достижении поровой скоростью критического значения количество загрязнений, задержанных в поровом пространстве, будет соответствовать полному насыщению порового пространства, и задержка в нем загрязнений прекращается. Критическую поровую скорость можно определить, если рассматривать задержку частиц в порах, как следствие воздействия сил адгезии. Силы адгезии зависят от природы контактирующих тел, межмолекулярных и электрических взаимодействий, капиллярных эффектов и других факторов.

В настоящее время отсутствуют теоретические положения, на основании которых можно определить силу адгезии частиц загрязнений в порах фильтроэлемента, а экспериментальные исследования этого процесса затруднены вследствие многообразия влияющих на него факторов. Данные, полученные при таких исследованиях, неоднозначны и не дают достаточно достоверных результатов. Однако можно с достаточной степенью достоверности рассматривать задержку частиц загрязнений в порах фильтроэлемента, как следствие воздействия сил адгезии, зависящих от поверхностного натяжения жидкости и диаметра частиц загрязнений.

Сила, удерживающая частицу в поре, равна:

$$F_{\sigma} = \pi \sigma d_{\phi}, \quad (2.50)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение рабочей жидкости, Н/м.

Считаем, что сила воздействия потока жидкости на частицу подчиняется закону Стокса и равна:

$$F_{\mu} = 3\pi\mu d_{\text{ч}} W_{\text{пкр}}, \quad (2.51)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость рабочей жидкости, Н·с/м<sup>2</sup>;  $W_{\text{пкр}}$  – критическая поровая скорость, м/с.

Вынос частиц из порового пространства начнется при равенстве воздействующих на эти частицы сил, значения которых получены из выражений (2.50) и (2.51), т.е.

$$\pi\sigma d_{\text{ч}} = 3\pi\mu d_{\text{ч}} W_{\text{пкр}},$$

откуда

$$W_{\text{пкр}} = \frac{\sigma}{3\mu}. \quad (2.52)$$

Уменьшение просветности пористой перегородки до критической величины за счет отложения в порах частиц загрязнений может быть выражено через максимальный объем задержанных загрязнений, который будет равен

$$V_{\text{загр max}} = (S_{\text{п}} - S_{\text{пкр}})(R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}) = (\Pi' - \Pi'_{\text{кр}})(R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})S_{\text{фэ}}, \quad (2.53)$$

где  $\Pi'_{\text{кр}} = \frac{S_{\text{пкр}}}{S_{\text{фэ}}}$  – критическая величина просветности, при которой

происходит вынос частиц из порового пространства;  $S_{\text{пкр}} = \frac{\pi d_{\text{пкр}}^2}{4} n$  – критическая площадь поперечного сечения пор, при которой происходит вынос частиц, м<sup>2</sup>;  $n$  – количество пор на рабочей поверхности фильтроэлемента, шт.

Отнеся количество пор к единице рабочей поверхности фильтроэлемента и умножив максимальный объем задержанных в поровом пространстве загрязнений на их среднюю плотность, получим зависимость между удельной грязеемкостью фильтроэлемента и его просветностью:

$$m_{\text{з max}} = \frac{\pi n_{\text{уд}} \rho_{\text{з}}}{4} (d_{\text{п}}^2 - d_{\text{пкр}}^2) (R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}) = (\Pi' - \Pi'_{\text{кр}}) (R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}) \rho_{\text{з}}, \quad (2.54)$$

где  $n_{\text{уд}} = \frac{n}{S_{\text{фэ}}}$  – количество пор на единице рабочей поверхности

фильтроэлемента, шт./м<sup>2</sup>;  $n$  – количество пор на всей рабочей поверхности фильтроэлемента, шт.;  $\rho_{\text{з}}$  – средняя плотность загрязнений, г/м<sup>3</sup>.

Совместным решением уравнений (2.43) и (2.54) можно определить ресурс работы фильтроэлемента, т.е. продолжительность его работы до начала выноса частиц загрязнений.

Для описания гидродинамических процессов при фильтровании рабочей жидкости через пористую перегородку воспользуемся уравнением Дарси, связывающим перепад давления на перегородке со скоростью фильтрования, представив его в виде

$$\frac{dP}{dR} = \frac{\mu W_{\text{ф}}}{K_{\text{п}}}. \quad (2.55)$$

Коэффициент проницаемости перегородки  $K_{\text{п}}$  в этом выражении зависит от степени заполнения пор загрязнениями.

Для нахождения взаимосвязи между коэффициентом проницаемости и изменением объема пористого пространства перегородки выразим коэффициент проницаемости через гидравлический радиус

$$K_{\text{п}} = \frac{\Pi r_{\text{г}}^2}{k}, \quad (2.56)$$

где  $r_{\text{г}} = \frac{V_{\text{п}}}{S_{\text{вн п}}}$  – гидравлический радиус, м;  $V_{\text{п}}$  и  $S_{\text{вн п}}$  – соответственно внутренний объем пор, м<sup>3</sup>, и их внутренняя поверхность, м<sup>2</sup>;  $k$  – постоянная Козени, зависящая от геометрии порового пространства.

Выразим гидравлический радиус через удельную внутреннюю поверхность пор

$$r_{\text{г}} = \frac{\Pi^3}{k S_{\text{уд п}}^2},$$

тогда

$$K_{\text{п}} = \frac{\Pi}{k S_{\text{уд п}}}, \quad (2.57)$$

где  $S_{\text{уд}} = \frac{S_{\text{вн п}}}{V_{\text{п}}}$  – удельная внутренняя поверхность пор, м<sup>-1</sup>.

В соответствии с принятыми допущениями представим внутреннюю перегородку из ПГС-полимера, как систему из  $n$  цилиндрических капилляров. Тогда

$$S_{\text{уд}} = \frac{n\pi d_{\text{п}} (R_{\text{н}} - R_{\text{вн}}) 4}{n\pi d_{\text{п}}^2 (R_{\text{н}} - R_{\text{вн}})} = \frac{4\Pi}{d_{\text{п}}}. \quad (2.58)$$

Отсюда

$$K_{\text{п}} = \frac{d_{\text{п}}^2}{16k}. \quad (2.59)$$

В процессе частичного закупоривания пор фильтроэлемента одновременно с рассмотренным выше уменьшением диаметра пор происходит уменьшение пористости перегородки. Выражая пористость,

как отношение объема пор фильтроэлемента к его полному объему, имеем:

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_{\Phi\Omega}} = \frac{\pi d_{\Pi}^2 (R_{\Pi} - R_{\text{вн}})}{4V_{\Phi\Omega}}, \quad (2.60)$$

откуда

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4V_{\Phi\Omega}\Pi}{\pi n(R_{\Pi} - R_{\text{вн}})}}. \quad (2.61)$$

Связь между коэффициентом проницаемости перегородки и ее переменной пористостью выразится уравнением:

$$K_{\Pi} = \frac{V_{\Phi\Omega}}{4k\pi n(R_{\Pi} - R_{\text{вн}})} \Pi^2. \quad (2.62)$$

В начальный период работы фильтроэлемента выражение (2.62) примет вид

$$K_{\Pi_0} = \frac{V_{\Phi\Omega}}{4k\pi n(R_{\Pi} - R_{\text{вн}})} \Pi_0^2. \quad (2.63)$$

где  $K_{\Pi_0}$  и  $\Pi_0$  – коэффициент проницаемости и пористость перегородки в начальный период.

Тогда в любой момент времени коэффициент проницаемости определится из выражения

$$r_{\Gamma} = K_{\Pi} = K_{\Pi_0} \left( \frac{\Pi}{\Pi_0} \right)^2, \quad (2.64)$$

а уравнение гидродинамики процесса фильтрования нефтепродуктов через пористую перегородку (2.55) можно представить в виде:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{\mu W_{\Phi}}{K_{\Pi_0} \left( \frac{\Pi}{\Pi_0} \right)^2}. \quad (2.65)$$

Используя приведенные в данном разделе закономерности, можно определить основные эксплуатационные параметры и характеристики первой ступени фильтроэлемента для очистки нефтепродуктов для сельскохозяйственных машин.

С другой стороны, основное уравнение процесса очистки нефтепродуктов фильтрованием может быть представлено в виде выражения, характеризующего интенсивность возрастания общего сопротивления пористой перегородки в процессе задержки ею части загрязнений, которое для случая фильтрования с постоянной скоростью будет иметь вид [127]:

$$\frac{d\Delta P}{d\tau} = k_{\tau} \Delta P^b; \text{ при } V_{\Phi} = V_{\Phi_0} = \text{const}, \quad (2.66)$$

где  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление пористой перегородки, Па;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $k_{\tau}$  – постоянная очистки (коэффициент пропорциональности)  $\text{Па}^{-(b-1)}$ ;  $b$  – показатель степени, определяемый видом фильтрования; (при полном закупоривании пор  $b = 2$ , при постепенном закупоривании пор  $b = 3/2$ );  $V_{\Phi_0}$  – начальная фиктивная скорость фильтрования, м/с.

Следует отметить, что выражение (2.66) является средством обработки результатов экспериментальных исследований и их представления в математической форме, поэтому в нем не содержится информация о влиянии различных факторов на закономерности фильтрования продукта, однако это выражение можно использовать для сравнения интенсивности возрастания сопротивления фильтрационного материала при различных взаимодействиях частиц и пор.

Проинтегрировав выражение (2.66), получим:

$$\tau = \frac{1}{k_{\tau}(b-1)} \left[ \left( \frac{1}{\Delta P_0} \right)^{b-1} - \left( \frac{1}{\Delta P} \right)^{b-1} \right]; \quad (2.67)$$

подставляя в выражение (2.68) значения показателя степени при фильтровании с полным и постепенным закупориванием пор, найдем:

при полном закупоривании пор

$$\tau_1 = \frac{1}{k_{\tau 1}} \left( \frac{1}{\Delta P_0} - \frac{1}{\Delta P} \right); \quad (2.68)$$

при постепенном закупоривании пор

$$\tau_2 = \frac{2}{k_{\tau 2}} \left( \frac{1}{\sqrt{\Delta P_0}} - \frac{1}{\sqrt{\Delta P}} \right). \quad (2.69)$$

Сравнивая ресурс работы фильтрационного материала в обоих случаях, после преобразований получим

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{k_{\tau 2}}{k_{\tau 1}} \frac{\Delta P^{\frac{1}{2}} + \Delta P_0^{\frac{1}{2}}}{2\Delta P^{\frac{1}{2}} \Delta P_0^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.70)$$

Поскольку величины  $\Delta P^{\frac{1}{2}}$  и  $\Delta P_0^{\frac{1}{2}}$  – положительные числа, их сумма меньше удвоенного произведения, а анализ коэффициентов пропорциональности показывает, что  $k_{\tau 1} > k_{\tau 2}$ , на основании выражения (2.70) можно утверждать, что интенсивность возрастания общего гидравличе-

ского сопротивления при фильтровании с постепенным закупориванием пор меньше по сравнению с процессом, сопровождающимся полным закупориванием пор. При одновременном осуществлении обоих процессов (схема 5 в табл. 2.1) ресурс работы фильтрационного материала  $\tau_5$  будет иметь промежуточное значение ( $\tau_1 < \tau_5 < \tau_2$ ), определяемое количеством в жидкости частиц с размерами больше и меньше диаметра пор материала. Следовательно, ресурс работы фильтрационного материала можно увеличить, если осуществлять процесс фильтрования в режиме постепенного закупоривания пор частицами загрязнений и исключить возможность полного закупоривания этими частицами.

Для обеспечения процесса фильтрования рабочей жидкости в нужном режиме целесообразно применять для ее очистки фильтроэлементы многоступенчатой конструкции, используя для изготовления каждой из ступеней фильтрационный материал с различным диаметром пор, выбранный таким образом, чтобы в данной ступени взаимодействие частиц загрязнений с пористой структурой осуществлялось в соответствии с механизмом постепенного закупоривания пор.

Для упрощения конструкции фильтроэлемента при очистке топлив и масел на объектах нефтепродуктообеспечения можно ограничиться двухступенчатым фильтроэлементом. При этом следует учитывать, что, как указывалось выше, указанные объекты оборудуются фильтрами предварительной (грубой) очистки, устанавливаемыми, как правило, при приеме нефтепродуктов на нефтесклад или заправочный пункт и служащими для удаления из нефтепродуктов наиболее крупных частиц загрязнений.

Определим оптимальное соотношение диаметров пор первой и второй ступеней из следующих соображений – коэффициент отфильтровывания частиц загрязнений  $i$ -го размера для случая, когда все поры фильтрационного материала имеют одинаковый диаметр, может быть определен путем использования вероятностной формулы (2.18).

С помощью приведенных выше соотношений между размерами пор и частиц загрязнений можно установить размеры пор фильтрационного материала, из которого следует изготавливать первую и вторую ступени фильтроэлемента. При отсутствии полного закупоривания пор фильтрационного материала частицами загрязнений и задержки всех частиц, размеры которых превышают требования к чистоте рабочих жидкостей, условие, при котором исключается проход таких частиц через фильтрационный материал, описывается соотношением между диаметром пор этого материала и размерами частиц:

$$\frac{1}{3}d_n < d_{\text{ч}} < d_n. \quad (2.71)$$

В соответствии с изложенным и в разделе 1.2 требованиями, предъявляемыми к чистоте дизельного топлива для двигателей тракторов и сельскохозяйственных машин, тонкость очистки этого топлива должна составлять 5 мкм. Следовательно, вторая ступень фильтроэлемента должна иметь соответствующую тонкость очистки, что обеспечивается при диаметре пор этой ступени менее 15 мкм.

Примем диаметр пор второй ступени фильтроэлемента равным 15 мкм. Частицы загрязнений, поступающие на вторую ступень, в соответствии с левой частью неравенства (2.71), должны быть менее 15 мкм. Для обеспечения этого условия примем диаметр пор первой ступени фильтроэлемента 45 мкм. Тогда в соответствии с неравенством (2.71) поступающие на первую ступень частицы загрязнений должны быть менее 45 мкм.

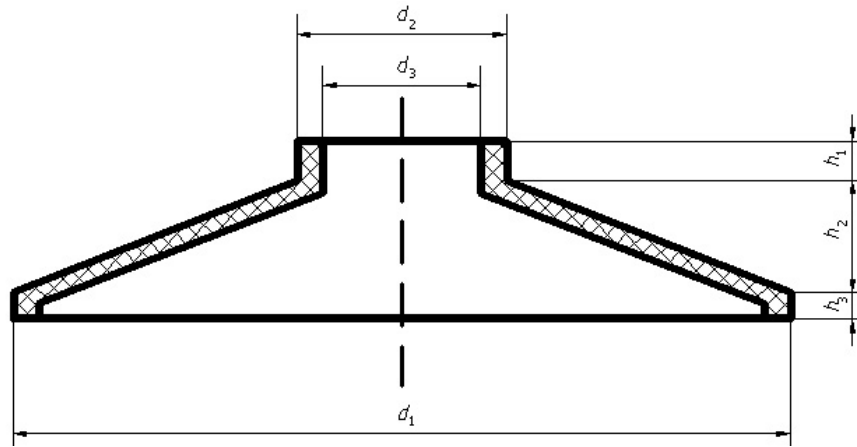
Это условие обеспечивается наличием в приемных коммуникациях нефтескладов и заправочных пунктов сельскохозяйственных предприятий фильтра предварительной (грубой) очистки, изготовленного из сетки № 0,100 с размером ячеек 100 мкм. В ряде случаев применяются фильтры грубой очистки и сеток саржевого плетения № 0,125 и 0,150 с размерами ячеек соответственно 125 и 150 мкм. Использование таких фильтров также практически обеспечивает выполнение требования, выраженного неравенством (2.71).

Целесообразность создания для очистки нефтепродуктов в сельскохозяйственном производстве двухступенчатого фильтроэлемента, вторая ступень которого имеет более высокую тонкость очистки, очевидна. Пропускная способность первой и второй ступеней фильтроэлемента должна быть одинакова, но вследствие более высокой тонкости очистки второй ступени ее удельная пропускная способность будет меньше, поэтому вторая ступень фильтроэлемента должна иметь более развитую рабочую поверхность.

Поскольку механические свойства ПГС-полимеров позволяют изготавливать из них изделия практически любой геометрической формы, целесообразно выполнить вторую ступень фильтроэлемента в виде чечевицеобразных дисков с рабочей поверхностью, состоящей из двух усеченных конусов. Изготавливать такие диски можно в виде двух симметричных частей (рис. 2.3), что существенно упростит технологию производства этих дисков, а рабочую поверхность их рассчитывать по стереометрическим формулам, путем разбиения тела сложной конфигурации на более простые.

Наружный диаметр диска равен внутреннему диаметру полого цилиндра, образующего первую ступень фильтроэлемента, т.е.  $d_n = D_{\text{вн}}$ . Количество дисков и угол наклона их образующей определяются из ус-

ловий одинаковой грязеемкости первой и второй ступеней фильтроэлемента и оптимального соотношения размеров второй ступени.



**Рис.2.3. Расчетная схема для определения рабочей поверхности половины диска второй ступени фильтроэлемента:**

$h_1$  – высота опорной части, м;  $h_2$  – высота наклонной части, м;  $h_3$  – высота боковой части, м;  $d_1$  – диаметр диска, м;  $d_2$  – диаметр опорной части, м;  $d_3$  – диаметр отверстия, м

В соответствии с приведенной схемой рабочая поверхность каждого диска составляет:

$$S_d = 2\pi \left[ d_{\text{вн}} h_0 + d_n h_6 + \frac{d_n + d_{\text{вн}}}{2} \sqrt{h_n^2 + \frac{1}{4}(d_n - d_{\text{вн}})^2} \right]. \quad (2.72)$$

Полная рабочая поверхность второй ступени фильтроэлемента составляет:

$$S_{\text{II}} = n S_d. \quad (2.73)$$

Для определения оптимального соотношения размеров второй ступени, т.е. пакета чечевично-дискового типа, следует установить, когда его рабочая поверхность будет максимальной при заданных наружном диаметре и высоте, определяемых размерами первой ступени. Из приведенной на рис. 2.3 схемы видно, что максимальная поверхность будет при  $d_{\text{вн}} \rightarrow 0$ . Это условие будет достигнуто, если  $d_n \geq d_{\text{вн}}$  и внутренним диаметром диска можно пренебречь. Тогда приближенная величина площади второй ступени фильтроэлемента будет равна:

$$S_{\text{II}} = \frac{\pi h d_n^2}{2t}, \quad (2.74)$$

где  $h$  – высота фильтроэлемента, м;  $t$  – шаг между дисками, м.

Из выражения (2.74) вытекает, что при уменьшении шага между дисками рабочая поверхность увеличивается при тех же габаритных размерах пакета. Однако рабочая поверхность пакета дисков может увеличиваться только до определенных пределов, так как при дальнейшем увеличении числа дисков (что адекватно уменьшению шага между ними) возрастает гидравлическое сопротивление пакета, обусловленное образованием на стенках дисков пограничного гидродинамического слоя. Таким образом, гидравлическое сопротивление второй ступени фильтроэлемента, в отличие от первой ступени, складывается из сопротивления в порах фильтрующего материала  $\Delta P_{\text{ф}}$  и сопротивления трения в пространстве между дисками  $\Delta P_{\text{тр}}$ .

Тогда начальное гидравлическое сопротивление чечевично-дискового пакета равно

$$\Delta P_o = \Delta P_{\text{ф}} + \Delta P_{\text{тр}}. \quad (2.75)$$

Гидравлическое сопротивление при фильтровании можно представить в безразмерной форме, с помощью критерия Эйлера, характеризующего соотношение сил давления и инерции в потоке:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_{\text{ж}} W^2}. \quad (2.76)$$

Известно [128], что для фильтропакета чечевично-дискового типа можно воспользоваться выражением, приведенным в работе [136] для поперечно-гофрированного фильтроэлемента.

Тогда

$$Eu = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{20\varepsilon^2 l^2}{(1-\varepsilon)^3 \delta^2} + \frac{\delta^2}{\varepsilon K_{\text{II}}^2} \right]. \quad (2.77)$$

Выражение (2.79) более удобно использовать в виде:

$$Eu = Eu_{\text{т}} + Eu_{\text{ф}}, \quad (2.78)$$

где  $Eu_{\text{т}} = \frac{20\varepsilon^2 l^2}{\text{Re}(1-\varepsilon)^3 \delta}$  – безразмерное сопротивление трения в про-

странстве между дисками;  $Eu_{\text{ф}} = \frac{\delta^2}{\text{Re} \varepsilon K_{\text{II}}}$  – безразмерное сопротивление

в порах фильтрационного материала;  $\text{Re} = \frac{W_o r_n}{\nu_{\text{ж}}}$  – безразмерная

скорость движения жидкости (критерий Рейнольдса) на огибающей поверхности фильтропакета;  $\varepsilon = \frac{2\delta}{t}$  – коэффициент заполнения (отношение объема, занятого фильтрационным материалом, ко всему

объему фильтропакета);  $\nu_{\text{ж}}$  – кинематическая вязкость жидкости.



Для определения оптимального шага между отдельными дисками в работе [136] приведены зависимости, которые с учетом сделанного допущения ( $d_n \geq d_{вн}$ ) имеют вид:

$$Eu_T = \frac{10 \sin \theta}{Re \operatorname{tg}^3 \theta}; \quad (2.79)$$

$$Eu_\phi = \frac{l \delta \sin \theta}{Re K_n}. \quad (2.80)$$

Увеличение общего сопротивления фильтропакета при фильтровании жидкости с постоянной скоростью обусловлено увеличением  $Eu_\phi$  при неизменном  $Eu_T$ . Выразим шаг между дисками через геометрические параметры диска

$$t = 2l_n \sin \theta = d_n \operatorname{tg} \theta. \quad (2.81)$$

Решая совместно уравнения (2.79), (2.80), и (2.81) относительно геометрических параметров фильтропакета чечевице-дискового типа, можно определить оптимальные величины этих параметров, обеспечивающие максимальный ресурс работы второй ступени фильтроэлемента при заданных габаритных размерах, определяемых высотой и внутренним диаметром первой ступени фильтроэлемента.

При оптимизации геометрических параметров двухступенчатого фильтроэлемента следует учитывать, что наилучшие условия для его эксплуатации и рационального технологического обслуживания (одновременной регенерации или замены обеих ступеней) будут обеспечиваться при равноресурсной работе обеих ступеней. Одинаковый ресурс работы обеих последовательно включенных ступеней фильтроэлемента с одинаковой пропускной способностью достигается при соблюдении условия:

$$\frac{G_1 S_{\phi 1}}{m_{31} V_{\phi 1}} = \frac{G_2 S_{\phi 2}}{m_{32} V_{\phi 2}}, \quad (2.82)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – грязеемкость фильтрационного материала соответственно первой и второй ступеней, г/м<sup>2</sup>;  $S_{\phi 1}$  и  $S_{\phi 2}$  – рабочая поверхность соответственно первой и второй ступеней, м<sup>2</sup>;  $m_{31}$  и  $m_{32}$  – количество загрязнений, задержанных в единице объема соответственно первой и второй ступеней;  $V_{\phi 1}$  и  $V_{\phi 2}$  – объем фильтрационного материала соответственно первой и второй ступеней, м<sup>3</sup>.

Условие равноресурсной работы двухступенчатого фильтроэлемента можно также представить в виде:

$$\frac{2G_1}{Q_{\phi 3} (c_n + c_k) \phi_1} = \frac{2G_2}{Q_{\phi 3} (c_n + c_k) (1 - \phi_1) \phi_2}, \quad (2.83)$$

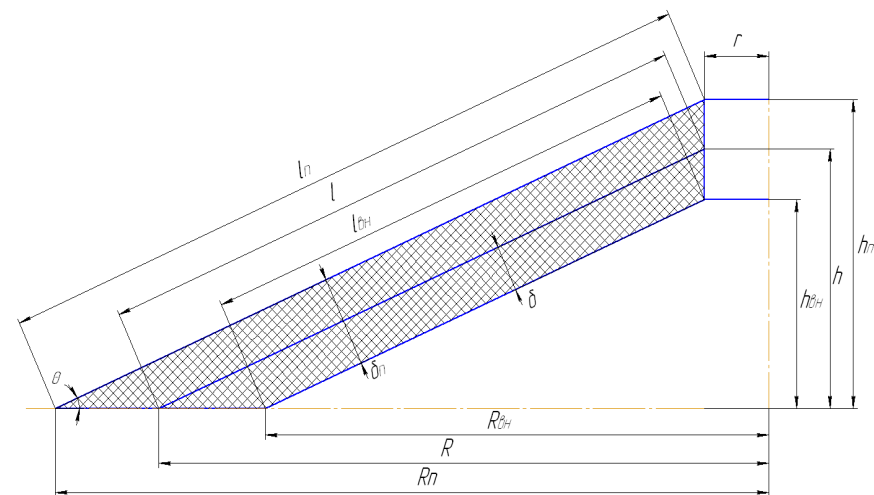
где  $Q_{\phi 3}$  – пропускная способность фильтра, м<sup>3</sup>/с;  $c_n$  и  $c_k$  – соответственно начальная и конечная концентрация загрязнений в рабочей жидкости, г/м<sup>3</sup>;  $\phi_1$  и  $\phi_2$  – коэффициенты полноты очистки соответственно первой и второй ступеней.

Суммарный коэффициент полноты очистки фильтроэлемента будет равен:

$$\varphi_\Sigma = 1 - \phi_1 \phi_2. \quad (2.84)$$

Таким образом, пользуясь выражением (2.82) можно определить соотношение площади рабочей поверхности и объема фильтрационного материала каждой ступени, обеспечивающее равноресурсную работу этих ступеней в зависимости от количества загрязнений, задержанных в единице объема пористой перегородки каждой ступени, а используя соотношение  $Q = W_\phi S_\phi$ , с помощью зависимости (2.83) можно найти величину рабочей поверхности каждой ступени фильтроэлемента в зависимости от коэффициента полноты очистки рабочей жидкости этой ступени.

Схема конической пористой перегородки, являющейся половиной чечевицеобразного диска, представлена на рис. 2.4.



**Рис. 2.4. Схема пористой перегородки второй ступени фильтроэлемента:**  
 $R_n$  и  $R_{вн}$  – соответственно наружный и внутренний радиусы пористой конической перегородки, м;  $r$  – радиус центрального отверстия в конической перегородке, м;  $\delta_n$  – толщина конической перегородки, м;  $l_n$  и  $l_{вн}$  – соответственно длина наружной и внутренней образующих конической перегородки, м;  $h_n$  и  $h_{вн}$  – соответственно наружная и внутренняя высота конической перегородки, м;  $\theta$  – угол наклона конической перегородки, град;  $R$ ,  $\delta$ ,  $l$  и  $h$  – переменные параметры (координаты) некоторого конического сечения перегородки, м

Рассматриваемая пористая перегородка с геометрической точки зрения представляет собой полый усеченный конус с высотой  $h_{\text{п}}$ , радиусами нижнего основания – наружным  $R_{\text{п}}$  и внутренним  $R_{\text{вн}}$ , радиусом верхнего основания  $r$ , длиной образующей  $l_{\text{п}}$ , имеющей угол наклона  $\theta$  и толщиной стенки  $\delta_{\text{п}}$ .

Для вывода уравнения материального баланса, описывающего изменение концентрации содержащихся в жидкой фазе твердых частиц при фильтровании нефтепродукта через эту перегородку, примем, что в любой момент времени градиент концентрации загрязнений по толщине указанной перегородки пропорционален количеству загрязнений, проходящих в единицу времени через единицу поверхности конического сечения перегородки, перпендикулярного направлению потока жидкости:

$$\left(\frac{dc}{d\delta}\right)_{\tau} = -\alpha g_{\delta} = -\alpha W_{\delta} c, \quad (2.85)$$

где  $g_{\delta}$  – элементарное количество загрязнений, проходящих через единицу поверхности конического сечения перегородки с координатой  $\delta$  в единицу времени,  $\text{г/м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности,  $1/\text{м}^2$ ;  $W_{\delta}$  – фиктивная скорость потока жидкости в коническом сечении с координатой  $\delta$ ,  $\text{м/с}$ . Знак «–» в выражении (2.85) означает, что векторы  $\frac{dc}{d\delta}$  и  $g_{\delta}$  имеют противоположное направление.

Фиктивная скорость потока жидкости на входе в пористую коническую перегородку равна:

$$W_{\text{вх}} = \frac{Q}{\delta_{\text{п}} [\delta_{\text{п}} + (R_{\text{вн}} + r) \sin \theta]}, \quad (2.86)$$

а в сечении перегородки с координатой  $\delta$  эта скорость равна:

$$W_{\delta} = \frac{Q}{\delta [\delta + (R_{\text{вн}} + r) \sin \theta]}, \quad (2.87)$$

где  $Q$  – пропускная способность перегородки,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Тогда фиктивная скорость потока жидкости в каждом коническом сечении пористой перегородки связана с координатой  $\delta$  этого сечения соотношением:

$$W_{\delta} = W_{\text{вх}} \frac{\delta_{\text{п}}}{\delta} \frac{\delta_{\text{п}} + (R_{\text{вн}} + r) \sin \theta}{\delta + (R_{\text{вн}} + r) \sin \theta}. \quad (2.88)$$

Объем полого усеченного цилиндра равен:

$$V_{\text{п}} = \frac{\pi}{3} (h - h_{\text{вн}}) (R_{\text{п}} - R_{\text{вн}}) (R_{\text{п}} + R_{\text{вн}} + r). \quad (2.89)$$

По аналогии элементарный объем конической перегородки  $dV_{\delta}$ , ограниченный коническими сечениями с координатами  $\delta$  и  $(\delta - d\delta)$ , будет равен:

$$dV_{\delta} = \frac{\pi dh}{3} dR (2R - dR + r). \quad (2.90)$$

Поскольку внутренний диаметр  $R_{\text{вн}}$ , внутренняя высота  $h_{\text{вн}}$ , внутренняя длина  $l_{\text{вн}}$  и диаметр центрального отверстия  $r$  конической перегородки являются постоянными для любого конического сечения данной перегородки, целесообразно все переменные величины, характеризующие коническое сечение – его радиус  $R$ , высоту  $h$  и длину  $l$ , выразить через одну переменную величину – координату  $\delta$  с использованием постоянного параметра – угла наклона  $\theta$ . Тогда

$$R = \frac{\delta}{\sin \theta} + R_{\text{вн}}; \quad h = \frac{\delta}{\cos \theta} + h_{\text{вн}}; \quad l = \delta (\text{ctg} \theta + \text{tg} \theta) + l_{\text{вн}}$$

и соответственно:

$$dR = \frac{d\delta}{\sin \theta}; \quad dh = \frac{d\delta}{\cos \theta}; \quad dl = d\delta (\text{ctg} \theta + \text{tg} \theta). \quad (2.91)$$

Угол наклона конической перегородки  $\theta$  связан с шагом между чечевицеобразными дисками фильтроэлемента соотношением, полученным в результате исследования гидродинамики процесса движения фильтрующей жидкости в междисковом пространстве и через пористую перегородку [137]:

$$t = 2l_{\text{п}} \sin \theta, \quad (2.92)$$

где  $t$  – шаг между дисками,  $\text{м}$ .

Целесообразно из конструктивных соображений принять  $\theta = 30^\circ$ . Тогда, представив параметры конической перегородки, приведенные в формулах (2.91), через значения тригонометрических функций для угла  $30^\circ$ , получим:

$$R = 2\delta + R_{\text{вн}}; \quad h = \frac{2\delta}{\sqrt{3}} + h_{\text{вн}}; \quad l = \frac{4\sqrt{3}\delta}{3} + l_{\text{вн}}; \\ dR = 2d\delta; \quad dh = 1,15d\delta; \quad dl = 2,31d\delta. \quad (2.93)$$

После подстановки полученных значений в выражение (2.93) оно примет вид:

$$dV_{\delta} = 4,8(d\delta)^2 (2\delta - d\delta + R_{\text{вн}} + 0,5r). \quad (2.94)$$

Площади конических сечений с координатами  $\delta$  и  $(\delta - d\delta)$ , ограничивающие элементарный объем  $dV_{\delta}$ , соответственно равны:

$$S_{\delta} = \pi l (R + r) = \pi [\delta (\text{ctg} \theta + \text{tg} \theta) + l_{\text{вн}}] \left( \frac{\delta}{\sin \theta} + R_{\text{вн}} + r \right) = \\ = (7,2\delta + 3,14l_{\text{вн}}) (2\delta + R_{\text{вн}} + r); \quad (2.95)$$

$$\begin{aligned}
S_{(\delta-d\delta)} &= \pi(l-dl)(R-dR+r) = \\
&= \pi[(\delta-d\beta)(\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{tg}\theta) + l_{\text{BH}}] \left( \frac{\delta-d\delta}{\sin\theta} + R_{\text{BH}} + r \right) = \\
&= (7,2(\delta-d\delta) + 3,14l_{\text{BH}})(2\delta-2d\delta + R_{\text{BH}} + r). \quad (2.96)
\end{aligned}$$

Количество загрязнений, которое в единицу времени войдет в элементарный объем пористой перегородки, будет равно:

$$G_{z(\delta)} = g_{\delta}(7,2\delta + 3,14l_{\text{BH}})(2\delta + R_{\text{BH}} + r)d\tau. \quad (2.97)$$

Количество загрязнений, которое за этот же период выйдет из рассматриваемого объема, будет равно:

$$G_{z(\delta-d\delta)} = g_{(\delta-d\delta)}(7,2(\delta-d\delta) + 3,14l_{\text{BH}})(2\delta-2d\delta + R_{\text{BH}} + r)d\tau, \quad (2.98)$$

где  $g_{(\delta-d\delta)}$  – элементарное количество загрязнений, проходящее через единицу поверхности конического сечения с координатой  $(\delta-d\delta)$  в единицу времени,  $\text{г/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Количество загрязнений, задержанных в рассматриваемом объеме пористой перегородки, будет равно:

$$dG_z = G_{z(\delta)} - G_{z(\delta-d\delta)} = 14,4(g_{\delta} - g_{(\delta-d\delta)})(d\delta)^2 d\tau. \quad (2.99)$$

Разложив функцию  $g_{(\delta-d\delta)}$  в ряд Тейлора и ограничившись двумя первыми членами этого ряда, получим:

$$g_{(\delta-d\delta)} = g_{\delta} - \frac{\partial g_{\delta}}{\partial \delta} d\delta. \quad (2.100)$$

Подставив полученное значение в выражение (2.99), получим:

$$dG_z = -14,4 \frac{\partial g_{\delta}}{\partial \delta} (d\delta)^3 d\tau. \quad (2.101)$$

В то же время соотношение между количеством загрязнений, задержанных в элементарном объеме конической перегородки, и их количеством в единице объема этой перегородки, задержанных за время  $\tau$ , будет иметь вид:

$$dG_z = \left( \frac{\partial m_z}{\partial \tau} \right)_{\tau} dV_{\phi} d\tau, \quad (2.102)$$

где  $m_z$  – количество загрязнений, задержанных в единице объема пористой перегородки,  $\text{г/м}^3$ , за время  $\tau$ , с.

Учитывая зависимость между количеством загрязнений, их концентрацией в потоке фильтруемой жидкости и скоростью этого потока, отнесенным к коническому сечению с координатой  $\delta$ , на основании выражений (2.89) и (2.106) после необходимых преобразований можно написать уравнение материального баланса для случая фильтрации жидкости через коническую пористую перегородку:

$$\frac{\partial m_z}{\partial \tau} = -W_{\text{ex}} \left( \frac{\partial c}{\partial \delta} \right), \quad (2.103)$$

где фиктивная скорость потока жидкости на входе в пористую перегородку  $W_{\text{ex}}$ , определяется из выражения (2.86), а изменение концентрации загрязнений в этом потоке по толщине пористой перегородки,  $\frac{\partial c}{\partial \delta}$  из выражения (2.85).

При исследовании кинетики фильтрования жидкости через коническую пористую перегородку, характеризующей процесс забивки пор загрязнениями, целесообразно сделать некоторые допущения, основывающиеся на известных свойствах ПГС-полимеров, которые имеют равномерную пористую структуру и узкий диапазон распределения пор по размерам. Как и в случае цилиндрической перегородки будем считать, что коническая перегородка является однородной пористой структурой с фиксированным размером пор, т.е. поры распределены равномерно в каждом коническом сечении перегородки, перпендикулярном потоку жидкости, а диаметры всех пор равны между собой и не изменяются по толщине перегородки. Тогда поровая скорость жидкости не будет зависеть от формы пористой перегородки, в отличие от фиктивной скорости, увеличивающейся по мере уменьшения площади конических сечений этой перегородки, как это следует из выражения (2.88).

При постепенном закупоривании пор перегородки изменяются во времени количество задержанных загрязнений в единице ее объема и их концентрация в потоке фильтруемой жидкости в соответствии с уравнением (2.103). Это сопровождается заполнением порового пространства перегородки частицами загрязнений, уменьшением ее просветности и увеличением поровой скорости в соответствии с зависимостью:

$$W_{\text{п}} = \frac{W_{\phi}}{II'}, \quad (2.104)$$

где  $W_{\text{п}}$  – поровая скорость потока, м/с;  $W_{\phi} = \frac{W_{\text{вх}} + W_{\text{вых}}}{2}$  – средняя фик-

тивная скорость потока, м/с;  $II' = \frac{S_{\text{пор}}}{S_{\text{п}}}$  – просветность пористой пере-

городки;  $S = \frac{\pi d_{\text{пор}}^2}{4} n$  – площадь поперечного сечения пор перегородки,  $\text{м}^2$ ;  $n$  – количество пор на поверхности конической перегородки, шт. Площадь поверхности конической перегородки определяется по уравнению (2.95) при  $\delta = \delta_{\text{п}}$ .

Задержка частиц загрязнений в порах прекращается по достижении критического значения поровой скорости в результате уменьшения просветности перегородки вследствие закупоривания пор. Если рассматривать задержку частиц загрязнений в порах как воздействие сил поверхностного натяжения жидкости, не учитывая межмолекулярных и электростатических сил, капиллярных эффектов и других факторов, то сила, удерживающая частицу в поре, будет равна:

$$F_{\sigma} = \pi \sigma d_{\text{ч}}, \quad (2.105)$$

а сила воздействия потока жидкости на частицу в соответствии с законом Стокса будет равна:

$$F_w = 3\pi \mu d_{\text{ч}} W_{\text{п}}, \quad (2.106)$$

где  $d_{\text{ч}}$  – диаметр частицы загрязнений, м;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Н с/м<sup>2</sup>.

Тогда вынос частиц загрязнений из поры начнется при достижении поровой скоростью критического значения, т.е. равенстве сил:  $F_{\sigma} = F_w$ :

$$\pi \sigma d_{\text{ч}} = 3\pi \mu d_{\text{ч}} W_{\text{п кр}},$$

откуда

$$W_{\text{п кр}} = \frac{\sigma}{3\mu}, \quad (2.107)$$

где  $W_{\text{п кр}}$  – критическое значение поровой скорости, м/с.

Считаем, что достижение просветностью критической величины связано с максимальным объемом задержанных загрязнений соотношением:

$$V_{\text{з max}} = (P' - P'_{\text{кр}}) \delta_{\text{п}} S_{\text{п}}, \quad (2.108)$$

где  $P'_{\text{кр}}$  – критическая величина просветности, соответствующая выносу загрязнений из порового пространства.

Умножив максимальный объем задержанных пористой перегородкой загрязнений на их среднюю плотность и отнеся количество пор в перегородке к единице ее поверхности, получим зависимость для определения удельной грязеемкости конической пористой перегородки:

$$m_{\text{з max}} = \frac{(P'_{\text{уд}} - P'_{\text{кр уд}}) \delta_{\text{п}} d_{\text{п}} \rho_{\text{з}}}{V_{\text{п}}}. \quad (2.109)$$

Совместным решением уравнений (2.103) и (2.109) можно определить ресурс работы пористой перегородки, т.е. продолжительность ее работы до начала выноса частиц загрязнений.

При расчетах, связанных с определением грязеемкости второй ступени фильтроэлемента следует полученные для конической пере-

городки результаты умножить на  $2m$ , где  $m$  – число чечевицеобразных дисков во второй ступени.

Для описания гидродинамики процесса фильтрования топлива через пористую коническую перегородку, характеризующего изменение перепада давления на этой перегородке во времени, используем уравнение Дарси, представив его в виде:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{\mu W_{\text{ф}}}{K_{\text{п}}}. \quad (2.110)$$

Коэффициент проницаемости перегородки  $K_{\text{п}}$  связан с ее пористостью отношением (2.57).

С учетом сделанного допущения об однородности пористой структуры перегородки из ПГС-полимера, используя выражения (2.59)

и (2.60), и учитывая:  $\Pi = \frac{\pi d_{\text{пор}}^2 \delta_{\text{п}}}{4V_{\text{п}}}$ , имеем:

$$d_{\text{пор}} = \sqrt{\frac{4V_{\text{п}} \Pi}{\pi n \delta_{\text{п}}}}. \quad (2.111)$$

Коэффициент проницаемости перегородки зависит от ее переменной пористости, которую можно описать уравнением:

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}} \Pi^2}{4k\pi n \delta_{\text{п}}}. \quad (2.112)$$

Для начального момента процесса фильтрования зависимость (2.112) будет иметь вид:

$$K_{\text{п0}} = \frac{V_{\text{п}} \Pi_0^2}{4k\pi n \delta_{\text{п}}}, \quad (2.113)$$

где  $K_{\text{п0}}$  и  $\Pi_0$  – соответственно коэффициент проницаемости и пористость перегородки в начальный момент времени.

Тогда в любой момент времени коэффициент проницаемости будет равен:

$$K_{\text{п}} = K_{\text{п0}} \left( \frac{\Pi}{\Pi_0} \right)^2, \quad (2.114)$$

а уравнение (2.110) можно представить в виде:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{\mu W_{\text{ф}}}{K_{\text{п0}} \left( \frac{\Pi}{\Pi_0} \right)}. \quad (2.115)$$

С помощью найденных закономерностей (2.103), (2.109) и (2.115) можно определить основные эксплуатационные характеристики вто-

рой ступени фильтроэлемента для очистки нефтепродуктов при эксплуатации сельскохозяйственных и других машин.

### 2.3. Обоснование применения гидродинамических фильтров

Перспективным методом очистки топлива является применение фильтрующих перегородок с обеспечением их периодической или непрерывной регенерации. При этом желательно осуществлять непрерывную регенерацию гидрофобной фильтрующей поверхности с использованием гидродинамического эффекта, что позволит отказаться от дополнительных приспособлений (продувочных, промывочных или механических устройств), применение которых неизбежно при проведении регенерации поэтапно на отдельных участках фильтрующей поверхности. При этом блокирование гидрофобной поверхности микрокаплями воды не будет происходить благодаря их удалению с этой поверхности под воздействием гидродинамических сил.

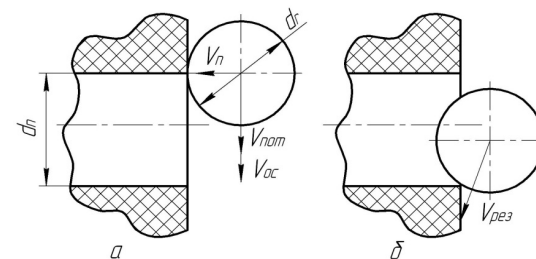
Сущность гидродинамического эффекта заключается в том, что подвод жидкости к фильтрующему элементу осуществляется не в радиальном направлении, как это принято при традиционной схеме организации потока очищаемой жидкости, а параллельно поверхности фильтрующего элемента. Использование гидродинамического эффекта дает возможность повысить тонкость очистки дизельного топлива без уменьшения размера пор фильтрующего элемента и увеличения тем самым его гидравлического сопротивления, что позволяет повысить ресурс его работы, а также обеспечивает эффективное обезвоживание топлива на гидрофобной фильтрующей перегородке.

Использование гидродинамического эффекта позволяет повысить тонкость очистки топлива без уменьшения размера пор фильтрующего элемента, а также увеличить ресурс его работы.

При рассмотрении процесса гидродинамического фильтрования топлива принимаем допущения:

- очищаемый продукт является несжимаемой и однородной жидкостью;
- твердые частицы загрязнений имеют сферическую форму;
- поры фильтрующего элемента имеют круглое сечение;
- электрокинетические, поверхностные и адгезионные силы при взаимодействии частиц загрязнений с фильтрующим элементом не учитываются;
- инерционное проскальзывание частицы относительно жидкости из-за ее вращения не учитывается.

Схема гидродинамического фильтрования представлена на рис. 2.5.



**Рис. 2.5. Схема взаимодействия твердой частицы и поры при гидродинамическом фильтровании:**

а – в начальный момент; б – при достижении частицей задней кромки поры;  $d_n$  и  $d_p$  – соответственно диаметры поры и частицы, м;  $V_{пот}$  – продольная скорость потока, м/с;  $V_{ос}$  – скорость осаждения частицы, м/с;  $V_{рез}$  – результирующая скорость частицы, м/с

Частица загрязнений, перемещающаяся в потоке продукта, участвует в двух движениях – вдоль вертикальной поверхности пористой перегородки и параллельно оси горизонтально расположенных пор этой перегородки. Вертикальное движение частицы происходит при совместном воздействии силы, приложенной со стороны потока, и объемной силы, являющейся разностью гравитационной и архимедовой сил. Вертикальная скорость частицы под действием силы потока определяется из выражения [130]:

$$F_{пот} = \frac{\phi}{4} \rho \pi d_p^2 V_{пот}^2, \quad (2.116)$$

а скорость частицы под воздействием объемной силы – из уравнения:

$$\frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_n) = \phi \frac{\pi d_p^2}{8} V_{ос}^2 \rho_n, \quad (2.117)$$

где  $\rho_n$  и  $\rho_p$  – соответственно плотность продукта и частицы, г/м<sup>3</sup>;  $F_{пот}$  – сила, приложенная к частице со стороны потока, Н;  $\phi$  – коэффициент лобового сопротивления движению частицы;  $V_{пот}$  и  $V_{ос}$  – соответственно скорость частицы под действием силы потока и скорость ее осаждения под воздействием объемной силы, м/с.

Поскольку величина  $\frac{\pi d_p^2}{4}$  является проекцией площади частицы на горизонтальную плоскость, подставим в выражение (2.116) значение  $\frac{4F_{пот}}{\pi d_p^2} = \Delta P_{пр}$ , т.е. перепад давления в вертикальном направлении, Па.

Тогда после преобразований находим суммарную продольную (вертикальную) скорость частицы:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пот}} + V_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{пр}}}{\phi \rho_{\text{ч}}}} + \sqrt{\frac{4 d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}})}{3 \phi \rho_{\text{ч}}}}. \quad (2.118)$$

Коэффициент лобового сопротивления  $\phi$  зависит от числа Рейнольдса. Для рассматриваемого случая можно принять  $\phi = 0,1$ .

Горизонтальное движение частицы происходит вследствие воздействия силы, возникающей из-за наличия перепада давления на пористой перегородке. При этом скорость, с которой перемещается частица, можно принять равной истинной (поровой) скорости, т.е. скорости потока продукта в порах фильтрующего элемента.

В разделе 2.2 найдена поровая скорость для цилиндрического фильтрующего элемента из ПГС-полимера, при определении которой сделано допущение, что поры распределены по сечению материала равномерно и их размеры (длина и диаметр) равны между собой. Такое допущение правомерно, так как ПГС-полимеры имеют довольно узкий диапазон распределения пор по размерам (отклонения составляют не более  $\pm 10\%$  от номинального значения). Тогда поровая скорость может быть найдена из выражения (2.23)

Для пористых перегородок, имеющих поры одинакового размера и формы, определение коэффициента проницаемости может производиться по формулам (2.24а) и (2.24б), поровая скорость определяется из выражения (2.26).

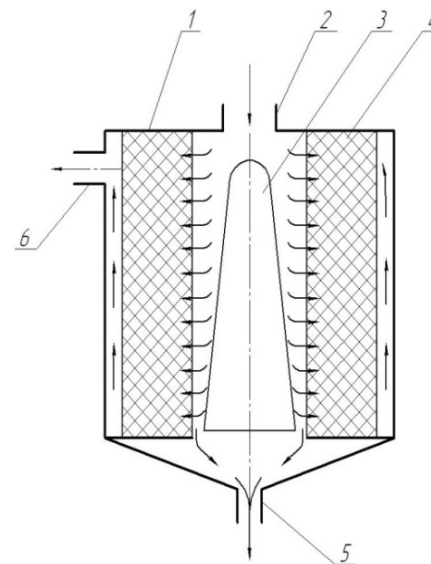
Приложим полученные из выражений (2.118) и (2.125) скорости к центру тяжести частицы. Если вектор суммы этих скоростей в момент соприкосновения частицы с нижней кромкой поры будет выше точки соприкосновения, то частица не войдет в пору, а в случае, когда этот вектор будет ниже кромки поры, частица попадет внутрь пористой перегородки. Таким образом, при достаточно высокой вертикальной скорости потока им будут увлекаться частицы, размеры которых значительно меньше размера поры.

Для обеспечения равномерной подачи продукта на рабочую поверхность пористой перегородки и одинакового давления на входе по всей ее высоте следует предусмотреть во внутренней полости фильтрующего элемента коническую вставку, что обеспечивает переменную ширину зазора между этой вставкой и пористой перегородкой (рис. 2.6). Оптимальной формой вставки для обеспечения равномерной подачи продукта является усеченный параболоид.

Однако для практических целей из технологических соображений можно принять вставку в форме усеченного корпуса.

При очистке топлива фильтрованием с применением гидродинамического эффекта потоком продукта вместе с твердыми частицами с

рабочей поверхности пористой перегородки будет удаляться некоторое количество микрокапель воды, однако процесс обезвоживания топлива с помощью ПГС-полимеров происходит главным образом за счет коалесценции этих капель в коагулирующей перегородке, что требует отдельного рассмотрения.



**Рис. 2.6. Принципиальная схема гидродинамического фильтра для очистки топлива:**

1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – коническая вставка; 4 – фильтрующий элемент; 5 – патрубок отвода загрязненного продукта; 6 – выходной патрубок

В процессе гидродинамического фильтрования некоторая часть продукта вместе с загрязнениями, не попавшими в пористую перегородку, также не поступит в эту перегородку и будет сбрасываться из внутренней полости фильтрующего элемента. Для очистки этого продукта следует предусмотреть какие-либо устройства (например, гидроциклон).

#### **2.4. Теоретические предпосылки процесса удаления углеводородных и гетероорганических загрязнений из нефтепродуктов**

В работе [129] указывается, что ПГС-полимеры, в зависимости от характера введенных в них при синтезе активных функциональных групп, могут обладать различными физико-химическими свойствами, в том числе и адсорбционными, т.е. способны извлекать из жидкостей

загрязняющие их вещества, находящиеся в этих жидкостях в виде истинных и коллоидных растворов. В данном разделе рассматривается процесс адсорбционной очистки нефтепродуктов от веществ, образующихся при транспортно-складских операциях в результате химических превращений углеводов.

Процессы образования органических загрязнений в нефтепродуктах и основные факторы, влияющие на эти процессы, в общем виде достаточно подробно рассмотрены в работе [27]. Основным процессом является окисление, в результате которого в нефтепродукте образуются смолы и осадки. До взаимодействия с кислородом нефтепродукт можно рассматривать, как истинный раствор сераорганических, азоторганических и кислородсодержащих соединений в углеводородной среде. При взаимодействии с кислородом наименее стабильные углеводородные компоненты начинают окисляться с образованием гидроперекисей вида  $C_nH_m(OOH)_k$ . При дальнейшем окислении образуются более сложные кислородсодержащие углеводородные соединения – спирты, кетоны, альдегиды, кислоты, эфиры и т.п., в том числе содержащие серу, азот, металлы и являющиеся промежуточными продуктами при образовании твердых (карбонильных и асфальтеновых) и пластичных (асфальто-смолистых) органических соединений.

В результате конденсации и полимеризации продуктов окисления в нефтепродукте появляются молекулы, масса которых значительно превышает среднюю массу молекул нефтепродукта. При дальнейшем окислении происходит полимеризация и образуются молекулы, не растворяющиеся в нефтепродукте, т.е. раствор из истинного превращается в коллоидный.

Следует отметить, что при хранении нефтепродуктов непродолжительное время при умеренной температуре процессы окисления углеводов и последующего их видоизменений протекают достаточно слабо, однако в условиях высокой температуры в присутствии катализаторов окислительных реакций количество образовавшихся углеводородных загрязнений может значительно возрасти и их следует удалять из нефтепродуктов.

В работе [128] приводится правило Траубе, согласно которому адсорбируемость углеводородных соединений увеличивается с возрастанием числа атомов углерода в молекуле. Поскольку органические загрязнения содержат большое количество указанных атомов, следует предположить, что процесс их адсорбции с помощью ПГС-полимеров будет достаточно эффективным.

Найдем функциональные зависимости между величинами, характеризующими процесс адсорбционной очистки нефтепродуктов, рас-

сматривая этот процесс с макроскопических позиций и не вдаваясь в исследование молекулярно-кинетических и микроскопических явлений.

При рассмотрении процесса очистки нефтепродуктов от органических загрязнений методом адсорбции с помощью ПГС-полимеров сделаем следующие допущения:

- очищаемый продукт несжимаем, а концентрация адсорбируемого вещества в нем столь мала, что изменением плотности потока вследствие удаления из него этих веществ можно пренебречь;
- движение потока продукта осуществляется в одном направлении с постоянной фиктивной скоростью.

Составим уравнение материального баланса адсорбции, для упрощения ограничившись рассмотрением одномерного процесса. Из фильтрующей перегородки выделим элементарный объем с площадью  $dS$  и толщиной  $dR$ . Количество загрязнений, входящих в элементарный объем через площадь  $dS$  за время  $d\tau$  составляет  $wcdSd\tau$ , а количество выходящих из этого объема загрязнений  $wcdSd\tau - d(wcdSd\tau)/dR$ . Изменение количества загрязнений при прохождении продукта через элементарный объем ПГС-полимера равно:

$$-\frac{\partial(wcdSd\tau)dR}{\partial R} = -\frac{\partial(wc)}{\partial R}dSdRd\tau, \quad (2.119)$$

где  $w$  – скорость потока продукта, м/с;  $c$  – концентрация загрязняющих веществ в нефтепродукте, % (масс).

Изменение концентраций загрязняющих веществ в элементарном объеме вызовет изменение их концентрации в ПГС-полимере, за счет адсорбции им загрязнений, и в потоке нефтепродукта, вследствие удаления из него загрязнений. В пористой перегородке это изменение будет равно  $(\partial a/\partial \tau)d\tau dR dS$ , а в нефтепродукте  $-(\partial c/\partial \tau)d\tau dR dS$ .

Уравняв полученные выражения и сделав необходимые преобразования, найдем уравнение материального баланса в элементарном объеме:

$$\frac{da}{d\tau} + \frac{dc}{d\tau} + \frac{d(wc)}{dR} = 0, \quad (2.120)$$

где  $a$  – адсорбционная способность пористой перегородки, % (масс).

Аналитическое решение дифференциального уравнения (2.120) возможно, если воспользоваться изложенной в [133] гипотезой, согласно которой фронт адсорбции перемещается по слою адсорбента (которым в рассматриваемом случае служит пористая перегородка из ПГС-полимера) в направлении координаты  $r$  с постоянной скоростью в режиме параллельного переноса. Поскольку мы ограничились рассмотрением одномерного потока, использование прямоугольных ко-

ординат для описания переноса на цилиндрическом фильтроэлементе является правомерным.

Произведем замену двух координат ( $r, \tau$ ) одной координатой  $Z$ , начало которой перемещается вместе с фронтом адсорбции. Связь этой координаты с исходными данными описывается уравнением:

$$Z = r - U\tau, \quad (2.121)$$

где  $U$  – скорость движения фронта адсорбции, м/с.

Определим граничные условия:

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } c = c_o: \quad a = a_o; \quad \frac{dc}{dz} = 0; \\ \text{При } c = 0: \quad a = 0; \quad \frac{dc}{dz} = 0, \end{array} \right\} \quad (2.122)$$

где  $c_o$  – концентрация углеводородных загрязнений в потоке нефтепродукта, % (масс);  $a_o$  – равновесная этой концентрации величина адсорбции, % (масс).

Решение уравнения (2.120) с учетом зависимости (2.121) и граничных условий (2.122) позволяет получить величину скорости движения адсорбционного фронта:

$$U = \frac{wc_o}{c_o + a_o}. \quad (2.123)$$

Отсюда можно определить продолжительность работы адсорбента до проскока через него поглощаемых веществ:

$$\tau_{пр} = \kappa_3 r - \tau_o, \quad (2.124)$$

где  $\kappa_3 = \frac{1}{U} = \frac{a_o + c_o}{wc_o}$  – коэффициент защитного действия адсорбента,

с/м;  $\tau_o = \kappa_3 z = \frac{z}{U}$  – время потери адсорбентом защитного действия, с.

Приведенные выражения позволяют определить продолжительность работы ПГС-полимера при адсорбции загрязнений углеводородного характера.

## 2.5. Механизм восстановления работоспособности фильтроэлементов из ПГС-полимеров

При гидродинамическом фильтровании процесс забивки загрязнениями пор фильтроэлемента протекает гораздо медленнее, чем при традиционном фильтровании с подачей жидкости перпендикулярно поверхности пористой перегородки, но со временем накопление загрязнений в порах достигает критической величины.

После забивки пор фильтроэлемента твердыми частицами загрязнений, блокирования их микрокаплями воды и насыщения поро-

вой структуры адсорбированными углеводородными загрязнениями фильтроэлемент перестает функционировать в нормальном режиме. При этом растет перепад давления до предельно допустимого значения в связи с увеличением гидравлического сопротивления пористой перегородки при постепенной забивке пор частицами загрязнений; одновременно поровая скорость потока нефтепродукта повышается до величины, при которой происходит частичный унос задержанных ранее частиц (проскок загрязнений через фильтроэлемент), а адсорбирование пористой перегородкой высокомолекулярных углеводородных соединений значительно замедляется или полностью прекращается из-за ее насыщения этими продуктами, т.е. в результате полного использования адсорбционной способности ПГС-полимера.

Восстановление эксплуатационных свойств пористой перегородки целесообразно осуществлять путем ее промывки обратным потоком продукта для удаления задержанных в порах твердых частиц, блокирующих поры микрокапель воды и адсорбированных ПГС-полимером углеводородных загрязнений.

Для удаления из пор твердых частиц загрязнений следует приложить к ним силу, которая будет больше сил, удерживающих частицы в поре за счет адгезионных и механических связей с ее стенкой. Наиболее прочные связи со стенкой поры имеют частицы, располагающиеся на нижней образующей вертикальной поры, так как на них наряду с адгезионными силами действуют также гравитационные силы.

Одиночная частица, расположенная на нижней образующей вертикальной поры, при промывке фильтроэлемента, испытывает силовое воздействие потока жидкости, вызванное лобовым сопротивлением частицы, и под действием гидродинамических сил потока смещается относительно поверхности контакта путем качения или скольжения. Отрыв частицы от поверхности поры и ее перемещение возможны, если сумма сил гидродинамического воздействия жидкости на частицу в направлении потока превысит силу трения частицы о внутреннюю поверхность поры. Это условие описывается выражением:

$$F_r > f(G - A + F_{ад}), \quad (2.125)$$

где  $F_r$  – сила гидродинамического воздействия потока, Н;  $f$  – коэффициент трения частицы о стенку поры;  $G = c_{об} l^3 g \rho_{ч}$  и  $A = c_{об} l^3 g \rho_{м}$  – соответственно сила тяжести (гравитационная) и подъемная (архимедова) силы, действующие на частицу, Н;  $c_{об}$  – коэффициент объема (постоянная, зависящая от формы частицы);  $l$  – характерный линейный размер частицы, м;  $\rho_{ч}$  и  $\rho_{м}$  – соответственно плотности частицы и масла, кг/м<sup>3</sup>;  $F_{ад}$  – сила адгезии частицы, Н.



За характерный линейный размер частицы обычно принимается диаметр равнообъемного шара. Сделав допущение, что частицы загрязнений имеют сферическую форму, получим:  $c_{об} = \frac{\pi}{6}$  и  $l_{ч} = d_{ч}$ , где  $d_{ч}$  – диаметр частицы, м.

Тогда действующая на частицу разность гравитационной и подъемной силой, называемая объемной силой, будет иметь вид:

$$F_{об} = G - A = \frac{\pi}{6} d_{ч}^3 g (\rho_{ч} - \rho_{м}). \quad (2.126)$$

Величина силы трения частицы о стенку поры зависит от ее сцепления с поверхностью стенки, которая обусловлена величиной объемной силы и силы адгезии. Сила адгезии зависит от природы контактирующих тел, межмолекулярных и электрических взаимодействий, капиллярных эффектов и других факторов. В настоящее время отсутствуют теоретические положения, на основании которых можно определить силу адгезии частиц загрязнений в капиллярах, а экспериментальные исследования этого процесса затруднены вследствие многообразия влияющих на него факторов и не дают достаточно достоверных результатов.

Сведения о влиянии силы адгезии на процесс удаления частиц загрязнений неоднозначны. В работе [134] указывается, что при промывке загрязненных поверхностей в атмосферной среде сила адгезии мелких частиц загрязнений может значительно превышать силу тяжести ( $F_{ад} \gg G$ ). Данные о соотношении этих показателей при удалении частиц загрязнений из пористых перегородок потоком жидкости, когда размеры частицы соизмеримы с диаметром пор, в известных нам исследованиях отсутствуют.

В то же время экспериментальные данные, приведенные в работе [135], свидетельствуют о том, что сила адгезии частиц к поверхности в жидкой среде на несколько порядков меньше силы адгезии, приложенной к этим частицам в воздухе. Там же указывается, что в жидкости частицы, удерживаемые на поверхности стенки, подвергаются воздействию расклинивающего давления, которое обусловлено молекулярным (Ван-дер-Ваальсовским) воздействием твердой фазы на граничный слой жидкости и образованием двойного электрического слоя на границе раздела фаз, причем, величина расклинивающего давления соизмерима с величиной силы адгезии и действует в противоположном этой силе направлении.

Предположим, что в случае взаимодействия частицы со стенкой поры сила адгезии существенно меньше объемной силы, под действием которой частица удерживается на стенке поры. Рассмотрим воздей-

ствие на частицу гидродинамических сил потока нефтепродукта при промывке им пористой перегородки.

В общем случае равнодействующая сил, приложенная к частице со стороны установившегося потока продукта, определяется силами давления и трения:

$$F_{\Gamma} = \int_S \sigma_n dS + \int_S \sigma_k dS, \quad (2.127)$$

где  $S$  – площадь поверхности частицы,  $m^2$ ;  $\sigma_n$  и  $\sigma_k$  – соответственно нормальное и касательное напряжения, Па.

Для тел неправильной или округлой формы, плохо обтекаемых потоком, при достаточной его скорости, превышающей 1 м/с, сумма сил, приложенная к ним со стороны потока, практически определяется только первым слагаемым выражения (2.127) и будет равна [135]:

$$F_{\Gamma} = \varphi \rho_m c_{\Pi} l^2 w^2, \quad (2.128)$$

где  $\varphi$  – коэффициент лобового сопротивления;  $c_{\Pi}$  – коэффициент поверхности (постоянная, зависящая от формы частицы);  $w$  – скорость потока, м/с.

С учетом принятых нами допущений, имеем:  $c_{\Pi} = \pi$ ;  $l = d_{ч}$ ;  $w = w_{\Pi}$ . Отсюда для сферической частицы:

$$F_{\Gamma} = \varphi \rho_m \pi d_{ч}^2 w_{\Pi}^2. \quad (2.129)$$

Давление противотока при промывке фильтроэлемента, необходимое для создания этой силы, будет равно:

$$P_{вх. \Pi} = \frac{4F_{\Gamma}}{\pi d_{\Pi}^2} = \varphi \rho_m \frac{d_{ч}^2}{d_{\Pi}^2} w_{\Pi}^2, \quad (2.130)$$

где  $P_{вх. \Pi}$  – давление противотока на входе в фильтроэлемент при его промывке, Па.

В случае осесимметричного обтекания частицы горизонтальным потоком продукта градиент скорости относительно поперечного сечения частицы равен нулю, а равнодействующая сил потока будет равна силе лобового сопротивления и приложена к плоскости симметрии частицы, если же частица расположена на стенке поры, то в воздействующем на нее потоке будет наблюдаться поперечный градиент скорости  $\frac{dw_{\Pi}}{dy}$ , вследствие чего происходит несимметричное ее обтекание

потоком. Нижняя часть частицы будет обтекаться потоком с меньшей скоростью, вследствие чего на эту часть будет оказываться большее давление.

Подъемная сила, вызванная поперечным градиентом скорости, будет равна:

$$F_{\pi} = \rho_m w_{\pi} \frac{dw_{\pi}}{dy} \pi d_{\text{ч}}^3. \quad (2.131)$$

Частица оторвется от стенки поры, когда подъемная сила превысит объемную силу, определяемую выражением (2.126), и будет иметь место неравенство:

$$\rho_m w_{\pi} \frac{dw_{\pi}}{dy} \pi d_{\text{ч}}^3 \geq \frac{4\pi}{3} d_{\text{ч}}^3 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_m). \quad (2.132)$$

Решая полученное уравнение, определим скорость потока продукта, при которой частица оторвется от стенки поры:

$$w_{\pi} \geq \sqrt{2gd_{\text{ч}} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_m}{\rho_m}}. \quad (2.133)$$

Обычно практическое применение формулы (2.143) в макросистемах (например, при промывке трубопроводов) затруднено тем, что найденная с ее помощью скорость потока, необходимая для отрыва частицы от стенки, должна быть обеспечена на уровне горизонтальной оси частицы и может не соответствовать средней скорости потока, однако учитывая, что размеры поры соизмеримы с диаметром частицы, можно считать, что эта разница невелика и будет компенсироваться некоторым повышением поровой скорости потока жидкости при промывке по сравнению с ее значением, полученным по формуле (2.133).

После отрыва частицы от стенки поры поток, обтекающий частицу, приобретает осесимметричный характер, и частица под действием объемной силы будет стремиться к повторному осаждению на стенку поры (рис. 2.7).

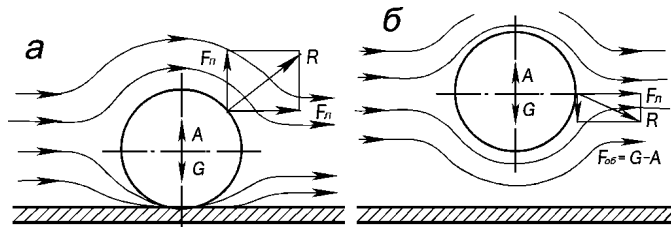


Рис. 2.7. Схема обтекания частицы потоком нефтепродукта: а – на стенке поры; б – после отрыва от стенки поры

Однако при достаточно большой скорости течения нефтепродукта этого не произойдет, так как гидродинамическая составляющая системы сил, действующих на частицу, будет значительно больше объемной составляющей этой системы. Если повторное осаждение частицы все же произойдет, возникший после этого поперечный градиент скорости вновь вызовет ее отрыв от стенки поры.

Помимо удаления из пористой перегородки твердых частиц загрязнений, при регенерации фильтроэлемента необходимо также удалить с его внутренней поверхности микрокапли воды, не прошедшие через пористую перегородку. Оставшаяся на перегородке вода частично выпадает в отстой за счет гидродинамического эффекта, а частично удерживается на поверхности перегородки за счет адгезии.

Для обеспечения отрыва микрокапли воды от поверхности пористой перегородки путем создания противотока нефтепродукта необходимо затратить энергию, равную работе адгезии, которая представляет собой разность между работой адгезии воды и работой адгезии продукта к поверхности перегородки.

Энергию, которую необходимо затратить для отрыва капли воды от перегородки, можно найти из выражения:

$$w_{AB} - w_{AM} = \sigma_B - \sigma_M + \sigma_{BM} \cos \theta, \quad (2.134)$$

где  $w_{AB}$  и  $w_{AM}$  – соответственно удельная работа адгезии воды и продукта к поверхности перегородки, Дж/м<sup>2</sup>.

В выражении (2.134) рассматриваются поры с единичным периметром, поэтому, умножив обе части этого выражения на длину линии контакта по периметру поры на поверхности раздела фаз «вода–нефтепродукт», получим величину силы, которую необходимо приложить, чтобы удалить микрокаплю воды с поверхности перегородки:

$$F_{\text{отр}} = (\sigma_B - \sigma_M + \sigma_{BM} \cos \theta) l_{\pi}, \quad (2.135)$$

где  $l_{\pi}$  – периметр поры, м.

Сила, действующая на микрокаплю воды при ее отрыве от вертикальной гидрофобной перегородки, складывается из двух составляющих – гидродинамической силы противотока нефтепродукта и эффективной гравитационной силы.

Гидродинамическую силу горизонтального потока для случая ламинарного течения нефтепродукта в пористой перегородке можно представить в виде:

$$F_{\Gamma} = S_{\kappa} \Delta P_{\pi}, \quad (2.136)$$

где  $\Delta P_{\pi} = P_{\text{вхп}} - P_{\text{выхп}}$  – перепад давления потока нефтепродукта на пористой перегородке при противоточной промывке, Па;  $P_{\text{вхп}}$  и  $P_{\text{выхп}}$  – давление потока продукта соответственно на внутренней и внешней поверхностях пористой перегородки при противоточной промывке, Па;  $S_{\kappa}$  – площадь контакта капли воды с пористой перегородкой, м<sup>2</sup>.

Действующая на каплю, эффективная гравитационная сила представляет собой совокупность объемной силы и силы сопротивления среды.

Объемная сила, действующая на каплю сферической формы, по аналогии с выражением (2.147) равна:

$$F_{об} = \frac{\pi}{6} d_k^3 g (\rho_v - \rho_m), \quad (2.137)$$

где  $d_k$  – диаметр капли воды, м;  $\rho_v$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Сила сопротивления среды при достаточно малых размерах микрокапель, осаждающихся в условиях ламинарного движения, может рассматриваться, как сумма сил трения между микрокаплями воды и нефтепродуктом:

$$T = \frac{\lambda \rho_m \pi d_k^2 w_{ос}^2}{8}, \quad (2.138)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления среды;  $w_{ос}$  – скорость осаждения капли, м/с.

Тогда эффективная гравитационная сила равна:

$$G_{эф} = F_{об} - T = \frac{\pi d_k^2}{24} [4g d_k (\rho_v - \rho_m) - 3\lambda \rho_m w_{ос}^2]. \quad (2.139)$$

Результирующая сила, действующая на каплю при очистке вертикальной гидрофобной перегородки противотоком, равна:

$$F_p = \sqrt{G_{эф}^2 + F_{Г}^2}. \quad (2.140)$$

Тогда давление на наружной поверхности фильтроэлемента, создаваемое для удаления блокирующих его микрокапель воды, можно получить из выражения:

$$P_{вхп} \geq \frac{4F_p}{\pi d_{п}^2}. \quad (2.141)$$

При противоточной промывке фильтроэлемента с целью его регенерации величины давления  $P_{вхп}$ , следует производить по большему значению, из полученных по формулам (2.130) и (2.141).

Большой интерес представляет рассмотрение возможности удаления из пористой перегородки адсорбированных его загрязнений углеводородного происхождения, т.е. исследование процесса десорбции поглощенных ПГС-полимером веществ. Однако, как отмечается в работе [140], теоретические основы десорбции разработаны гораздо слабее, чем теория статики, кинетики и динамики адсорбции, в связи, с чем имеются только отдельные решения для ряда частных случаев, содержащие существенные допущения. Трудность математического описания процесса десорбции вынуждает ограничиваться эмпирическими зависимостями для каждой конкретной системы в определенных условиях. Тем не менее, можно отметить некоторые общие моменты характерные для процессов десорбции углеводородных веществ.

В отличие от прямого процесса (адсорбции), определяющим фактором которого является диффузионные процессы, при об-

ратном процессе (десорбции) решающее значение приобретает скорость отрыва адсорбированных углеводородных или гетероорганических молекул от поверхности адсорбента.

В соответствии с теорией Ленгмюра скорость десорбции пропорциональна поверхности адсорбента и доле его заполненной поверхности [135].

$$w_d = S_a K_d \theta, \quad (2.142)$$

где  $S_a$  – поверхность адсорбента, м<sup>2</sup>;  $\theta$  – степень заполнения поверхности адсорбированным веществом;  $K_d$  – константа скорости десорбции.

Использование формулы (2.142) для обработки экспериментальных данных затруднительно из-за отсутствия прямых методов определения входящих в нее величин, но она дает представление об общих закономерностях процесса десорбции.

В работе [135] показано, что если при десорбции сохраняются условия перемещения фронта этого процесса, сформулированные для процесса адсорбции при выводе формулы (2.123), т.е. имеет место режим параллельного переноса, то указанным выражением можно пользоваться и для описания механизма десорбции, а из выражений (2.121)–(2.124) можно определить другие параметры этого процесса, взяв исходные величины с обратным знаком.

## 2.6. Обоснование методов контроля чистоты нефтепродуктов

Как показано в разделе 1.1, одной из основных причин отрицательного воздействия на окружающую среду нефтепродуктов, используемых при эксплуатации мобильной техники, является загрязненность этих продуктов, поэтому необходимо разработать методы контроля данного показателя, которые в короткие сроки при малых трудозатратах обеспечивали бы получение достаточно объективных результатов.

При анализе способов контроля чистоты в разделе 1.4 установлено, что для определения в лабораторных условиях загрязненности жидкостей может быть использован турбодинамический метод, основанный на свойстве частиц загрязнений, имеющих различную величину, осаждаться в жидкости с разной скоростью. Имеется ряд методов, основанных на определении скорости седиментации частиц, однако существующие методы регистрации (весовые, шламовые, ареометрические и т.д.), не обладают необходимой чувствительностью при достаточно малом содержании загрязнений в жидкости и дают большую погрешность при возникновении в ней конвекционных токов.

Для регистрации скорости седиментации частиц целесообразно использовать фотоколориметрический способ, который основан на измерении оптической плотности среды путем сравнения яркости

проходящего через нее светового потока с эталонным. Принцип ускоренного метода определения дисперсного состава механических примесей в жидкостях основан на том, что частицы различного размера и плотности будут оседать с разной скоростью, в соответствии с формулой Стокса, выражающей силу сопротивления  $f_c$ , оказываемую вязкой средой движущейся шарообразной частице:

$$f_c = -\pi \delta w_{oc}, \quad (2.143)$$

где  $\delta$  – диаметр частицы, мкм;  $w_{oc}$  – скорость осаждения частицы, м/с.

Оседание частицы, имеющей плотность  $\rho_{\text{ч}}$ , в вязкой среде с плотностью  $\rho_c$  происходит под действием силы тяжести  $f_g$ , которая в этих условиях равна:

$$f_g = mg = \frac{\pi \delta^3}{6} (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g. \quad (2.144)$$

При достижении равномерной скорости падения сила сопротивления среды  $f_c$  уравнивает силу тяжести  $f_g$ . Из условия равенства этих сил получаем выражение для вычисления скорости осаждения частицы по заданным ее диаметру и плотности, а также по плотности и вязкости среды:

$$w_{oc} = \frac{1}{18} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_c}{\mu} g \delta^2. \quad (2.145)$$

А если скорость осаждения частицы известна из наблюдений, можно определить ее диаметр:

$$\delta = \sqrt{\frac{18\mu}{(\rho_{\text{ч}} - \rho_c) g} w_{oc}}. \quad (2.146)$$

Эти формулы получены при допущении о несжимаемости и бесконечной протяженности среды, а также и бесконечно малой скорости движения жидкости на поверхности частицы. С учетом этих допущений область применения закона Стокса ограничена со стороны как мелких, так и крупных частиц, однако при соответствующих поправках этот закон можно распространить на достаточно большой диапазон размеров частиц. Учитывая, что размер частиц, загрязняющих моторные топлива и масла, редко превышает 200 мкм, а нижний предел измерений размеров частиц ограничен 5 мкм, закон Стокса использован без поправок, необходимых для определения размера частиц, соизмеримых со средней длиной свободного пробега молекул, т.е. для частиц мельче 0,5 мкм, а также для более крупных частиц, размером больше 200 мкм, когда нельзя пренебречь инерционными силами. Учитывая, что в формулу (2.146) входит величина плотности среды и взвешенной частицы, необходимо исследовать зависимость скорости осаждения от плотности частиц.

Анализ дисперсионного состава примесей с помощью фотоэлектродориметров основан на том, что пучок света, прошедший через жидкую среду, становится менее интенсивным. Чем оптически плотнее среда, т.е. чем больше загрязнений содержится в жидкости, тем более ослабляется интенсивность проходящего через нее пучка света:

$$D = \lg \frac{J'_0}{J_\delta} = \lg J'_0 - \lg J_\delta, \quad (2.147)$$

где  $J'_0$  и  $J_\delta$  – интенсивности пучков света соответственно исходного (падающего) и прошедшего через среду, содержащую загрязнения.

Принимая вместо интенсивности падающего света  $J'_0$  интенсивность света, прошедшего через чистую (эталонную) среду  $J_0$ , получим относительную оптическую плотность загрязнений среды, характеризующую ослабление света суспензированными в ней частицами:

$$D_0 = (\lg J_0 - \lg J_\delta). \quad (2.148)$$

Если измерять интенсивность света, прошедшего через суспензию за одинаковое время от начала осаждения частиц на одном и том же уровне, то, очевидно, световой поток будет пропорционален суммарной поверхности частиц, т.е. пропорционален концентрации суспензии:

$$\int_0^\delta = k (\lg J_0 - \lg J_\delta), \quad (2.149)$$

где  $\int_0^\delta$  – поверхность всех частиц взвеси, диаметр которых меньше  $\delta$ ,

мкм;  $k$  – константа светопоглощения, зависящая от светопроницаемости, отражательной способности, прозрачности и других свойств загрязняющих рабочую жидкость частиц.

Световой поток, проходящий через стеклянную кювету с суспензией, направляется на фотоэлемент, в котором возбуждается ток, пропорциональный интенсивности светового потока. По измерениям силы фототока определяются величины суммарных поверхностей суспензированных в жидкости частиц и можно судить о том, частицы какого размера осадилась, а какие остались во взвешенном состоянии. Вычислив суммарную поверхность частиц всех размеров по формуле (2.149), определяем количество частиц каждого размера, которые будут занимать определенную площадь. Для этого необходимо рассчитать коэффициент  $k$ , входящий в выражение (2.149), для каждой марки исследуемого топлива и для различных диспергированных в нем загрязнений. Затем по скорости осветления суспензии находим размер частиц, находившихся во взвешенном состоянии. Скорость осветления, а значит, и скорость осаждения частиц, можно определять при

помощи приборов ФЭК-М или ЛФМ-69, а также фотоэлектроколориметров других типов.

При эксплуатации тракторов и самоходной сельскохозяйственной техники не всегда представляется возможным использовать для оценки загрязненности применяемого в двигателях этих машин топлива инструментальные методы, а визуальный метод имеет недостаточную разрешающую способность, так как невооруженный глаз способен различать в проходящем свете частицы размером 40 мкм, что значительно превышает требования к чистоте топлива для дизелей. По отношению к бесцветным и слабоокрашенным частицам возможности человеческого зрения еще ниже, хотя именно такие частицы (кварц, корунд и т.п.) вследствие своей высокой твердости вызывают максимальный износ сопряженных деталей топливной аппаратуры дизеля.

Для оценки размеров твердых частиц, загрязняющих топливо, целесообразно использовать эффект обтекания, возникающий в тонком слое текущей жидкости при наличии в ней указанных частиц. Использование этого эффекта позволяет существенно повысить возможности наблюдателя при фиксации мелких частиц без применения сложных оптических устройств даже в непрозрачной жидкости. Благодаря эффекту обтекания можно определять максимальный размер содержащихся в жидкости частиц, что является наиболее актуальной задачей в области обеспечения чистоты топлив при эксплуатации дизелей тракторов и сельскохозяйственных машин.

Метод контроля чистоты жидкостей с использованием эффекта обтекания основан на том, что при наблюдении в проходящем свете тонкого слоя жидкости, стекающего по наклонной поверхности, в случае оседания на этой поверхности твердых частиц над ними происходит утолщение стекающего слоя жидкости и возникают возмущения ламинарного течения этого слоя в виде завихрений и ряби. Определить размер находящейся в жидкости частицы можно по величине возникающего из-за нее возмущения, т.е. по высоте образующейся волны. Однако определить высоту волны или ее проекцию на плоскость, перпендикулярную наклонной поверхности и расположенную вдоль этой поверхности без использования достаточно сложных приспособлений не представляется возможным, поэтому целесообразно увязать размеры частицы с длиной возникающей волны.

Описание явления обтекания жидкостью твердых частиц только на основании законов гидродинамики является весьма сложной задачей, поэтому для ее решения имеет смысл воспользоваться теорией комплексных чисел. Описанный выше случай течения жидкости можно рассматривать как несовершенный, или волнистый гидравлический

прыжок (прыжок-волну) [136], который представлен рядом последовательных постепенно затухающих волн. При оценке эффекта обтекания с целью определения размеров обтекаемой частицы затухающими волнами можно пренебречь, а рассмотреть профиль лба прыжка-волны и высоту первого гребня волны. Сделаем допущение, что первый гребень можно рассматривать в виде уединенной волны. При решении нелинейной задачи об уединенной волне используется метод конформных отображений, в частности, принцип сжатых отображений [137]. В результате получены выражения для определения глубины потока над вершиной первого гребня прыжка-волны:

$$\eta_b = \frac{1}{2} Fr^2 \left\{ 1 - \exp \left[ -4 \ln Fr \left( 1 + \frac{3}{2} \ln Fr \right) \right] \right\}, \quad (2.150)$$

где  $\eta_b = \frac{h_b}{h_0}$  – безразмерная глубина под вершиной волны;  $h_0$  и  $h_b$  – соответственно глубина невозмущенного потока и потока под вершиной волны, м;  $Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gh_0}}$  – критерий Фруда;  $V_0$  – скорость невозмущенного потока (зависит от угла наклона поверхности), м/с.

Уравнение (2.150), описывающее профиль лба прыжка-волны (рис. 2.8), имеет весьма сложный вид. Для рассматриваемого случая его можно представить в более простой форме:

$$\eta_b = 1 + (h_g - 1) \text{ch}^2 \left( \frac{x}{h} \sqrt{\frac{3}{2} \ln Fr} \right), \quad (2.151)$$

где  $h$  – глубина потока на произвольном расстоянии  $x$  от вершины волны, м.

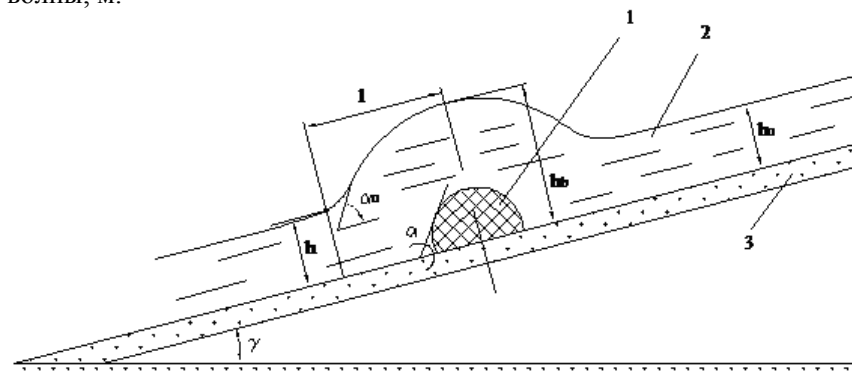


Рис. 2.8. Расчетная схема для определения длины волны при обтекании частицы потоком жидкости:

1 – частица; 2 – слой жидкости; 3 – прозрачная поверхность с углом наклона  $\gamma$

Отсюда можно определить длину лба прыжка-волны  $l$ , которая равна расстоянию от вершины волны до точки, где глубина потока  $h$  практически не отличается от глубины невозмущенного потока  $h_0$   $\left(\frac{h}{h_0} \leq 1,01\right)$ .

$$l = \left[ \sqrt{\frac{2}{3}} \ln Fr \operatorname{Arch}(10\sqrt{\eta_b - 1}) \right] h_0. \quad (2.152)$$

Угол волнового склона лба прыжка-волны  $\alpha_0$  (максимальный угол наклона поверхности потока в точке перегиба) определяется из выражения:

$$\alpha_0 = \arctg \left[ \frac{2}{3} (\eta_b - 1) \sqrt{2 \ln Fr} \right]. \quad (2.153)$$

Зависимость между углом волнового склона лба прыжка-волны и размером частицы устанавливается из предположения, что угол обтекания частицы  $\alpha$  равен углу волнового склона  $\alpha_0$ . Из приведенных выражений видно, что чем больше высота волны, зависящая от размера частицы, тем больше угол волнового склона лба прыжка-волны и, соответственно больше длина волны. По этому показателю можно с достаточной степенью точности определить размер частицы, из-за возмущающего действия которой возникла данная волна. Эту взаимосвязь представлена в форме табл. 2.2.

Таблица 2.2

Зависимость размеров частиц загрязнений от длины волны

Размер частицы, мкм	5	10	20	30	40
Длина волны, мкм	20	40	81,3	126	154

Таким образом, предложенным методом можно без помощи оптических приспособлений фиксировать в нефтепродукте частицы размерами 10 мкм и более, что позволит в условиях эксплуатации дизелей выявлять наличие в топливе, заливаемом в бак, загрязнений, размеры которых превышают существующие требования.

## Глава 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ С БИОТОПЛИВАМИ

### 3.1. Особенности транспортно-складских операций с биотопливами на основе растительных масел

В качестве альтернативных моторных топлив можно использовать различные продукты, их сравнительный анализ приведен в разделе 1.5. Показано, что наиболее пригодны для использования в условиях средней полосы России топлива на основе растительных масел.

Исследовались свойства различных перспективных топлив: рапсового масла (РМ), смесового топлива – смесь РМ и дизельного топлива (ДТ), а также эфиров жирных кислот – метилового эфира рапсового масла (МЭРМ) и метилового эфира подсолнечного масла (МЭПМ). Поскольку эти топлива пока не нашли широкого применения в нашей стране, целесообразно исследовать их свойства с точки зрения топливо-заправочных операций с этими продуктами. Эти операции затрудняются при работе с РМ высокой вязкостью этого продукта, а при работе с эфирами жирных кислот – высокой гигроскопичностью и склонностью к гидролизу при взаимодействии с водой, поэтому представляет интерес изучение процесса обводнения этих продуктов. Кроме того, эти продукты обладают агрессивностью по отношению к некоторым конструкционным материалам.

### 3.2. Исследование процесса обводнения МЭРМ при транспортировании и хранении и зависимость ее от продолжительности хранения

В разделе 1.1 рассмотрены источники попадания влаги в нефтепродукты и указано, что данные об обводнении МЭРМ при транспортных, складских и заправочных операциях в доступной нам литературе отсутствуют. Целесообразно рассмотреть механизм попадания воды в МЭРМ при этих операциях.

Влага, попадающая в МЭРМ, имеет преимущественно атмосферное происхождение и первоначально находится в атмосфере в виде водяных паров или осадков. Количество водяных паров, попадающих в емкость (резервуар, транспортную или заправочную цистерну и т. п.) в процессе выдачи из нее продукта (при его сливе, заправке техники и т.д.) можно определить из выражения

$$G_{вбд} = 0,001 V_{п} C_{в}, \quad (3.1)$$

где  $G_{вбд}$  – масса атмосферной влаги, попавшей в емкость при большом дыхании, кг;  $V_{п}$  – объем сливаемого из емкости продукта, м<sup>3</sup>;  $C_{в}$  – абсолютная влажность воздуха во время слива продукта, г/м<sup>3</sup>.

Это выражение справедливо для случая, когда газовое пространство емкости непосредственно соединяется с атмосферой, а упругостью паров топлива можно пренебречь. Однако емкости для хранения и транспортирования светлых нефтепродуктов оборудованы дыхательной арматурой, рассчитанной на открытие при избыточном давлении и вакууме, отличных от атмосферного давления, а находящийся в емкости продукт обладает определенной упругостью паров.

Влажный воздух поступает в емкость при больших дыханиях, т.е. при возникновении в емкости вакуума вследствие выдачи из нее продукта, или при малых дыханиях, т.е. при возникновении вакуума из-за понижения температуры газового пространства емкости и хранимого в ней продукта, что вызывает частичную конденсацию паров продукта и уменьшение его объема.

При большом дыхании поступление воздуха в резервуар или транспортную цистерну, оборудованные дыхательными клапанами, начинается тогда, когда вакуум в этой емкости станет равным вакууму, на который отрегулирован клапан.

Для определения количества воздуха, поступающего в емкость, сделаем допущение, что этот процесс подчиняется закону Бойля-Мариотта, то есть протекает при постоянной температуре, и произведение давления на объем на протяжении всего процесса не изменяется ( $PV = \text{const}$ ). Тогда

$$P_a V_{\text{возд}} = P_{\text{емк}} V_{\text{п}}, \quad (3.2)$$

где  $P_a$  и  $P_{\text{емк}}$  – соответственно атмосферное давление и давление в емкости после открытия клапана, Па;  $V_{\text{возд}}$  и  $V_{\text{п}}$  – соответственно объем воздуха, поступившего в емкость, и объем продукта, выданного из нее, м<sup>3</sup>.

Следует учитывать, что атмосферное давление является суммой парциальных давлений всех газов, входящих в состав атмосферного воздуха, в том числе и содержащихся в нем водяных паров.

Давление в резервуаре будет меньше атмосферного на величину  $P_{\text{кв}}$  равную разрежению, при котором открывается дыхательный клапан, а парциальное давление поступившего в емкость воздуха, в соответствии с законом Дальтона, будет меньше общего давления в резервуаре или цистерне на величину парциального давления паров продукта. Считая, что концентрация этих паров соответствует полному насыщению газового пространства емкости, т.е. парциальное давление паров продукта равно их упругости  $P_y$ , можно представить выражение (3.2) в виде:

$$P_a V_{\text{возд}} = (P_a - P_{\text{кв}} - P_y) V_{\text{п}}, \quad (3.3)$$

откуда

$$V_{\text{возд}} = \frac{P_a - P_{\text{кв}} - P_y}{P_a} V_{\text{п}}, \quad (3.4)$$

а количество атмосферной влаги, поступающей в емкость при большом дыхании, определяется из выражения:

$$G_{\text{вбд}} = \frac{0,001 V_{\text{п}}}{P_a} (P_a - P_{\text{кв}} - P_y) C_{\text{в}}. \quad (3.5)$$

Аналогичным путем, пользуясь уравнением газового состояния и законом Дальтона, можно определить количество влаги, поступающей в емкость при малых дыханиях, т.е. при создании в ее газовом пространстве вакуума из-за уменьшения объема продукта и снижения упругости его паров, что актуально для продуктов с высокой упругостью паров. Однако данные об упругости паров МЭРМ отсутствуют, а коэффициент теплового расширения составляет около 0,0009 1/град, поэтому влияние малых дыханий на обводнение МЭРМ при его хранении требует изучения.

Кроме попадания паров влаги в газовое пространство резервуара или цистерны с атмосферным воздухом при срабатывании дыхательного клапана влага может поступать в емкость также в виде атмосферных осадков при наличии неплотностей и зазоров в горловине этой емкости. Количество влаги, попавшей в МЭРМ через зазоры в горловине, равно

$$G_{\text{вз}} = \frac{2\pi R \delta D_{\text{ос}} \rho_{\text{в}}}{1000}, \quad (3.6)$$

где  $G_{\text{вз}}$  – количество влаги, попавшей через зазоры, кг;  $R$  – радиус горловины, м;  $\delta$  – средняя величина зазора, м;  $D_{\text{ос}} = \frac{G_{\text{г}} \tau_{24}}{\tau_{\text{ос}}}$  – количество

осадков, мм;  $G_{\text{г}}$  – средняя норма осадков для данной местности, мм/год;  $\tau$  – продолжительность хранения или транспортирования МЭРМ в данной емкости, сут;  $\tau_{\text{ос}}$  – средняя продолжительность осадков для данной местности, час/год;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

В случае разгерметизации порожних емкостей перед их наливом (для внутреннего осмотра, зачистки и т.п.) количество поступившей в емкость влаги можно определить из выражения

$$G_{\text{впор}} = 0,001 V_{\text{емк}} C_{\text{впор}}, \quad (3.7)$$

где  $G_{\text{впор}}$  – количество атмосферной влаги, поступившей в порожнюю емкость при ее разгерметизации, кг;  $V_{\text{емк}}$  – объем емкости, м<sup>3</sup>;  $C_{\text{впор}}$  – абсолютная влажность воздуха при его поступлении в порожнюю емкость, г/м<sup>3</sup>.

Если в промежуток времени между разгерметизацией емкости и наливом продукта температура воздуха понизится и его абсолютная

влажность уменьшится, то количество влаги, сконденсировавшейся на внутренних поверхностях емкости за этот промежуток, составит:

$$G_{\text{вкон}} = 0,001 V_{\text{емк}} (C_{\text{впор}} - C_{\text{внал}}), \quad (3.8)$$

где  $C_{\text{внал}}$  – абсолютная влажность воздуха, вытесняемого из емкости при налив в нее МЭРМ, г/м<sup>3</sup>.

Суммарное количество влаги, попавшей в емкость при транспортно-складских операциях с МЭРМ, составляет:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{вбд}} + G_{\text{вз}} + G_{\text{вкон}}. \quad (3.9)$$

Из этого количества часть влаги растворится в МЭРМ, часть ее образует с эфиром эмульсию, а часть останется в газовом пространстве емкости в виде паровой фазы. Можно предположить с высокой степенью вероятности, что капельная влага, попавшая в емкость в виде осадков через неплотности в горловине и сконденсировавшаяся в порожней емкости попадет в продукт, а пары воды, попавшие в газовое пространство емкости при открытии дыхательного клапана, попадут в него частично, и количество поступившей в топливо влаги в этом случае будет зависеть от ряда факторов, к которым относятся химический состав продукта, влажность контактирующего с ним воздуха, температура и давление в емкости, площадь зеркала МЭРМ и толщина его слоя, интенсивность движения воздуха в газовом пространстве емкости.

Известно, что растворимость воды в нефтепродуктах невелика. Так, в дизельном топливе ДЛ этот показатель колеблется от 0,0021 % при –10 °С до 0,0104 % при 30 °С [138]. Значения растворимости воды в МЭРМ требуют определения. Влияние влажности воздуха на концентрацию растворенной в продукте воды объясняется тем, что растворенная вода находится в состоянии динамического равновесия с содержащимся в воздухе парами воды, если температура этих сред одинакова. Зависимость между содержанием растворенной воды в продукте и относительной влажностью воздуха носит линейный характер и может быть описана законом Генри:

$$c = \varphi C, \quad (3.10)$$

где  $c$  – концентрация воды в топливе, %;  $C$  – растворимость воды в продукте при данной температуре, %;  $\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}}$  – относительная влаж-

ность воздуха, %;  $P_{\text{п}}$  и  $P_{\text{н}}$  – соответственно парциальное давление паров воды и давление ее насыщенных паров при данной температуре, Па.

В реальных условиях хранения и транспортирования МЭРМ его температура практически всегда будет отличаться от температуры окружающей среды, что объясняется большей тепловой инерционностью жидкого продукта по сравнению с воздухом. Этим объясняется возможность образования в продукте эмульсионной воды. При резком

потеплении происходит конденсация водяных паров из теплого воздуха на поверхности холодного продукта, а при охлаждении растворенная вода из продукта не успевает перейти в воздух, абсолютная влажность которого также снижается, и выделяется в виде микрокапель, образуя эмульсионную воду, находящуюся в динамическом равновесии с водой, растворенной в МЭРМ. С течением времени микрокапли воды могут укрупняться и, осаждаваясь, образовывать на дне емкости слой отстойной (подтоварной) воды, которая также находится в динамическом равновесии с растворенной в продукте водой.

Процесс осаждения микрокапель воды первоначально подчиняется закономерностям, которые характерны для свободного осаждения, когда капли не соприкасаются между собой и на каждую из них действует сила тяжести, вектор которой направлен вертикально вниз, подъемная сила, вектор которой направлен вертикально вверх, и сила сопротивления среды, вектор которой также направлен вертикально вверх.

Сила тяжести, действующая на каплю сферической формы

$$G = \frac{1}{6} \pi d_{\text{к}}^3 g \rho_{\text{в}}, \quad (3.11)$$

где  $d_{\text{к}}$  – диаметр капли, м.

Подъемная сила, действующая на каплю, в соответствии с законом Архимеда, равна

$$A = \frac{1}{6} \pi d_{\text{к}}^3 g \rho_{\text{п}}, \quad (3.12)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>.

Сила сопротивления среды зависит от режима движения капли и физических свойств продукта. Если считать, что при достаточно малых размерах микрокапли ее осаждение будет происходить в условиях ламинарного движения, можно рассматривать силу сопротивления среды как сумму сил трения между каплей воды и продуктом:

$$R = \frac{\lambda \rho_{\text{п}} \pi d_{\text{к}}^2 v_{\text{ос}}^2}{8}, \quad (3.13)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления;  $v_{\text{ос}}$  – скорость осаждения капли, м/с.

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

$$\frac{1}{6} \pi d_{\text{к}}^3 g (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}}) - \frac{1}{8} \pi d_{\text{к}}^2 \rho_{\text{п}} \lambda v_{\text{ос}}^2 = 0. \quad (3.14)$$

Известно, что при ламинарном режиме осаждения капли коэффициент сопротивления среды, определенный экспериментально, равен



$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\mu_{\text{п}}}{v_{\text{ос}}d_{\text{к}}\rho_{\text{п}}}, \quad (3.15)$$

где  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса, характеризующий гидродинамическое подобие при движении потоков жидкости (в рассматриваемом случае при обтекании осаждающейся капли воды продуктом);  $\mu_{\text{п}}$  – динамическая вязкость МЭРМ, Н·с/м<sup>2</sup>;

Подставив значение коэффициента сопротивления среды, полученное по формуле (3.15) в уравнение (3.14), можно определить скорость осаждения капли воды в МЭРМ:

$$v_{\text{ос}} = \frac{gd_{\text{к}}^2(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}{18\mu_{\text{п}}}. \quad (3.16)$$

Полученное выражение аналогично известному закону Стокса, описывающему процесс осаждения твердых частиц в жидкости, для случая осаждения сферической капли воды в МЭРМ с меньшей плотностью, чем вода. Однако на границе раздела жидкостей вследствие поверхностного взаимодействия между молекулами воды и продукта будут возникать перемещения воды внутри капли, влияющие на скорость ее осаждения за счет увеличения силы сопротивления среды движению капли воды в продукте.

Величина силы сопротивления среды с учетом тормозящего воздействия на процесс осаждения микропотоков внутри капли воды будет иметь вид:

$$R = \pi\mu_{\text{п}}v_{\text{ос}}d_{\text{к}} \frac{2\mu_{\text{п}} + 3\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{п}} + \mu_{\text{в}}}, \quad (3.17)$$

где  $\mu_{\text{в}}$  – динамическая вязкость воды, Н·с/м<sup>2</sup>.

Тогда уравнение, аналогичное выражению (3.16), примет вид:

$$v_{\text{ос}} = \frac{gd_{\text{к}}^2(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}{6\mu_{\text{п}}} \frac{\mu_{\text{п}} + \mu_{\text{в}}}{2\mu_{\text{п}} + 3\mu_{\text{в}}}. \quad (3.18)$$

Из анализа выражений (3.16) и (3.18) можно сделать вывод, что при прочих равных условиях скорость осаждения капель воды в МЭРМ зависит от размера этих капель, причем между этими величинами существует квадратичная зависимость. Поэтому процесс образования подтоварной воды в емкости будет зависеть от количества и размера микрокапель воды, диспергированных в МЭРМ.

Количество подтоварной воды, образовавшейся в емкости за некоторый промежуток времени, можно найти из выражения:

$$V_{\text{отс}} = \frac{\pi}{2g} \frac{N\mu_{\text{п}}V_{\text{п}}\tau d_{\text{к}}}{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}}} \frac{2\mu_{\text{п}} + 3\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{п}} + \mu_{\text{в}}}, \quad (3.19)$$

где  $V_{\text{отс}}$  – объем подтоварной воды, м<sup>3</sup>;  $N$  – количество микрокапель воды в единице объема продукта в начальный период, шт./м<sup>3</sup>;  $V_{\text{п}}$  – объем продукта в емкости, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – продолжительность осаждения микрокапли воды, с.

При выводе выражения (3.19) принято, что микрокапли воды со средним диаметром  $d_{\text{к}}$  в начальный момент равномерно распределены по всему объему МЭРМ, поэтому путь капли при осаждении принимаем равным половине высоты налива продукта. Данное выражение носит оценочный характер из-за трудностей определения количества капель в продукте и их размера.

Количество влаги, сконденсировавшейся из воздуха на поверхности продукта при повышении температуры, и количество свободной воды, перешедшей в продукт при охлаждении из растворенного состояния, аналитически определить с достаточной степенью точности также невозможно, так как эти процессы зависят, помимо температуры и давления, также от многих трудно поддающихся учету факторов, к которым относятся скорость изменения температуры воздуха и продукта, скорость диффузии водяного пара в газовой фазе к поверхности продукта, скорость диффузии молекул растворенной воды на границе раздела фаз воздух-продукт и в самом продукте, интенсивности движения газовой среды над его поверхностью и т.д. Поэтому приведенные закономерности, описывающие механизм обводнения МЭРМ атмосферной влагой дают неполную картину этого процесса и требуют корректировки с помощью экспериментальных данных.

Анализ рассмотренного выше механизма обводнения МЭРМ при попадании в него атмосферной влаги позволяет сделать вывод, что удалять из продукта растворенную воду нецелесообразно, если этот продукт контактирует с атмосферным воздухом. В этом случае при любых колебаниях температуры или давления вследствие изменяющегося динамического равновесия между растворенной водой, находящейся в МЭРМ, и водяными парами в газовой фазе будет происходить насыщение продукта влагой или ее самопроизвольное удаление из продукта путём перехода в водяной пар.

Задача состоит в удалении из МЭРМ эмульсионной воды, оказывающей отрицательное влияние на работу двигателей, поэтому следует рассмотреть возможность создания достаточно эффективного устройства для удаления эмульсионной воды из МЭРМ. При этом максимальное суммарное количество влаги, способное находится в продукте в свободном состоянии, можно определить, раскрыв величины, входящие в выражение (3.9), и учтя выражение (3.10), в котором относительная влажность воздуха принимается за 100 % (считаем, что воз-

дух в газовом пространстве емкости полностью насыщен водяными парами):

$$G_{\text{св max}} = 0,001 \left[ V_{\text{п}} \frac{P_{\text{a}} - P_{\text{кв}}}{P_{\text{a}}} C_{\text{в}} - \rho_{\text{п}} C V_{\text{ост}} + 2\pi R \delta D_{\text{ос}} \rho_{\text{в}} + (V_{\text{п}} + V_{\text{ост}})(C_{\text{впор}} - C_{\text{нал}}) \right], \quad (3.20)$$

где  $G_{\text{св max}}$  – максимальное количество свободной воды в МЭРМ, кг;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность МЭРМ, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ост}} = V_{\text{ем}} - V_{\text{п}}$  – количество МЭРМ, оставшегося в резервуаре после слива, м<sup>3</sup>.

Именно этим количеством свободной воды следует задаваться при расчете средств для обезвоживания МЭРМ при заправке сельскохозяйственной техники. При этом часть эмульсионной воды, выпавшая в осадок и образовавшая подтоварную воду, количество которой определяется выражением (3.19), не учитывалась, так как продолжительность отстаивания МЭРМ на нефтескладах сельскохозяйственных предприятий обычно невелика; так экспериментально установлено, что капли воды диаметром 15–20 мкм осаждаются в дизельном топливе на глубину 1 м в течение 12 ч и более, а капли диаметром 10–15 мкм проходят это расстояние за 30 ч. Аналогичные данные по МЭРМ отсутствуют, но, ввиду его более высокой вязкости по сравнению с дизельным топливом, скорость осаждения в нем капель воды будет еще меньше.

### 3.3. Обезвоживание смесевых топлив с помощью ПГС-полимеров

В разделе 3.2 показано, что основным источником обводнения моторных топлив, в том числе и МЭРМ, является атмосферная влага, содержащаяся в воздухе в виде водяных паров или в виде осадков – капельных (дождь, туман) и кристаллических (снег, иней, град) [139], причем в МЭРМ влага может содержаться в растворенном состоянии или в виде свободной (эмульсионной) воды. В моторных топливах нефтяного происхождения растворимость воды сравнительно невелика. Однако в МЭРМ, который относится к классу сложных эфиров, обладающих, как известно большой гигроскопичностью, этот показатель может иметь достаточно высокие значения. На количество растворенной в продукте воды значительное влияние оказывает его температура, а также температура и влажность контактирующего с ним воздуха.

Свободная вода в МЭРМ образуется из растворенной воды при охлаждении продукта, поскольку растворимость воды падает при понижении температуры, или попадает в него непосредственно из атмосферы в виде осадков. При соблюдении правил эксплуатации резер-

вуаров и транспортных цистерн, когда попадание капельной влаги в эти емкости не происходит, практически единственным источником обводнения МЭРМ является контактирование продукта с влажным воздухом, влага из которого поглощается МЭРМ, или конденсация водяных паров на стенках порожней емкости. После заполнения емкости МЭРМ конденсат смывается этим продуктом и растворяется в нем. Таким образом, на первом этапе обводнения продукта происходит растворение в нем воды, которая затем при понижении температуры может перейти в эмульсионное состояние.

Накопление растворенной воды в МЭРМ в течение некоторого промежутка времени происходит постепенно, достигая к какому-то моменту  $\tau_{\text{к}}$  состояния полного насыщения (теоретически  $\tau_{\text{к}} \rightarrow \infty$ , но реально имеет конечное значение). В связи с тем, что существует состояние предельного насыщения МЭРМ растворенной водой, предположим, что в этом продукте содержится определенное количество молекул, способных удерживать воду в растворенном состоянии.

По аналогии с другими сложными эфирами будем считать, что насыщение МЭРМ растворенной водой протекает неравномерно, замедляясь по мере приближения к состоянию полного насыщения. На основе этого можно сделать предположение, что интенсивность накопления растворенной воды в МЭРМ прямо пропорциональна численности свободных от воды молекул.

В связи с тем, что сумма оставшихся свободными и уже связанных с водой молекул постоянна, справедливо предположение, что интенсивность накопления растворенной воды в МЭРМ обратно пропорциональна количеству уже связанных с водой молекул этого продукта, т.е. имеет место зависимость:

$$\alpha = \frac{1}{\tau_{\text{ср}}}, \quad (3.21)$$

где  $\alpha$  – интенсивность процесса связывания молекул воды с молекулами МЭРМ, 1/с;  $\tau_{\text{ср}}$  – средняя продолжительность связывания молекул воды с молекулами МЭРМ, с.

Процесс связывания молекул МЭРМ с водой описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чапмена [139]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\text{своб}}}{d\tau} &= -\alpha N_{\text{своб}}; \\ \frac{dN_{\text{связ}}}{d\tau} &= -\alpha N_{\text{связ}}, \end{aligned} \quad (3.22)$$

где  $N_{\text{своб}}$  и  $N_{\text{связ}}$  – соответственно количество свободных и связанных с водой молекул, ед., в некоторый момент времени  $\tau$ .

Поскольку общее количество молекул МЭРМ в процессе его обводнения остается постоянным, систему уравнений (3.22) можно дополнить уравнением баланса:

$$N_{\text{своб}} + N_{\text{связ}} = N_0, \quad (3.23)$$

где  $N_0$  – начальное количество молекул, ед.

Разделив переменные в первом дифференциальном уравнении системы (3.22) и проинтегрировав его, найдем количество несвязанных с водой молекул МЭРМ:

$$N_{\text{своб}} = c e^{(-\alpha\tau)}. \quad (3.24)$$

Учитывая, что при  $\tau = 0$   $N_{\text{своб}} = N_0$ , получим:

$$N_{\text{своб}} = N_0 e^{(-\alpha\tau)}, \quad (3.25)$$

а, используя выражение (2.250), получим:

$$N_{\text{связ}} = N_0 (1 - e^{(-\alpha\tau)}). \quad (3.26)$$

Введем обозначения:

$$c_\tau = \frac{N_{\text{связ}} m_{\text{в}}}{m_{\text{э}}} \text{ и } c_{\text{max}} = \frac{N_{\text{связ}} m_{\text{в}}}{m_{\text{э}}},$$

где  $c_\tau$  и  $c_{\text{max}}$  – концентрация растворенной воды в МЭРМ соответственно в момент времени  $\tau$  и при полном насыщении ( $\tau \rightarrow \infty$ ), %;  $m_{\text{в}}$  – масса растворенной воды, связанная с одной молекулой рапсового метилэфира, г;  $m_{\text{э}}$  – масса МЭРМ, г.

Подставив эти обозначения в выражение (3.26), получим формулу для расчета концентрации растворенной в продукте воды в любой произвольный момент времени  $\tau$ :

$$c_\tau = c_{\text{max}} (1 - e^{(-\alpha\tau)}). \quad (3.27)$$

В выражении (3.27) неизвестны значения величин  $c_{\text{max}}$  и  $\alpha$ . Значение концентрации растворенной воды в МЭРМ при полном насыщении  $c_{\text{max}}$  может быть экспериментально определено после достаточно длительного контактирования продукта с водяными парами, когда концентрация растворенной в нем воды стабилизируется и ее приращение во времени практически равняется нулю. Значение интенсивности процесса насыщения МЭРМ водой  $\alpha$  также может быть получено экспериментально путем определения изменения концентрации растворенной воды в продукте в течение всего срока его контактирования с водяными парами при постоянстве прочих параметров этого процесса (температуры, относительной влажности воздуха, соотношения объемов газового пространства емкости и жидкости и т.п.)

Поскольку в процессе хранения МЭРМ и при измерении концентрации растворенной в нем воды присутствуют случайные составляющие, объективной оценкой значения величины  $\alpha$  может служить

ее значение, определенное с использованием среднеквадратичной аппроксимации. Для упрощения вида аппроксимирующей функции проведем тождественное преобразование выражения (3.27) к виду:

$$1 - \frac{c_\tau}{c_{\text{max}}} = e^{(-\alpha\tau)} \quad (3.28)$$

и введем обозначения:

$$z = 1 - \frac{c_\tau}{c_{\text{max}}}; x = \tau; a = -\alpha.$$

Тогда выражение (3.28) примет вид:

$$z = e^{ax}. \quad (3.29)$$

Прологарифмировав выражение (3.29) и произведя замену  $\ln z = y$ , получим

$$y = ax. \quad (3.30)$$

Условие минимальной среднеквадратичной погрешности аппроксимации имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2 = \min, \quad (3.31)$$

где  $n$  – количество измерений концентрации растворенной воды, шт.

Продифференцировав выражение (3.31) по  $a$  и приравняв полученный результат к нулю, после преобразований получим:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (3.32)$$

где  $y_i = \ln(1 - \frac{c_i}{c_{\text{max}}})$ ;  $x_i = \tau_i$ ;  $c_{\text{max}} = c_{\text{п}}$  при ( $x_i = x_{\text{п}}$ ) – максимальное значение концентрации растворенной воды при последнем измерении, %.

Окончательно аппроксимирующая функция зависимости концентрации растворенной воды в МЭРМ от продолжительности его хранения при постоянных внешних условиях примет вид:

$$c_\tau = c_{\text{max}} [1 - e^{a\tau}]. \quad (3.33)$$

При определении коэффициента среднеквадратичной аппроксимации  $a$  в выражении (3.32) в качестве предельной концентрации растворенной воды  $c_{\text{max}}$  принято последнее из измеренных экспериментальных значений этой величины, которое всегда несколько меньше фактического, так как продолжительность эксперимента не бесконечна. Значение  $c_{\text{max}}$  может быть получено с заданной степенью точности

методом последовательных приближений по критерию минимума среднеквадратичного отклонения расчетных значений концентрации растворенной воды  $c_{\tau}$  от полученных экспериментально значений  $c_i$ .

Преобразовав выражение (3.33), можно получить зависимость для прогнозирования предельно допустимого срока хранения МЭРМ  $\tau_{\text{доп}}$ , по истечении которого обводнение продукта достигнет заданной величины (например, предельно допустимой концентрации  $c_{\text{доп}}$ ):

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{1}{a} \ln \left( 1 - \frac{c_{\text{доп}}}{c_{\text{max}}} \right). \quad (3.34)$$

При рассмотрении процесса обводнения МЭРМ, приведенном выше, принято, что в начальный момент этого процесса растворенная вода в продукте отсутствовала, однако в реальных условиях в нем может находиться некоторое количество растворенной воды, т.е. при  $\tau = 0$   $c_0 \neq 0$ .

Тогда выражение (3.34) можно представить в виде:

$$c_{\tau} = c_{\text{max}} - (c_{\text{max}} - c_0) e^{(-a\tau)}. \quad (3.35)$$

Отсюда, произведя замену  $-a = a$  и  $c_{\tau} = c_{\text{доп}}$ , получим зависимость для прогнозирования концентрации растворенной воды в МЭРМ в зависимости от продолжительности его хранения и для определения допустимого срока хранения этого продукта:

$$c_{\tau} = c_{\text{max}} - (c_{\text{max}} - c_0) e^{a\tau}; \quad (3.36)$$

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{1}{a} \ln \frac{c_{\text{max}} - c_{\text{доп}}}{c_{\text{max}} - c_0}. \quad (3.37)$$

Вычисление значения коэффициента  $a$  осуществляется с использованием среднеквадратичной аппроксимации аналогично изложенному выше, обозначив в выражении (3.32):

$$y_i = \ln \frac{c_{\text{max}} - c_i}{c_{\text{max}} - c_{\text{в}}}.$$

Введя обозначения:

$$z = \frac{c_{\text{max}} - c_{\tau}}{c_{\text{max}} - c_0} \text{ и } x = \tau,$$

получим аппроксимирующую функцию в виде выражения (3.28).

Приведенная математическая модель процесса насыщения МЭРМ растворенной водой при хранении позволяет определить концентрацию влаги в продукте в любой момент времени и найти предельно допустимый срок его хранения, при котором концентрация воды не превысит установленного значения.

Как указывалось выше, растворимость воды в МЭРМ значительно выше, чем в моторных топливах нефтяного происхождения, что

объясняется неполярностью углеводородных молекул, входящих в состав этих топлив, поэтому механизм растворения в них воды заключается главным образом в ее физическом взаимодействии с молекулами углеводородов. В сложных эфирах, являющихся полярными соединениями, растворимость воды определяется главным образом ее физико-химическим взаимодействием с полярными молекулами сложного эфира, сопровождающимся образованием водородных связей. С повышением температуры растворимость воды в сложных эфирах растет благодаря увеличению вероятности образования таких связей, за счет которых молекулы воды и сложного эфира образуют различные ассоциаты, причем их состав в зависимости от концентрации растворенной воды будет изменяться.

Второй фактор, оказывающий влияние на растворение воды в эфирах, это химическое взаимодействие: сложные эфиры вступают в реакцию гидролиза – обменное взаимодействие с водой с образованием карбоновых кислот и спиртов. При нагревании гидролиз усиливается, равновесие реакции смещается в сторону образования кислоты и спирта, а в случае МЭРМ образуется весьма ядовитый метиловый спирт.

МЭРМ, относящийся к классу сложных эфиров, способен при определенной температуре растворять ограниченное количество воды. С повышением температуры продукта растворимость в нем воды увеличивается, причем зависимость растворимости воды от температуры в общем виде может быть выражена уравнением [138]:

$$\lg C = a - \frac{b}{T}, \quad (3.38)$$

где  $C$  – растворимость воды при данной температуре, %;  $T$  – температура продукта, К;  $a$  и  $b$  – некоторые постоянные для данного продукта величины.

Считаем, что в соответствии с законами термодинамики содержание воды, растворенной в продукте, подчиняется закону Генри, а зависимость между этим показателем и относительной влажностью контактирующего с продуктом воздуха носит линейный характер и может быть описана уравнением (3.10).

В тех случаях, когда при температуре воздуха, превышающей температуру продукта, парциальное давление паров воды превысит давление ее насыщенных паров, т.е.  $P_{\text{п}} > P_{\text{н}}$ , или  $\phi > 100\%$ , будет происходить конденсация паров из воздуха в продукт. Чем больше разность между температурой воздуха и продукта, тем при меньшей относительной влажности воздуха будет происходить конденсация водяных паров. Скорость процесса конденсации зависит от относи-

тельной влажности воздуха и от абсолютного значения давления водяных паров.

Выражение (3.38), за исключением случаев, когда происходит конденсация влаги в МЭРМ непосредственно из воздуха, позволяет достаточно точно определить содержание воды, растворенной в этом продукте, при любых значениях относительной влажности воздуха и постоянстве значений других воздействующих факторов. Для нахождения входящих в это выражение коэффициентов  $a$  и  $b$  необходимо результаты экспериментов, полученные при определении содержания воды в МЭРМ при различных температурах, обработать путем среднеквадратичной аппроксимации. Для этого в выражение (3.38) введем обозначения:

$$y_i = \lg C_i \text{ и } x_i = \frac{1}{T_i}.$$

Тогда выражение (3.38) для  $i$ -го эксперимента примет вид:

$$y_i = a - bx_i. \quad (3.39)$$

Условие минимальной среднеквадратичной погрешности аппроксимации имеет вид:

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - a + bx_i)^2 = \min, \quad (3.40)$$

где  $n$  – количество экспериментов, шт.;  $F$  – значение аппроксимирующей функции.

Продифференцировав выражение (3.40) по  $a$  и  $b$  и приравняв полученные результаты к нулю, найдем условие минимального среднеквадратичного отклонения экспериментальных данных от вычисленных по аппроксимирующей функции:

$$\frac{dF}{da} = \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - a + bx_i) = 0; \quad (3.41)$$

$$\frac{dF}{db} = \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - a + bx_i) x_i = 0. \quad (3.42)$$

Проведя необходимые преобразования, получим:

$$a = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{i=n} y_i + b \sum_{i=1}^{i=n} x_i \right); \quad (3.43)$$

$$b = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} x_i^2} \left( a \sum_{i=1}^{i=n} x_i - \sum_{i=1}^{i=n} x_i y_i \right). \quad (3.44)$$

Подставив в выражение (3.44) значение  $a$  из выражения (3.43) и проведя необходимые преобразования, получим:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i \sum_{i=1}^{i=n} y_i - n \sum_{i=1}^{i=n} x_i y_i}{n \sum_{i=1}^{i=n} x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^{i=n} x_i \right)^2}. \quad (3.45)$$

Произведя в выражении (3.43) и (3.45) обратную замену обозначений, введенных в выражение (3.39), получим:

$$a = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{i=n} \lg C_i + b \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{T_i} \right); \quad (3.46)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \lg C_i \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{T_i} - n \sum_{i=1}^{i=n} \lg C_i \frac{1}{T_i}}{n \sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{1}{T_i} \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{T_i} \right)^2}. \quad (3.47)$$

Выражения (3.46) и (3.47) позволяют использовать зависимость (3.38) для определения содержания растворенной воды в МЭРМ при любой температуре. Для этого не менее чем по трем точкам строится график указанной зависимости, который носит линейный характер (третья точка является контрольной). Это позволяет использовать существующие лабораторные методы определения суммарного содержания воды в МЭРМ (метод Фишера, гидрид-кальциевый метод и др.) для определения содержания в нем свободной воды, которая оказывает непосредственное влияние на работу двигателя, а также с помощью выражения (3.10) прогнозировать изменение содержания растворенной воды в МЭРМ при изменении температуры этого продукта и воздуха и определить условия, при которых водяные пары из воздуха могут конденсироваться в продукте.

### 3.4. Обеспечение температурного режима рапсового масла

В разделе 1.5 обоснована необходимость снижения вязкости рапсового масла путем его подогрева перед приготовлением смесового биотоплива на его основе. Анализ способов подогрева вязких и застывающих жидкостей [117] показывает, что обеспечить оптимальный температурный режим указанных жидкостей при их выдаче из резервуара и значительно сократить продолжительность этого процесса можно за счет интенсификации теплообмена между нагреваемой жидкостью и источником тепла. Наиболее перспективными являются локальные способы подогрева, позволяющие осуществить разогрев

сравнительно небольшого количества жидкости, которая по мере снижения ее вязкости откачивается из зоны подогрева и замещается более вязким продуктом [140].

Для локального подогрева рапсового масла (а в случае необходимости и смесового биотоплива) могут служить местные паровые подогреватели с нагревательными элементами трубчатого типа, снабженные экраном из материала с высокой теплопроводностью, который отделяет область интенсивного нагрева жидкости от остального объема резервуара [141]. Такая конструкция имеет ряд преимуществ, к которым относятся:

- применение в качестве теплоносителя острого или перегретого пара, обладающего высоким теплосодержанием и большим коэффициентом теплоотдачи, являющегося недефицитным веществом, обеспечивающим постоянную температуру подогрева;
- отсутствие в устройстве движущихся узлов и деталей для создания искусственной конвекции;
- возможность быстрой замены отдельного трубчатого нагревательного элемента в случае его повреждения.

В горизонтальных цилиндрических резервуарах, повсеместно используемых в сфере сельскохозяйственного производства при операциях с вязкими нефтепродуктами (смазочными и энергетическими маслами, топочными мазутами, котельным топливом и т.п.) находят применение подогреватели подобной конструкции, что позволяет интенсифицировать процесс подогрева благодаря созданию в резервуаре ограниченной рабочей зоны – подэкранного пространства, и сократить сроки начала выдачи продукта.

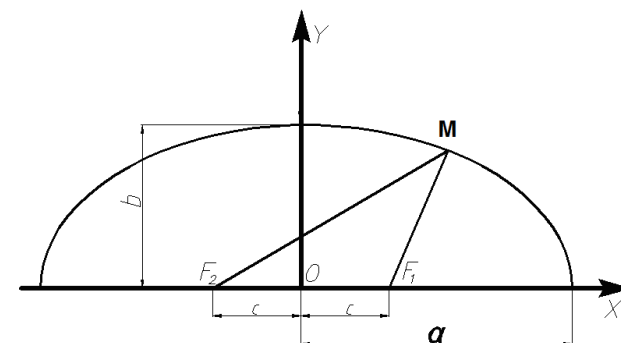
Применяемые в этих конструкциях криволинейные экраны обычно выполняются из металла с высоким коэффициентом теплопроводности (например, алюминия) в форме круглого прямого горизонтально расположенного цилиндра с основанием в виде сегмента круга, обращенного вверх выпуклой поверхностью, т.е. представляют собой пространственную фигуру, образованную вращением отрезка прямой вокруг горизонтальной оси, совпадающей с нижней образующей резервуара.

Такая форма экрана выбрана из технологических соображений, как наиболее простая в изготовлении, но не соответствует профилю распространения теплового потока при использовании в конструкции подогревательного устройства более одного трубчатого элемента. В этом случае неодинаковое удаление различных точек поверхности экрана от нагревательных элементов не обеспечивает равномерного распределения температуры на его поверхности.

Анализ геометрических форм различных фигур показал, что равномерное распределение температур на поверхности экрана может быть достигнуто, если трубчатые нагревательные элементы разместить в фиксированных фокусах поперечного сечения экрана, выполненного в виде эллипсообразного полуовала Кассини (рис. 3.1) [142], являющегося геометрическим местом точек  $M$ , для которых справедливо уравнение:

$$F_1MF_2M = k^2, \quad (3.65)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – фиксированные фокусы, находящиеся от центра овала на расстоянии  $c$ ,  $m$ ;  $k$  – постоянная величина.



**Рис. 3.1. Эллипсообразный полуовал Кассини:**

$a$  и  $b$  – соответственно горизонтальная и вертикальная полуоси овала;  
 $c$  – расстояние между центром овала и фокусом;  $O$  – центр овала;  
 $F_1$  и  $F_2$  – фокусы овала;  $M$  – произвольная точка на образующей овала

Уравнение этой кривой имеет вид:

$$(x^2 + y^2)^2 - 2c^2(x^2 - y^2) = k^4 - c^4. \quad (3.66)$$

Если принять  $k = c\sqrt{2}$ , то в верхней точке овала кривизна равна нулю, а уравнение (2.176) примет вид:

$$(x^2 + y^2)^2 - 2c^2(x^2 - y^2) = 3c^4. \quad (3.67)$$

В связи с тем, что до начала подогрева рапсового масла и в начальный период этого процесса оно обладает малой подвижностью, предположим, что в течение первого периода подогрева теплопередача в ограниченном подэкранном пространстве осуществляется преимущественно кондукцией, т.е. путем теплопроводности, а конвективным теплообменом в этот период можно пренебречь. Тогда теплопередача через слой рапсового масла к экрану описывается уравнением Фурье для тел неправильной формы:

$$q = \frac{\lambda_m}{\delta} F \Delta t, \quad (3.68)$$

где  $q$  – тепловой поток, Вт;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности рапсового масла, Вт/(м·град.);  $\delta$  – толщина слоя рапсового масла под экраном, м;  $F$  – площадь экрана, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – температурный напор (перепад температур) в подэкранном пространстве, град.

Поскольку толщина слоя рапсового масла под экраном различна в разных направлениях распространения теплового потока, найти среднее значение этой величины можно, проанализировав уравнение (2.51), из которого следует:

$$\delta_{cp} = \sqrt{F_1 M F_2 M} = k. \quad (3.69)$$

Площадь экрана будет равна:

$$F = PL, \quad (3.70)$$

где  $P = \frac{\pi}{2} [1,5(a+b) - \sqrt{ab}]$  – периметр полуовала, м;  $L$  – длина экрана, м;  $a$  и  $b$  – соответственно горизонтальная и вертикальная полуоси овала Кассини, м.

Тогда уравнение (3.68) можно представить в виде:

$$q = \frac{\pi \lambda_m}{2k} [1,5(a+b) - \sqrt{ab}] L \Delta t, \quad (3.71)$$

Будем считать, что суммарный тепловой поток в каждой точке подэкранного пространства является суммой тепловых потоков от каждого из нагревательных элементов в соответствии с выражением (3.71). После включения нагревательных элементов тепло, передаваемое от нагревательных элементов к РМ, находящемуся в подэкранном пространстве, будет удерживаться в этом пространстве за счет геометрической формы экрана, обеспечивающего изотермический характер теплового потока. По мере прогревания РМ и снижения его вязкости наступает второй период подогрева – продукт приобретает подвижность, и в подэкранном пространстве образуются конвекционные токи, интенсифицирующие процесс теплопередачи к экрану за счет конвективного перемешивания РМ. При нагревании РМ в подэкранном пространстве и возникновении в нем естественной конвекции процесс теплопередачи в этом пространстве будет осуществляться одновременным действием кондукции и конвекции.

Интенсивность конвективной составляющей процесса теплопередачи определяется по формуле Ньютона-Римана:

$$q = \alpha F_{нагр} (t_{нагр} - t_m), \quad (3.72)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от нагревательных элементов к рапсовому маслу, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $F_{нагр}$  – поверхность нагревательных элементов, м<sup>2</sup>;  $t_{нагр}$  и  $t_m$  – соответственно температура нагревательных элементов и рапсового масла, град.

При сплошном экране, изготовленном из непроницаемого материала, теплоотдача через него описывается уравнением, аналогичным выражению (3.68), которое для рассматриваемого случая имеет вид:

$$q = \frac{\lambda_3}{h_3} F_3 \Delta t_3, \quad (3.73)$$

где  $\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности материала экрана, Вт/м·град;  $h_3$  – толщина экрана, м;  $F_3$  – площадь экрана, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_3$  – перепад температур между внутренней и внешней стенками экрана.

Тогда для удельных тепловых потоков, отнесенных к единице поверхности экрана, можно составить систему уравнений:

$$\begin{aligned} q_1 &= \alpha_{вн} (t_{м\ вн} - t_{ст\ вн}); \\ q_2 &= \frac{\lambda_3}{h_3} (t_{ст\ вн} - t_{ст\ нар}); \\ q_3 &= \alpha_{нар} (t_{ст\ нар} - t_{м\ нар}), \end{aligned} \quad (3.74)$$

где  $\alpha_{вн}$  и  $\alpha_{нар}$  – коэффициенты теплопередачи соответственно от масла, находящегося в подэкранном пространстве, к внутренней стенке экрана, и от его внешней стенки к маслу, находящемуся над экраном, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $t_{м\ вн}$  и  $t_{м\ нар}$  – температура масла соответственно в подэкранном пространстве и над экраном, град;  $t_{ст\ вн}$  и  $t_{ст\ нар}$  – соответственно температура внутренней и наружной поверхности экрана, град.

Из системы уравнений (3.70) определим частные температурные напоры:

$$\begin{aligned} t_{м\ вн} - t_{ст\ вн} &= q_1 \frac{1}{\alpha_{вн}}; \\ t_{ст\ вн} - t_{ст\ нар} &= q_2 \frac{h_3}{\lambda_3}; \\ t_{ст\ нар} - t_{м\ нар} &= q_3 \frac{1}{\alpha_{нар}}. \end{aligned} \quad (3.75)$$

Сложив эти уравнения, получим полный температурный напор:

$$t_{м\ вн} - t_{м\ нар} = q_{(1-3)} \left( \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{нар}} \right). \quad (3.76)$$

Отсюда удельный тепловой поток через экран равен:

$$q_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{нар}}} (t_{м\ вн} - t_{м\ нар}) = k_3 (t_{м\ вн} - t_{м\ нар}), \quad (3.77)$$

где  $q_3$  – удельный тепловой поток (плотность теплового потока) через экран, Вт/м<sup>2</sup>;  $k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}}$  – полный коэффициент теплопередачи

дачи через экран, Вт/м<sup>2</sup> град.

Величина, обратная общему коэффициенту теплоотдачи, является общим термическим сопротивлением теплопередачи и характеризует теплопроницаемость экрана.

$$R = \frac{1}{k_3} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}, \quad (3.78)$$

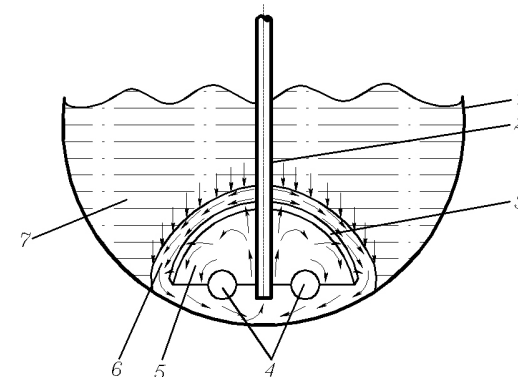
где  $R$  – общее термическое сопротивление теплопередачи, м<sup>2</sup> град/Вт.

Из выражения (3.78) видно, что с ростом величины  $R$  уменьшается поступление тепла через экран. Для уменьшения термического сопротивления на внутренней поверхности экрана целесообразно изготовить его из пористого материала небольшой толщины (например, из мелкоячеистой металлической сетки). Тогда процесс естественной конвекции масла распространится на пористую структуру экрана. Это соответствует третьему периоду подогрева. Помимо конвекции в порах, проникновению в них масла будет способствовать его расширение при нагревании в подэкранном пространстве.

Третий период подогрева характеризуется тем, что масло, проходящее сквозь поры экрана, а также масло над экраном, нагреваемое за счет процесса теплопередачи кондукцией, описываемого уравнением (3.77), образуют на внешней поверхности экрана пограничный слой, вязкость которого существенно меньше, чем вязкость основной массы РМ в резервуаре.

Таким образом, теплопередача через экран будет осуществляться за счет явлений кондукции через материал экрана и конвекции в его порах, однако определить вторую составляющую этого процесса теоретическим путем затруднительно, поэтому целесообразно ввести понятие эквивалентной теплопроводности экрана, характеризующейся коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$ , учитывающим суммарный перенос тепла через экран и определяемым экспериментально. Значение этого коэффициента следует использовать при расчетах в выражениях (3.77) и (3.78).

После разогрева РМ в подэкранном пространстве до температуры, обеспечивающей его откачку из резервуара, наступает четвертый период процесса подогрева, сопровождающийся вынужденной конвекцией, которая возникает при выдаче РМ из подэкранного пространства через приемную трубу с помощью насоса (рис. 3.2).



**Рис. 3.2. Схема работы подогревательного устройства при выдаче рапсового масла из резервуара:**

1 – резервуар; 2 – приемная труба; 3 – экран; 4 – нагревательный элемент; 5 – подвижное (разогретое) масло; 6 – пограничный слой; 7 – малоподвижное (холодное) масло

Пограничный слой маловязкого масла, образовавшийся на внешней поверхности экрана, будет снизу ограничен этой поверхностью, а сверху – малоподвижным слоем масла высокой вязкости. После возникновения разрежения в подэкранном пространстве этот слой начнет перемещаться вдоль образующей профиля экрана по направлению к зазорам между его нижней кромкой и обечайкой резервуара, поступая через эти зазоры под экран и далее в приемную трубу. Освободившееся пространство на поверхности экрана будет заполняться РМ из расположенных выше слоев более вязкого продукта, где оно нагревается, перемещается к нижней кромке экрана и поступает в подэкранное пространство. Этот процесс продолжается до опорожнения резервуара (или до остановки перекачки).

Исходя из сказанного, предполагаемая конструкция подогревательного устройства в горизонтальных резервуарах для хранения РМ включает трубчатые нагревательные элементы и экран, отделяющий зону локального подогрева рапсового масла от остального объема резервуара. Экран расположен по всей длине горизонтального резервуара и включает каркас, состоящий из дугообразных опор, имеющих профиль эллипсообразного полуовала Кассини, и соединяющих их продольных балок, крупноячеистую опорную сетку, крепящуюся на каркасе, и размещенное на этой сетке покрытие из пористого материала. Нагревательные элементы размещены по всей длине экрана в фокусах образующего его поперечное сечение полуовала Кассини и соединены с подводящим паропроводом и сборником конденсата.



Бесперебойная выдача нагретого РМ из резервуара обеспечивается его непрерывным поступлением в подэкранное пространство. Если опускающееся на наружную поверхность экрана масло не будет успевать нагреваться до температуры, обеспечивающей его подвижность, возможен срыв работы насоса и прекращение перекачки масла. Предотвращение этого возможно путем снижения производительности откачивающегося насоса, но этот параметр задается, исходя из технологических требований при операциях по приготовлению смесового биотоплива, и его снижение не всегда возможно.

Интенсификацию процесса локального подогрева РМ при его выдаче из резервуара можно обеспечить путем оптимизации конструктивных параметров подогревательного устройства – поверхности нагревательных элементов, площади экрана, объема подэкранного пространства. Рассмотрим составляющие этого процесса.

Полное количество теплоты, сообщаемое нагревательными элементами, расходуется на разогрев РМ в подэкранном пространстве от некоторой его начальной температуры  $t_{\text{нач}}$  до температуры  $t_m$ , при которой обеспечивается подвижность масла, и на передачу тепла через экран. Тепловыми потерями в окружающую среду через нижнюю часть оболочки резервуара пренебрегаем (их величину можно значительно сократить путем установки резервуара на теплоизоляционное основание).

Количество теплоты, необходимое для подогрева РМ в подэкранном пространстве:

$$Q_1 = G_m c_m (t_m - t_n), \quad (3.79)$$

где  $G_m$  – количество РМ в подэкранном пространстве, кг;  $c_m$  – удельная теплоемкость масла, Дж/кг·град.;  $t_n$  – начальная температура масла, град.

Количество теплоты, отводимой через экран:

$$Q_2 = k_3 F_3 (t_{m \text{ вн}} - t_{m \text{ нагр}}) \tau, \quad (3.80)$$

где  $\tau$  – продолжительность процесса подогрева, с.

Для рассматриваемого случая можно считать, что  $Q = Q_1 + Q_2 = \text{const}$ , а  $t_{m \text{ вн}} \approx t_m$ , т.е. температура РМ во всех точках подэкранного пространства имеет близкие значения за счет естественной конвекции. Тогда

$$Q d\tau = G c dt + k_3 F_3 (t_m - t_{m \text{ нагр}}) d\tau. \quad (3.81)$$

Разделяя переменные, имеем:

$$\int_0^\tau d\tau = \int_{t_n}^{t_m} \frac{G c}{Q - k_3 F_3 (t_m - t_{m \text{ нагр}})} dt. \quad (3.82)$$

Интегрируя выражение (3.82), получим:

$$\ln \frac{Q - k_3 F_3 (t_n - t_{m \text{ нагр}})}{Q - k_3 F_3 (t_m - t_{m \text{ нагр}})} = \frac{k_3 F_3 \tau}{G c}. \quad (3.83)$$

Введя коэффициент  $\beta = \frac{k_3 F_3 \tau}{G c}$ , получим:

$$Q = k_3 F_3 \frac{(t_m - t_{m \text{ нагр}}) e^\beta - (t_n - t_{m \text{ нагр}})}{e^\beta - 1}. \quad (3.84)$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$G_m c_m dt = k_T F_{\text{нагр}} (t_T - t) d\tau - k_3 F_3 (t - t_{m \text{ нагр}}) d\tau, \quad (3.85)$$

где  $k_T$  – полный коэффициент теплопередачи от теплоносителя к рапсовому маслу, Вт/м<sup>2</sup> град.;  $t_T$  – температура теплоносителя, град.;  $t$  – текущая температура рапсового масла, град., в момент времени  $\tau$ .

В выражение (3.85) входят все основные величины, влияющие на процесс подогрева РМ: площадь нагревательных элементов  $F_{\text{нагр}}$ , площадь поверхности экрана  $F_3$  и объем подэкранного пространства, который можно вычислить из соотношения:

$$V_{\text{пэ}} = \frac{G_m}{\rho_m}, \text{ м}^3,$$

где  $\rho_m$  – плотность РМ, кг/м<sup>3</sup> при температуре  $t_n$ .

Определение этих величин не представляет затруднений. Так, найдя суммарную поверхность нагревательных элементов из уравнения:

$$F_{\text{нагр}} = \frac{Q}{k_T (t_T - t_{m \text{ нагр}}) \tau}, \quad (3.86)$$

можно определить диаметр каждого из двух нагревательных элементов  $d_{\text{нэ}}$ , м:

$$d_{\text{нэ}} = \frac{F_{\text{нагр}}}{2\pi L}. \quad (3.87)$$

Аналогично можно определить и другие величины, входящие в выражение (3.85).

### 3.5. Теоретические основы создания устройств для смешивания компонентов биотоплива

Как показано в разделе 1.7, смешивание компонентов биотоплива – рапсового масла и дизельного топлива – может производиться как путем заблаговременного приготовления смеси в расходной емкости, так и путем подачи исходных компонентов в смесительное устройство непосредственно перед выдачей биотоплива потребителю. Выбор способа приготовления смесового биотоплива зависит от стабильности

при хранении, которая должна быть исследована при выполнении данной работы.

Для смешивания двух жидкостей в какой-либо емкости широко используются мешалки различной конструкции, которые обеспечивают достаточно эффективное механическое перемешивание исходной смеси до получения однородной жидкой среды. Учитывая, что процесс получения смесового биотоплива целесообразно осуществлять в серийно изготавливаемых горизонтальных цилиндрических резервуарах, для перемешивания исходных компонентов наиболее пригодны мешалки якорного типа, контур рабочего которых соответствует внутренней форме сосудов, используемых для приготовления смеси. Для цилиндрического резервуара контур рабочего органа мешалки должен иметь форму части кругового кольца (рис. 3.3).

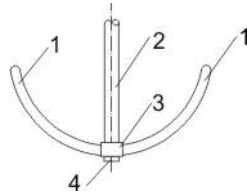


Рис. 3.3. Общий вид мешалки якорного типа:

1 – лопасть; 2 – вал; 3 – втулка; 4 – гайка

Рассмотрим дугу кругового кольца с наружным радиусом  $R_n$ , м, внутренним радиусом  $R_{вн}$ , м, расположенную между полярными углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и вращающуюся вокруг оси  $Oy$  с угловой скоростью  $\omega$ ,  $c^{-1}$ . Площадь элемента поверхности этой дуги (рис. 3.4) будет равна:

$$\alpha F = r d\varphi dr, \quad (3.88)$$

где  $F$  – площадь дуги,  $m^2$ ;  $r$  – радиус-вектор, м;  $\varphi$  – полярный угол, град.

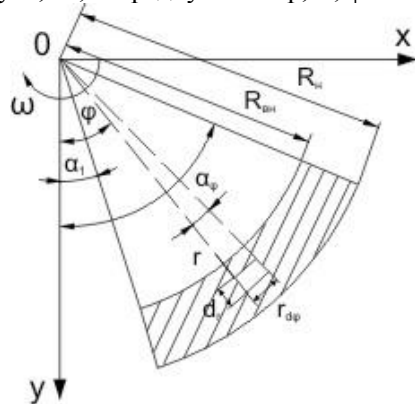


Рис. 3.4. Расчетная схема мешалки с круглым якорем

Элементарная сила, действующая на этот элемент, описывается законом сопротивления Кармана:

$$dP = c \rho dF v^2 = c \rho r^3 \omega^2 \sin^2 \varphi dr d\varphi, \quad (3.89)$$

где  $c$  – коэффициент лобового сопротивления,  $m^2$ ;  $v = \omega x = \omega r \sin \varphi$  – скорость перемещения элемента поверхности, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости,  $kg/m^3$ .

Интегрируя выражение (3.89), получим величину силы, действующей на дугу кругового кольца:

$$P = c \omega^2 \rho \int_{R_{вн}}^{R_n} r^3 dr \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin^2 \varphi d\varphi. \quad (3.90)$$

Поскольку

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin^2 \varphi d\varphi = \left[ \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} - \frac{\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1}{4}, \quad (3.91)$$

получим:

$$P = c \frac{\omega^2 \rho}{4} (R_n^4 - R_{вн}^4) \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} - \frac{\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1}{4} \right). \quad (3.92)$$

Координаты точки приложения силы определяются с учетом соотношений:  $x = r \sin \varphi$ ;  $y = r \cos \varphi$ , тогда

$$x_0 = c \frac{\rho \omega^2}{P} \int_{R_{вн}}^{R_n} r^4 dr \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin^3 \varphi d\varphi; \quad (3.93)$$

$$y_0 = c \frac{\rho \omega^2}{P} \int_{R_{вн}}^{R_n} r^4 dr \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin^2 \varphi \cos \varphi d\varphi. \quad (3.94)$$

Поскольку

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin^3 \varphi d\varphi &= \left[ \frac{\cos^3 \varphi}{3} - \cos \varphi \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \\ &= \frac{\cos^3 \alpha_2 - \cos^3 \alpha_1}{3} - (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1); \end{aligned} \quad (3.95)$$

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin^2 \varphi \cos \varphi d\varphi = \left[ \frac{\sin^3 \varphi}{3} \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \frac{\sin^3 \alpha_2 - \sin^3 \alpha_1}{3}.$$

Получим

$$x_0 = \frac{4}{5} \frac{R_H^5 - R_{BH}^5}{R_H^4 - R_{BH}^4} \frac{\cos^3 \alpha_2 - \cos^3 \alpha_1 - (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} - \frac{\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1}{4}}; \quad (3.96)$$

$$y_0 = \frac{4}{15} \frac{R_H^5 - R_{BH}^5}{R_H^4 - R_{BH}^4} \frac{\sin^3 \alpha_2 - \sin^3 \alpha_1}{\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} - \frac{\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1}{4}}. \quad (3.97)$$

Мощность, затрачиваемая на вращение лопасти якорной мешалки:

$$N = P v_0 = P \omega x_0, \quad (3.98)$$

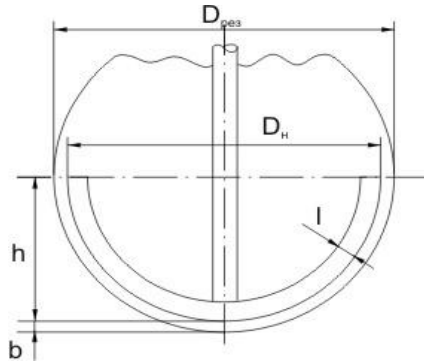
где  $v_0$  – скорость перемещения точки приложения сил, м/с.

Подставляя в выражение (3.98) значения  $P$  и  $x_0$ , получим:

$$N = c \frac{\rho \omega^3}{5} (R_H^5 - R_{BH}^5) \left[ \frac{\cos^3 \alpha_2 - \cos^3 \alpha_1}{3} - (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \right]. \quad (3.99)$$

Для якорной мешалки, установленной в горизонтальном цилиндрическом резервуаре, целесообразно принять  $\alpha_1 = 0$  и  $\alpha_2 = \pi/2$  (рис. 3.5). При этом соотношения элементов конструкции мешалки будут соответствовать рекомендациям, сделанным в работе [122] на основании экспериментальных данных:

$$D_H = 0,9 D_{рез}; \quad b = 0,05 D_{рез}; \\ h = 0,45 D_H; \quad l = 0,06 D_{рез}.$$



**Рис. 3.5. Схема установки якорной мешалки в горизонтальном цилиндрическом резервуаре:**

$D_{рез}$  – диаметр резервуара;  $D_H$  – наружный диаметр мешалки;  $h$  – высота мешалки;  $b$  – зазор между лопастью и стенкой резервуара;  $l$  – ширина лопасти

Тогда

$$P = c \frac{\pi \rho \omega^2}{16} (R_H^4 - R_{BH}^4); \quad (3.100)$$

$$x_0 = \frac{32}{15\pi} \frac{R_H^5 - R_{BH}^5}{R_H^4 - R_{BH}^4}; \quad (3.101)$$

$$y_0 = \frac{16}{15\pi} \frac{R_H^5 - R_{BH}^5}{R_H^4 - R_{BH}^4}; \quad (3.102)$$

$$N = c \frac{2\rho\omega^2}{15} (R_H^5 - R_{BH}^5). \quad (3.103)$$

Все величины параметров, входящих в выражение (3.103), обуславливаются поставленной задачей, кроме коэффициента лобового сопротивления, определение которого теоретическим путем связано со значительными трудностями. В общем случае коэффициент лобового сопротивления зависит от большого числа факторов:

$$c = f(\text{Re}, \text{Fr}, \text{Be}, \text{We}), \quad (3.104)$$

где  $\text{Re} = \frac{l v}{\nu}$  – критерий Рейнольдса, являющийся мерой соотношения

сил трения и инерции;  $\text{Fr} = \frac{v^2}{gl}$  – критерий Фруда, являющийся мерой

отношения сил инерции к силе тяжести;  $\text{Be} = \frac{\nu}{v_{зв}}$  – число Берроу, яв-

ляющееся отношением скорости движения к скорости звука;

$\text{We} = \frac{\rho l v^2}{\delta}$  – критерий Вебера, характеризующий влияние сил поверх-

ностного натяжения; где  $l$  – характерный линейный размер, м;  $\delta$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м<sup>2</sup>;  $v_{зв}$  – скорость звука в жидкости, м/с.

Рассмотрение приведенных выражений показывает, что критерий Фруда, отражающий зависимость сопротивления среды от волнообразования, при полном погружении лопасти в жидкость практически не оказывает влияния на величину коэффициента лобового сопротивления; число Берроу характеризует влияние сжимаемости жидкости, которая проявляется при скоростях перемещения, близких к скорости звука, то есть в данных условиях также не влияет на величину коэффициента лобового сопротивления; критерий Вебера, величина которого зависит от поверхностного натяжения на границе раздела фаз «твердое тело – жидкость», также не будет оказывать существенного влияния на процесс перемещения пластины.

Таким образом, коэффициент лобового сопротивления практически зависит только от критерия Рейнольдса. Исследованиями [123] установлено, что для пластины, движущейся в направлении, перпенди-

кулярном её плоскости, коэффициент лобового сопротивления практически постоянен, то есть:

$$c = f(\text{Re}) = \text{const.} \quad (3.105)$$

Однако в связи с отсутствием аналитической зависимости между величинами, входящими в выражение (3.105), значение коэффициента лобового сопротивления определяется, как правило, экспериментально можно определить, пользуясь эмпирической зависимостью:

$$c = (0,2-0,3)\sqrt[3]{v}. \quad (3.106)$$

Для определения плотности смеси, образующейся при получении смесового биотоплива, можно воспользоваться формулой [122]:

$$G_{\text{рм}} = \frac{(\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{дт}})G_{\text{дт}}}{\rho_{\text{рм}} - \rho_{\text{см}}}, \quad (3.107)$$

где  $G_{\text{рм}}$  и  $G_{\text{дт}}$  – соответственно исходная масса рапсового масла и дизельного топлива, кг;  $\rho_{\text{см}}$ ,  $\rho_{\text{дт}}$  и  $\rho_{\text{рм}}$  – соответственно плотность смеси, дизельного топлива и рапсового масла, кг/м<sup>3</sup>.

Для смешивания жидкостей непосредственно в потоке целесообразно использовать аппарат струйного типа, то есть устройство, в котором осуществляется процесс инжекции. Струйные аппараты широко используются в различных областях техники, главным образом для перемещения жидкостей и газов, создания давления или вакуума в системе, пневмо- и гидротранспорта твердых тел. Теоретические основы применения этих устройств для смешения жидкостей с различными физическими свойствами с целью получения эмульсии в известной нам литературе не рассматривались.

Ниже излагаются некоторые теоретические предпосылки создания таких устройств.

Принципиальная схема струйного аппарата представлена на рис. 3.6.

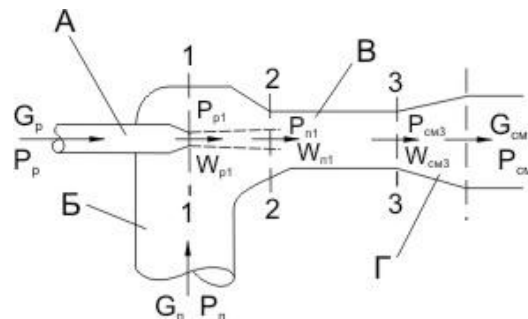


Рис. 3.6. Принципиальная схема струйного смесителя:

А – рабочее сопло; Б – приемная камера; В – смесительная камера; Г – диффузор

Поток жидкости, подаваемый в устройство с большой скоростью, считается рабочим, а поток, подаваемый в устройство за счет инжекции – инжестируемым.

Известно [143], что процессы, характеризующие работу всех струйных аппаратов, описывается тремя основными уравнениями:

- закона сохранения энергии:

$$h_p + uh_u = (1 - u)h_{\text{см}}, \quad (3.108)$$

где  $h_p$ ,  $h_u$  и  $h_{\text{см}}$  – энтальпия соответственно рабочего, инжестируемого потоков до аппарата и потока смеси после аппарата, кДж/кг;  $u = G_u/G_p$  – коэффициент инжекции;  $G_u$  и  $G_p$  – массовые расходы соответственно инжестируемой и рабочей среды, кг/с;

- закона сохранения массы:

$$G_{\text{см}} = G_p + G_u \quad (3.109)$$

где  $G_{\text{см}}$  – массовый расход смеси, кг/с;

- закона сохранения импульса:

$$J_{p2} + J_{u2} = \int_{f_{\text{см}3}}^{f_{u2}} P df + J_{\text{см}3}, \quad (3.110)$$

где  $J_{p2}$  и  $J_{u2}$  – импульсы соответственно рабочего и инжестируемого потоков во входном сечении смесительной камеры, н;  $J_{\text{см}3}$  – импульс

потока смеси в выходном сечении смесительной камеры, н;  $\int_{f_{\text{см}3}}^{f_{u2}} P df$  –

интеграл импульса по боковой поверхности смесительной камеры, н;  $f_{u2}$  и  $f_{\text{см}3}$  – площади входного и выходного сечений смесительной камеры, м<sup>2</sup>;  $P$  – давление, Па.

Струйный смеситель относится к устройствам, у которых рабочая и инжестируемая среды находятся в одном агрегатном состоянии, причем обе среды практически несжимаемы, т.е. не обладают упругостью. Уравнение характеристики струйного смесителя выведем на основе закона импульсов для несжимаемых сред.

Импульс потока в некотором сечении  $x-x$  равен:

$$J_x = Gw + Pf_x, \quad (3.111)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/с;  $w$  – скорость потока, м/с;  $f_x$  – площадь сечения  $x-x$ , м<sup>2</sup>.

Для цилиндрической смесительной камеры уравнение закона импульсов будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \rho_2[G_p w_{p1} + G_u w_{u2}] - (G_p + G_u)w_{\text{см}3} &= (p_{\text{см}3} - p_{u2})f_{u2} + (p_{\text{см}3} - p_{p1})f_{p1} = \\ &= p_{\text{см}3}f_{\text{см}3} - p_{u2}f_{u2} - p_{p1}f_{p1}, \end{aligned} \quad (3.112)$$

где  $w_{p1}$  – скорость рабочего потока на выходе из сопла, м/с;  $w_{u2}$  – скорость инжестируемого потока во входном сечении смесительной ка-

меры, м/с;  $w_{см3}$  – скорость потока смеси в выходном сечении смесительной камеры;  $p_{p1}$ ,  $p_{и2}$  и  $p_{см3}$  – давления соответственно в выходном сечении рабочего сопла, во входном и выходном сечении рабочего сопла, м<sup>2</sup>;  $\varphi_2$  – коэффициент скорости смесительной камеры.

Скорости потоков рабочего, инжектируемого и смеси соответственно равны:

$$w_{p1} = \frac{G_p}{f_{p1}\rho_p}; w_{и2} = \frac{G_{и}}{f_{и2}\rho_{и}}; w_{см3} = \frac{G_p + G_{и}}{f_{см3}\rho_{см}}, \quad (3.113)$$

где  $\rho_p$ ,  $\rho_{и}$  и  $\rho_{см}$  – плотности соответственно рабочей, инжектируемой сред и смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Давления в струйном смесителе равны:

$$p_{см3} = p_{см} - \frac{w_{см3}^2 \rho_{см}}{2\varphi_3^2}; p_{и2} = p_{и} - \frac{w_{и2}^2 \rho_{и}}{2\varphi_4^2}; p_{p1} = p_p - \frac{w_p^2 \rho_p}{2\varphi_1^2}, \quad (3.114)$$

где  $p_{p1}$ ,  $p_{и}$  и  $p_{см}$  – давления соответственно рабочего и инжектируемого потоков перед струйным смесителем и потока смеси на выходе из диффузора, Па;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_4$  и  $\varphi_3$  – коэффициенты скорости соответственно сопла, входа в камеру смешения и диффузора.

Произведя преобразования, получим:

$$\frac{\Delta p_{см}}{\Delta p_p} = \varphi_1^2 \frac{f_{p1}}{f_{см3}} \left[ 2\varphi_2 + \left( 2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{\rho_p}{\rho_{и}} \frac{f_{p1}}{f_{и2}} u^2 - \left( 2 - \varphi_3^2 \right) \frac{\rho_p}{\rho_{см}} \frac{f_{p1}}{f_{см3}} (1 + u^2) \right], \quad (3.115)$$

где  $\Delta p_{см} = p_{см} - p_{и}$ ;  $\Delta p_p = p_p - p_{и}$  – перепады давлений между потоками в струйном смесителе, Па.

Полученное выражение является уравнением характеристики струйного смесителя. На основании экспериментальных исследований рекомендованы значения коэффициентов скорости [144]:

$$\varphi_1 = 0,95; \varphi_2 = 0,975; \varphi_3 = 0,9; \varphi_{и} = 0,925.$$

После подстановки этих значений выражение (3.115) примет вид:

$$\frac{\Delta p_{см}}{\Delta p_p} = \frac{f_{p1}}{f_{см3}} \left[ 1,76 + 0,7 \frac{\rho_p}{\rho_{и}} \frac{f_{p1}}{f_{и2}} u^2 - 1,07 \frac{\rho_p}{\rho_{см}} \frac{f_{p1}}{f_{см3}} (1 + u^2) \right]. \quad (3.116)$$

На основании полученного уравнения характеристики струйного смесителя можно определить оптимальное соотношение сечений этого устройства. При заданном значении перепада давления между рабочим и инжектируемым потоками  $\Delta p = (p_p - p_{и})$ , которое определяется, исходя из технической характеристики подающего насоса, и известном значении коэффициента инжекции  $u$ , которое зависит от вы-

бранного соотношения рапсового масла и дизельного топлива в смешанном биотопливе, с учетом условия:  $\frac{d\Delta p_{см}}{d(f_{p1}/f_{см3})} = 0$ , имеем:

$$\left( \frac{f_{см3}}{f_{p1}} \right)_{опт} = \frac{\left( 2 - \varphi_3^2 \right) \frac{\rho_p}{\rho_{см}} (1 + u)^2 - \left( 2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{\rho_p}{\rho_{и}} nu^2}{\varphi_2}, \quad (3.117)$$

$$\text{где } n = \frac{f_{см3}}{f_{и2}} = \frac{f_{см3}}{f_{p1}} \cdot \left[ \frac{f_{см3}}{f_{p1}} - 1 \right].$$

Подставив в выражение (3.117) численные значения коэффициентов скорости, приведенные в работе [144] с учетом формулы для определения  $n$ , вычислим значения  $\left( \frac{f_{см3}}{f_{p1}} \right)_{опт}$  в зависимости от величины коэффициента инжекции  $u$  (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения $\left( \frac{f_{см3}}{f_{p1}} \right)_{опт}$		0	1	2	3	4	5	6	10
$u$	$\left( \frac{f_{см3}}{f_{p1}} \right)_{опт}$	1,11	3,8	7,25	11,6	16,9	23,2	30,3	66,4

Пользуясь найденными значениями, можно выбрать оптимальные соотношения сечений струйного смесителя в зависимости от требуемой концентрации компонентов смешанного биотоплива.

Полученные в результате теоретического рассмотрения процесса приготовления биотоплива математические зависимости позволяют спроектировать соответствующие устройства – механическую мешалку и струйный смеситель.

### 3.6. Применение многокомпонентного топлива

В монографии [145] проведен анализ результатов исследований работы дизеля на многокомпонентных биотопливах. Рассмотрены физико-химические свойства биотоплив, системы подачи этих топлив в цилиндры двигателей, соответствующие системы управления топливоподачей, особенности протекания рабочих процессов при работе двигателей на указанных топливах, экономические и экологические

показатели таких двигателей, экологические аспекты использования биотоплив. Отмечено, что использование этих биотоплив не только обеспечивает улучшение показателей токсичности отработавших газов двигателя, но и позволяет приблизить свойства биотоплив к свойствам традиционного нефтяного топлива, что в свою очередь, облегчает организацию процессов топливоподачи, распыливания топлива, смесеобразования и последующего сгорания. Помимо этого адаптация двигателей к работе на многокомпонентных биотопливах упрощает снабжение транспортных средств и сельскохозяйственной техники необходимыми моторными топливами.

Авторами [145] отмечено, что применение биотоплив на основе растительных масел позволит не только обеспечить замещение нефтяных топлив топливами, получаемыми из возобновляемых сырьевых ресурсов, но улучшить экологические показатели дизелей. Их широкое внедрение на транспорте, в сельском хозяйстве, в других отраслях экономики сдерживается рядом факторов, одним из которых являются отличия их физико-химических свойств от аналогичных свойств традиционных нефтяных топлив. В качестве одного из наиболее эффективных путей обеспечения требуемых свойств биотоплив рассматривается смешивание нескольких разнородных компонентов, т.е. применение многокомпонентных смесевых биотоплив.

Проблема обеспечения необходимых физико-химических свойств биотоплив актуальна и применительно к растительным маслам и их производным – эфирам растительных масел. Важной особенностью этих топлив является способность смешиваться в любых пропорциях с большинством органических растворителей (в том числе и с нефтепродуктами – бензином, керосином и дизельным топливом). Также следует отметить и хорошую совместимость различных растительных масел и их эфиров между собой. Эта особенность позволяет получать многокомпонентные биотоплива с заданными физико-химическими свойствами путем смешивания различных компонентов в требуемых пропорциях.

В качестве моторного топлива могут применяться и смеси, компоненты которых плохо смешиваются друг с другом. Но так как создание однородных стабильных смесей невозможно, необходимо предварительное приготовление эмульсий этих несмешиваемых (или плохо смешиваемых) компонентов. Примерами таких смесевых биотоплив, используемых в качестве дизельного топлива, являются смеси (эмульсии) простейших спиртов (например, этанола) с нефтяными топливами, растительными маслами, их эфирами, другими компонентами. В этом случае основное спиртовое топливо, отличающиеся нали-

чием в их молекулах значительного количества атомов кислорода и низким цетановым числом, обеспечивает бездымное сгорание эмульсии, а нефтяное дизельное топливо (или компонент, получаемый из растительных масел) с высоким цетановым числом является запальным топливом. Возможны и другие пути организации работы двигателей одновременно на нескольких топливах, включая биотопливо. Разработаны методы смешения разнородных топливных компонентов в элементах системы топливоподачи. Предложена организация процесса топливоподачи, при которой смешение различных компонентов (в том числе жидких несмешиваемых компонентов и жидких компонентов с газовыми) осуществляется в линии высокого давления дизельной топливной аппаратуры за счет регулирования начального давления в ней.

Рассмотренные смеси дизельного топлива с рапсовым маслом и метиловым эфиром рапсового масла подтверждают возможность использования в качестве топлива для дизелей «чистых» растительных масел, а также их смесей с традиционным нефтяным дизельным топливом, обеспечивающих снижение токсичности отработавших газов. Авторы отмечают, что одной из наиболее острых проблем является повышенная вязкость растительных масел. Рапсовое масло по сравнению с нефтяным топливом имеет и более высокую плотность, а также оно имеет большее поверхностное натяжение. Указанные отличия физических свойств рапсового масла от свойств нефтяного дизельного топлива оказывают заметное влияние на параметры процесса топливоподачи дизеля, приводя к трансформации характеристик впрыскивания и распыливания этих топлив, последующих процессов смесеобразования и сгорания, показателей топливной экономичности и токсичности. Поэтому целесообразна реализация мероприятий, способствующих улучшению качества процессов подачи топлива, его распыливания и смесеобразования при работе дизеля на растительных маслах и топливах на их основе.

Эффективным способом улучшения качества указанных процессов является приближение свойств биотоплив на основе растительных масел к свойствам нефтяного дизельного топлива. Но при использовании лишь двух компонентов смесевых биотоплив (например, дизельного топлива и рапсового масла) возможности этого способа ограничены. Применение большего числа компонентов, имеющих различные физико-химические свойства (например, дизельного топлива, рапсового масла и МЭРМ (метиловым эфиром рапсового масла), позволяет целенаправленно воздействовать на указанные свойства путем оптимизации состава биотоплива. Таким образом, использование многокомпонентных биотоплив позволяет обеспечить приближение физико-

химических свойств этих топлив к свойствам нефтяного дизельного топлива. В частности исследуемые ниже многокомпонентные биотоплива (смеси дизельного топлива, рапсового масла и МЭРМ) имеют вязкость, соответствующую вязкости зимнего дизельного топлива по ГОСТ 305–82 ( $\nu_r = 1,8–5 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

При эксплуатации транспортных средств и объектов сельхозтехники многокомпонентные биотоплива могут образовываться в процессе их заправки. Если дизель кроме традиционного дизельного топлива эксплуатируется и биотопливах (на рапсовом масле и МЭРМ), то при заправке оставшееся в баке топливо смешивается с вновь заправляемым топливом, и возможна достаточно продолжительная работа дизелей на смесях указанных топлив. В этом случае оказавшееся в топливном баке топливо становится многокомпонентным.

Рассмотрены испытания дизеля типа Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики на нефтяном дизельном топливе марки «З» по ГОСТ 305–82, а также на смеси 90 % дизельного топлива, 5 % рапсового масла и 5 % МЭРМ (биотопливо № 1), смеси 80 % дизельного топлива, 10 % рапсового масла и 10 % МЭРМ (биотопливо № 2), и смеси 60 % дизельного топлива, 20 % рапсового масла и 20 % МЭРМ (биотопливо № 3).

Исследуемые многокомпонентные биотоплива имеют физические свойства, приближающиеся к свойствам дизельного топлива. Но их плотность и вязкость все-таки несколько выше аналогичных свойств дизельного топлива. Поэтому при испытаниях отмечено небольшое увеличение часового расхода топлива. В то же время, из-за наличия в молекулах рапсового масла и МЭРМ атомов кислорода при работе на многокомпонентных биотопливах коэффициент избытка воздуха изменился незначительно.

Оказывает влияние на концентрацию в отработавших газов оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  также вид топлива. В целом можно отметить не очень значительное влияние вида топлива на содержания в отработавших газах оксидов азота.

Содержание в отработавших газах монооксида углерода  $C_{\text{co}}$  также зависит от вида топлива. На указанных режимах наименьшие концентрации  $C_{\text{co}}$  имели место при работе на биотопливах 1 и 2.

Вид топлива оказывает также влияние на концентрацию в отработавших газах легких несгоревших углеводородов  $C_{\text{CHx}}$ . Полученные данные подтверждают возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов дизеля типа Д-245.12С при его переводе с нефтяного дизельного топлива на многокомпонентные биотоплива. Авторы указывают, что проведенные исследования подтвердили воз-

можность получения многокомпонентных биотоплив с заданными физико-химическими свойствами путем смешивания дизельного топлива, рапсового масла и МЭРМ в определенных пропорциях. Они показали возможность улучшения показателей токсичности и дымности отработавших газов при работе дизеля типа Д-245.12С на многокомпонентных биотопливах рассматриваемого состава.

Многокомпонентные смесевые биотоплива, полученные путем смешивания нефтяного дизельного топлива с рапсовым маслом и МЭРМ, имеют плотность и вязкость, больше, чем у нефтяного дизельного топлива, а также физические свойства указанных смесей несколько отличаются от свойств дизельного топлива. Максимальное приближение указанных физических свойств смесевых биотоплив к свойствам нефтяного дизельного топлива может быть достигнуто путем добавления в биотоплива, получаемые из растительных масел, легких нефтяных или альтернативных топлив (легких индивидуальных углеводородов, газовых конденсатов, диметилового эфира).

Определенный интерес с точки зрения авторов представляют результаты исследований транспортного дизеля, работающего на многокомпонентном смесевом биотопливе, полученном добавлением в смесь дизельного топлива и рапсового масла нефтяного топлива с легким фракционным составом – бензина. Эта добавка позволяет существенно снизить вязкость получаемого в результате такого смешения многокомпонентного биотоплива. При этом в качестве маловязкого топлива выбран бензин АИ-80, имеющий сравнительно высокое (по сравнению с другими бензинами) цетановое число равное 20. Работоспособность дизельных двигателей при добавлении бензина в топлива с более тяжелым фракционным составом уже подтверждена рядом проведенных исследований дизелей, работающих не только с добавками бензина в дизельное топливо, но и на чистом бензине. При этом подтверждается возможность получения вязкостно-температурных характеристик многокомпонентных смесевых биотоплив, максимально приближенных к аналогичным характеристикам нефтяного дизельного топлива.

В экспериментальных исследованиях были использованы многокомпонентные биотоплива следующих составов – смесь 85 % дизельного топлива, 5 % рапсового масла и 10 % бензина АИ-80, смесь 80 % дизельного топлива, 10 % рапсового масла и 10 % бензина АИ-80 и смесь 70 % дизельного топлива, 20 % рапсового масла и 10 % бензина АИ-80. Исследуемый бензин АИ-80 при 20 °С имел плотность  $\rho = 756 \text{ кг/м}^3$  и вязкость  $\nu = 0,73 \text{ мм}^2/\text{с}$ , что существенно меньше плотности и вязкости исследуемых дизельного топлива и рапсового масла.

Поэтому разбавление смесей дизельного топлива и рапсового масла бензином АИ-80 позволило заметно снизить повышенные плотность и вязкость исходных смесей. Полученные многокомпонентные биотоплива при 20 °С имели плотность от 807 до 823 кг/м<sup>3</sup> и вязкость от 2,127 до 3,599 мм<sup>2</sup>/с, что вполне укладывается в допустимый диапазон изменения плотности и вязкости штатного дизельного топлива. Наличие в исследуемых многокомпонентных биотопливах бензина АИ-80 с низкой температурой замерзания ( $t = -55$  °С), малой вязкостью и высокой испаряемостью позволило уменьшить температуру замерзания этих биотоплив, улучшить их вязкостно-температурные характеристики и значительно облегчить запуск холодного двигателя.

Разбавление смесей дизельного топлива и рапсового масла бензином АИ-80 благоприятно сказывается и на коксуемости многокомпонентных смесевых биотоплив. Поскольку в бензине АИ-80 смолистые вещества практически отсутствуют (содержание фактических смол – не более 5 мг в 100 мл бензина, а в нефтяном дизельном топливе марки «З» по ГОСТ 305–82 – не более 30 мг), получаемые многокомпонентные биотоплива содержат меньше фактических смол, чем исходные смеси дизельного топлива и рапсового масла. Поэтому их сжигание в дизелях не сопровождается образованием значительных коксовых отложений на распылителях форсунки и других деталях камеры сгорания.

Для оценки влияния состава многокомпонентных биотоплив на показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов дизеля типа Д-245.12С проведены экспериментальные исследования. На первом этапе этих исследований проведены испытания дизеля на режимах внешней скоростной характеристики на чистом дизельном топливе марки «З» по ГОСТ 305–82, а также на смеси 85 % дизельного топлива, 5 % рапсового масла, 10 % бензина АИ-80 (биотопливо № 1), смеси 80 % дизельного топлива, 10 % рапсового масла, 10 % бензина АИ-80 (биотопливо № 2) и смеси 70 % дизельного топлива, 20 % рапсового масла, 10 % бензина АИ-80 (биотопливо № 3). Так как исследуемые многокомпонентные биотоплива имели физические свойства, близкие к свойствам дизельного топлива, при испытаниях замечена слабая зависимость часового расхода топлива  $G_T$  от вида топлива.

При работе на многокомпонентных биотопливах в связи с наличием в молекулах рапсового масла атомов кислорода отмечена тенденция некоторого увеличения коэффициента избытка воздуха, но при этом теплотворная способность многокомпонентных биотоплив была ниже теплотворной способности дизельного топлива. Это привело к

тому, что при использовании этих биотоплив удельный эффективный расход топлива  $g_e$  оказался несколько выше, чем при работе на дизельного топлива.

При экспериментальных исследованиях дизеля, работающего на многокомпонентных биотопливах с добавкой бензина АИ-80, отмечено значительное улучшение показателей токсичности отработавших газов.

Также изучался вопрос использования эмульсии дизельного топлива и рапсового масла с водой. Считается, что использование в дизелях биотоплив, отличающихся повышенными плотностью, вязкостью и пониженной сжимаемостью, сопровождается ухудшением процессов распыливания топлива и смесеобразования. Улучшение качества указанных процессов достигается при использовании эмульгированного топлива – эмульсий нефтяного дизельного топлива и биотоплив с водой. При впрыскивании такого топлива в камеру сгорания дизеля и его нагрева легкокипящие частицы воды взрывоподобно превращаются в пар, подвергая окружающие их частицы топлива дополнительному дроблению и турбулентному перемешиванию за счет выбросов паров воды из капель топлива. Поэтому время существования капелек эмульгированного топлива сокращается по сравнению с существованием капелек чистого дизельного топлива, что уменьшает продолжительность процесса смесеобразования и улучшает его качество.

Еще одна проблема перевода дизелей на указанные биотоплива – возможное некоторое увеличение выбросов с отработавших газов наиболее значимого токсичного компонента – оксидов азота. Впрыскивание в камеру сгорания дизеля водотопливных эмульсий позволяет снизить температуру конца сжатия, среднюю и максимальную температуры цикла, что благоприятно сказывается на процессе сгорания. В ряде работ отмечено, что применение водотопливных эмульсий в дизелях позволяет снизить выбросы  $\text{NO}_x$  – в 1,5 раза, дымность отработавших газов и эмиссию СО в 2 раза.

Также одной из проблем адаптации дизелей к работе на растительных маслах и их производных, является закоксовывание распылителей форсунок. Для решения этой проблемы возможно использование в качестве топлива эмульгированных топлив. Вода, содержащаяся в водотопливных эмульсиях, способствует очищению распыливающих отверстий форсунок от коксовых отложений.

В результате эмульсия № 1 содержала 67 % дизельного топлива, 23 % рапсового масла и 10 % воды. Вторая многокомпонентная эмульсия представляла собой смесь четырех объемных частей дизельного топлива марки Л по ГОСТ 305–82 и трех объемных частей



эмульсии, содержащей 70 % рапсового масла и 30 % воды. Эта эмульсия № 2 содержала 57 % дизельного топлива, 30 % рапсового масла и 13 % воды. Необходимо отметить, что указанная исходная эмульсия рапсового масла и воды хорошо смешивалась с нефтяным дизельным топливом без привлечения дополнительных устройств для смешивания этих компонентов.

Одной из задач получения водотопливных эмульсий является необходимость использования специальных эмульгирующих устройств. Для получения стойких эмульсий рапсового масла и воды авторами применен эмульгатор – алкенил-сукцинимид мочевины, производимый по ТУ 38.1011039–85. Это вязкая, прозрачная, растворимая в углеводородах жидкость светло-коричневого цвета. Содержание эмульгатора в эмульгированном топливе не превышало 0,5 %. Полученная эмульсия была достаточно стабильна: расслоение эмульсии на две фракции происходило лишь после нескольких недель хранения. Однако первоначальные вид и свойства эмульсии восстанавливались путем ее простого взбалтывания.

Использование исследуемых эмульгированных топлив позволяет заметно снизить дымность отработавших газов. Тип применяемого топлива оказывает определяющее влияние на показатели токсичности отработавших газов, т. е. на выбросы нормируемых токсичных компонентов – оксидов азота  $\text{NO}$ , монооксида углерода  $\text{CO}$  и легких несгоревших углеводородов  $\text{CH}_x$ .

Тип применяемого топлива оказывает заметное влияние и на эмиссию с отработавших газов продуктов неполного сгорания топлива – монооксида углерода  $\text{CO}$  и несгоревших углеводородов  $\text{CH}_x$ . При питании исследуемого дизеля рассматриваемыми эмульгированными топливами выбросы несгоревших углеводородов возрастают практически на всех исследованных режимах.

Также определено, что наилучшее сочетание показателей топливной экономичности исследуемого дизеля и токсичности его отработавших газов достигается при использовании эмульсии № 1, содержащей 67 % нефтяного дизельного топлива, 23 % рапсового масла и 10 % воды. Однако они считают, что требуется проведение дополнительных исследований для определения оптимального состава рассматриваемых многокомпонентных эмульгированных топлив. Проведенный комплекс экспериментальных исследований еще раз показал возможность и эффективность использования многокомпонентных эмульгированных топлив в отечественных транспортных дизелях.

Рассмотрен вопрос оптимизации состава многокомпонентных биотоплив [145]. Проведенные исследования работы дизеля типа

Д-245.12С на различных многокомпонентных биотопливах подтвердили необходимость оптимизации состава таких топлив. Отмечено, что все рассматриваемые смесевые биотоплива заметно улучшают показатели токсичности отработавших газов дизеля типа Д-245.12С. Наилучшие результаты достигнуты при использовании смеси (эмульсии) 57 % дизельного топлива, 30 % рапсового масла и 13 % воды. Среди рассматриваемых многокомпонентных биотоплив наименьший эффект при снижении токсичности отработавших газов дало использование смеси 85 % дизельного топлива, 5 % рапсового масла и 10 % бензина АИ-80. При использовании этого топлива отмечено улучшение показателей токсичности отработавших газов. Замена нефтяного дизельного топлива указанным топливом привела к снижению дымности отработавших газов.

## Глава 4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Методика определения фактической загрязнённости моторных топлив

Загрязнённость моторных топлив, то есть количество и гранулометрический состав содержащихся в нём механических частиц определялась путём статистической обработки результатов анализа проб топлива, отобранных из раздаточных кранов средств заправки и топливных баков транспортных и сельскохозяйственных машин при заправочных операциях.

Определение массовой концентрации загрязнений в топливе проводилось в соответствии с ГОСТ 10577–78. Среднее содержание механических примесей на каждом из объектов исследования определялось с доверительной вероятностью 0,9 при допустимой относительной ошибке 10 % с использованием методов математической статистики [146, 147].

Среднее значение загрязнённости определялось, как среднее арифметическое отдельных измерений:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{M_i}{n}, \quad (4.1)$$

где  $M_i$  – значение загрязнённости при  $i$ -м измерении, % (масс.);  $n$  – количество измерений, шт.

Расчёт необходимого числа измерений производился на основании результатов анализа 6–8 поисковых проб топлива на каждом из исследуемых объектов.

Средний диаметр частиц определялся по формуле:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i}{\sum_{i=1}^m n_i}, \quad (4.2)$$

где  $n_i$  – число частиц в  $i$ -м интервале размеров,  $\sum_{i=1}^m n_i$  – общее число частиц;  $m$  – число интервалов размеров.

Гранулометрический состав загрязнений определяется с помощью микроскопа МБИ-6 в пробах нефтепродукта, предварительно отстоявшихся в мерных кюветах из оптического стекла, и просматриваются под микроскопом в соответствии со схемой (рис. 4.1); количест-

во частиц загрязнений по интервалам размеров определяется по формуле [148]:

$$N_j = 1274 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} N_i}{D^2 nh}, \quad (4.3)$$

где  $N_j$  – количество частиц загрязнений данного интервала размеров, шт./мл;  $N_i$  – количество частиц загрязнений данного интервала размеров в  $i$ -м поле зрения, шт.;  $n$  – количество полей зрения, шт.;  $D$  – диаметр поля зрения микроскопа, мм;  $h$  – высота столба жидкости в мерной кювете, мм.

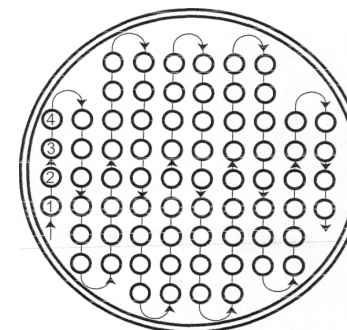


Рис. 4.1. Схема подсчета частиц загрязнения в полях зрения микроскопа: 1, 2, 3... и т.д. – поля зрения; – направление перемещения предметного столика с помощью препароводителя

### 4.2. Методика определения физико-химических показателей дизельного топлива и биотоплива на основе рапсового масла

Проводилось исследование свойств рапсового масла (РМ), смешанного биотоплива – смеси дизельного топлива (ДТ) с РМ, метилового эфира рапсового масла (МЭРМ) и метилового эфира подсолнечного масла (МЭПМ). Определение физико-химических показателей этих веществ проводилось с целью оценки возможности использования их в качестве моторных топлив.

Из многообразия показателей качества, характеризующих физико-химические свойства топлив и масел, в качестве определяемых, влияющих на возможность использования этих продуктов, выбраны следующие показатели:

- кинематическая вязкость;
- кислотность;
- содержание механических загрязнений;
- гранулометрический состав загрязнений;

- содержание свободной воды;
- температура помутнения;
- температура застывания;
- содержание фактических смол.

Кинематическая вязкость нефтепродуктов и биотоплива определяется с помощью вискозиметра ВПЖТ-1 по формуле [149]:

$$\nu = C\tau, \quad (4.4)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость продукта, мм<sup>2</sup>/с;  $C$  – постоянная вискозиметра, мм<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – среднearифметическое время истечения продукта, с.

Кислотность нефтепродуктов и биотоплива определяется путем нахождения количества гидроксида калия КОН, которое пошло на титрование органических кислот, извлеченных из продукта 85%-м водным раствором спирта, по формуле [150]:

$$K = \frac{VT}{50} 100, \quad (4.5)$$

где  $K$  – кислотность продукта, мг КОН/100 см<sup>3</sup>;  $V$  – объем 0,05 нормального раствора КОН, пошедшего на титрование, см<sup>3</sup>;  $T$  – титр 0,05 нормального раствора КОН, мг.

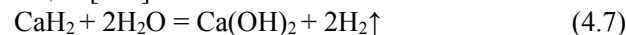
Содержание механических загрязнений определяется путем фильтрования продукта через мембранный фильтр и рассчитывается по изменению массы этого фильтра [151]:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_m} 100, \quad (4.6)$$

где  $X$  – содержание механических загрязнений, %;  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно масса фильтра до и после фильтрования, г;  $m_m$  – навеска продукта, г.

Гранулометрический состав загрязнений определяется с помощью микроскопа МБИ-6 (см. рис. 4.1) и рассчитывается по формуле (4.3).

Содержание свободной воды в продукте определяется газометрическим (гидридкальциевым) методом по количеству водорода, выделившегося при реакции [152]:



Общее количество воды рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{100V_O M}{NV_{\text{OM}} m_m}, \quad (4.8)$$

где  $W$  – содержание воды, % (масс);  $M = 18$  – молярная масса воды, г;

$V_O = V_t \frac{P_a - P_{\text{II}}}{(1 - \alpha T) P_O}$  – объем выделившегося водорода, приведенный к нормальным условиям, мл;  $N = 1$  – число молекул водорода, приходящихся при реакции на одну молекулу воды;  $V_{\text{OM}} = 22,4 \cdot 10^3$  – молярный

объем газа, мл/моль;  $m_m$  – навеска масла, г;  $V_t$  – объем газа при температуре анализа, мл;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $P_{\text{II}}$  – парциальное давление паров, Па;  $P_O = 1,013 \cdot 10^5$  – атмосферное давление при нормальных условиях, Па;  $\alpha = 1/275$  – термический коэффициент объемного расширения газа 1/град.;  $T$  – температура, °К.

Температура помутнения продукта определяется путем охлаждения образца топлива, залитого в пробирку с двойными стенками, которая помещается в стакан с охлаждающей смесью, с последующим наблюдением за состоянием образца [153]. Температура, при которой происходит помутнение продукта, фиксируется по показаниям помещенного в пробирку термометра.

Температура застывания продукта определяется аналогично изложенному выше при определении температуры помутнения, но пробирка берется меньшего диаметра, продукт в нее наливается до уровня кольцевой метки, а температура застывания фиксируется по потере топливом подвижности при наклоне прибора под углом 45° [154].

Содержание фактических смол в топливе определяется с помощью прибора ПОС путем выпаривания продукта под струей водяного пара. Концентрация фактических смол рассчитывается по формуле [155]:

$$X = \frac{(m_2 - m_1) 100}{V}, \quad (4.9)$$

где  $X$  – концентрация фактических смол, мг/100 г масла;  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно масса сухого стакана и масса стакана со смолами, мг;  $V$  – объем топлива, налитого в стакан для испытания, мл.

Перечисленные физико-химические показатели нефтепродуктов и биотоплива определяются до и после прокачивания через фильтр, оснащенный фильтроэлементами с фильтрующей перегородкой из ПГС-полимеров. Фиксируется изменение каждого из перечисленных показателей (в абсолютных единицах и в процентах).

Дизельное топливо, предназначенное для смешения с рапсовым маслом, проверяется по всем показателям качества в объеме контрольного анализа [156]. Полученные после смешения композиции биотоплива с соотношением компонентов 25:75, 50:50 и 75:25, также проверяются по всем показателям качества в объеме контрольного анализа, предусмотренного для дизельного топлива.

Для определения возможности заблаговременного приготовления смесового биотоплива исследуется его гомогенность при длительном хранении.

Поскольку показатели рапсового масла и дизельного топлива имеют достаточно близкие значения, различающиеся примерно на 10 %, использовать эти показатели для индикации процесса рассло-

ния смесового биотоплива затруднительно. Поэтому в качестве определяющего показателя выбрана вязкость компонентов смесового биотоплива, значение которой у рапсового масла превышает соответствующий показатель у дизельного топлива в 15–30 раз.

Гомогенность смесового биотоплива при длительном хранении определяется следующим образом. В цилиндрические сосуды высотой 400 мм и диаметром 55 мм заливается тщательно перемешанные композиции смесового биотоплива с содержанием компонентов (рапсового масла и дизельного топлива) в процентных соотношениях 25:75, 50:50 и 75:25. Сосуды помещаются в термостатированный бокс с температурой 20 °С и выдерживаются при указанной температуре в течение 30 сут. По истечении этого срока сосуды осторожно извлекаются и подвергаются визуальному осмотру в проходящем свете.

При отсутствии внешних признаков расслоения смесового биотоплива из каждого цилиндрического сосуда отбираются пробы продукта в точках, расположенных на расстоянии 10 мм выше дна сосуда и 10 мм ниже уровня топлива в сосуде. Для отбора проб используется стеклянная трубка, соединенная с резиновой грушей или шприцем. Отобранная проба помещается в вискозиметр ВПЖТ-1, с помощью которого определяется вязкость смеси по методике [149].

Смесовое биотопливо считается гомогенным, если разница показателей вязкости, полученных при анализе проб, взятых из верхнего и нижнего уровней сосуда, находится в пределах точности измерений вискозиметра.

Физико-химические свойства МЭРМ, относящегося к сложным эфирам, могут существенно ухудшаться при взаимодействии с водой, поэтому необходимо разработать метод определения содержания воды в этом продукте и методику оценки его гигроскопичности при контактировании с атмосферным воздухом.

В настоящее время в технической документации на все топлива и масла применяется количественный метод определения содержания воды по ГОСТ 2477. Этот метод, основанный на азеотропной дистилляции бензинового раствора нефтепродукта, обеспечивает контроль содержания воды в топливе при производстве и хранении. Однако недостаточная чувствительность этого метода не позволяет использовать его при исследовании обводненности МЭРМ.

Для определения содержания воды при оценке гигроскопичности МЭРМ целесообразно использовать кулонометрическое титрование по методу Фишера.

Известно, что скорость насыщения углеводородных соединений влагой в условиях контакта с влажной атмосферой зависит от относи-

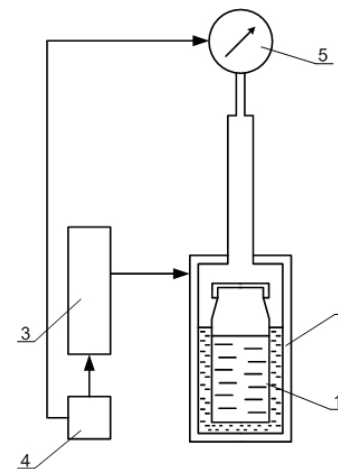
тельной влажности воздуха, температуры среды поверхности соприкосновения, толщины слоя продукта.

Необходимо установить скорость насыщения влагой МЭРМ, т.е. определить минимально необходимое время, за которое достигается равновесное состояние системы «МЭРМ–растворенная вода–насыщенный водяной пар» при различных температурах, относительной влажности воздуха и удельной поверхности соприкосновения продукта с воздухом.

Выбор температурного режима при оценке гигроскопичности МЭРМ осуществляется, исходя из реальных усредненных условий хранения и применения этого продукта. Оптимальной с этой точки зрения является температура 15–25 °С.

В работах [157, 158] установлено, что при оценке гигроскопичности авиационных синтетических масел, основу которых составляют сложные эфиры, время выдерживания навески должно составлять не более 72 ч, т.к. за это время происходит полное насыщение водой навески масла. Дальнейшее увеличение содержания воды не происходит и устанавливается равновесное состояние в системе «растворенная вода – авиационное синтетическое масло». По аналогии этот показатель можно применять и для МЭРМ.

При оценке гигроскопичности выбрана 100 % относительная влажность, что обеспечивает поддержание выбранной относительной влажности с помощью дистиллированной воды в течение всего времени испытания. Для оценки гигроскопичности МЭРМ разработана установка (рис. 4.2).



**Рис. 4.2. Установка для оценки гигроскопичности МЭРМ:**

1 – стакан с навеской продукта; 2 – герметичная емкость; 3 – блок нагрева; 4 – блок автоматики; 5 – датчик давления

Для оценки гигроскопичности МЭРМ навеску отбирают продукта массой 50 г и определяют в ней содержание воды кулонометрическим титрованием по методу Фишера. Затем навеска заливается в стакан, который помещается в герметичную емкость с водой и выдерживается в течение 72 ч. Содержание воды в навеске продукта определяется кулонометрическим титрованием по методу Фишера при температуре 20 °С, влажности воздуха 100 %, парциальном давлении паров воды 2000 Па; высота взлива продукта в стакане – 0,05 м, площадь поверхности контакта продукта с влажным воздухом – 0,00107 м<sup>2</sup>. Температурный режим в герметичной емкости обеспечивается блоком нагрева и контролируется блоком автоматики, а давление – датчиком давления. Зависимость содержания воды от продолжительности испытания определяется по формуле (3.27).

Изложенная методика позволяет оценить способность МЭРМ к поглощению воды и дать оценку его гигроскопичности в определенных условиях, однако, в условиях реального хранения и применения этого продукта температура может изменяться в широком интервале. Поэтому исследование влияния температуры на процесс обводнения МЭРМ в средствах его хранения и заправки и нахождение зависимости скорости поглощения воды от температуры представляет значительный интерес.

В разделе 3.3 указано, что МЭРМ способен растворять ограниченное количество воды. С повышением температуры растворимость воды в нем увеличивается. Температурная зависимость растворимости воды в маслах выражается эмпирическим уравнением (3.38). Зная растворимость воды при трех температурах, можно определить ее растворимость при любой другой температуре.

Для исследования влияния температуры на содержание воды в МЭРМ используется установка, представленная на рис. 4.2.

Сущность методики заключается в расчете количества воды  $C$  в продукте при заданной температуре  $T$  по математической зависимости (3.38) с учетом экспериментальных коэффициентов  $a$  и  $b$ , определяемых по формулам (3.46) и (3.47).

Для проведения эксперимента отбирают навеску продукта в количестве 50 г и помещают в эксикатор с хлористым кальцием, где выдерживают в течение 72 ч. Затем определяют содержание воды в осушенном продукте кулонометрическим титрованием по методу Фишера. После этого навеска продукта заливается в стакан, который помещается в герметичную полость с водой и выдерживается в течение 48 ч при заданной температуре. Содержание воды в навеске продукта определяется кулонометрическим титрованием по методу Фишера.

Температурный режим в герметичной емкости обеспечивается блоком нагрева и контролируется блоком автоматики.

Аналогичным образом определяется содержание воды в МЭРМ не менее чем при двух других температурах и строится график искомой зависимости в логарифмических координатах.

Известно, что сложные эфиры при взаимодействии с водой подвергаются гидролизу с образованием кислоты и спирта. Исходя из этого, можно судить об интенсивности процесса гидролиза МЭРМ при различной продолжительности контакта с водой по показателю его кислотности, определяемому в соответствии с ГОСТ 11362–96.

Кислотность МЭРМ определяется потенциометрически методом объемного анализа. Для определения кислотности МЭРМ в стакан для титрования помещается 100 см<sup>3</sup> продукта и 100 см<sup>3</sup> растворителя (смесь 30 % этилового спирта и 70 % хлороформа). Полученный раствор титруют 0,05 н. раствором (0,05 моль/дм<sup>3</sup>) гидроксида калия до показателя pH = 11.

Кислотность продукта выражают в мг гидроксида калия КОН на 100 см<sup>3</sup> и определяют по формуле:

$$K = \frac{VT}{50} 100, \quad (4.10)$$

где  $V$  – объем 0,05 н. раствора гидроксида калия, пошедшего на титрование 50 см<sup>3</sup> продукта, см<sup>3</sup>;  $T$  – титр 0,05 н. раствора гидроксида калия, выраженный в мг щелочи.

#### 4.3. Методика исследования стойкости конструкционных материалов при взаимодействии с биотопливом

В известной нам литературе отсутствуют сведения о стойкости металлов, неметаллических материалов и защитных покрытий, используемых при изготовлении нефтескладского и заправочного оборудования, к воздействию рапсового масла, изготовленного на его основе смесового биотоплива и МЭРМ. Поэтому возникла необходимость в исследовании данного вопроса и разработки для этой цели соответствующих методик.

Для определения коррозионного воздействия на металлы различных видов биотоплива используются пластинки размером 50×50×4 мм, изготовленные из конструкционной стали марок Ст.3, ГОСТ 19903–90, и Ст.45, ГОСТ 1050–88 и из алюминиевого сплава марки АМГ-6, ГОСТ 18475–73, наиболее часто используемых в конструкции нефтескладского и заправочного оборудования, применяемого в сельскохозяйственном производстве. Пластинки обрабатываются до шероховатости рабочей поверхности от 0,63 до 0,32 мкм по ГОСТ 2789–73. Шлифова-

ние пластинки производят с последовательным применением шлифовальных шкур № 8 и № 6, а затем полируют полировальным порошком в соответствии с методикой, изложенной в [159].

В чистый сухой стакан наливают 50 мл биотоплива и помещают в термостат, где он нагревается до температуры 50 °С. После достижения указанной температуры в стакан с биотопливом помещаются металлические пластинки и выдерживаются в течение 3 ч при температуре 50 °С. По истечении указанного времени пластина извлекается из стакана, промывается в гексане и высушивается с помощью фильтровальной бумаги. Результаты испытания определяются путем визуального осмотра пластинки невооруженным глазом и оценка состояния ее наружной поверхности. К браковочным показателям относятся: наличие коррозионных повреждений поверхности пластинки; наличие налета продуктов окисления металла; изменение цвета пластины.

Из неметаллических материалов, используемых в конструкции изделий, входящих в комплект нефтескладского и заправочного оборудования, преобладают резины различного состава, из которых изготавливаются всасывающие, напорные и раздаточные рукава, прокладочные и уплотнительные детали и т.п. Для определения стойкости резинотехнических изделий к воздействию биотоплива были изготовлены образцы прямоугольной формы размером 50×25×2 мм из резины марок НО68-2, МБС и 8564/14Э.

Стойкость образцов резины к воздействию исследуемых продуктов определяется по изменению массы, объема и размеров этих образцов [160].

При определении изменения массы образцов, они взвешиваются в бюксах (ГОСТ 11358–89). Предельная допустимая погрешность измерений не должна превышать ±0,001 г. Изменение массы образца определяется по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100, \quad (4.11)$$

где  $\Delta m$  – изменение массы образца, %;  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно масса образца до и после контакта с продуктом, г.

При определении изменения размеров образца его длину и ширину измеряют с помощью штангенциркуля с предельно допускаемой погрешностью ±0,5 мм, а толщину с помощью толщиномера с допускаемой погрешностью ±0,01 мм, до и после контактирования с продуктом. Измерение длины образца производится в двух местах вдоль его продольной оси по верхней и нижней поверхности, а ширину и толщину в четырех местах, равномерно расположенных по длине образца (рис. 4.3)

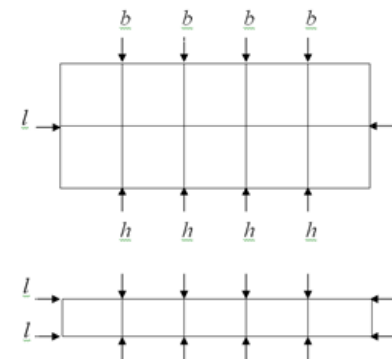


Рис. 4.3. Схема измерения линейных размеров образца:

$l$  – длина, мм;  $b$  – ширина, мм;  $h$  – толщина, мм

Изменение линейных размеров образца определяется по формулам:

$$\Delta l = \frac{l_2 - l_1}{l_1} 100; \Delta b = \frac{b_2 - b_1}{b_1} 100; \Delta h = \frac{h_2 - h_1}{h_1} 100, \quad (4.12)$$

где  $\Delta l$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta h$  – соответственно изменение длины, ширины и толщины образца, %;  $l_1$ ,  $b_1$  и  $h_1$  – соответственно длина, ширина и толщина образца до контакта с продуктом;  $l_2$ ,  $b_2$  и  $h_2$  – то же после контакта с продуктом, мм.

При проведении испытаний поверхность образцов промывается этиловым спиртом и протирается мягкой тканью. Каждый образец взвешивается на аналитических весах при температуре 25 °С, производится измерение его линейных размеров. Затем образцы размещают в емкости с топливом в подвешенном состоянии таким образом, чтобы они не касались друг друга, стенок и дна емкости. Уровень продукта над образцами должен быть не менее 1 см, а его объем в 15–30 раз превышать объем образцов. Заполнение емкости продуктом должно быть не более 75 %. Испытания проводятся при температуре 50 °С.

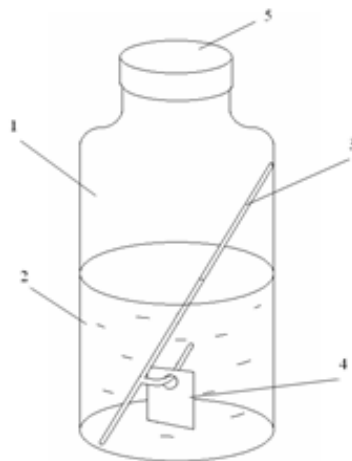
Продолжительность испытаний устанавливается по достижении образцами постоянного значения массы (равновесного состояния набухания образцов в продукте). Постоянное значение массы определяется путем его периодического извлечения из продукта и взвешивания каждые 72 ч. Значение массы считается постоянным, если масса образца при двух последовательных взвешиваниях различается не более чем на 0,001 г.

За результат испытаний принимается среднее арифметическое значение показателя, рассчитанное по параллельным определениям, полученным на трех образцах, при предельном отклонении каждого определения от среднего арифметического значения ±10 % при опре-

делении массы и объема образца и  $\pm 5\%$  при определении его линейных размеров.

Для оценки защитных свойств антикоррозионных покрытий внутренних поверхностей технологического оборудования при транспортных складских и заправочных операциях с биотопливом были использованы металлические пластины из стали Ст. 10, ГОСТ 1050, размером  $75 \times 12,5 \times 3$  мм, с отверстиями для подвешивания. Пластины зачищаются шлифовальной шкуркой и промываются уайт-спиритом, после чего высушиваются и взвешиваются с погрешностью не более  $\pm 0,0003$ , затем на них наносятся защитные покрытия, приведенные в [161]: марки ЭП-525 (в 2 слоя) и марки ХС-5132 (в четыре слоя).

После нанесения покрытия выдерживаются на воздухе при комнатной температуре в течение 7 сут. Подготовленные к испытаниям образцы помещаются в стеклянные сосуды вместимостью  $500 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, оборудованные приспособлением для размещения образцов. Перед размещением в продукты образцов с нанесенным покрытием они взвешиваются на аналитических весах 2-го класса точности. В сосуд наливается  $250 \text{ см}^3$  топлива. Пластины с покрытием размещаются в сосуде с помощью специального приспособления (рис. 4.4).



**Рис. 4.4. Приспособление для оценки защитных свойств антикоррозионных покрытий:**

- 1 – стеклянный сосуд; 2 – биотопливо; 3 – крепежное устройство (стеклянная палочка с крючками); 4 – пластина с антикоррозионным покрытием; 5 – герметичная металлическая крышка

Каждое испытание состоит из двух частей, первая из которых заключается в выдерживании образцов при температуре  $60 \pm 2^\circ \text{C}$  в те-

чение 8 ч и последующем постепенном их охлаждении до комнатной температуры в течение 16 ч. Вторая часть цикла заключается в выдерживании образцов при температуре  $-20 \pm 2^\circ \text{C}$  в течение 8 ч и последующем постепенном повышении их температуры до комнатной в течение 16 ч. После каждого цикла производится осмотр внешнего вида защитных покрытий. Испытания проводятся до появления признаков разрушения защитных покрытий или в течение 25 циклов.

#### **4.4. Методика определения свойств ПГС-полимеров, используемых для очистки топлива**

Исследования эксплуатационных свойств ПГС-полимеров проводятся с целью определения возможности их использования для очистки моторных топлив с заданными параметрами (пропускной способностью, ресурсом работы и возможностью неоднократного использования). Исследуются также фильтрационные показатели ПГС-полимеров и их прочностные показатели.

Исследовались следующие эксплуатационные показатели ПГС-полимеров:

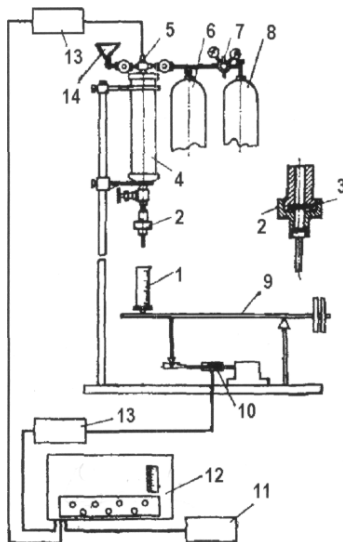
- тонкость и полнота фильтрования;
- стойкость к вымыванию компонентов;
- изменение массы материала после контактирования с топливом;
- удельная пропускная способность;
- гидравлическая характеристика (зависимость пропускной способности образца от перепада давления на нем);
- ресурс работы образца;
- возможность регенерации образца для повторного использования.

Эксплуатационные свойства ПГС-полимеров определяются на безнасосной установке (рис. 4.5).

Моторное топливо, взятое для исследования, заливается в бачок и продавливается через образец ПГС-полимера, помещенного в патрон установки, сжатым воздухом. Для измерения количества топлива, прошедшего через фильтрующий материал в единицу времени, применяется метод синхронной автоматической регистрации количества продукта, при котором объем прошедшего через образец топлива измеряется с помощью мерного цилиндра, а его масса – с помощью тензометрического устройства, давление перед испытуемым материалом – с помощью датчика давления, продолжительность процесса – секундомером.

Перед проведением испытаний бачок безнасосной лабораторной установки тщательно промывают растворителем (изооктан или нефрас) и ополаскивают чистым продуктом. Зажимной патрон установки

тщательно промывают горячей водой, затем раствором двухромовокислого калия и ополаскивают дистиллированной водой, после чего сушат в сушильном шкафу или термостате. Посуду (мерные цилиндры и стаканы) и фильтровальные воронки моют и сушат в соответствии с принятыми в лабораторной практике методами.



**Рис. 4.5. Безнасосная лабораторная установка для исследований пористых материалов:**

- 1 – мерный цилиндр; 2 – патрон; 3 – исследуемый материал; 4 – бачок;  
5 – датчик давления; 6 – ресивер; 7 – редуктор; 8 – баллон с сжатым воздухом;  
9 – коромысло; 10 – тензометрический датчик; 11 – отметчик времени;  
12 – компьютер; 13 – усилитель; 14 – воронка

В качестве материала для очистки топлива используются ПГС-полимеры на основе метадиксибензола в виде дисков диаметром 25 мм.

Испытания проводились при температуре продукта  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ . Перепад давления на испытуемом образце фильтрующего материала должен составлять 0,05 МПа. Этот перепад давления создается путем подачи сжатого воздуха из баллона в ресивер с помощью газового редуктора.

Искусственно загрязненный продукт в количестве  $500\text{ см}^3$  заливают в бачок и продавливают через образец материала сжатым воздухом из ресивера.

Пробу загрязненного топлива отбирают из колбы перед заливом его в бачок, а пробу отфильтрованного топлива – из мерного стакана.

Продукт, используемый в качестве рабочей среды, перед проведением испытаний фильтруют с помощью воронки через мембранный фильтр № 5 или «Владипор» МФА-МА и проверяют в нем содержание загрязнений по ГОСТ 10577–78 [151] и путем просмотра проб масла под микроскопом [162]. Содержание естественных загрязнений в продукте не должно превышать 0,0002 % (масс.), а присутствие искусственного загрязнителя не допускается.

Навески искусственного загрязнителя массой до 1 г приготавливается на часовом стекле, а от 1 до 60 г – в бюксах, и взвешиваются на аналитических весах. Навеска искусственного загрязнителя выбирается так, чтобы его концентрация в продукте составляла  $0,05\text{ кг/м}^3$ .

Испытуемый образец материала устанавливается в зажимной патрон и закрепляется специальной гайкой.

Ресурс работы образцов ПГС-полимеров определяется путем пропускания продукта через испытуемый образец до снижения удельной пропускной способности материала, полученной на чистом продукте, до 50%-го значения этого показателя. Топливо периодически доливают в бачок безнасосной лабораторной установки с помощью воронки.

Возможность регенерации образцов ПГС-полимеров для повторного использования проверяется после ресурсных испытаний образца и снижения его пропускной способности на 50 % перепада давления. После этого образец, выработавший ресурс, поворачивается в патроне противоположной стороной и продувается сжатым воздухом при давлении, равном предельно допустимому значению для данного образца. Затем образец устанавливается в первоначальное положение, и определяется его гидравлическая характеристика. Аналогично проводятся исследования возможности регенерации образцов ПГС-полимеров противотоком жидкости, в качестве которой используется заливаемое в бачок установки топливо.

Испытания проводились на трех образцах ПГС-полимера. Отобранные пробы продукта подвергались анализу гранулометрического состава загрязнений.

Гранулометрический состав загрязнителя следует определять в следующем порядке:

- мерную кювету с пробой продукта установить на предметный столик и закрыть полиэтиленовой пленкой вместе с объективом и предметным столиком;
- провести подсчет частиц искусственного загрязнения по схеме, приведенной на рис. 4.1;
- рассчитать количество загрязнителя на каждом интервале размеров по формуле (4.3).



Затем в каждом интервале размеров определялся коэффициент отфильтровывания, равный:

$$\phi_j = \frac{N_{2j}}{N_{1j}}, \quad (4.12)$$

где  $\phi_j$  – коэффициент отфильтровывания частиц в  $j$ -м размерном интервале;  $N_{1j}$  и  $N_{2j}$  – количество частиц загрязнения  $j$ -го размерного интервала соответственно до и после прохождения через ПГС-полимер.

По данным анализа гранулометрического состава искусственно загрязненного определяют величину абсолютной и номинальной тонкости фильтрации ПГС-полимера.

Полнота фильтрации, характеризующая уменьшение массы загрязнителя в продукте, определяется как соотношение массовых содержаний загрязнений в продукте до и после его прохождения через ПГС-полимер и вычисляется по формуле:

$$\phi = (1 - \frac{G_2}{G_1})100, \quad (4.13)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  – соответственно, содержание загрязнений в продукте до и после фильтрации, мг/л;  $\phi$  – полнота фильтрации, %.

По данным, полученным при анализе массового содержания загрязнителя в пробах топлива, взятых до и после его прохождения через образец ПГС-полимера, определяется полнота фильтрации этого материала.

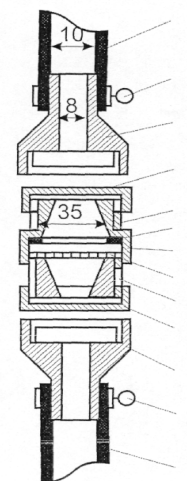
Стойкость ПГС-полимера к вымываемости компонентов оценивается как количество частиц составляющих компонентов (гранул и волокон), содержащихся в 1 л продукта после его прохождения через испытуемый образец материала. Для оценки вымываемости компонентов из ПГС-полимеров была разработана конструкция зажимного устройства для улавливания гранул и волокон (рис. 4.6).

Зажимное устройство в разобранном виде тщательно промывают горячей водой, затем раствором двуххромовокислого калия и ополаскивают дистиллированной водой, после чего сушат в сушильном шкафу или термостате, собирают и устанавливают на безнасосной лабораторной установке при помощи резинового шланга после зажимного патрона.

Топливо, используемое в качестве рабочей среды при проведении испытаний, отфильтровывают без введения в него искусственного загрязнителя.

Предварительно отфильтрованный продукт в количестве 500 мл заливается в бачок безнасосной лабораторной установки и продавливается через образец материала в зажимном устройстве сжатым воз-

духом из ресивера. Количество отфильтрованного продукта измеряют мерным цилиндром. По окончании фильтрации зажимное устройство отсоединяют от безнасосной установки, с его внутренних поверхностей смывают возможные гранулы или волокна бензином Б-70 в количестве 50–60 мл, после чего зажимное устройство помещают в сушильный шкаф или термостат и выдерживают в течение 10–15 мин при температуре  $110 \pm 5$  °С. Подсчет количества вымытых компонентов производится с помощью микроскопического анализа.



**Рис. 4.6. Зажимное устройство для улавливания компонентов ПГС-полимера:**

- 1 – резиновый шланг; 2 – крепежный хомут; 3 – переходник; 4 – транспортная заглушка; 5 – верхняя часть зажимного устройства; 6 – резиновая прокладка; 7 – сетка № 80/720; 8 – прокладка; 9 – нижняя часть зажимного устройства

После сушки зажимное устройство разбирают пинцетом, извлекают сетку № 80/720, помещают её на предметное стекло, которое устанавливают на предметный столик с препаратоводителем.

Микроскоп настраивают для работы в отраженном свете и подсчитывают количество вымытых частиц по всей поверхности сетки № 80/720, для чего перемещают предметный столик препаратоводителем по схеме, приведенной на рис. 4.1, с интервалом, равным диаметру поля зрения микроскопа.

Оценку вымываемости из фильтрующего материала составляющих компонентов производят по формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} K_i}{V}, \quad (4.14)$$

где  $K_i$  – количество вымываемых частиц в  $i$ -м поле зрения, шт.;  $n$  – количество полей зрения, шт.;  $V$  – количество отфильтрованного продукта, мл;  $K$  – количество вымываемых частиц, шт., в 1 мл.

Удельная пропускная способность ПГС-полимера определяется, как количество продукта, прошедшего через единицу поверхности материала в единицу времени при заданном перепаде давления на материале по результатам параллельных испытаний трех образцов.

Удельную пропускную способность материала подсчитывают по формуле:

$$q = \frac{V}{\tau S 100}, \quad (4.15)$$

где  $V$  – объем продукта, прошедшего через образец ПГС-полимера,  $\text{см}^3$ ;  $\tau$  – время истечения продукта, с;  $S$  – рабочая поверхность образца ПГС-полимера,  $\text{см}^2$ ;  $q$  – удельная пропускная способность,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ .

Расхождения между параллельными испытаниями не должны превышать  $\pm 10\%$ . За величину определяемого параметра принимается среднеарифметическое значение удельной пропускной способности по результатам испытаний трех образцов.

Изменение массы материала определяется как разность между значениями массы до контактирования с биотопливом и после такого контактирования при заданной температуре.

Для проведения испытаний используются: аналитические весы с погрешностью не более 0,001 г; сушильный шкаф или термостат с температурой нагрева до  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ; стеклянные банки вместимостью 2 л с герметичными стеклянными крышками, снабженными резиновыми прокладками.

Подготавливаются образцы ПГС-полимера, для чего из материала, имеющего гибкую структуру, вырезаются образцы размером  $15 \times 15$  см, а из материала, имеющего жесткую структуру, вырезаются фрагменты объемом не менее  $10 \text{ см}^3$ .

Образцы доводятся до постоянного веса путем сушки их в сушильном шкафу или термостате при температуре  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  и периодического взвешивания на аналитических весах. Образцы считаются готовыми к испытаниям, если разница между результатами двух последовательно проведенных взвешиваний составляет не более 0,005 г.

Образцы ПГС-полимера помещаются в стеклянные банки, заполненные продуктом, и закрываются крышками, после чего помещаются в термостат и выдерживаются при температуре  $50 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 100 ч. Параллельно проводятся испытания трех образцов материала.

По окончании испытаний образцы материала извлекаются пинцетом из банок, промываются растворителем нефрас С50/70 для удаления топлива и высушиваются с доведением до постоянного веса. Изменение массы материала при контакте с продуктом определяется, как среднеарифметическое значение этого показателя для трех параллельно испытанных образцов.

Для каждого образца изменение массы вычисляется по формуле:

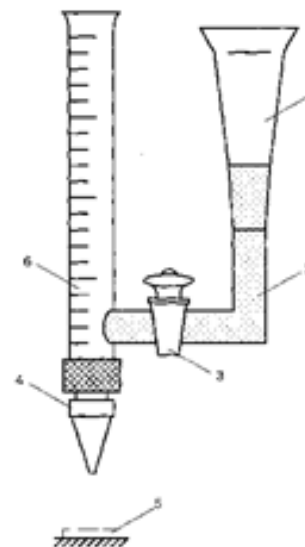
$$\Delta G = (G_1 - G_2) \frac{100}{G_1}, \quad (4.16)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – масса образца до и после контакта с маслом, г;  $\Delta G$  – изменение массы образца, %.

Продукты, используемые в процессе испытаний, исследуются с целью определения изменения их физико-химических показателей после длительного контакта с ПГС-полимером.

#### 4.5. Методика определения эксплуатационных свойств влагоотделяющих перегородок

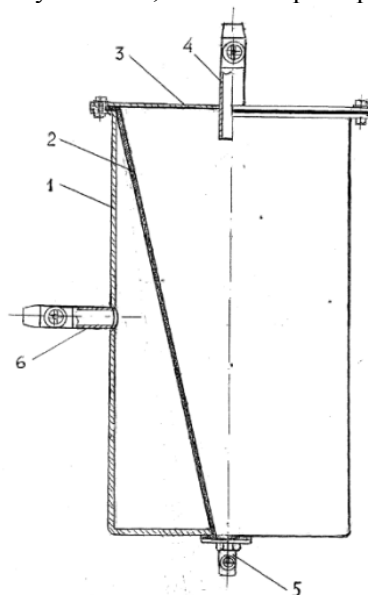
Гидрофобные свойства влагоотделяющих перегородок оценивались по их водопроницаемости, которая характеризовалась давлением, соответствующим началу просачивания воды через перегородку. Для определения величины водопроницаемости перегородки использовался гидростатический принцип, на котором основан изготовленный для этой цели прибор (рис. 4.7), состоящий из бюретки, зажимного патрона и Г-образной трубки с заливной воронкой и запорным краном.



**Рис. 4.7. Прибор для определения водопроницаемости влагоотделяющей перегородки:**  
1 – воронка; 2 – Г-образная трубка;  
3 – кран; 4 – патрон;  
5 – водочувствительная бумага;  
6 – бюретка

При проведении испытаний образец влагоотделяющей перегородки диаметром 30 мм, промытый в растворителе (бензине БР-1, уайт-спирите и т.п.) устанавливался в зажимной патрон с помощью уплотнительных прокладок. В воронку заливалась дистиллированная вода, после открытия крана по Г-образной трубке поступающая в бюретку, которая имеет вертикальную шкалу для измерения высоты столба воды, численно равной давлению, выраженному в мм водяного столба. При достижении предельного уровня воды начинается её просачивание через испытываемую перегородку, что фиксируется изменением цвета индикаторной бумаги. После этого кран закрывался, и фиксировалась высота столба воды в мерном цилиндре, которая соответствует давлению проскока воды через перегородку, то есть её водопроницаемости. Величина этого показателя определялась по трём параллельным испытаниям.

Проверка эффективности использования гидродинамического эффекта при создании фильтра-водоотделителя тонкой очистки производится на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 4.8.



**Рис. 4.8. Установка для проверки эффективности гидродинамического фильтра:**

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – фильтрационная перегородка; 4 – входной патрубок;  
5 – патрубок сброса части топлива; 6 – выходной патрубок

Установка состоит из цилиндрического корпуса, в крышке которого размещён патрубок для входа очищаемого топлива, в обечайке – пат-

рубок для выхода очищенного топлива, а в днище – патрубок для сброса части топлива, создающего продольный поток вдоль фильтрационной перегородки, которая выполнена в виде усечённого конуса, обращённого меньшим основанием вниз, размещена внутри корпуса и герметично разделяет его на две части. Угол конусности перегородки выбирается из условия равномерного поступления топлива на фильтрационную перегородку по всей её высоте. Тогда искомый угол будет равен:

$$\alpha = \arctg \frac{2H}{D_{\text{верхн}} - D_{\text{нижн}}}, \quad (4.17)$$

где  $H$  – высота фильтрующей перегородки, м;  $D_{\text{верхн}}$  и  $D_{\text{нижн}}$  – соответственно диаметры верхнего и нижнего оснований фильтрационной перегородки, м.

Эффективность обезвоживания моторного топлива изготовленными влагоотделяющими перегородками определяется при различных скоростях потока продукта с начальным содержанием воды от 0,1 до 0,25 % (масс.).

Содержание воды в топливе после прохождения гидрофобной перегородки определяется гидридкальциевым методом. Эффективность использования гидродинамического эффекта при очистке и обезвоживании дизельного топлива проверялась путём фильтрования топлива, в которое введены искусственный загрязнитель и эмульсионная вода в соответствии с изложенной выше методикой, через влагоотделяющую перегородку последовательно при закрытом и открытом вентиле для сброса части продукта.

В первом случае процесс осуществляется в режиме обычного фильтрования, а во втором – в режиме гидродинамического фильтрования. Результаты определения массового содержания и гранулометрического состава твёрдых загрязнений и содержания эмульсионной воды при различных режимах фильтрования сравнивались.

Исследования по определению эффективности очистки моторных топлив от свободной воды проводятся на установке путем прокачки через фильтрующе-коагулирующую и влагоотделяющую ступени искусственно обводненного топлива. В качестве фильтрующе-коагулирующей ступени применяется высокопористый полимерный материал с пористо-глобулярной структурой (ПГС-полимер) с размером пор 15 мкм, обеспечивающем в гидродинамическом режиме тонкость фильтрования 5 мкм, в качестве водоотталкивающей ступени – сетка из нержавеющей стали с фторопластовым покрытием.

Исследования проводились при удельной пропускной способности 0,18, 0,24, 0,3 м<sup>3</sup>/ч. Обводнение МЭРМ в процессе исследований

проводились путем искусственного введения в него воды в количестве  $0,5 \pm 0,01$  и  $0,05 \pm 0,01$  % (масс). Время работы на МЭРМ с заданной начальной обводненностью составляет не менее 1 ч для каждого значения этого показателя. Определение начальной обводненности продукта, а также содержание воды в продукте после испытаний определялись кулонометрическим титрованием по методу Фишера.

#### 4.6. Методика определения теплотехнических показателей при подогреве рапсового масла

Экспериментальные исследования процесса нагрева рапсового масла проводятся на лабораторной модельной установке, спроектированной и изготовленной в соответствии с правилами геометрического, гидравлического и теплового подобия.

Условием геометрического подобия модельной установки и полноразмерного натурного образца является соотношение их размеров в определенном масштабе, который может быть определен после нахождения критериев подобия гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в натурном образце и модели.

В качестве критерия гидродинамического подобия принимаем критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения сил инерции и сил молекулярного трения в потоке жидкости:

$$Re = \frac{Wl}{\nu}, \quad (4.18)$$

где  $W$  – скорость потока жидкости м/с;  $\nu$  – вязкость жидкости м<sup>2</sup>/с;  $l$  – характерный линейный размер, м.

Гидродинамическое подобие будет соблюдено, если в сходственных сечениях потока жидкости натурного образца и модели критерий Рейнольдса будет одинаковым.

В разделе 3.5 рассматриваются четыре периода процесса нагрева рапсового масла в резервуаре с использованием локального подогревателя экранного типа. Моделирование этого процесса следует проводить применительно к его четвертому периоду, когда осуществляется основная технологическая операция – выдача рапсового масла из резервуара. При этом течение потока рапсового масла происходит через два определяющих сечения, являющихся сходственными в натуре и на модели – поперечное сечение сливноналивной трубы и суммарное сечение двух продольных зазоров между нижними кромками экрана и обечайкой резервуара.

Определим критерий Рейнольдса для потока рапсового масла в сливноналивной трубе. В этом случае характерный линейный размер в выражении (4.18) будет равен диаметру этой трубы.

В качестве резервуара для хранения и нагрева рапсового масла выбираем алюминиевый резервуар со сферическими днищами РА-2, техническая характеристика которого приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Техническая характеристика резервуара РА-2

Показатель	Единица измерения	Значение
Габаритные размеры:		
длина	мм	1965
диаметр	мм	1220
Толщина стенки	мм	10
Масса	кг	426
Диаметр сливноналивной трубы	мм	100
Допустимый вакуум	МПа	0,02
Рабочее давление	МПа	0,06

Для перекачки рапсового масла выбираем шестеренный насос РЗ-7,5. Производительность этого насоса составляет 5 м<sup>3</sup>/ч (0,0014 м<sup>3</sup>/с). Вязкость рапсового масла при его выдаче из резервуара должна быть не менее 20 мм<sup>2</sup>/с, что соответствует температуре продукта 65 °С. Для указанных условий критерий Рейнольдса  $Re = 885$ .

Найдем критерий Рейнольдса для потока масла через другое определяющее сечение – продольные зазоры между нижними кромками экрана и обечайкой резервуара. В этом случае характерный линейный размер будет равен учетверенному гидравлическому радиусу поперечного сечения потока, который определяется по формуле

$$r_r = \frac{S_{сеч}}{\Pi_{сеч}} = \frac{L_3 h}{2L_3 + 2h}, \quad (4.19)$$

где  $S_{сеч}$  – площадь сечения потока, м<sup>2</sup>;  $\Pi_{сеч}$  – длина периметра сечения зазора, м;  $L_3$  – длина экрана, равная длине цилиндрической части резервуара, м;  $h$  – высота зазора, м.

Суммарное сечение продольных зазоров по площади не должно быть меньше, чем площадь поперечного сечения сливноналивной трубы, т.е. имеет место соотношение:

$$h \geq \frac{\pi d_{тр}^2}{8L_3}, \quad (4.20)$$

где  $d_{тр}$  – диаметр сливноналивной трубы, м.

Тогда минимальная высота каждого зазора  $h_{min} = 0,002$  м. Из конструктивных и технологических соображений принимаем  $h = 0,02$  м. Тогда гидравлический радиус зазора будет равен  $r_r = 0,01$  м, а критерий Рейнольдса будет определяться по уравнению:

$$Re = \frac{W 4r_r}{\nu} \quad (4.21)$$

Критерий Рейнольдса  $Re = 36$ .

Следует использовать эти значения критерия Рейнольдса для определения линейных размеров характерных сечений и скоростей потока жидкостей в этих сечениях. Одновременно надо оценить возможности моделирования процесса нагрева рапсового масла с использованием критериев теплового подобия.

В качестве критерия теплового подобия применяем критерий Прандтля, являющийся мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке жидкости [163]:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a}, \quad (4.22)$$

где  $Pe = \frac{Wl}{a}$  – критерий теплового подобия Пекле, являющийся мерой отношения молекулярного и конвективного переноса тепла в потоке;  $a = \frac{\lambda}{c}$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/s$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности рапсового масла,  $Вт/м \cdot град$ ;  $c$  – удельная теплоемкость рапсового масла,  $Дж/кг \cdot град$ .

Поскольку в модельной установке и на натурном образце применяется одна и та же жидкость с одинаковыми теплофизическими свойствами – вязкостью, температуропроводностью и теплоемкостью, критерий теплового подобия не оказывает влияния на геометрические размеры модели, которые будут зависеть только от критерия гидродинамического подобия.

Приняв масштаб геометрического моделирования 1:6, получим размеры модели: внутренний диаметр 200 мм; длина цилиндрической части 260 мм; диаметр сливоналивной трубы 16 мм.

Тогда скорость потока рапсового масла в сливоналивной трубе модельной установки  $W_m = 1,1$  м/с, а производительность насоса модельной установки  $Q_m = 0,0002$   $m^3/s = 12$  л/мин.

Расчет размера экрана подогревателя на модельной установке.

Площадь поперечного сечения экрана:

$$S_{сеч} = \frac{\pi}{2} ab, \quad (4.23)$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно горизонтальная и вертикальная полуоси эллипсовидного овала Кассини, м.

В соответствии с уравнением (3.67) при  $k = c\sqrt{2}$  эти полуоси будут равны:  $a = c\sqrt{3}$ ,  $b = c$ , а формула (4.23) примет вид:

$$S_{сеч} = \frac{\pi\sqrt{3}}{2} c^2. \quad (4.24)$$

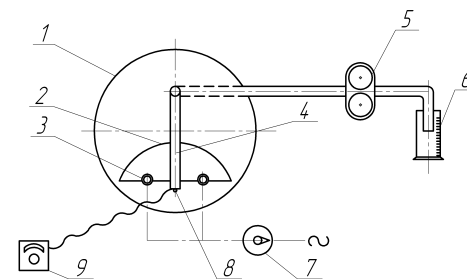
При  $c = 0,04$  м  $S_{сеч} = 0,03$   $m^2$ , ширина экрана  $2a = 0,138$  м, высота экрана  $b = 0,04$  м. Площадь экрана:

$$S_{эк} = P L_3, \quad (4.25)$$

где  $P = \frac{\pi}{2} [1,5(a + b) - \sqrt{ab}]$  – периметр половины овала Кассини, м;  $L_3$  – длина экрана, м.

Отсюда  $S_{эк} = 0,05$   $m^2$ . Расстояние между осями нагревательных элементов  $2c = 0,08$  м.

В качестве нагревательных элементов использованы трубчатые электронагреватели ТЭН, а температура на их поверхности, которая при нагреве паром должна быть равна 100 °С, регулируется с помощью автотрансформатора. Схема модельной установки для исследования процесса нагрева РМ представлена на рис. 4.9.



**Рис. 4.9. Схема лабораторной модельной установки для исследования процесса нагрева рапсового масла:**

1 – стеклянная ёмкость; 2 – проницаемый экран; 3 – трубчатый подогреватель; 4 – приёмная труба; 5 – шестерённый насос; 6 – мерный бак для приёма рапсового масла; 7 – автотрансформатор; 8 – термомпара; 9 – потенциометр

#### 4.7. Методика спектрального анализа моторных топлив

Поскольку помимо механических частиц и воды к загрязнениям моторных топлив относятся продукты окисления и полимеризации, входящих в ее состав углеводородов, для их идентификации использовался метод инфракрасной спектроскопии. Применялся ИК-спектрометр Specord M-80 с дуолучевой схемой, сопряжений с IBM PC, используемой для обработки и документирования полученных данных.

Образцы для спектроскопии приготавливались в виде 10 % (об.) раствора исследуемой жидкости в четыреххлористом углеороде  $CCl_4$ .

Раствор заливался в кювету, изготовленную из соли NaCl, слоем 0,6 мм; в контрольную кювету заливается таким же слоем чистый CCl<sub>4</sub>. При спектральном анализе моторных топлив представляют интерес характеристические полосы 1700–1720 см<sup>-1</sup>, соответствующие продуктам окисления углеводородов (валентные колебания C = O); 980–990 см<sup>-1</sup> и 1600–1650 см<sup>-1</sup>, соответствующие продуктам полимеризации углеводородов, т. е. полимерам (–CH = CH–)<sub>n</sub>.

## Глава 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1. Исследование фактической загрязненности моторных топлив

Для определения фактической загрязненности и обводненности дизельного топлива, поступающего в топливные баки сельскохозяйственных машин и другой мобильной техники, отбирались пробы из резервуаров нефтескладов сельскохозяйственных предприятий Московской области, из раздаточных кранов топливораздаточных колонок топливозаправочных пунктов этих предприятий и из раздаточных кранов автотопливо-заправщиков при заправке техники в полевых условиях, а также из топливных баков машин.

Гранулометрический состав твердых загрязнений в дизельном топливе в средних пробах, отобранных на перечисленных этапах его жизненного цикла, представлен в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Гранулометрический состав твердых загрязнений в пробах дизельного топлива

Место отбора пробы	Количество частиц, шт./мл, по интервалам размеров, мкм					
	1–5	6–10	11–25	26–40	41–50	Более 50
Резервуар после налива	1200	5900	5125	575	25	–
Резервуар при хранении	6200	3900	2940	153	6	–
Раздаточный кран ТРК	9900	4900	3950	600	20	–
Раздаточный кран АТЗ	6100	3600	2630	149	–	–
Бак после залива	10250	5050	4900	640	32	–
Бак при эксплуатации	11500	5300	4980	955	100	13

Результаты исследований загрязнённости дизельного топлива механическими частицами показали, что среднее содержание твёрдых загрязнений в резервуарах нефтескладов непосредственно после их налива составляет 0,0285 % (масс.), а в процессе кратковременного хранения повышается и достигает 0,130 % (масс.). Среднее содержание твердых загрязнений в дизельном топливе при заправке через топливораздаточные колонки на нефтескладах составляет 0,006 % (масс.), а при заправке в полевых условиях с помощью автотопливозаправщиков – 0,0033 % (масс.). Загрязненность топлива в баках системы питания дизелей составляет в среднем 0,009 % (масс.) непосредственно после заправки и 0,015 % (масс.) в процессе эксплуатации техники.

Были сделаны анализы на содержание воды в пробах дизельного топлива, которые показали, что средний уровень обводненности проб

дизельного топлива, взятых из резервуаров, стационарных и подвижных средств заправки примерно одинаков и находится в пределах 0,02–0,05 %, наиболее вероятные значения содержания воды 0,03–0,035 %.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что загрязненность моторных топлив, поступающих в систему питания дизельных двигателей сельскохозяйственной техники, достаточно велика, а размер частиц содержащихся в топливе загрязнений значительно превышает пределы, допускаемые конструкцией узлов системы питания дизелей.

## 5.2. Исследование физико-химических свойств биотоплива

Для приготовления смесового биотоплива можно использовать различные компоненты, в нашем исследовании использовали ДТ и РМ. Поскольку отдельные партии РМ могут значительно различаться по своим физико-химическим показателям, необходимо уточнить свойства конкретного образца этого продукта, который будет использован для приготовления смесового биотоплива. Аналогичные исследования целесообразно провести и для дизельного топлива, которое будет использоваться для приготовления смесового топлива, так как его показатели могут изменяться в довольно широких пределах.

Согласно ГОСТ Р 52368–2005, плотность летнего дизельного топлива при 20 °С установлена не более 860 кг/м<sup>3</sup> (нижний предел не нормируется), кинематическая вязкость при той же температуре установлена в пределах 3–6 мм<sup>2</sup>/с и т.п. Требования к показателям дизельного топлива в Европе и США также находятся в некотором диапазоне. Например, по Европейскому стандарту EN 590-1999 для дизельного топлива нормируется плотность при 15 °С от 820 до 845 кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость при 40 °С от 2 до 4,5 мм<sup>2</sup>/с и т.п. Это подтверждает необходимость определения физико-химических показателей товарного образца дизельного топлива, используемого в дальнейших исследованиях.

Результаты определения физико-химических показателей РМ, ДТ и изготовленного из них смесового биотоплива приведены в табл. 5.2.

Следует отметить, что данные по фракционному составу рапсового масла и смесового биотоплива на его основе весьма условны, так как определение этого показателя стандартным методом на аппарате ЛАФС сопровождалось термоллизом продукта с выделением едкого дыма и конденсацией в приемнике ярко-зеленой жидкости, анализ которой с помощью ИК-спектроскопии показал наличие полиненасыщенных органических кислот. Это явление наблюдалось у рапсового масла после перегонки 10 %, а у смесового биотоплива с содержанием 50 % рапсового масла – после перегонки 46 %, при температуре 315 °С.

Таблица 5.2

Физико-химические показатели смесового биотоплива и его компонентов

Показатель	Единица измерения	Продукт		
		Дизельное топливо	Рапсовое масло	Смесовое биотопливо 50:50
Плотность при 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	826	913	869,5
Кинематическая вязкость при 20 °С	мм <sup>2</sup> /с	3,8	71,7	21,14
Температура: воспламенения	°С	60	317	119
застывания		–10	–18	–14
помутнения		–5,0	–9,0	–7,0
Кислотное число	мг КОН/г	0,06	0,04	0,05
Фракционный состав (температура) при отгоне:	°С			
		50 %	255	325
		90 %	325	355
Содержание золы	%	0,02	0,01	0,015
Содержание фактических смол	мг/100 мл	20	178	100

В связи с тем, что рапсовое масло и приготовленное на его основе смесовое топливо требуют подогрева в процессе складских и заправочных технологических операций, определялась плотность и вязкость этих продуктов в диапазоне температур 20–70 °С. Полученные данные приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Плотность и вязкость смесового топлива и его компонентов при различных температурах

Показатель	Единица измерения	Продукт		
		Дизельное топливо	Рапсовое масло	Смесовое топливо 50:50
Плотность: при 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	826,0	913,0	869,5
		при 50 °С	805,0	877,0
		при 70 °С	791,0	826,0
Кинематическая вязкость: при 20 °С	мм <sup>2</sup> /с	3,8	71,7	21,14
		при 50 °С	2,11	24,4
		при 70 °С	1,67	16,8

Заблаговременное приготовление смесового топлива для дизелей на основе рапсового масла позволяет повысить качество этого топли-

ва, так как его производство можно организовать в стационарных условиях с применением современных технологий. Однако данные о структурной стабильности полученного смесового биотоплива при последующем транспортировании и хранении отсутствуют. В то же время в случае нестабильности структуры смесового биотоплива может произойти его частичное или полное расслоение с нарушением однородности компонентного состава, что в первом случае затруднит, а во втором – сделает невозможным использовать это топливо по прямому назначению.

Для определения гомогенности смесового биотоплива при продолжительном хранении в соответствии с методикой, изложенной в разделе 4.2.2, образцы топлива с соотношением компонентов (рапсового масла и дизельного топлива) 50:50 помещались в цилиндрические стеклянные сосуды высотой 400 мм и диаметром 55 мм. Параллельно проводились испытания двух видов образцов – полученных путем механического перемешивания компонентов и путем обработки смеси СВЧ-генератором в течение 2 мин.

Для перемешивания компонентов биотоплива использовалась установка СВЧ фирмы «Витоинвест», имеющей положительный опыт по применению этого метода при приготовлении моторных масел с присадками. Обработка смеси производилась при рабочей частоте 2450 МГц. Снижение энергозатрат по сравнению с механическим перемешиванием составило около 30 % при уменьшении продолжительности процесса в 4 раза.

Сосуды термостатировались при 20 °С и выдерживались при этой температуре в течение 30 сут. По истечении указанного срока производился визуальный осмотр сосудов с образцами в проходящем свете, при котором внешних признаков расслоения смесового биотоплива обнаружено не было. Затем проводился отбор проб смесового биотоплива.

В качестве определяющего показателя, характеризующего гомогенность смесового биотоплива, была выбрана его вязкость, так как плотность РМ и ДТ. Так, у взятых для смешения компонентов плотность РМ при 20 °С составляла 916 кг/м<sup>3</sup>, а плотность ДТ при той же температуре – 860 кг/м<sup>3</sup>, следовательно разница между этими показателями равна:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{РМ}} - \rho_{\text{ДТ}}}{\rho_{\text{РМ}}} 100 = 6\%, \quad (5.1)$$

где  $\rho_{\text{РМ}}$  и  $\rho_{\text{ДТ}}$  – соответственно плотность рапсового масла и дизельного топлива при 20 °С.

Поскольку плотность смесового биотоплива обладает свойством аддитивности, то этот показатель компонентов в процентном соотношении 50:50 составляет:

$$\rho_{\text{ст}} = \frac{0,5\rho_{\text{РМ}} + \rho_{\text{ДТ}}}{1,5} = 878 \text{ кг/м}^3, \quad (5.2)$$

т.е. плотность смесового биотоплива будет отличаться от плотности рапсового масла на 4 %, а от плотности дизельного топлива – на 2 %.

Учитывая, что погрешность при определении плотности продукта с помощью нефтенсимиетра составляет 0,04 %, очевидно, что проводить сравнение плотностей смесового биотоплива в пробах, взятых в различных слоях продукта, нецелесообразно.

В то же время показатели вязкости у рапсового масла и дизельного топлива различаются весьма значительно. У компонентов, взятых для изготовления испытуемых образцов смесового биотоплива, вязкость рапсового масла составила 75 мм<sup>2</sup>/с, а вязкость дизельного топлива – 5 мм<sup>2</sup>/с, т.е. разница между этими величинами превышает 90 %. Это позволяет уверенно использовать показатель вязкости смесового биотоплива для определения его однородности после продолжительного хранения.

Приведенные в табл. 5.4 данные свидетельствуют о стабильности образцов смесового биотоплива, приготовленного по различным технологиям, в течение 30 сут, а через 100 сут в пробах, отобранных из верхней и нижней точек, у обоих образцов имеется некоторое различие вязкости: увеличение ее в нижнем слое образцов по сравнению с верхним ее слоем на 4–7 % у смесового биотоплива, полученного механическим перемешиванием, и на 2–3 % у топлива, полученного с помощью СВЧ-обработки, что объясняется, очевидно, физико-химическими процессами, связанными с окислительными, полимеризационными, конденсационными и другими явлениями.

Таблица 5.4

**Вязкость смесового биотоплива в условиях продолжительного хранения**

Способ приготовления образца	Значение вязкости, мм <sup>2</sup> /с					
	Исходное		Через 30 сут		Через 100 сут	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Механическое перемешивание	7,7	7,7	7,7	7,7	8,0	8,25
СВЧ-обработка	7,87	7,87	7,87	7,87	8,04	8,15

В то же время разница между вязкостью топлива в пробах, взятых из верхней и нижней точек образцов, не превышает 3 % для топлива, полученного механическим перемешиванием, и 1,4 % для топлива, полученного путем СВЧ-обработки, что свидетельствует о



достаточно высокой стабильности смесового биотоплива. Следует отметить, что образец смесового биотоплива, полученный путем СВЧ-обработки, обладает лучшими показателями как по устойчивости к изменению вязкости, так и по гомогенности при длительном хранении.

Поскольку в реальных условиях применения смесового биотоплива при эксплуатации сельскохозяйственной техники срок его хранения не превысит 30 сут, можно сделать заключение, что смесовое биотопливо обладает высокой стабильностью как в отношении гомогенности структуры, так и в отношении физико-химических превращений входящих в его состав углеводов.

Поскольку основным показателем качества, характеризующим испаряемость ДТ, является фракционный состав, необходимо определить этот показатель у перспективных топлив. Для ДТ нормируют температуры начала перегонки и 10 % отгона. Для топлив с улучшенными экологическими характеристиками нормируют температуру выкипания 96 % или конца кипения. Испаряемость ДТ также оптимизируют двумя точками фракционного состава: 50 и 96 % выкипания. При этом для товарного ДТ (по ГОСТ Р 52368–2005) фракционный состав изменяется в диапазонах: начало кипения – 180–200 °С; 50 % – 256–280 °С; 96 % – до 360 °С.

Проведены исследования фракционного состава метилового эфира рапсового масла (МЭРМ), метилового эфира подсолнечного масла (МЭПМ). Результаты определения фракционного состава МЭРМ, МЭПМ представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

**Фракционный состав метиловых эфиров подсолнечного и рапсового масла**

	Метилловый эфир подсолнечного масла (образец № 1)	Метилловый эфир подсолнечного масла (образец № 2)	Метилловый эфир рапсового масла
Фракционный состав, °С			
Начало кипения	324	325	310
10 %	330	330	320
20 %	332	332	329
30 %	333	333	332
40 %	334	334	333
50 %	335	335	334
60 %	336	336	335
70 %	338	338	337
80 %	341	341	339
90 %	347	343	344
97 %	348	350	348

Анализ результатов, представленных в табл. 5.5, показывает, что фракционный состав МЭРМ, МЭПМ существенно отличается от данных товарного ДТ и характеризуется узким диапазоном фракционирования, что затрудняет их использование в чистом виде взамен дизельного топлива. Поэтому следует рассматривать эти продукты (МЭРМ и МЭПМ) в качестве добавок к товарному ДТ, как это определено в ГОСТ Р 52368–2005. Топлива с биодобавками – новый продукт на рынке, требуется их дальнейшее исследование с применением как стандартных, так и стендовых методов.

Известно, что растворимость воды в эфирах гораздо выше, чем у других углеводородных соединений, что объясняется полярностью молекул этого продукта. Рассмотрим процесс взаимодействия эфира с водой на примере метилового эфира рапсового масла. Параллельно с физико-химическим взаимодействием между полярными молекулами воды и эфира, сопровождающимся образованием водородных связей, МЭРМ вступает с водой в химическую реакцию гидролиза. Теоретические вопросы, связанные с исследованием путей попадания воды в МЭРМ и его обводнения при транспортно-складских операциях, а также влияние на этот процесс температуры продукта, рассмотрены в главе 3. Представляет интерес экспериментальная проверка полученных теоретических положений в соответствии с методиками, приведенными в главе 4.

Как указывалось в разделе 4.2, для определения содержания воды в МЭРМ при оценке гигроскопичности этого продукта использовалось кулонометрическое титрование по методу Фишера. В ходе эксперимента определялась скорость насыщения влагой МЭРМ, т.е. минимально необходимый промежуток времени, за который достигается равновесное состояние системы «МЭРМ – растворенная вода – насыщенный водяной пар» при постоянных температуре, относительной влажности воздуха и поверхности соприкосновения продукта с воздухом. Выбор температурного режима при оценке гигроскопичности МЭРМ осуществлялся, исходя из реальных усредненных условий хранения и применения этого продукта. Эксперимент проводился при температуре 25 °С. Поскольку в известной нам литературе отсутствуют данные о продолжительности процесса насыщения водой МЭРМ, при оценке гигроскопичности этого продукта через каждые 24 ч отбирались пробы эфира и определялось содержание воды кулонометрическим титрованием, протяженность испытаний составила 168 ч.

При оценке гигроскопичности принята относительная влажность воздуха 100 %, что обеспечивает поддержание выбранной относительной влажности с помощью дистиллированной воды в течение всего времени испытания.

Для оценки гигроскопичности МЭРМ использовалась установка, описанная в разделе 4.2 (рис. 4.1).

При оценке гигроскопичности МЭРМ в навеске продукта массой 50 г. определялось первоначальное содержание воды кулонометрическим титрованием по методу Фишера. Затем навеска в стакане помещалась в герметичную емкость с водой и выдерживалась в течение 168 ч.

В результате проведенных исследований установлено, что за первые 96 ч эксперимента происходит интенсивное насыщение МЭРМ влагой, а через 140 ч этот процесс практически прекращается. На рис. 5.1 представлена зависимость содержания влаги в МЭРМ от продолжительности эксперимента.

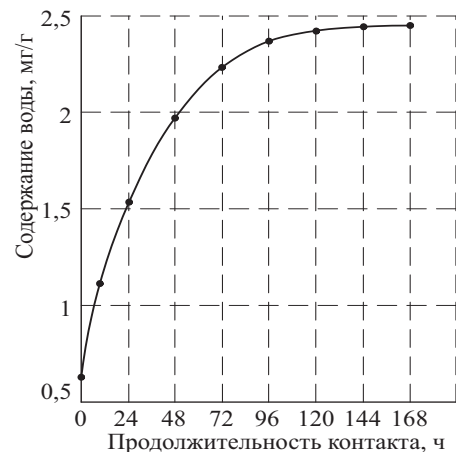


Рис. 5.1. Зависимость обводненности МЭРМ от продолжительности контакта с влагой при температуре 25 °C

Приведенные данные позволяют оценить способность МЭРМ к поглощению воды и дать оценку его гигроскопичности в определенных температурных условиях, однако при реальном хранении и применении этого продукта температура может изменяться в широком интервале. Поэтому исследовалось влияние температуры на процесс обводнения МЭРМ с нахождением зависимости скорости поглощения воды от температуры.

Метилловые эфиры способны растворять ограниченное количество воды при данной температуре, с повышением температуры растворимость воды в эфирах увеличивается. Температурная зависимость растворимости воды в МЭРМ выражается эмпирическим уравнением (3.38). Зная растворимость воды при трех температурах, можно определить ее растворимость при любой другой температуре.

Для исследования влияния температуры на содержание воды в МЭРМ использовалась установка, представленная на рис. 4.2.

Определялось количество воды в продукте при заданных температурах и сравнении полученных данных с теоретическими значениями, найденными по математической зависимости (3.38) с учетом экспериментальных коэффициентов, определяемых по формулам (3.46) и (3.47).

Для этого навеска продукта заливалась в стакан, который помещался в герметичную емкость с водой и выдерживался в течение 48 ч при температуре 20 °C. Содержание воды в навеске продукта определялось кулонометрическим титрованием по методу Фишера. Аналогично определялось содержание воды в МЭРМ при температурах 45, 55 и 65 °C. График искомой зависимости в полулогарифмических координатах приведен на рис. 5.2.

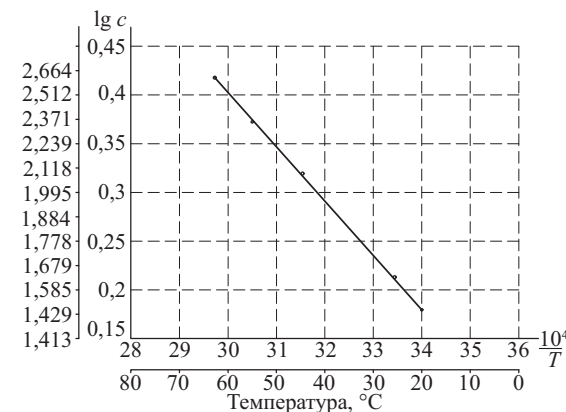


Рис. 5.2. Зависимость содержания воды в МЭРМ от температуры

Коэффициенты, входящие в выражение (3.38), имеют значения:  $a = 1,165$ ;  $b = 100$ .

Тогда указанная зависимость содержания воды в МЭРМ от его температуры будет иметь вид:  $\lg C = 1,165 - 100/T$ .

Поскольку сложные эфиры при взаимодействии с водой подвергаются гидролизу с образованием кислоты и спирта, об интенсивности процесса гидролиза МЭРМ при различной продолжительности контакта с водой можно судить по показателю его кислотности, определяемому в соответствии с ГОСТ 11362–96.

Кислотность МЭРМ определялась потенциометрически методом объемного анализа. Кислотность продукта определялась по формуле (4.10). Полученные данные приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

**Зависимость кислотности МЭРМ от его обводненности**

Показатель	Значения					
Обводненность МЭРМ, мг/г	0,62	1,12	2,12	2,32	2,36	2,44
Кислотность МЭРМ, мг КОН/100 см <sup>3</sup>	136,9	195,7	194,45	216,6	207,2	229,1

Как видно из приведенных в табл. 5.6 данных, кислотность продукта возрастает по мере увеличения количества содержащейся в нем воды, обводненность МЭРМ зависит от температуры, при которой происходит насыщение продукта водой и протекает реакция гидролиза. Следует отметить, что кислотность МЭРМ значительно выше аналогичного показателя дизельного топлива, который в соответствии с ГОСТ Р 52368–2005 и другими отечественными нормативными документами установлен не более 5 мг КОН/100 см<sup>3</sup>. Это подтверждает необходимость обезвоживания МЭРМ перед его использованием в качестве моторного топлива.

### 5.3. Исследование совместимости биотоплив с конструкционными материалами

Исследовалась совместимость различных видов биотоплива (РМ, смесового биотоплива, МЭРМ и МЭПМ) с конструкционными материалами, наиболее часто используемыми при изготовлении технологического оборудования для операций с моторными топливами. Исследованиям подвергались образцы стали Ст.3 без покрытия и с защитным покрытием из фенолалкидной топливостойкой эмали ФА 5278 с пигментом черного и зеленого цвета, а также резины марки НО68-2 и 8564/14Э. Испытания проводились в соответствии с методиками, приведенными в разделе 4.3.

Коррозионное воздействие различных видов биотоплив на металлы определялось визуально, пластинки из конструкционной стали марки Ст.3 (ГОСТ 19903–90) с полированной поверхностью помещались в сосуды с испытуемым топливом и выдерживались в течение 288 ч (12 сут) при температуре 50 °С.

Каждые 72 ч проводился осмотр пластинок, следов коррозии на поверхности пластинок не обнаружено. Это свидетельствует о стойкости конструкционной стали к воздействию биотоплив при повышенной температуре. Аналогичные результаты получены при длительных испытаниях в течение 6 месяцев при температуре 25 °С. Изменений внешнего вида образцов при визуальном осмотре, а также их массы и размеров при измерении этих величин не обнаружено (рис. 5.3).

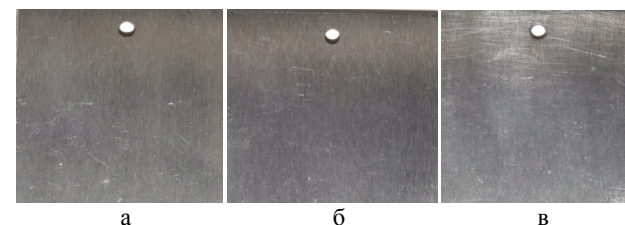


Рис. 5.3. Образцы из стали Ст.3 без покрытия после 100 ч испытаний в биотопливе:

а – РМ; б – в смесовом топливе с содержанием РМ 50 %; в – МЭРМ

Стальные образцы с защитным фенолалкидным покрытием обладают стойкостью к исходным компонентам смесового биотоплива – РМ и ДТ, однако в смесовом биотопливе происходит отслаивание защитного покрытия от металла, причем с увеличением содержания РМ в смесовом биотопливе это явление проявляется более интенсивно. Так, при соотношении рапсового масла и дизельного топлива 25:75 после трех циклов «нагревание – охлаждение» размер дефектов покрытия составил 1×3 мм, 2×5 мм, при соотношении компонентов 50:50 размер поврежденной поверхности покрытия составил 6×12 мм, а при соотношении рапсового масла и дизельного топлива 75:25 на одном из образцов наблюдалось отслаивание покрытия на площади 40×60 мм, а на втором размеры дефекта составили 2×5 мм, при контактировании с МЭРМ происходит вспучивание покрытия пузырями и отслаивание, т.е. покрытие не выдерживает даже кратковременного контакта с этим продуктом (рис. 5.4).

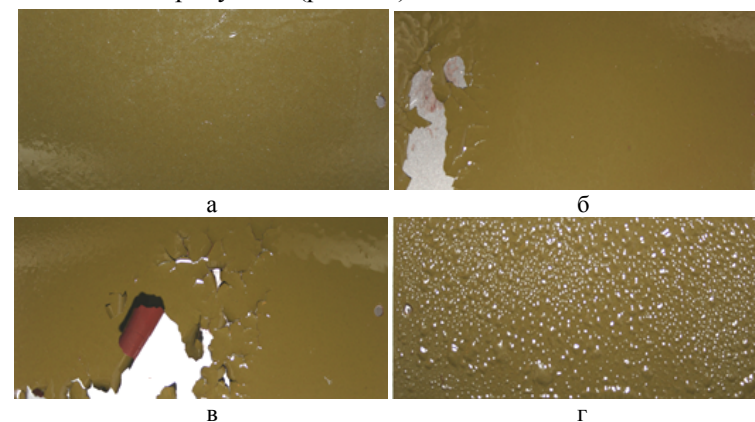


Рис. 5.4. Образцы из стали Ст.3 с защитным покрытием из фенолалкидной эмали после трех циклов испытаний:

а – в РМ; б – в смесовом биотопливе с содержанием РМ 50 %; в – с содержанием РМ 75 %; г – в МЭРМ

Из неметаллических материалов, используемых в конструкции нефтескладского и заправочного оборудования, широкое применение получили резинотехнические изделия (рукава различного назначения, прокладочные и уплотнительные детали и т.п.). Для определения стойкости этих изделий к воздействию перспективных биотоплив были изготовлены образцы прямоугольной формы из нитрильной резины марки НО68-2, используемой при изготовлении гибких резинотканевых рукавов, и резины марки 8564/14Э, применяющейся для изготовления уплотнительных прокладок фланцевых соединений. При проведении испытаний образцы размещались в сосудах с биотопливом в подвешенном состоянии, откуда периодически извлекались для взвешивания и измерения линейных размеров. Температура продукта составляла 50 °С.

Параллельно в аналогичных условиях проводились контрольные испытания с дизельным топливом. Данные, полученные в результате проведения испытаний, приведены в табл. 5.7–5.10 и на рис. 5.5.

Таблица 5.7

**Изменение массы резины образцов НО68-2 при взаимодействии с различными видами топлива**

Топливо	Продолжительность контакта, ч.				
	0	72	144	216	288
	Масса образцов после контакта, г				
РМ	2,8765	2,6873	2,6912	2,6968	2,6987
25 % РМ +ДТ	2,8746	2,8445	2,8462	2,8557	2,8726
50 % РМ +ДТ	3,0149	2,9206	2,9225	2,9292	2,9298
75 % РМ +ДТ	3,0627	2,9178	2,9206	2,9270	2,9271
МЭРМ	2,8680	3,0134	3,2483	3,3394	3,3964
МЭПМ	2,8386	3,1690	3,2947	3,4320	3,5520
5 % МЭПМ+ ДТ	3,0116	3,0626	3,0760	3,0858	3,0979
ДТ	2,9455	2,9596	2,9734	2,9725	2,9674

Таблица 5.8

**Изменение линейных размеров образцов резины НО68-2 при взаимодействии с различными видами топлива**

Топливо	Продолжительность контакта, ч.	
	0	288
	Размеры образца (длина х ширина), мм	
Рапсовое масло	50,0 × 24,6	48,7 × 24,0
25 % РМ +ДТ	49,9 × 24,6	50,3 × 24,6
50 % РМ +ДТ	49,6 × 25,7	49,5 × 25,5
75 % РМ +ДТ	49,8 × 26,1	49,6 × 25,6
МЭРМ	49,9 × 24,7	53,9 × 25,8
МЭПМ	49,6 × 24,3	54,3 × 26,0
5 % МЭПМ+ ДТ	50,0 × 25,2	50,6 × 26,6
Дизельное топливо	49,6 × 24,7	50,0 × 24,8

Таблица 5.9

**Изменение массы резины 8564/14 Э при взаимодействии с различными видами топлива**

Среда	Продолжительность контакта, ч.					
	0	82	144	Хранение при t = 25 °С 23 сут	216	288
	Масса образцов после контакта, г					
ДТ, образец 1	3,2683	3,3036	3,2963	3,2883	3,2982	3,2922
ДТ, образец 2	3,3122	3,3437	3,3400	3,3335	3,3421	3,3350
МЭРМ, образец 1	3,0733	3,4080	3,4744	3,5003	3,5635	3,6430
МЭРМ, образец 2	3,3524	3,6992	3,7703	3,7920	3,8422	3,8990

Таблица 5.10

**Изменение линейных размеров резины 8564/14 Э при взаимодействии с различными видами топлива**

Среда	Продолжительность контакта, ч		
	0	82	216
	Размеры образца (длина х ширина), мм		
ДТ образец 1	49,6 × 25,9	50,2 × 26,0	50,5 × 26,2
ДТ образец 2	50,5 × 25,2	51,0 × 25,6	51,0 × 25,6
МЭРМ образец 1	49,9 × 25,1	52,3 × 26,0	53,7 × 26,5
МЭРМ образец 2	50,3 × 25,4	52,9 × 26,6	53,9 × 26,7



**Рис. 5.5. Фото образцов резины марки НО68-2 после 288 ч контакта:**  
а – с МЭРМ; б – с ДТ

Из приведенных данных видно, что масса и линейные размеры образцов резины после контактирования с дизельным топливом, рапсовым маслом и смесевым топливом изменились незначительно. В то же время образцы, контактировавшие с МЭРМ и МЭПМ, значительно

изменяются в результате набухания резины: наблюдается увеличение массы образца резины НО68-2 после 39 сут контакта с МЭРМ на 30 %, а площадь образца увеличивается на 20 %. Аналогичные результаты получены для образцов резины 8564/14 Э: за 12 сут масса образцов выросла в среднем на 17,5 %.

Таким образом, в результате проведенных испытаний установлено, что эфиры жирных кислот не оказывают существенного влияния на детали, изготовленные из конструкционной стали. В то же время резина НО68-2, наиболее широко применяемая в конструкции технологического оборудования, в том числе для внутреннего покрытия бензостойких резиноканевых рукавов, не выдерживает даже сравнительно кратковременного контакта с этими продуктами. Разрушающее воздействие оказывают эфиры и на топливостойкое защитное покрытие на основе фенолалкидной эмали, которое обладает высокой стойкостью по отношению к дизельному топливу.

Исследовалось также влияние контакта с конструкционными материалами на свойства МЭРМ. Исследования проводились методом инфракрасной спектроскопии. Параллельно исследовались пробы ДТ, контактировавшие с конструкционными материалами в тех же условиях.

Установлено, что в ИК-спектрах проб МЭРМ, отобранных после контактирования с нитрильной резиной и защитным покрытием из фенолалкидной эмали имеются изменения в области  $1490\text{--}1650\text{ см}^{-1}$  и  $3000\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ , что объясняется, очевидно, наличием в нитрильной резине водородных соединений азота, а в фенолалкидной эмали – циклических углеводородных соединений, которые поступают в продукт при контактировании с указанными материалами.

В то же время спектры дизельного топлива, контактировавшего с теми же конструкционными материалами, не изменились.

Для замены прокладочных и уплотнительных деталей оборудования, предназначенного для операций с МЭРМ и МЭПМ, целесообразно использовать листовой тетрафторэтилен, известный под промышленным названием фторопласт-4, который обладает высокой химической стойкостью практически ко всем химически активным и агрессивным жидкостям, в том числе и к эфирам, что подтверждено паспортными данными этого материала и проведенными испытаниями, которые осуществлялись по методике, применявшейся при испытаниях образцов резины. В ходе этих испытаний изменений массы и линейных размеров у образцов фторопласта-4 не обнаружено.

Недостатком фторопласта-4 является его хладотекучесть, поэтому фланцевые соединения технических средств для предотвраще-

ния выдавливания фторопластовых прокладок следует оборудовать канавками, препятствующими деформации помещенных в них прокладок в радиальном направлении (например, стыковочными узлами типа шип–паз).

Ввиду непригодности для операций с эфирами жирных кислот резиноканевых напорных, всасывающих и раздаточных рукавов, которыми оснащены средства перекачки и заправки, целесообразно укомплектовать эти средства металлорукавами типа СРГС, представляющими собой сильфон из нержавеющей стали с наружной проволоночной защитной оплеткой.

В остальном средства перекачки, заправки и хранения, используемые при транспортно-складских и заправочных операциях с дизельным топливом и другими светлыми нефтепродуктами, вполне пригодны для осуществления аналогичных операций с эфирами жирных кислот.

Наряду с конструкционными материалами, применяемыми при изготовлении технологического оборудования объектов системы нефтепродуктообеспечения, на совместимость с МЭРМ были исследованы также элементы отдельных узлов топливной системы тракторов с целью определения работоспособности этих узлов при использовании МЭРМ в качестве моторного топлива для дизелей.

Для проведения испытаний были подготовлены образцы деталей топливной системы трактора МТЗ 80/82: поливинилхлоридный топливопровод, резиновый топливопровод, резиновое уплотнительное кольцо топливоподкачивающего насоса, резиновая прокладка, картонная обечайка и картонный фильтрующий элемент топливного фильтра тонкой очистки.

Результаты исследований приведены на рис. 5.6–5.8.

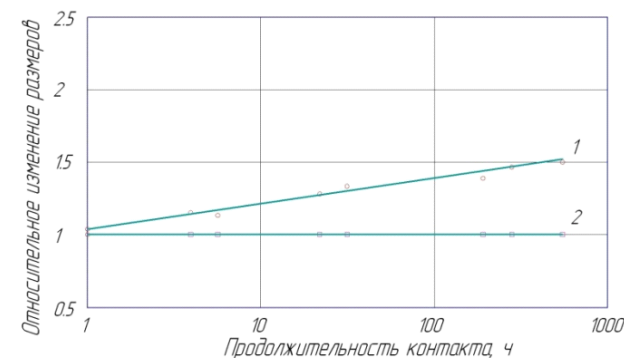
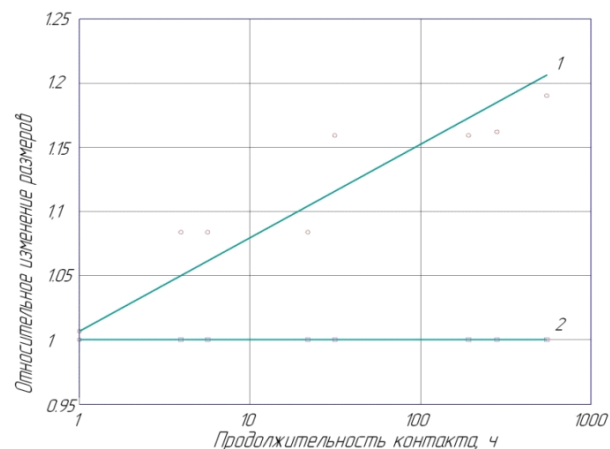
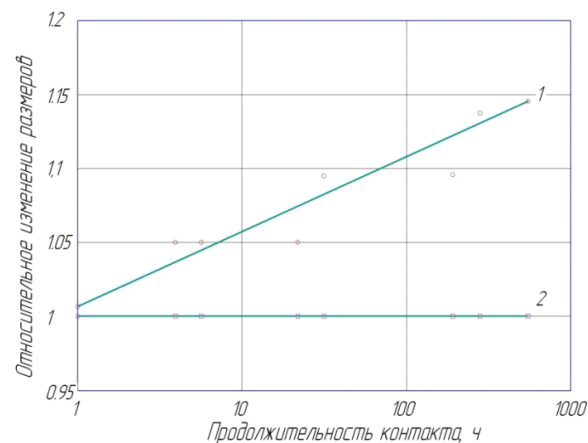


Рис. 5.6. Изменение размеров резинового топливопровода после контакта: 1 – с МЭРМ; 2 – с ДТ





**Рис. 5.7. Изменение размеров резиновой прокладки топливного фильтра после контакта:**  
1 – с МЭРМ; 2 – с ДТ



**Рис. 5.8. Изменение размеров резинового уплотнительного кольца топливного насоса после контакта:**  
1 – с МЭРМ; 2 – с ДТ

В результате испытаний установлено, что детали топливной системы, изготовленные из картона – обечайка и фильтрующий элемент топливного фильтра, а также изготовленный из поливинилхлорида топливопровод не претерпели изменений после достаточно продолжительного (в течение одного месяца) контакта с МЭРМ. В то же время детали топливной системы, изготовленные из резины, под воздействи-

ем МЭРМ изменили свои габаритные размеры вследствие набухания и частично разрушились. У аналогичных образцов при контактировании в тех же условиях с дизельным топливом изменений внешнего вида и габаритных размеров не обнаружено.

#### 5.4. Исследование эксплуатационных свойств ПГС-полимеров

Лабораторные исследования прочностных свойств фильтрующих материалов проводились путем определения предельных разрушающих нагрузок при растяжении (прочность на разрыв) и при сжатии (прочность на продавливание). Сопротивление растяжению определялось на вертикальной разрывной машине с динамометром, а сопротивление продавливанию – на механическом прессе.

Прочностным испытаниям на разрыв подвергались ПГС-полимеры в виде объемных жестких образцов, а также гибкие материалы, изготовленные путем синтеза полимерообразующей композиции на гибких фильтрующих материалах – тканях, нетканом материале и бумаге. Результаты исследований приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

**Прочность фильтрующих материалов на основе ПГС-полимеров при растяжении**

Материал	Удельная разрушающая нагрузка, МПа	Относительное удлинение, %			
		В направлении			
		продольном	поперечном	продольном	поперечном
ПГС-полимер резорцин + формальдегид толщиной 5 мм	19	–	–	–	–
ПГС-полимер карбамид + формальдегид толщиной 5 мм	21	–	–	–	–
Фильтробельтинг с пропиткой ПГС-полимер резорцин + формальдегид	280	166	42	10	
Нетканый материал с пропиткой ПГС-полимер резорцин + формальдегид	25,2	25,2	–	–	
Фильтрационная бумага с пропиткой ПГС-полимер карбамид + формальдегид	1,9	1,9	–	–	
Лавсан с пропиткой ПГС-полимер карбамид + формальдегид	128	113	44	42	
Х.б. ткань с пропиткой ПГС-полимер карбамид + формальдегид	132	98	37	10	

Как видно из приведенных в табл. 5.11 данных, испытанные материалы по своей прочности на разрыв соответствуют требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам для очистки нефтепродуктов.

Прочностным испытаниям на сжатие подвергались ПГС-полимеры двух типов, изготовленные на основе резорцин-формальдегидных и стирол-дивинилбензолных композиций. Установлено, что прочность на сжатие ПГС-полимеров увеличивается с повышением концентрации полимерообразующих реагентов, но при этом одновременно снижается пропускная способность материала, что связано с изменением его пористости. Прочностные показатели ПГС-полимеров при сжатии приведены в табл. 5.12, тонкость и полнота очистки – в табл. 5.13.

Таблица 5.12

**Прочность фильтрующих материалов на основе ПГС-полимеров при сжатии**

Композиция материала	Концентрация реагентов, % (масс.)	Удельная разрушающая нагрузка, МПа	Проницаемость $\text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot 10^{-4}$
Резорцин + формальдегид	20	0,8	105
То же	30	2,4	60
То же	40	4,4	28
То же	50	6,0	11
Стирол + дивинилбензол	25	1,0	120
То же	40	2,3	42
То же	60	5,5	8

Таблица 5.13

**Тонкость и полнота очистки материалами на основе ПГС-полимеров**

Материал	Тонкость фильтрования, мкм		Полнота фильтрования, %
	Абсолютная	Номинальная	
ПГС-полимер резорцин + формальдегид толщиной 5 мм	10	5	95
ПГС-полимер карбамид + формальдегид толщиной 5 мм	10	5	93
Фильтробельтинг с пропиткой ПГС-полимером (резорцин + формальдегид)	10	5	91
Нетканый материал с пропиткой ПГС-полимером (резорцин + формальдегид)	15	10	83
Фильтрационная бумага с пропиткой ПГС-полимером (карбамид + формальдегид)	15	10	71

Материал	Тонкость фильтрования, мкм		Полнота фильтрования, %
	Абсолютная	Номинальная	
Лавсан с пропиткой ПГС-полимером (карбамид + формальдегид)	10	5	94
Х.б. ткань с пропиткой ПГС-полимером (карбамид + формальдегид)	10	5	92

Определение удельной пропускной способности ПГС-полимеров производилась путем пропускания через них топлива или масла при перепаде давления на испытуемых образцах 0,05 МПа. Таким образом, удельная пропускная способность образцов зависела только от вязкости продукта и составляла для различных видов масла при температуре 20 °С:

- на моторном масле 0,35  $\text{дм}^3/\text{мин} \cdot \text{см}^2$ ;
- на гидравлическом масле 0,275  $\text{дм}^3/\text{мин} \cdot \text{см}^2$ ;
- на турбинном масле 0,22  $\text{дм}^3/\text{мин} \cdot \text{см}^2$ ;
- на трансформаторном масле 0,178  $\text{дм}^3/\text{мин} \cdot \text{см}^2$ .

Таблица 5.14

**Удельная пропускная способность и воздухопроницаемость материалов на основе ПГС-полимеров**

Материал	Удельная пропускная способность при перепаде давления 0,05 МПа, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	Воздухопроницаемость при перепаде давления 0,0001 МПа, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
ПГС-полимер резорцин + формальдегид толщиной 5 мм	24,9	1962
ПГС-полимер карбамид + формальдегид толщиной 5 мм	9,6	756,5
Фильтробельтинг с пропиткой ПГС-полимером (резорцин + формальдегид)	38,9	3065
Нетканый материал с пропиткой ПГС-полимером (резорцин + формальдегид)	104,1	8203
Фильтрационная бумага с пропиткой ПГС-полимером (карбамид + формальдегид)	9,12	118,6
Лавсан с пропиткой ПГС-полимером (карбамид + формальдегид)	8,64	680,8
Х.б. ткань с пропиткой ПГС-полимером (карбамид + формальдегид)	14,4	1134,72

Прочность фильтрующих материалов на основе ПГС-полимеров

Композиция материала	Удельная разрушающая нагрузка	
	При растяжении	При сжатии
Резорцин + формальдегид	19,0	6,0
Карбамид + формальдегид	21,0	6,5
Стирол + дивинилбензол	15,5	2,5

Лабораторные исследования по определению эффективности регенерации различных сортов отработанных нефтяных масел проводилась на безнасосной установке (рис. 5.10).



Рис. 5.10. Безнасосная установка

Проводилась проверка эффективности регенерации образцов ПГС-полимеров, выработавших ресурс, с целью их повторного использования. Исследования по регенерации образцов ПГС-полимеров проводились путем их противоточной продувки сжатым воздухом при давлении 0,1 МПа в течение 5 мин и методом противоточной промывки продуктом. Установлено, что после одноразовой регенерации у образцов ПГС-полимеров почти полностью восстанавливается удельная пропускная способность: наблюдалось снижение этого показателя на 3–5 % по сравнению с первоначальными результатами, полученными на новом образце. Проведенные исследования подтверждают возможность неоднократного использования ПГС-полимеров при очистке моторных топлив с периодической противоточной промывкой или продувкой этих материалов.

Гидравлическая характеристика ПГС-полимера, получена при температуре 20 °С, представлена на рис. 5.9. Указанная характеристика практически имеет линейный характер.

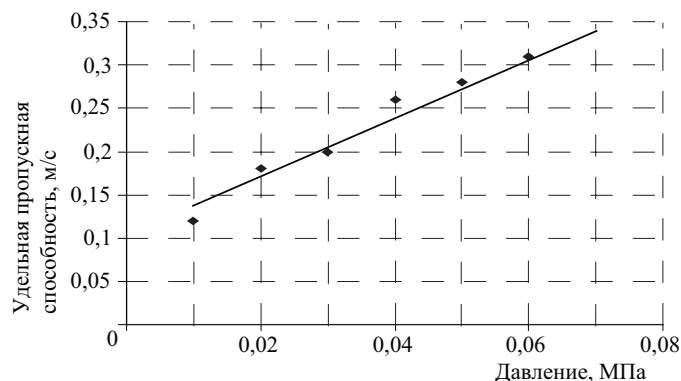


Рис. 5.9. Гидравлическая характеристика образца ПГС-полимера

При проведении исследований проверялась также эффективность обезвоживания сильно обводненных масел с помощью ПГС-полимеров. С этой целью была искусственно приготовлена водомасляная эмульсия на масле МС-8П с содержанием воды 15 % (масс.). После обезвоживания масла путем пропускания через испытуемый образец ПГС-полимера содержание воды в полученном масле составило 0,35 % (масс.), что свидетельствует о высокой влагоотделяющей способности образца.

Исследование совместимости ПГС-полимеров с биотопливом показали, что после выдерживания в течение 5 сут образцов ПГС-полимеров, изготовленных из резорцин-формальдегидной композиции с размером пор 15 и 45 мм, изменений в структуре этих материалов и в физико-химических показателях продуктов, в которых выдерживались образцы, практически не обнаружено.

Прочностным испытаниям на разрыв и сжатие подвергались ПГС-полимеры в виде объемных жестких образцов толщиной 5 мм, изготовленных путем синтеза различных полимерообразующих композиций: резорцин-формальдегид, карбамид-формальдегид и стирол-дивинилбензол. Результаты исследований приведены в табл. 5.15.

Как видно из приведенных в табл. 5.15 данных, испытанные материалы по своей прочности на разрыв и сжатие соответствуют требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам для очистки нефтепродуктов.



При повторной регенерации элемента пропускная способность восстанавливалась до такого же уровня, как и после первой регенерации, но ресурс работы первой регенерации снижается в три раза, а после второй регенерации еще на 20 %, поэтому использовать ПГС-полимер более трех циклов нецелесообразно (рис. 5.11).

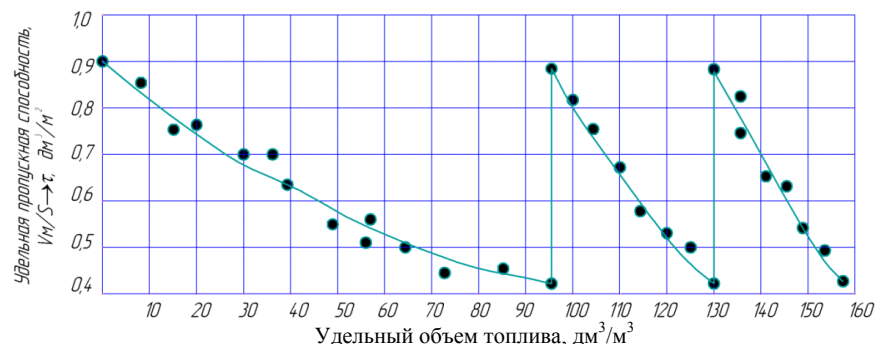


Рис. 5.11. Изменение удельной пропускной способности ПГС-полимера после регенерации

Зависимость удельной пропускной способности ПГС-полимера, определяемой из соотношения  $q_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{пр}}}{S\tau}$ ,  $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  от удельного объема продукта, определяемого отношением  $V_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{пр}}}{V_0}$ ,  $\text{дм}^3/\text{м}^3$ , где  $V_{\text{пр}}$  – объем продукта,  $\text{м}^3$ ;  $S$  – площадь элемента,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – продолжительность цикла регенерации, с;  $V_0$  – объем элемента,  $\text{м}^3$ .

При определении эффективности обезвоживания МЭРМ с помощью ПГС-полимера определялась сорбционная способность этого материала в статических условиях. Результаты определения эффективности адсорбции воды образцом ПГС-полимера в статических условиях при контакте с МЭРМ приведены в табл. 5.16.

Таблица 5.16

Результаты оценки эффективности применения ПГС-полимера для обезвоживания МЭРМ в статических условиях

Условия эксперимента	Содержание воды, % масс.	Эффективность адсорбции, %
Исходный продукт	0,3078	
После контакта с ПГС-полимером в течение 1 ч	0,2845	8
После контакта с ПГС-полимером в течение 3 ч	0,2793	10
После контакта с ПГС-полимером в течение 30 ч	0,2813	9

Исследования показали, что ПГС-полимеры обладают адсорбционными свойствами. В статических условиях из продукта может быть адсорбировано до 8 % масс. воды при температуре 18 °С.

Для оценки эффективности очистки МЭРМ от свободной воды в динамических условиях прокачивали обводненный МЭРМ через образец ПГС-полимера толщиной 8 мм и диаметром 24 мм на безнасосной лабораторной установке (рис. 5.10) при давлении 0,05 МПа. Результаты испытаний приведены в табл. 5.17.

Исследования показали, что прокачивание через образец ПГС-полимера может обеспечить очистку биотоплива от свободной воды до 13,7 % масс. за счет адсорбции; однако кроме того ПГС-полимеры обладают хорошими коагулирующими свойствами: так, после пропускания обводненного МЭРМ через ПГС-полимер в продукте визуально просматриваются скоагулировавшиеся капли воды размером до 100 мкм.

Таблица 5.17

Результаты оценки влагоотделяющих свойств ПГС-полимеров при очистке МЭРМ в динамических условиях

№ образца	Содержание воды до очистки, % масс.	Содержание воды после очистки, % масс.	Эффективность очистки, % от исходного значения
1	0,1243	0,1183	8
2	0,1183	0,1114	10
3	0,1114	0,1093	9

Результаты определения эффективности очистки биотоплив от твердых частиц загрязнений показали, что ПГС-полимеры обладают достаточно высокой задерживающей способностью. Данные приведены в табл. 5.18.

Таблица 5.18

Эффективность очистки моторных топлив фильтром из ПГС-полимера

Место отбора пробы	Количество загрязнений, шт./мл, по интервалам размеров частиц, мкм									
	5–10	10–15	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50	>50
До фильтра	3000	2308	1962	433	231	202	144	–	58	144
После фильтра	598	114	58	–	–	–	–	–	–	–
Коэффициент отфильтровывания	0,80	0,95	0,97	–	–	–	–	–	–	–

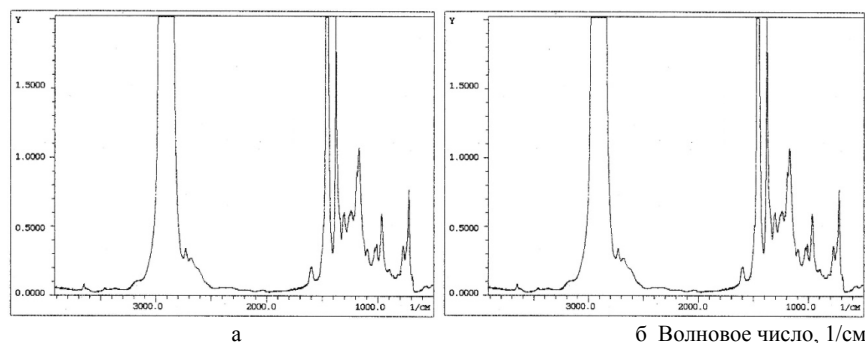
Согласно полученным результатам, ПГС-полимеры обеспечивают при фильтровании моторных топлив номинальную тонкость очистки 5 мкм и абсолютную тонкость очистки 10 мкм.

При оценке совместимости ПГС-полимеров с очищаемым продуктом исследованиям подвергались образцы, изготовленные в виде полых цилиндров, их помещали в емкость с МЭРМ, выдерживали в течение 7 и 14 сут, затем распиливали и осматривали поверхность распила.

В результате визуального осмотра образцов ПГС-полимеров после взаимодействия с продуктом в течение 7 сут изменений состояния наружной и внутренней поверхности образцов, а также поверхности в местах распила, не обнаружено. По результатам анализа проб МЭРМ после его контактирования с ПГС-полимерами установлено, что физико-химические свойства продукта не претерпели изменений.

Результаты анализа проб продукта после взаимодействия с образцами ПГС-полимеров в течение 14 сут показывает, что значения показателей свойств МЭРМ также не изменились, а визуальный осмотр состояния образцов ПГС-полимеров, проведенный после 14 сут, не выявил видимых изменений поверхности элементов.

Пробы МЭРМ после взаимодействия с образцами ПГС-полимеров в течение 7 и 14 сут исследовались методом ИК-спектроскопии (рис. 5.12).



**Рис. 5.12. ИК-спектры МЭРМ:**

а – исходный образец; б – образец после контакта с ПГС-полимером в течение 14 сут

По результатам ИК-спектроскопии можно установить, что в спектрах проб МЭРМ до испытаний и после 14 сут взаимодействия с ПГС-полимером отличий не отмечено. Это подтверждает результаты, полученные при лабораторных анализах проб продукта.

### 5.5. Исследование эксплуатационных свойств влагоотделяющих перегородок

При анализе литературных данных по эксплуатационным свойствам ПГС-полимеров, приведенных в разделе 4.5, было высказано предположение, что в качестве влагоотделяющей ступени устройства для очистки и обезвоживания моторных топлив возможно использо-

вать пористую перегородку из образцов ПГС-полимера, обладающих гидрофобными свойствами.

Однако проведенные предварительные испытания имеющихся в нашем распоряжении образцов ПГС-полимеров различного состава показали недостаточную эффективность указанных образцов при обезвоживании органических жидкостей за счет использования гидрофобных свойств этих образцов. Поэтому целесообразно предусмотреть в устройстве для очистки моторных топлив дополнительные приспособления, повышающие эффективность обезвоживания этих продуктов.

В работах [164–166] приведены результаты исследования различных пористых водоотталкивающих материалов с целью их использования в качестве влагоотделяющих гидрофобных перегородок в конструкции трёхступенчатых аэродромных фильтров-сепараторов. В указанных работах рассмотрены свойства следующих перегородок: иглопробивного нетканого смесового материала (70 % полиэтилена + 30 % лавсана), пропитанного растворами эмульсий фторалкилакрилата и кремнийорганической кислоты и имеющего размер пор 25 мкм; лавсановой ткани, пропитанной теми же составами и имеющей размер пор 15 мкм; капроновой ткани, пропитанной теми же составами и имеющей размер пор 30 мкм; такой же ткани, имеющей размер пор 20 мкм; нетканого материала марки ДРКБ, пропитанного раствором кремнийорганической жидкости ГКЖ-94 и имеющего размер пор 30 мкм; металлической сетки с тефлоновым покрытием фирмы «Фауди», имеющей размер пор 60 мкм; металлической сетки с покрытием суспензией фторопласта 4Д, имеющей после нанесения покрытия размер пор 30 мкм.

Установлено, что лучшими гидравлическими и водоотделяющими свойствами обладает металлическая сетка с фторопластовым покрытием, гидравлические потери у которой составляют 2 кПа при скорости потока жидкости 7 см/с, а содержание воды в очищаемом продукте не превышает 0,003 % (масс.). Остальные материалы обладают более низкими эксплуатационными свойствами.

Для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств водоотталкивающей перегородки необходимо выбрать металлическую сетку, служащую основой для нанесения гидрофобного покрытия. Водоотталкивающие перегородки изготавливались из проволочных тканых латунных сеток с квадратными ячейками, технические параметры которых приведены в табл. 5.19.

Гидрофобное покрытие состояло из водной суспензии фторопласта 4Д, содержащей 55–65 % твёрдого фторопласта, 1–10 % поверхно-

стно-активного вещества ОП-1 и 25–38 % воды. Для снижения поверхностного натяжения наносимого состава с целью предотвращения залипания пор материала в этот состав вводился этилцеллозольв в количестве 7–9 % [166].

Таблица 5.19

**Металлические сетки, используемые для изготовления водоотталкивающих перегородок**

№ сетки	Размер стороны ячейки в свету, мм	Диаметр проволоки, мм	Число проволок на 1 дм сетки, шт.	Пористость сетки	Число ячеек на 1 см <sup>2</sup>
004	40	0,03	1430	0,63	20450
0056	56	0,04	1040	0,69	10085
0063	63	0,045	910	0,69	8270
0071	71	0,055	800	0,67	6400
008	80	0,055	740	0,7	5476

После смешения указанных компонентов композиция обрабатывалась ультразвуком в течение одного часа для получения гомогенной среды. Технология изготовления водоотталкивающей перегородки заключалась в погружении обезжиренной сетки в жидкую композицию на 20 мин, высушивании покрытия при комнатной температуре и его спекании в муфельной печи при температуре 360 °С в течение 30–40 мин.

После нанесения гидрофобного покрытия размер пор водоотталкивающей перегородки характеризуется показателями:

№ исходной сетки	004	0056	0063	0071	008
Размер ячейки в свету, мкм	20×20	25×25	36×36	40×40	48×48

При этом поры сеток № 004 и № 0056 приобрели почти круглую форму, а поры остальных сеток – квадратную форму с закруглёнными краями.

Гидрофобные свойства водоотталкивающих перегородок оценивались по их водопроницаемости, которая характеризовалась давлением, соответствующим началу просачивания воды через перегородку. Для определения величины водопроницаемости перегородки использовался гидростатический принцип, на котором основан изготовленный для этой цели прибор (рис. 4.7).

Эффективность обезвоживания биотоплив изготовленными водоотталкивающими перегородками определялась при различных скоростях потока продукта с начальным содержанием воды 0,1 % (масс.). Результаты испытаний приведены в табл. 5.20 и 5.21.

Таблица 5.20

**Влагоотделяющая способность перегородок на основе металлических сеток**

№ исходной сетки	Содержание свободной воды после перегородки, % (масс), при скорости потока, м/с 10 <sup>-3</sup>									
	5,5	17,0	28,0	38,0	52,0	69,5	82,0	95,0	109,5	122,0
004	Отс	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007	0,0008	0,0011	0,0014	0,0018
0056	0,0001	0,0002	0,0002	0,0004	0,0006	0,0009	0,0012	0,0013	0,0015	0,0021
0063	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007	0,0009	0,0013	0,0016	0,0018	0,0023
0071	0,0002	0,0003	0,0006	0,0008	0,0008	0,0010	0,0018	0,0025	0,0032	0,0081
008	0,0003	0,0004	0,0007	0,0009	0,0012	0,0016	0,0028	0,0035	0,0056	0,0099

Таблица 5.21

**Эффективность обезвоживания моторных топлив влагоотделяющими перегородками**

№ исходной сетки	Эффективность водоотделения, % при скорости потока м/с 10 <sup>-3</sup>									
	5,5	17,	28,0	38,0	52,0	69,5	82,0	95,0	109,5	122,0
004	100	99,9	99,8	99,7	99,5	99,3	99,2	98,9	98,6	98,2
0056	99,9	99,8	99,8	99,6	99,4	99,1	98,8	98,7	98,5	97,9
0063	99,9	99,8	99,7	99,5	99,3	99,1	98,7	98,4	98,2	97,7
0071	99,8	99,7	99,4	99,2	99,2	99	98,2	97,5	96,8	91,9
008	99,7	99,6	99,3	99,1	99,8	98,4	97,2	96,5	94,4	90,1

Как видно из приведенных данных, лучшими влагоотделяющими свойствами обладает перегородка, изготовленная из сетки 004. Проведенные параллельно испытания сетки из нержавеющей стали с тефлоновым покрытием фирмы «Фауди» показали, что сетка 004 с фторлоновым покрытием эффективно обеспечивает водоотделение до предельно допустимого её содержания в продукте (0,0015 %) при скорости потока 0,11 м/с, а сетка с тефлоновым покрытием фирмы «Фауди» обеспечивает такое содержание воды только при скорости потока не выше 0,038 м/с. При этом в обоих случаях содержание воды в исходном продукте практически не влияет на конечный результат.

Результаты испытаний изготовленных гидрофобных перегородок приведены в табл. 5.22.

Таблица 5.22

**Водопроницаемость гидрофобных перегородок**

№ исходной сетки	Площадь живого сечения ячейки, кв. мкм	Давление продавливания воды, мм вод. ст.
004	322	228
0056	852	182
0063	1296	163
0071	1600	159
008	2304	148

Зависимость водопроницаемости гидрофобных перегородок от живого сечения их ячеек представлена на рис. 5.13. Указанная зависимость носит нелинейный характер, так как водопроницаемость перегородки резко возрастает с увеличением размера ячеек.

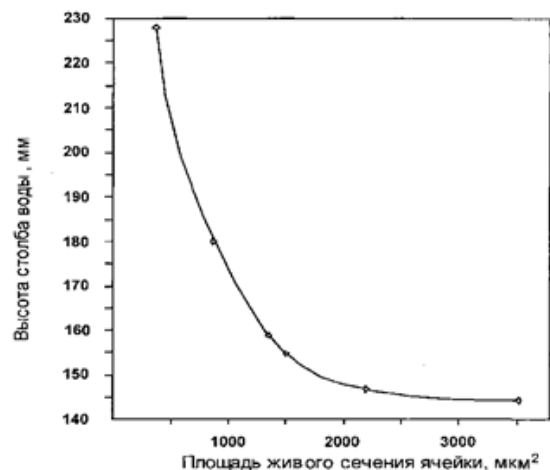


Рис. 5.13. Водопроницаемость гидрофобных перегородок с различным размером ячеек

Гидравлические характеристики изготовленных гидрофобных перегородок представлены на рис. 5.14.

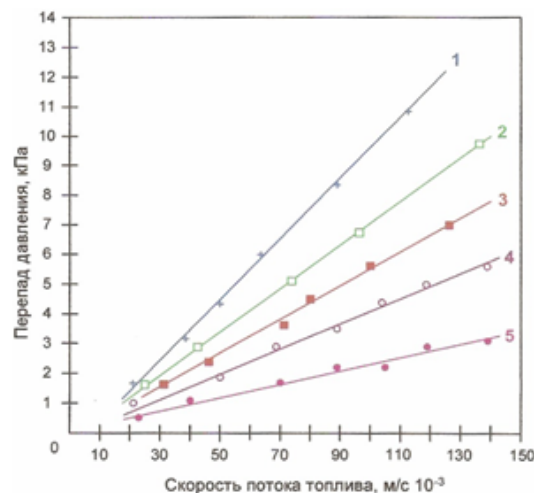


Рис. 5.14. Гидравлические характеристики гидрофобных перегородок, изготовленных из сеток:  
1 – 004; 2 – 0056; 3 – 0063; 4 – 0071; 5 – 008

В исследуемом диапазоне скоростей потока продукта зависимость перепада давления на перегородке от скорости потока носит линейный характер, то есть подчиняется закону Дарси.

Стойкость покрытия изготовленных перегородок к биотопливу проверялась путём пропускания через образец 5 л указанного продукта с последующим просмотром под микроскопом испытуемого образца и установленной за ним по ходу потока контрольной сетки. Каких-либо повреждений покрытия и частиц на контрольной сетке не обнаружено.

Прочность изготовленных гидрофобных перегородок определялась на разрывном стенде. Установлено, что эти перегородки обладают лучшими прочностными свойствами, чем исходные сетки до нанесения на них водоотталкивающего покрытия. У сетки 004 удельная разрушающая нагрузка составляет 68,5 МПа, а у изготовленной на её основе гидрофобной перегородки – 71,1 МПа.

## 5.6. Результаты исследования процесса нагрева рапсового масла

Исследования проводились путем нагрева РМ в модельной лабораторной установке, описание которой приведено в разделе 4.6.

Для определения эффективности разработанного способа нагрева с использованием локального подогревателя, оснащенного проницаемым экраном, исследования проводились в три этапа.

На первом этапе нагрев РМ осуществлялся трубчатыми нагревательными элементами без экрана (рис. 5.15 а). Нагрев производился до момента, когда температура масла в емкости модельной установки достигала 65 °С, после чего включался насос, и производилось откачивание масла из емкости.

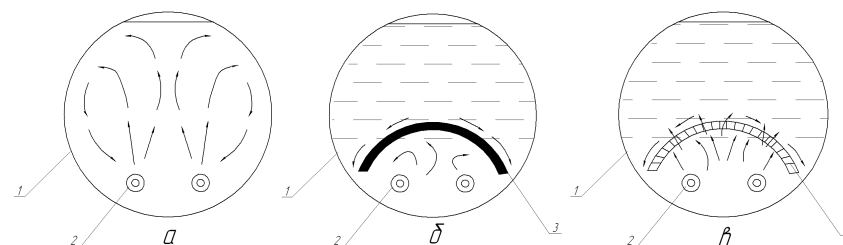


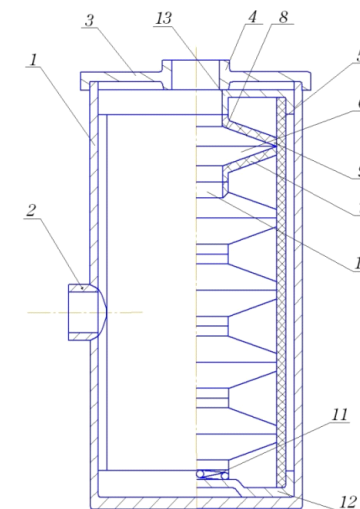
Рис. 5.15. Схема нагрева РМ в емкости модельной установки:  
а – без экрана; б – со сплошным экраном; в – с проницаемым экраном:  
1 – резервуар; 2 – нагревательный элемент; 3 – сплошной экран;  
4 – проницаемый экран

На втором этапе в емкость модельной установки помещался сплошной металлический экран из алюминиевого листа, имеющий

## Глава 6. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧИСТОТЫ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ И ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

### 6.1. Разработка конструкции фильтроэлемента из ПГС-полимеров

На основании теоретических и экспериментальных исследований свойств ПГС-полимеров был разработан двухступенчатый фильтроэлемент, первая ступень которого представляет собой цилиндр, а вторая ступень – набор чечевицеобразных дисков с рабочей поверхностью, состоящей из двух усеченных конусов (рис. 6.1).



**Рис. 6.1. Фильтр с двухступенчатым фильтроэлементом из ПГС-полимера:**  
1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – крышка; 4 – выходной патрубок; 5 – первая ступень; 6 – вторая ступень; 7 – чечевицеобразный диск; 8 – внутренний опорный выступ; 9 – внешний опорный выступ; 10 – центральное отверстие; 11 – нажимная пружина; 12 – глухая заглушка; 13 – проходная заглушка

При работе фильтра загрязнённый нефтепродукт под давлением поступает через входной патрубок в кольцевой зазор между стенкой корпуса и первой ступенью фильтроэлемента, проходит через эту ступень, где отделяются более крупные частицы загрязнений, поступает в кольцевые конические зазоры между первой и второй ступенями фильтроэлемента, проходит через диски второй ступени, где осуществляется его тонкая очистка от мелких загрязнений, и через осевой канал подаётся к выходному патрубку.

форму сегмента горизонтального цилиндра с основанием в виде круга (рис. 5.156). Объем подэкранного пространства составлял 20 % от полного объема емкости модельной установки. Нагрев РМ производился до температуры в подэкранном пространстве 65 °С, после чего включался насос, и производилось откачивание масла из подэкранного пространства. Одновременно в это пространство поступало РМ из остального объема емкости.

На третьем этапе в емкость модельной установки помещался пористый экран с покрытием из металлической сетки квадратного переплетения, имеющей в поперечном сечении форму половины эллипсоидного овала Кассини (рис. 5.15в). Объем подэкранного пространства также составлял 20 % от полного объема модельной установки. Нагрев РМ в подэкранном пространстве и его выкачка из емкости модельной установки производились в том же порядке, что и на втором этапе исследований.

Сравнительные данные, характеризующие эффективность нагрева РМ различными способами, приведены в табл. 5.23.

Таблица 5.23

**Эффективность нагрева рапсового масла различными способами**

Способ нагрева	Продолжительность опорожнения резервуара, с	Относительная продолжительность опорожнения, %
Без экрана	1780	100
Со сплошным экраном	593	33,3
С проницаемым экраном	354	19,9

Как видно из приведенных в табл. 5.23 данных, использование локального подогревателя с проницаемым экраном снижает затраты времени на выдачу рапсового масла в 1,7 раза по сравнению с аналогичным устройством, оборудованным сплошным экраном, и в 5 раз по сравнению с применением общего нагрева без использования локальных подогревательных устройств.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований опубликованы в работах [167–246].

Соотношение тонкости очистки первой и второй ступеней выбрано на основании экспериментально полученных вероятностных соотношений таким образом, что обе ступени работают в оптимальном режиме фильтрования – с постепенным закупориванием пор, а ресурсность обеих ступеней достигается за счёт развития рабочей поверхности второй ступени, обладающей более высокой тонкостью очистки. При этом габаритные размеры фильтра практически не увеличиваются по сравнению с одноступенчатым фильтром, имеющим такую же пропускную способность.

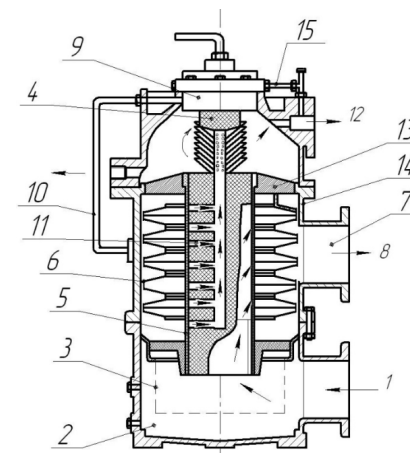
Наряду с высокой тонкостью очистки такой фильтр обладает значительным ресурсом работы, а при необходимости легко регенерируется путём противоточной продувки сжатым воздухом. На конструкцию этого фильтра был получен патент [247].

Однако такие фильтры имеют ограниченный ресурс работы, что требует периодической замены фильтрационных элементов или их регенерации для удаления загрязнений, блокирующих рабочую поверхность фильтроэлемента.

## 6.2. Разработка конструкции самоочищающегося фильтра из ПГС-полимеров

Для увеличения ресурса и непрерывной работы фильтра предлагается конструкция самоочищающегося фильтра (рис. 6.2), при работе которого происходит одновременно и очистка топлива от механических примесей, и регенерация фильтрующих перегородок.

Разработанный самоочищающийся фильтр помещен в корпус 14, в его нижней части имеется патрубок для входа очищаемого топлива 1. Выходная камера оснащена фильтром предварительной очистки из сетки 008. В средней части корпуса, образующей камеру для сбора очищенного топлива с выходным патрубком 8, размещен пакет с фильтрующими элементами и смонтированным в его центральной части распределителем 4. Пакет состоит из дисковых секций с фильтрующими элементами из ПГС-полимера и разделенных радиальными перегородками на 12 секторов, образующих соответственно 12 колонн, высота которых равна высоте пакета. При помощи распределителя очищаемое топливо продается в 11 колонн, а двенадцатая в это время промывается противотоком очищенного топлива. Затем гидромотор поворачивает распределитель на 30° и осуществляется промывка следующей колонны. На конструкцию этого фильтра получен патент [248]. Самоочищающийся фильтр показал хорошие результаты при очистке нефтепродуктов от твердых загрязнений и воды [216], он может также эффективно применяться для очистки биотоплива [246].



**Рис. 6.2. Самоочищающийся фильтр:**

- 1 – патрубок для входа очищаемого топлива; 2 – камера; 3 – фильтр предварительной очистки; 4 – распределитель; 5 – кожух; 6 – фильтрующий пакет; 7 – выходная камера; 8 – выходной патрубок; 9 – гидромотор; 10 – питающий трубопровод; 11 – каналы для промывочного топлива; 12 – патрубок для выхода промывочного топлива; 13 – крышка; 14 – корпус; 15 – отводящий трубопровод

Проведённые исследования прочностных и технологических свойств пористых полимерных материалов с глобулярной структурой (ПГС-полимеров) показали их пригодность для очистки биотоплив. По отношению к биотопливу полимерные материалы инертны, никаких изменений в образцах фильтров и биотопливе после их продолжительного контакта не обнаружено. Удельная разрушающая нагрузка образцов ПГС-полимеров составила 15,5–21 МПа при растяжении и 2,5–6 МПа при сжатии. Тонкость фильтрования полимерными материалами – 10 мкм, а полнота очистки 92–95 %.

Проверка эффективности регенерации образцов полимерных фильтров показала, что при противоточной продувке сжатым воздухом или промывке топливом удельная пропускная способность полимерных фильтров восстанавливается на 95–97 %.

Разработанная конструкция самоочищающегося фильтра, изготовленного из ПГС-полимеров, позволяет одновременно проводить очистку топлива от механических примесей и регенерацию фильтра противоточной промывкой в выделенном сегменте фильтроэлемента. Самоочищающийся фильтр может продолжительное время эффективно работать без замены и технического обслуживания [246].



### 6.3. Разработка конструкций гидродинамических фильтров

Перспективным направлением является использование фильтров, конструкция которых позволяет осуществлять непрерывную регенерацию фильтрационных элементов непосредственно на фильтре без остановки процесса очистки. К таким устройствам относятся гидродинамические фильтры, при работе которых одновременно осуществляются процесс фильтрования жидкости через пористую перегородку и процесс гидродинамического воздействия инерционных сил потока жидкости на загрязнения, непрерывно удаляющиеся с поверхности этой перегородки.

Для обеспечения равномерной подачи топлива на рабочую поверхность пористой перегородки и одинакового давления на входе по всей ее высоте следует придать фильтрующему элементу криволинейную форму, что обеспечивает переменную ширину его внутренней полости (рис. 6.3).

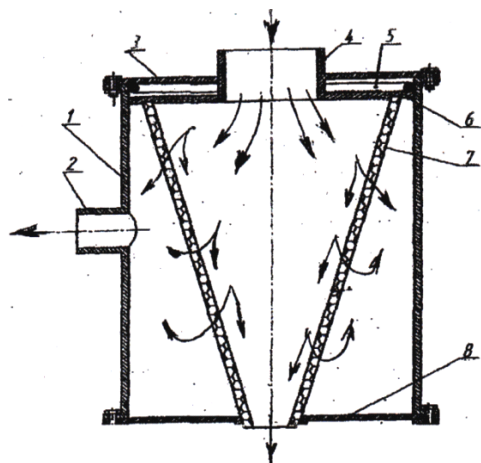


Рис. 6.3. Схема гидродинамического фильтра устройства для тонкой очистки топлива:

1 – корпус; 2 – патрубок отвода очищенной жидкости; 3 – крышка; 4 – входной патрубок; 5 – пружина; 6 – основание фильтрующего элемента; 7 – пористая перегородка; 8 – днище корпуса

Оптимальной формой перегородки для обеспечения равномерной подачи на неё топлива является усеченный параболоид, однако для практических целей из технологических соображений можно принять форму фильтрующего элемента в виде усеченного конуса. В этом случае вектор скорости частицы под действием силы потока очищаемого топлива может не совпадать с вертикальным направлением, од-

нако движение потока жидкости в сужающемся пространстве с одновременным отводом части жидкости через пористую перегородку можно с достаточной степенью вероятности считать вертикальным.

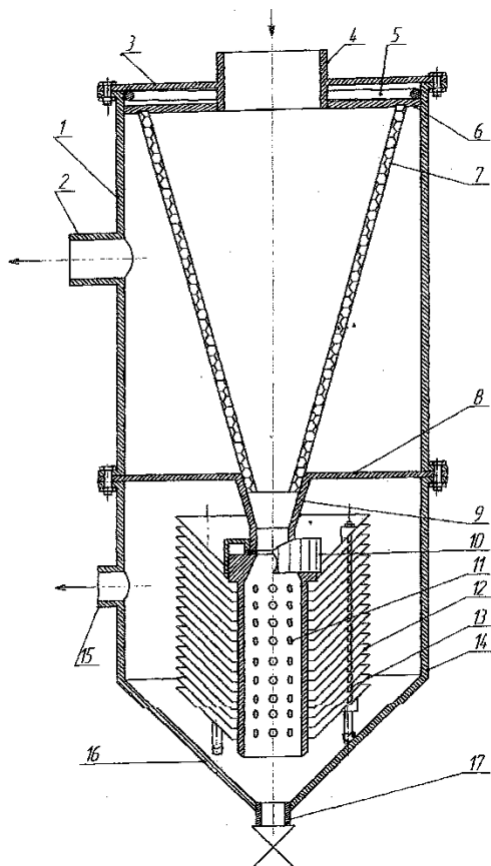
В процессе гидродинамического фильтрования некоторая часть топлива вместе с загрязнениями, не попавшими в пористую перегородку, также не поступит в эту перегородку и будет сбрасываться из внутренней полости фильтрующего элемента и отводиться обратно в топливный бак. Для очистки этого топлива, которое содержит повышенную концентрацию загрязнений, с целью предотвращения их накопления в топливном баке, следует предусмотреть дополнительное очистное устройство для сбрасываемого топлива. Таким устройством может служить динамический отстойник, представляющий собой пакет конических тарелок. Механизм очистки топлива с помощью этого динамического отстойника рассмотрен в работе [209].

Компоновку устройства целесообразно выбрать, исходя из конструктивных соображений, для уменьшения габаритных размеров устройства для тонкой очистки топлива в системе питания двигателя. Этой цели можно достичь, если сбрасываемое топливо подводится к центральной трубке отстойника, а его выход из отстойника осуществляется по периферии конических тарелок. Кроме того, при таком подводе топлива повышается эффективность очистки топлива в динамическом отстойнике, так как скорость потока топлива при его движении по поверхности тарелок замедляется, что создаёт благоприятные условия для осаждения загрязнений и улучшается процесс отвода осевших на тарелках отстойника загрязнений, которые концентрируются в центральной части конического днища.

Схема устройства для тонкой очистки топлива, включающего гидродинамический фильтр и динамический отстойник, представлена на рис. 6.4.

При работе устройства загрязнённое топливо под давлением поступает во внутреннюю полость фильтрационного элемента, проходит через пористую перегородку и отводится из корпуса через патрубок выхода очищенного продукта. Часть топлива создаёт продольный поток вдоль внутренней поверхности пористой перегородки и в виде концентрированной суспензии, насыщенной твёрдыми частицами и эмульсионной водой, поступает в перфорированную трубку, через отверстия в этой трубке распределяется по коническим тарелкам, на поверхности которых происходит осаждение твёрдых частиц и микрокапель воды. Осадившиеся частицы загрязнений перемещаются по поверхности тарелок, отводятся через радиальный зазор между тарелками и перфорированной трубкой в днище насадки и удаляется через патрубок слива

отстоя, а очищенное в динамическом отстойнике топливо через патрубок возврата отводится в бак циркуляционной системы.



**Рис. 6.4. Устройство для очистки топлива в циркуляционных системах:**

1 – корпус; 2 – патрубок выхода очищенного продукта; 3 – крышка; 4 – патрубок подвода продукта; 5 – пружина; 6 – основание фильтрационного элемента; 7 – пористая перегородка; 8 – днище корпуса; 9 – патрубок сброса части продукта; 10 – накидная гайка; 11 – перфорированная трубка; 12 – пакет конических тарелок; 13 – стяжка; 14 – насадка; 15 – патрубок возврата топлива в бак; 16 – днище насадки; 17 – патрубок слива отстоя

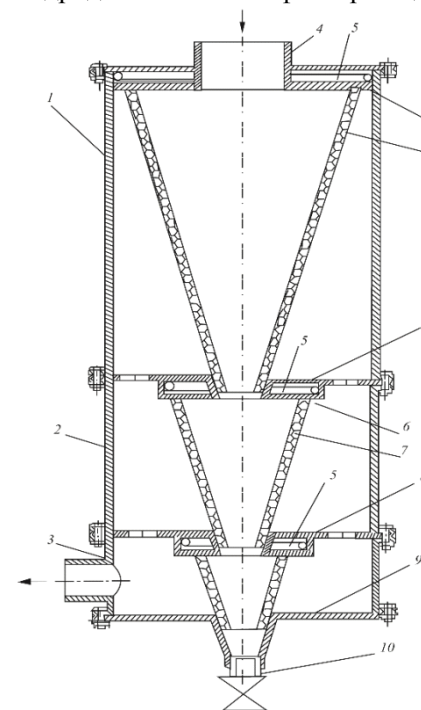
На конструкцию устройства для очистки жидкостей в циркуляционных системах был получен патент [249].

Предлагаемое устройство может найти применение для очистки топлив и других нефтепродуктов как в циркуляционных системах (системах питания дизелей, гидравлических системах, системах смаз-

ки и т.п.) так и при однократном проходе очищаемого нефтепродукта через фильтрационное устройство.

В тех случаях, когда отсутствует возможность возврата части очищаемого нефтепродукта, сброшенного из гидродинамического фильтра, в какую-либо ёмкость, следует производить очистку этой части продукта до уровня чистоты, позволяющего применять его по прямому назначению.

Перспективным направлением совершенствования гидродинамических фильтров является применение каскадной схемы очистки нефтепродуктов. Если при использовании единичного гидродинамического фильтра очистке подвергается не более 70–90 % очищаемого продукта, то при трёхступенчатой установке этих фильтров объём очищенного продукта составит 97,3–99 %. На рис. 6.5 представлена схема каскадного гидродинамического фильтра-водоотделителя [250].

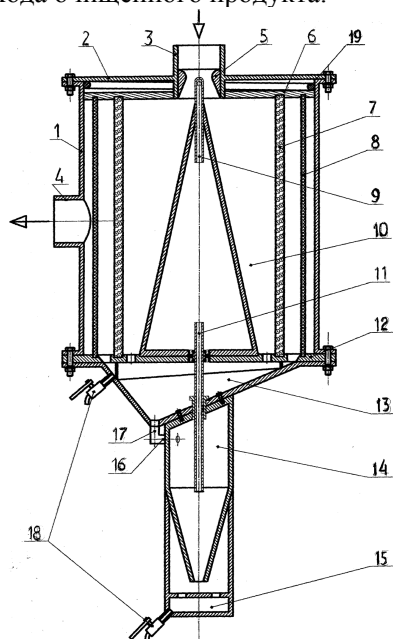


**Рис. 6.5. Каскадный гидродинамический фильтр:**

1 – корпус первой ступени; 2 – корпус второй ступени; 3 – корпус третьей ступени с патрубком выхода очищенного нефтепродукта; 4 – крышка с входным патрубком; 5 – пружина; 6 – основание фильтрационного элемента; 7 – гидрофобная пористая перегородка; 8 – промежуточное перфорированное днище со сливным патрубком; 9 – глухое днище со сливным патрубком; 10 – сливной вентиль



Первая ступень каскадного гидродинамического фильтроводоотделителя работает аналогично гидродинамическому фильтроводоотделителю, представленному на рис. 6.4. Часть топлива, создающая продольный поток вдоль внутренней поверхности пористой перегородки, через сливной патрубок в промежуточном днище поступает во внутреннюю полость фильтрационного элемента второй ступени, и частично проходит через пористую перегородку, а частично создаёт продольный поток вдоль её внутренней поверхности. В таком же порядке очистка оставшегося топлива происходит в третьей ступени, где насыщенное загрязнениями топливо удаляется через сливной вентиль, а очищенный отводится из корпуса третьей ступени через патрубок выхода очищенного продукта. Топливо, очищенное в предыдущих ступенях, также поступает в корпус третьей ступени через отверстия в промежуточных перфорированных днищах и отводится через патрубок выхода очищенного продукта.



**Рис. 6.6. Схема устройства для очистки топлива:**

1 – корпус; 2 – патрубок выхода очищенной жидкости; 3 – коническое днище; 4 – патрубок сброса части очищаемой жидкости; 5 – крышка; 6 – патрубком подачи очищаемой жидкости; 7 – пористая полимерная перегородка; 8 – полая вставка; 9 – уплотнительная прокладка; 10 – горизонтальная перегородка; 11 – нажимная пружина; 12 – винты; 13 – гидроциклон; 14 – питающий патрубок; 15 – выходная труба; 16 – уплотняющее устройство; 17 – отстойник; 18 – сливной кран; 19 – струйный аппарат; 20 – всасывающая трубка

Аналогичную конструкцию имеет устройство для комплексной очистки дизельного топлива, изготовленное из двухслойного пористого материала на основе ацетиленовой сажи с использованием в качестве связующего фторопластовой суспензии и армированный металлической сеткой [251]. Этот материал позволяет очищать топливо не только от механических примесей и воды, но и от продуктов окисления углеводородов.

Разработано устройство, включающее, наряду с гидродинамическим фильтром, гидроциклон для очистки нефтепродукта, сбрасываемого из гидродинамического фильтра, и струйный аппарат для возврата этого продукта во входной патрубок (рис. 6.6).

Особенностью конструкции гидродинамического фильтра является наличие во внутренней полости цилиндрического фильтрационного элемента полый конической вставки, обеспечивающей равномерную подачу на его рабочую поверхность очищаемого продукта и одновременно служащей разделительным бачком между гидроциклоном и струйным аппаратом, на устройство получен патент [252]. Такое устройство обеспечивает очистку практически всего объема нефтепродукта, поступающего в гидродинамический фильтр, но имеет довольно сложную конструкцию.

#### **6.4. Разработка технологического оборудования для приготовления смесового топлива и заправки им сельскохозяйственной техники**

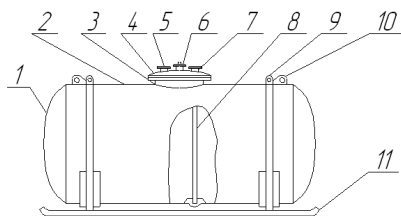
Комплекс технологического оборудования для обеспечения операций по подготовке смесового топлива и заправки им сельскохозяйственной техники описан в работе [208].

Для разогрева рапсового масла предлагается использовать резервуар РА-2 (рис. 6.7), оборудованный локальным подогревателем с проникаемым экраном. Основные размеры подогревателя приведены в табл. 6.1.

*Таблица 6.1*

#### **Характеристика подогревательного устройства для разогрева рапсового масла**

Параметр	Ед. измерения	Величина
Размеры экрана: длина × ширина × высота	м	1,6×0,8×0,25
Площадь экрана	м <sup>2</sup>	1,8
Ширина продольного зазора	м	0,02
Расстояние между нагревательными элементами	м	0,5
Наружный диаметр труб нагревательного элемента	м	0,1
Внутренний диаметр труб нагревательного элемента	м	0,075

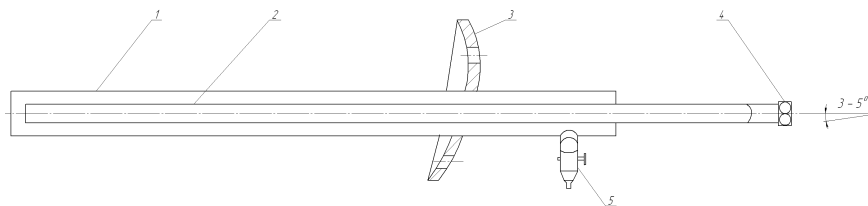


**Рис. 6.7. Резервуар РА-2:**

1 – днище; 2 – обечайка; 3 – горловина; 4 – крышка горловины; 5 – замерный и пробоотборный патрубок; 6 – патрубок для предохранительного клапана; 7 – патрубок для сливно-наливной трубы; 8 – сливно-наливная труба; 9 – стяжная лента; 10 – погрузочное кольцо; 11 – салазки

Резервуар целесообразно оборудовать телескопической сливно-наливной трубой, позволяющей производить отбор продукта из верхней части резервуара [253], и сигнализатором наполнения емкости для предотвращения перелива топлива [254], а также установить экран в форме полуовала Кассини для интенсификации процесса выдачи РМ [255]. Трубчатый нагревательный элемент имеет конструкцию «труба в трубе», т.е. выполнен в виде двух коаксиальных труб. Внутренняя труба одним концом соединена с внешним источником пара, а вторым концом – с внутренним пространством наружной трубы. Один конец наружной трубы, находящийся внутри резервуара, выполнен глухим, а второй, расположенный с внешней стороны днища резервуара, снабжен краном для слива конденсата (рис. 6.8).

После подачи острого пара от внешнего источника в нагревательный элемент пар проходит по всей длине внутренней трубы и поступает в наружную трубу, где конденсируется, а образовавшийся конденсат удаляется через сливной кран. Такая конструкция обеспечивает постоянную температуру наружной поверхности нагревательного элемента и предотвращает перегрев рапсового масла свыше 100 °С, устраняя опасность образования продуктов его термоллиза.



**Рис. 6.8. Трубчатый нагревательный элемент:**

1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – фланец для крепления нагревательного элемента к сферическому дну резервуара; 4 – штуцер для присоединения паропровода; 5 – пробковый кран для отвода конденсата

В разделе 3.5 рассмотрены два вида смесительных устройств для получения смесового биотоплива – мешалка якорного типа и струйный смеситель. В результате проведенных исследований получены расчетные формулы для конструирования этих устройств. Предполагалось использовать струйный смеситель для получения смесового биотоплива непосредственно при заправке техники.

По результатам исследований стабильности смесового биотоплива в условиях продолжительного хранения, результаты которого приведены в разделе 5.2, показано, что указанный продукт, полученный путем механического перемешивания компонентов (РМ и ДТ), обладает достаточно высокой стабильностью, поэтому приготовление смесового биотоплива можно осуществлять заблаговременно, с использованием механических мешалок, не прибегая к более дорогому и технически более сложному смешению его компонентов в процессе заправки. Кроме того, было проведено исследование стабильности смесового биотоплива, полученного путем перемешивания с помощью СВЧ-установки (рис. 6.9).



**Рис. 6.9. Общий вид установки для СВЧ-обработки компонентов смесового биотоплива при его изготовлении**

Техническая характеристика установки приведена в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Техническая характеристика СВЧ-установки

Показатель	Ед. измерения	Значение
Объем камеры	л	120
Рабочая частота	МГц	2450
Напряжение сети	В	220
Потребляемая мощность	кВт	4,5
СВЧ-мощность	кВт	2,0
Производительность насоса	л/с	1,1
Продолжительность обработки	мин	2,0

СВЧ-перемешивание более экономично с точки зрения энергозатрат и продолжительности перемешивания, этот способ может применяться при наличии соответствующего оборудования. Поскольку в сельскохозяйственных предприятиях, планирующих использовать в качестве моторного топлива для дизелей смесевое биотопливо собственного приготовления, СВЧ-установки практически отсутствуют, целесообразно использовать для смешения исходных компонентов биотоплива мешалки якорного типа, обеспечивающие высокую однородность продукта после перемешивания и его длительную стабильность в процессе хранения.

В качестве емкости для приготовления смесового биотоплива принят алюминиевый резервуар РА-2. Поскольку внутренний диаметр этого резервуара равен 1200 мм, размеры якорной мешалки (рис. 3.4), определяемые по формулам, приведенным в разделе 3.6 (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Размеры якорной мешалки

Линейные размеры оборудования	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Наружный диаметр мешалки	$D_n$	мм	1080
Ширина лопасти	$l$	мм	72
Зазор между лопастью мешалки и обечайкой резервуара	$b$	мм	60
Высота мешалки	$h$	мм	540

Расчет потребляемой мощности производится по формуле (3.100). Входящее в эту формулу значение плотности смеси, определяемое из выражения (3.104), равно:  $\rho = 878 \text{ кг/м}^3$ .

Для определения величины лобового сопротивления, входящего в формулу (3.100), воспользуемся эмпирической зависимостью (3.103). Поскольку входящий в это выражение показатель вязкости

смеси не обладает аддитивными свойствами, его следует определять с помощью формулы [122]:

$$v_{см} = \frac{v_{рм} P_{рм} + v_{дт} P_{дт} - k_v (v_{рм} - v_{дт})}{100}, \quad (6.1)$$

где  $v_{рм}$  и  $v_{дт}$  – соответственно вязкость рапсового масла и дизельного топлива,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;  $P_{рм}$  и  $P_{дт}$  – соответственно содержание компонентов в смеси, %;  $k_v$  – эмпирический коэффициент, определяемый по графику (рис. 6.10).

При равном соотношении компонентов в смесовом биотопливе, температуре рапсового масла  $60^\circ\text{C}$  (что соответствует его вязкости  $20 \text{ мм}^2/\text{с}$ ) и температуре дизельного топлива  $20^\circ\text{C}$  (что соответствует его вязкости около  $3,8 \text{ мм}^2/\text{с}$ ), вязкость смеси  $v_{см}$  равна  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , а величина лобового сопротивления  $c = 0,25 \sqrt[3]{7 \cdot 10^{-5}} = 0,5$ .

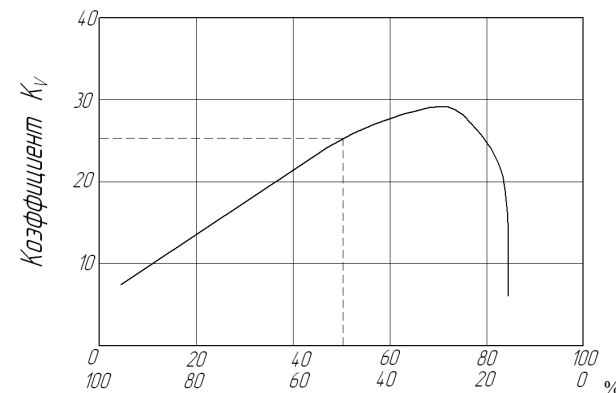


Рис. 6.10. Значение коэффициента для определения вязкости смесового биотоплива

Потребляемая мешалкой мощность при коэффициенте полезного действия  $\eta = 0,7$  будет равна:  $N = 0,194 \text{ кВт}$ . Для привода мешалки можно использовать электродвигатель 4А71Б8УЗ, ГОСТ 19523–81, мощностью  $0,25 \text{ кВт}$ , с частотой вращения  $n_{дв} = 680 \text{ мин}^{-1}$ . Частоту вращения мешалки определим, используя приведенный на рис. 6.11 [123] график зависимости:

$$Eu_m = f(Re_m), \quad (6.2)$$

где  $Eu_m$  и  $Re_m$  – модифицированные критерии Эйлера и Рейнольдса.

Частота вращения мешалки  $n_m = 40 \text{ мин}^{-1}$ . Требуемое передаточное число от электродвигателя к мешалке:  $i = n_{дв} / n_m = 17$ .

Наиболее близким к этому показателю является червячный редуктор Ч-50 с передаточным числом  $i_p = 16$ . Тогда фактическая частота

та вращения мешалки  $n_m = 42,5 \text{ мин}^{-1}$ , что находится в допустимых пределах. Расчет вала мешалки и выбор подшипников производим в соответствии с методикой, изложенной в [185]. Диаметр вала, определяемый по допустимому напряжению кручения:  $d_b = 13,25 \text{ мм}$ . Принимаем  $d_b = 14 \text{ мм}$ . Диаметр посадочных мест под подшипники выбираем из конструктивных соображений:  $d_n = 30 \text{ мм}$ .

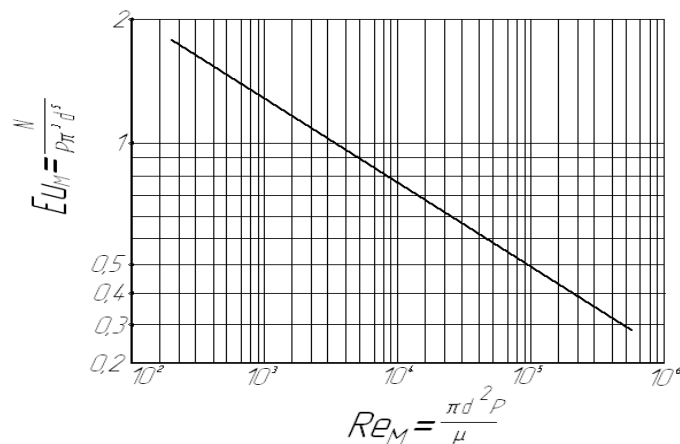


Рис. 6.11. Зависимость  $E_{\eta} = f(Re_M)$

Выбираем шариковые однорядный радиальные подшипники легкой серии № 106 по ГОСТ 833879.

Ресурс долговечности этих подшипников  $L_h = 104 \cdot 10^6 \text{ ч}$ , удовлетворяет требованиям. Упорный шариковый подшипник № 8105Н, ГОСТ 7872–89, выбран по динамической грузоподъемности, которая зависит от действующей на подшипник осевой силы, определяемой массой мешалки и вала. Ресурс долговечности этого подшипника  $L_h = 603 \cdot 10^6 \text{ ч}$ .

Для перекачки рапсового масла выбран шестеренный насос РЗ-7,5, устанавливаемый на автотопливозаправщике АТМЗ-4,5-375. Техническая характеристика этого насоса приведена в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Техническая характеристика шестеренного насоса РЗ-7,5

Показатель	Единица измерения	Значение
Подача	м <sup>3</sup> /с	0,0014
Напор	МПа	0,3
Давление перепуска	МПа	0,45
Высота всасывания	м	3
Частота вращения	1/мин	1450

Потребляемую насосом мощность определяем по формуле:

$$N = \frac{QPK_3}{\eta 1000}, \quad (6.3)$$

где  $N$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт;  $Q$  – номинальная подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $P$  – номинальный напор Па;  $K_3$  – коэффициент запаса;  $\eta$  – коэффициент полезного действия насоса.

Принимая  $K_3 = 1,2$  и  $\eta = 0,7$ , получим  $N = 0,72 \text{ кВт}$ .

Выбираем электродвигатель РА 80В4 мощностью 0,75 кВт с частотой вращения 1400 мин<sup>-1</sup>, что удовлетворяет требованиям к электроприводу насоса.

Для заправки сельскохозяйственной техники смесевым биотопливом выбрана однопостовая топливораздаточная колонка Нара 27М1С производства ЗАО «Нара», г. Серпухов, техническая характеристика которой приведена в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Техническая характеристика топливораздаточной колонки Нара 27М1С

Показатель	Единица измерения	Значение
Номинальный расход	л/мин	50
Минимальная доза выдачи	л	2,0
Относительная погрешность	%	0,25
Номинальная толщина фильтрования	мкм	20,0
Длина раздаточного рукава	м	4
Мощность двигателя	кВт	0,55
Масса	кг	135,0

Выбор указанной колонки обоснован простотой ее конструкции при приемлемых технических показателях, в силу чего она рекомендована заводом-изготовителем для применения на заправочных пунктах предприятий, эксплуатирующих топливопотребляющую технику. Фильтр данной колонки не отвечает требованиям к тонкости очистки смесового биотоплива для дизелей, поэтому необходимо ее дополнительно укомплектовать фильтром ФВ2П.

Для обеспечения перекачки рапсового масла при его подогреве и смешении с дизельным топливом, а также при подаче смесового биотоплива к топливораздаточной колонке предусмотрено использование труб, фитингов и запорной арматуры, входящих в комплект разборного трубопровода РТ-75.

Технологическая схема участка приготовления смесового биотоплива и заправки им техники представлена на рис. 6.12.

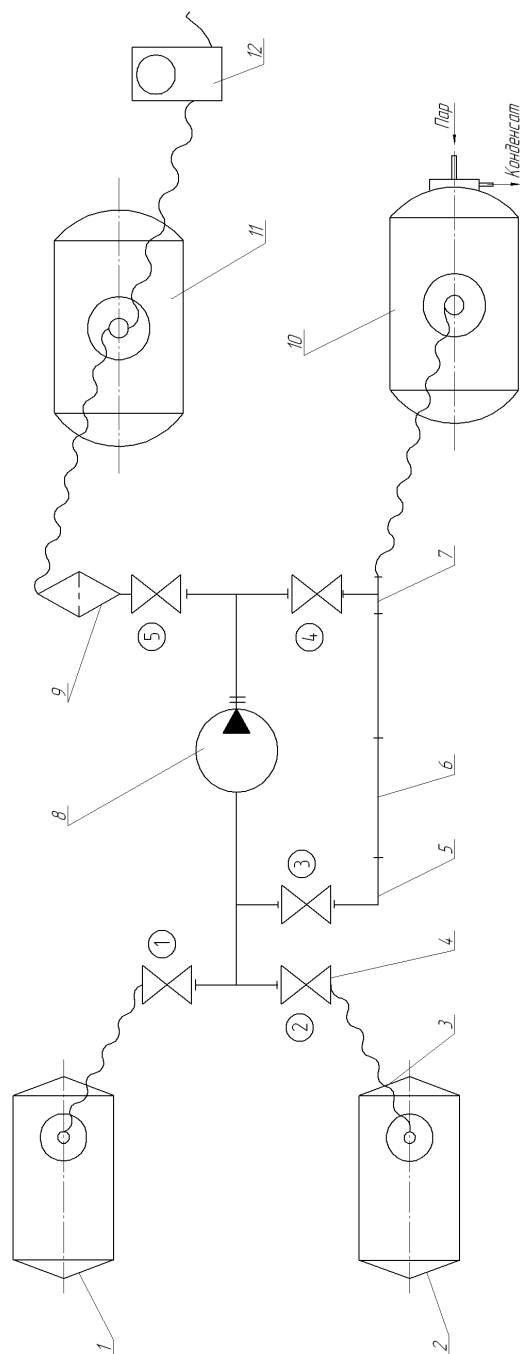


Рис. 6.12. Технологическая схема участка приготовления и выдачи смешанного биотоплива:

1 – емкость с дизельным топливом; 2 – емкость с рапсовым маслом; 3 – рукав РБС-75 длиной 4,5 м (5 шт.); 4 – вентиль Ду 75 (5 шт.); 5 – угольник (1 шт.); 6 – труба длиной 3 м (3 шт.); 7 – тройник (4 шт.); 8 – насос РЗ-7,5 с электродвигателем; 9 – фильтр ФВ2П; 10 – резервуар РА-2 с подогревателем; 11 – резервуар РА-2 с мешалкой; 12 – топливораздаточная колонка Нара 27 МПС; I–V – номера запорных вентилях

## 6.5. Совершенствование устройства для очистки воздуха, поступающего в топливный бак

Загрязнения топлива оказывают негативное влияние на работу самого двигателя, вызывая износ сопряженных деталей двигателя, при этом возрастает концентрация токсичных веществ в отработавших газах двигателя [200], поэтому так важно обеспечить чистоту топлива. Поскольку загрязнения попадают в топливные баки мобильных машин при их эксплуатации в основном из атмосферы, очень важно ограничить контакт топлива с атмосферным воздухом. Существуют различные конструктивные решения этой задачи (установка дыхательных клапанов в крышке горловины бака, удлинённых дыхательных трубок, эластичных газгольдеров и т.п.).

Дыхательный клапан в герметичной крышке горловины топливного бака снижает количество атмосферной пыли и влаги, попадающих в топливо из поступающего в него воздуха, но полностью не исключает их взаимный контакт при периодическом открывании клапана. Дыхательная трубка большой длины, выведенная в зону минимальной загрязнённости воздуха, является довольно эффективным средством защиты топлива от атмосферных загрязнений, но при отрицательных температурах в ней возможно образование ледяных пробок вследствие конденсации водяных паров.

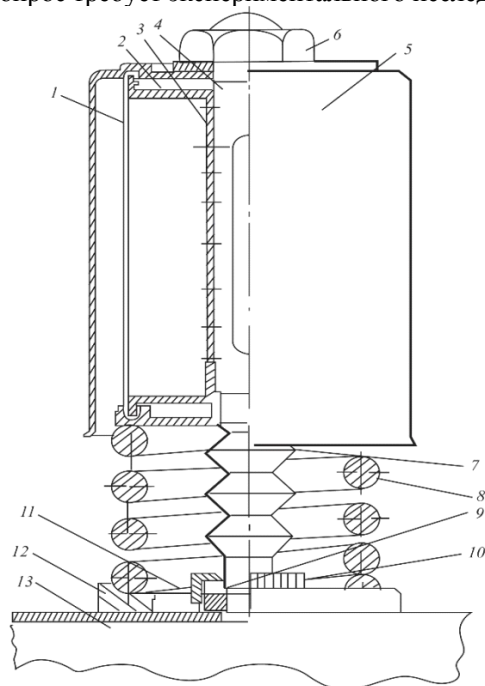
Эластичный газгольдер является достаточно эффективным средством защиты топлива, но применение этой конструкции связано с определёнными техническими трудностями, вызванными сложностью уплотнения эластичной оболочки во внутренней полости топливного бака. Наиболее перспективным способом очистки атмосферного воздуха является его фильтрование, но воздушный фильтр из пористых материалов требует периодической замены и не защищает топливный бак от попадания в него влаги.

Однако наличие воздушных фильтров не исключает полностью накопления загрязнений в топливном баке, поэтому для повышения чистоты топлива, поступающего в систему питания двигателя, следует принимать дополнительные меры.

Анализ различных вариантов использования пористых перегородок для обеспыливания и обезвоживания поступающего в топливный бак атмосферного воздуха показывает, что для этих целей наиболее пригодна перегородка из гидрофобного материала, например, из недорогого и недефицитного фильтрующего материала с размером пор 20–30 мкм (бумаги, нетканого полотна и т.п.), пропитанного смесью из 90–92 % толуола и 8–10 % полимера этилгидросилоксана. Удаление пылевого

осадка и микрокапель воды с поверхности пористой перегородки можно осуществлять, используя вибрационную очистку этой поверхности.

При удалении загрязнений с пористой перегородки вибрационными методами нерационально применять для этой цели дополнительные устройства, приводимые в действие от посторонних источников энергии. Делались попытки использовать для создания вибрации при регенерации фильтрующей перегородки энергию воздушного потока, но для воздушного фильтра, установленного на топливном баке, это решение является малоэффективным. В то же время сам двигатель внутреннего сгорания является источником упругих колебаний от вибрации в широком спектре частот. Вибрации дизеля имеют интенсивные составляющие в частотном диапазоне от 16 до 8000 Гц. В литературе отсутствуют данные, характеризующие уровни и спектральный состав вибрации топливных баков дизельных двигателей, на которых планируется установить воздушные фильтры; этот вопрос требует экспериментального исследования.



**Рис. 6.13. Фильтр для очистки воздуха, поступающего в топливный бак при работе дизеля:**

1 – гидрофобная перегородка; 2 – тарелка; 3 – перфорированная втулка;  
4 – центральная труба; 5 – крышка-колпак; 6 – колпачковая гайка; 7 – сильфон;  
8 – пружина; 9 – прокладка; 10 – накидная гайка; 11 – штуцер воздушного патрубка; 12 – чашка пружины; 13 – топливный бак

Теоретические положения, на которых основан процесс регенерации фильтрующей перегородки вибрационными методами, был подробно рассмотрен в работе [209]. На основании этой математической модели были определены характеристики пружины, которая монтируется вместе с фильтром на топливном баке. Частота колебаний воздушного фильтра будет равна частоте колебаний топливного бака. Для эффективной регенерации пористой перегородки используется явление резонанса.

Общий вид устройства для очистки атмосферного воздуха, поступающего в топливный бак дизеля, представлен на рис. 6.13.

При работе дизельного двигателя уровень топлива в баке понижается, атмосферный воздух поступает под крышку-колпак и проходит через гидрофобную перегородку, на которой задерживается влага и пыль. Затем через отверстия в перфорированной втулке воздух поступает в топливную емкость. Осевшие на гидрофобной перегородке загрязнения удаляются с ее поверхности под воздействием вибрации.

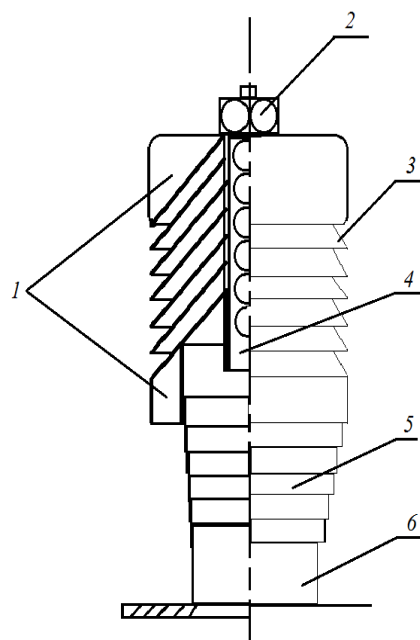
На конструкцию фильтра для очистки воздуха, поступающего в топливный бак, получен патент [256].

## **6.5. Совершенствование устройства для снижения загрязненности топлива при выдаче его из резервуара**

Наиболее простым методом очистки топлива от механических примесей является гравитационная очистка. Под действием силы тяжести твердые частицы загрязнений и микрокапли воды оседают на дно топливного бака, поэтому отбор топлива целесообразно осуществлять с помощью топливоприёмника, размещённого в верхних слоях топлива, содержащих наименьшее количество твёрдых частиц загрязнений и микрокапель воды. С этой целью топливоприёмник следует оборудовать поплавком, обеспечивающим нахождение этого устройства в верхних слоях топлива. Для повышения эффективности гравитационной очистки топлива в расходных ёмкостях плавающий топливоприёмник целесообразно оснастить динамическим отстойником в виде пакета конических тарелок.

Схема плавающего топливоприёмника с динамическим отстойником тарельчатого типа представлена на рис. 6.14.

Такое приспособление осуществляет дополнительную очистку топлива от загрязнений, плотность которых превышает плотность топлива, и одновременно предотвращает попадание в топливоприёмник загрязнений меньшей плотности, плавающих на поверхности топлива [209].



**Рис. 6.14. Схема плавающего топливopриёмника:**

1 – поплавок; 2 – гайка; 3 – пакет конических тарелок; 4 – центральная трубка;  
5 – телескопическая труба; 6 – топливозаборный патрубок

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сафонов, А.С.** Химмотология ГСМ. / А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В.В. Гришин. – СПб.: НПИКЦ, 2007. – 488 с.
2. **Грехов, Л.В.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с..
3. **Смайлис, В.И.** Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения // Двигателестроение. – 1991. № 1. – С. 3–6.
4. **Серковская, Г.С.** О канцерогенности нефти и нефтепродуктов // Химия и технология топлив и масел. – 1996. – № 1. – С. 39–45.
5. **Bischof, V.O.F.** Zwei Online-Messkonzepte zur Physikalischen Charakterisierung Ultrafeiner Partikel in Motorabgasen am Beispiel von Dieselemissionen / V.O.F. Bischof, H.-G. Horn // MTZ. – 1999. – Jg. 60. – N 4. – S. 226.
6. **Williams, R.L.** A Review of Sampling Condition Effect on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PNA) from Heavy-Duty Diesel Engines / R.L. Williams, J.M. Perez, M.E. Griffing // SAE Technical Paper Series. – 1985. – N 852081. – P. 57–75.
7. **Ziejewski, M.** Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emissions from Plant Oil Based Alternative Fuels / M. Ziejewski, H.J. Goettler, L.W. Gook // SAE Technical Paper Series. – 1991. – N. 911765. – P. 1–8.
8. Химическая энциклопедия. В 5 т / Под ред. Н.С. Зефинова. – Т. 4. – М.: БРЭ, 1995. – 639 с.
9. **Akasaka, Y.** Effects of Fuel Properties on Exhaust Emission from DI Diesel Engine / Y. Akasaka, Y. Sakurai // Transactions of the JSME. Ser. B. – 1997. – Vol. 63. – N 607. – P. 1091–1097.
10. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. – Изд. 7-е. – СПб., 2008. – 54 с.
11. Азарова, Ю.В. Новое об относительной агрессивности углеводородов / Ю.В. Азарова, Н.Я. Кузнецова // Автомобильная промышленность. – 1999. – № 3. – С. 14–16.
12. **Коваленко, В.П.** Автомобиль и экономия горючего / В.П. Коваленко, Т.П. Карпекина, А.Л. Барханаджян. – Ташкент: Узбекистан, 1982. – 84 с.
13. **Чертков, Я.Б.** Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив. / Я.Б. Чертков, К.В. Рыбаков, В.Н. Зрелов. – М.: Химия, 1970. – 238 с.
14. **Каприлин, В.Н.** К вопросу деформации деталей топливных насосов дизелей в процессе износа под действием остаточных поверхностных напряжений // Сб. науч. трудов ЦНИИТА. – Л., 1963. – Вып. 16. – С. 47.
15. **Бахтияров, Н.И.** Производство и эксплуатация прецизионных пар / Н.И. Бахтияров, В.Е. Логинов. – М.: Машиностроение, 1979. – 205 с.



16. **Фомин, Ю.Я.** Топливная аппаратура дизелей / Ю.Я. Фомин, Г.М. Никонов, В.Т. Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 186 с.
17. **Алиев, Р.А.** Повышение чистоты дизельных топлив / Р.А. Алиев, Т.Н. Митусова, Б.А. Энглин // Химия и технология топлив и масел. – 1981. – № 1. – С. 52–54.
18. **Лебедев, В.И.** Повышение долговечности прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры / В.И. Лебедев, В.А. Ярков. – М.: Автосельхозмаш, 1985. – С. 31–33.
19. **Тарасов, В.С.** Повышение долговечности плунжерных пар // Труды СИМХ. – Саратов, 1969. – Вып. 42. – Ч. 4. – С. 58–62.
20. **Кутенев, В.Ф.** [и др.] Экологические аспекты применения моторных масел на транспорте // Автомобильные и тракторные двигатели: межвуз. сб. – М.: Изд-во ТУ "МАМИ", 1998. – Вып. 14. – С. 150–160.
21. **Коваленко, В.П.** Очистка нефтепродуктов от загрязнений / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. – М.: Недра, 1990. – 160 с.
22. **Матвеев, А.С.** Влияние загрязненности масел на работу гидроагрегатов. – М.: Россельхозиздат, 1976. – 207 с.
23. **Коваленко, В.П.** Загрязнения и очистка нефтяных масел. – М.: Химия, 1998. – 302 с.
24. **Удлер, Э.И.** Фильтрация нефтепродуктов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – 215 с.
25. **Удлер, Э.И.** Фильтрующие топливно-масляные элементы из бумаги и картона / Э.И. Удлер, В.И. Зуев. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. – 134 с.
26. **Бродский, Г.С.** Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. – М.: Горная промышленность, 2004. – 452 с.
27. **Коваленко, В.Г.** Очистка нефтепродуктов от загрязнений в системе нефтепродуктообеспечения / В.Г. Коваленко, Е.И. Зоря, В.Е. Турчанинов. – М.: Нефть и газ, 2002. – 136 с.
28. **Коваленко, В.П.** Разработка системы обеспечения чистоты нефтепродуктов в сельском хозяйстве: дис. ... д.т.н. – М., 1989.
29. **Удлер, Э.И.** Повышение эффективности очистки нефтепродуктов в сельском хозяйстве средствами фильтрации: дис. ... д.т.н. Томск, 1998.
30. **Григорьев, М.А.** Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1985. – 145 с.
31. **Пискарев, И.В.** Фильтрационные ткани. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 190 с.
32. **Коваленко, В.П.** Полимерные фильтрующие материалы // В.П. Коваленко, И.Д. Гаркуша, К.Я. Лесной // Материально-техническое снабжение, сер. 1. – 1983. – Вып. 10. – С. 24–26.
33. **Коваленко, В.П.** Использование ПГС-полимеров для очистки жидкостей в сельскохозяйственном производстве // В.П. Коваленко,

К.Я. Лесной, С.С. Гусев, И.Н. Леонов // Вестник МГАУ, сер. «Технический сервис в АПК». – 2003. – Вып. 1.

34. **Коваленко, В.П.** Средства очистки нефтепродуктов от механических загрязнений / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. – М.: ЦНИИТЭ-НЕФТЕХИМ, 1984. – 68 с.
35. **Новичков, В.М.** Автоматизированные средства контроля чистоты жидкостных и газовых систем летательных аппаратов / В.М. Новичков, Б.М. Новичков // Автоматизация и современные технологии. – 1996. – № 2. – С. 2–7.
36. **Новичков, В.М.** Технология контроля твердой фазы загрязнений авиационного топлива / В.М. Новичков, Б.М. Новичков // Автоматизация и современные технологии. – 1998. – № 9. – С. 26–32.
37. **Новичков, В.М.** Экспрессный анализ дисперсных жидких систем / В.М. Новичков, Б.М. Новичков, А.В. Орешников // Автоматизация и современные технологии. – 2001. – № 12. – С. 23–26.
38. **Большаков, Г.Ф.** Оптические методы определения загрязненности жидких сред / Г.Ф. Большаков, В.Ф. Тимофеев, М.Н. Новичков. – Новосибирск: Наука, 1984. – 158 с.
39. **Большаков, Г.Ф.** Экспресс-методы определения загрязненности нефтепродуктов / Г.Ф. Большаков, В.Ф. Тимофеев, И.И. Сибарова. – Л.: Химия, 1976. – 167 с.
40. ОСТ 141144–80. Промышленная чистота. Определение содержания загрязнений в жидкостях по гранулометрическому составу. Метод анализа. – М.: Изд-во Стандартов, 1980.
41. **Сапожников, В.М.** Надежность и долговечность авиационных гидросистем // В кн. «Повышение качества и надежности гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов». – М.: НИАТ, 1987. – С. 5–14.
42. **Новичков, Б.М.** Метод автоматизированного контроля чистоты авиационных топлив для летательных аппаратов: дис. ... к.т.н. – М., 2008. – 160 с.
43. **Кораблев, М.А.** Фотометрические счетные анализаторы дисперсного состава примесей в авиа ГСМ // М.А. Кораблев, А.Т. Ованесян, Г.Т. Метревели // В кн. «Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей». – Киев: КНИГА, 1977. – С. 121–122.
44. **Грохольский, А.Л.** Анализ методов определения механических примесей в авиационных горюче-смазочных материалах // А.Л. Грохольский, А.П. Меншиков // В кн. «Авиационные приборы, метрология и методы измерения». – Киев: КНИГА, 1975. – С. 7–10.
45. Инновационное развитие альтернативной энергетики: науч. изд. – Ч. 1. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2010. – 348 с.



46. **Лисиенко, В.Г.** Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание: В 3-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 608 с.

47. **Марков, В.А.** Топлива и топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей / В.А. Марков, С.И. Козлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 296 с.

48. **Звонов, В.А.** Оценка традиционных и альтернативных топлив по полному жизненному циклу / В.А. Звонов, А.В. Козлов, А.С. Теренченко // Автостроение за рубежом. – 2001. – № 12. – С. 14–20.

49. **Льотко, В.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Льотко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.

50. **Марков, В.А.** Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.В. Маркова // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 5. – С. 42–47.

51. **Марков, В.А.** Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учеб. пособ. // В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов [и др.]. – М.: Легион-Авто дата, 2008. – 464 с.

52. **Терентьев, Г.А.** Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Г.А. Терентьев, В.М. Тюков, Ф.В. Смаль. – М.: Химия, 1989. – 272 с.

53. **Лapidус, А.Л.** Природный газ как моторное топливо / А.Л. Лapidус, И.Ф. Крылов, Б.П. Тонконогов // Химия и технология топлив и масел. – 2005. – № 3. – С. 3–8.

54. **Шпаликова, В.Н.** Применение нетрадиционных топлив в дизелях / В.Н. Шпаликова, Н.Н. Патрахальцев. – М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1993. – 64 с.

55. **Пронин, Е.Н.** Как зарабатывать в деревне по два миллиарда рублей в год / Е.Н. Пронин // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2005. – № 6. – С. 41–43.

56. **Семёнов, В.Г.** Оптимизация состава бинарного альтернативного дизельного топлива / В.Г. Семенов // Химия и технология топлив и масел. – 2003. – № 4. – С. 29–32.

57. **Алиева, Р.Б.** Современное состояние переработки и использования газовых конденсатов: Обзор, сер. «Переработка газа и газового конденсата» / Р.Б. Алиева. – М.: ВНИИЭгазпром, 1978. – 44 с.

58. **Fleisch, T.** A New Clean Diesel Technology: Demonstration of ULEV Emissions on a Navistar Diesel Engine Fueled with Dimethyl Ether / T. Fleisch, C. McCarthy, A. Basu [e.a.] // SAE Technical Paper Series. – 1995. – N. 950061. – P. 1–10.

59. **Пронин, Е.Н.** В поисках ответов / Е.Н. Пронин // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2003. – № 6. – С. 5–11.

60. **Namba, K.** The Combustion Mechanism and Combustion Promotion of Coal-Water Mixture Fuel / K. Namba, K. Kimoto, T. Ochi // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Ser. B. – 1992. – Vol. 58. – N. 548. – P. 1221–1227.

61. **Марков, В.А.** Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / В.А. Марков, С.Н. Девянин, В.Г. Семенов, А.В. Шахов, В.В. Багров. – М.: НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. – 536 с.

62. **Гаврилова, В.А.** Перспективы и реальность использования масел растительного происхождения в качестве биотоплива / В.А. Гаврилова [и др.] // Масложировая промышленность. – 2005. – № 4. – С. 15–17.

63. **Девянин, С.** Применение рапсового масла в качестве альтернативного топлива для дизелей / С. Девянин, А. Севастенко, М. Кузнецов // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2007. – № 3. – С. 68–71.

64. **Noureddini, H.** Densities of Vegetable Oils and Fatty Acids / H. Noureddini, B.C. Teoh, L. Davis Clements // Journ. of the American Oil Chemists' Society. – 1992. – Vol. 69. – N. 12. – P. 1184–1188.

65. **Hohl, G.H.** Rape Oil Methyl Ester (RME) and Used Cooking Oil Methyl Ester (UOME) as Alternative Fuels / G.H. Hohl // SAE Technical Paper Series. – 1995. – N. 952755. – P. 163–170.

66. **Hamasaki, K.** Utilization of Waste Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel / K. Hamasaki, H. Tajima, K. Takasaki [e.a.] // SAE Technical Paper Series. – 2001. – N. 2001-01-2021. – P. 1–6.

67. **Hamasaki, K.** Performance and Emission Characteristics of a Small Diesel Engine with Emulsified Rapeseed Oil Fuels / K. Hamasaki, Y. Tanaka, F. Kurogi // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Ser. B. – 1992. – Vol. 58. – N. 549. – P. 1551–1556.

68. **Фукс, И.Г.** Экологические аспекты использования топлив и смазочных материалов растительного и животного происхождения / И.Г. Фукс, А.Ю. Евдокимов, А.А. Джамалов // Химия и технология топлив и масел. – 1992. – № 6. – С. 36.

69. Широкомасштабные эксперименты по введению рапсового масла в дизельное топливо // Автомобильная промышленность США. – 1997. – № 3. – С. 5–9.

70. **Шахов, А.В.** Биотопливо нового поколения / А.В. Шахов // Сельский механизатор. – 2008. – № 9. – С. 33.

71. **Савельев, Г.С.** Использование рапсового масла в качестве топлива в дизельных двигателях / Г.С. Савельев, М.Н. Кочетков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 1. – С. 62–66.

72. **Савельев, Г.С.** Биологическое моторное топливо для дизелей на основе рапсового масла / Г.С. Савельев, Н.В. Краснощеков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 10. – С. 11–16.

73. **Семёнов, В.Г.** Биодизель. Физико-химические показатели и эколого-экономические характеристики работы дизельного двигателя / В.Г. Семенов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – 186 с.

74. **Семёнов, В.Г.** Альтернативные топлива растительного происхождения. Определение фракционного и химического составов / В.Г. Семенов, А.А. Зинченко // Химия и технология топлив и масел. – 2005. – № 1. – С. 29–34.

75. **Патрахальцев, Н.Н.** Биотопливо для быстроходных дизелей на основе рапсового масла / Н.Н. Патрахальцев, В.Е. Пономарев, Е.Г. Пономарев // Совершенствование мощностных и экологических показателей ДВС: материалы науч.-техн. конф. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 1997. – С. 97–98.

76. **Марков, В.А.** Особенности применения метилового эфира рапсового масла в качестве топлива для дизелей / В.А. Марков, А.Ю. Шустер, С.Н. Девянин // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – № 3. – С. 56–69.

77. **Девянин, С.Н.** Использование смесевых биотоплив в дизелях / С.Н. Девянин, В.А. Марков, Д.А. Коршунов // Сб. науч. трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 63–68.

78. **Девянин, С.Н.** Улучшение экологических показателей транспортных дизелей при использовании смесевого биотоплива / С.Н. Девянин, В.А. Марков, Д.А. Коршунов // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 12. – С. 27–33.

79. **Горбунов, В.В.** Экспериментальные исследования дизеля ЯМЗ-238 при его работе на смесевых топливах / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев, А.М. Абелян // Вестн. Российского ун-та дружбы народов. Инженерные исследования. – 2003. – № 1. – С. 5–10.

80. **Федоренко, В.Ф.** Использование биологических добавок в дизельное топливо / В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин, С.А. Нагорнов, А.Н. Зазуля, И.Г. Голубев. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. – 52 с.

81. **Федоренко, В.Ф.** Инновационные технологии производства биотоплива второго поколения / В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин, С.А. Нагорнов, А.Н. Зазуля, И.Г. Голубев. [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 68 с.

82. **Никифоров, О.** Биотопливо второго поколения / О. Никифоров // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 5. – С. 67.

83. **Картошкин, А.П.** Влияние бензино-этанольных смесей на продукты сгорания бензиновых двигателей / А.П. Картошкин, А.В. Мокин //

Сб. научных трудов VI Международной научно-практической конференции «Новые горючие и смазочные материалы с присадками». – СПб., 2010. – С. 152–156.

84. **Мокин, А.В.** Влияние добавок этанола в бензин на их физико-химические свойства / А.В. Мокин, А.П. Картошкин // Сб. научных трудов VI Международной научно-практической конференции «Новые горючие и смазочные материалы с присадками». – СПб., 2010. – С. 157–161.

85. **Горбунов, С.И.** Биэтанол из сахарного сорго – альтернативный источник энергии / С.И. Горбунов, А.Г. Ишин, О.М. Космоенко // Техника и оборудование для села. – 2006. – № 12. – С. 12–13.

86. **Федоренко, В.Ф.** Состояние и развитие производства биотоплива: науч. аналит. обзор / В.Ф. Федоренко, И.Г. Голубев. [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. – 130 с.

87. Bosch: Системы управления дизельными двигателями / Пер. с нем. – М.: За рулем, 2004. – 480 с.

88. **Савельев, Г.С.** Применение газомоторного и биодизельного топлив в автотракторной технике / Г.С. Савельев. – М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемия, 2009. – 216 с.

89. **Шилова, Е.П.** Опыт применения альтернативных видов топлива для автомобильной и сельскохозяйственной техники: Науч. аналит. обзор / Е.П. Шилова [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 96 с.

90. **Семенов, В.Г.** Определение теплоты сгорания биотоплив растительного происхождения / В.Г. Семенов // Труды Одесского политехнического ун-та. – 2001. – Вып. 5. – С. 218–221.

91. **Семёнов, В.Г.** Экономические и экологические показатели дизеля при работе на биодизельных топливах разных сортов / В.Г. Семенов, И.П. Васильев // Грузовик &. – 2007. – № 12. – С. 37–40.

92. **Жегалин, О.И.** Альтернативные топлива и перспективы их применения в тракторных дизелях: Обзор / О.И. Жегалин, Е.Г. Пономарев, В.Н. Журавлев. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1986. – 40 с.

93. **Fanick, E.R.** Particulate Characterization Using Five Fuels / E.R. Fanick, K.A. Whitney, B.K. Bailey // SAE Technical Paper Series. – 1996. – N. 961089. – P. 1–9.

94. **Murphy, M.J.** Safety and Occupational Hygiene Results – Clean Fleet Alternative Fuels Project / M.J. Murphy // SAE Technical Paper Series. – 1995. – N. 950397. – P. 1–13.

95. **Takagaki, S.S.** The Effects of Compression Ratio on Nitric Oxide and Hydrocarbon Emissions from a Spark-Ignition Natural Gas Fuelled Engine / S.S. Takagaki, R.R. Raine // Ibid. – 1997. – N. 970506. – P. 55–61.

96. **Федоренко, В.Ф.** Результаты испытаний и перспективы эксплуатации дизелей на биотопливе / В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин,

С.А. Нагорнов, А.Н. Зазуля, И.Г. Голубев [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 136 с.

97. **Hohl, G. H.** Rape Oil Methyl Ester (RME) and Used Cooking Oil Methyl Ester (UOME) as Alternative Fuels / G.H. Hohl // SAE Technical Paper Series. – 1995. – N. 952755. – P. 163–170.

98. **May, H.** Neuere Untersuchungen über die Umweltverträglichkeit und Dauerstandfestigkeit von Vorkammer- und Direkt Einspritzenden Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester / H. May, K. Hattingen, C. Birkner [e.a.] // VDI-Berichte. – 1992. – Vol. 1020. – P. 189–212.

99. Zehn Prozent Biokraftstoff für Alle // Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Nachrichten. – 2005. – Jg. 59. – N. 47. – S. 8.

100. **Long, E.** Bio-Diesel Markets Begin to Open up in North America / E. Long // Farmers Weekly. – 1995. – Vol. 122. – N. 11. – P. 86.

101. Широкомасштабные эксперименты по введению рапсового масла в дизельное топливо // Автомобильная промышленность США. – 1997. – № 3. – С. 5–9.

102. **Льотко, В.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Льотко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 311 с.

103. **Weidman, K.** Rapsoel-Methylester im Dieselmotor / K. Weidman, H. Menzad // MTZ. – 1989. – Jg. 50. – N. 2. – S. 69–73.

104. **Zimmermann, J.** Porsche-Versuch Lasst für die Landwirtschaft Hoften: Rapsöl als Dieselalternative / J. Zimmermann // Automobil Revue. – 1990. – Jg. 85. – N. 30. – S. 19.

105. **Braun, F.** Biodiesel: Ein Nutzer Erzählt / F. Braun // KFZ Anzeiger. – 1996. – Jg. 49. – N. 2. – S. 12–15.

106. **Марченко, А.П.** Достижение физико-химических показателей альтернативного биотоплива на основе рапсового масла / А.П. Марченко, В.Т. Семенов, Д.У. Семенова и др. // Вестник ХГПУ. – Машиностроение. – 2000. – Вып. 101. – С. 159–163.

107. **Девянин, С.Н.** Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей / С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов. – М.: НИЦ ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. – 340 с.

108. **Desantes, J.M.** Characterisation of the Injection-Combustion Process in a D.I. Diesel Engine Running with Rape Oil Methyl Ester / J.M. Desantes, J. Arregle, S. Ruiz [e.a.] // SAE Technical Paper Series. – 1999. – N. 1999-01-1497. – P. 1–8.

109. **Нагорнов, С.А.** Работа дизелей на разных видах топлива / С. Нагорнов, Р. Фокин // Сельский механизатор. – 2008. – № 7. – С. 42–43.

110. **Ивашенко, Н.А.** Работа дизеля с разделенной камерой сгорания на рапсовом масле / Н.А. Ивашенко, В.А. Марков, А.А. Ефанов // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 26–40.

111. **Васильев, И.П.** Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля / И.П. Васильев. – Луганск: Изд-во Восточноукраинского ун-та им. В. Даля, 2009. – 240 с.

112. **Семёнов, В.Г.** Экономические и экологические показатели дизеля при работе на биодизельных топливах разных сортов / В.Г. Семенов, И.П. Васильев // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 3. – С. 7–8.

113. **Семёнов, В.Г.** Производство биодизельного топлива из липидов микроводорослей / В.Г. Семенов // Масла и жиры. – 2008. – № 11. – С. 16–17.

114. **Смирнова, Т.Н.** Биодизель – альтернативное топливо для дизелей. Получение. Характеристики. Применение. Стоимость / Т.Н. Смирнова, В.М. Полгаецкий // Двигатель. – 2007. – № 1. – С. 32–36; – № 2. – С. 32–34.

115. **Марков, В.А.** Использование в дизелях многокомпонентных смесевых биотоплив / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Л.И. Быковская // Грузовик. – 2010. – № 5. – С. 41–47.

116. Тенденции развития технологий производства биодизельного топлива: науч. изд. – М.: ФГБНУ «Росинформатех», 2017. – 172 с.

117. **Коваленко, В.П.** Обеспечение температурного режима нефтепродуктов при их транспортировании и хранении / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. – М.: ЦНИИТЭ Нефтехим, 1989. – 84 с.

118. **Коваленко, В.П.** Перспективные теплообменные аппараты для модернизации систем нагрева и охлаждения в мобильных машинах и на стационарных объектах / В.П. Коваленко, В.Ф. Ковальский, К.Я. Лесной, Е.Н. Пирогов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2005. – № 1. – С. 10–12.

119. **Стрюк, И.С.** Устройство для разогрева вязких и застывающих жидкостей / И.С. Стрюк, В.Г. Коваленко, В.П. Коваленко // А.С. СССР, № 195593, 1967.

120. Машины и аппараты химической промышленности / Под ред. И.И. Чернобыльского. М.-Киев: Машгиз, 1960. – 414 с.

121. Машины и аппараты химических производств. Под ред. И.И. Чернобыльского. Машгиз, М. – Киев, 1961. – 524 с.

122. **Конторович, З.Б.** Машины химической промышленности / З.Б. Конторович. – М.: Машиностроение, 1965. – 416 с.

123. **Касаткин, А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

124. **Коваленко, В.П.** Нефтепродуктообеспечение сельскохозяйственных товаропроизводителей / В.П. Коваленко, А.В. Симоненко, В.С. Лоскутов. – М.: МГАУ, 2002. – 110 с.

125. Устройство для получения смесового топлива при заправке транспортного средства. Пат. РФ 2003123725/11(025500). МПК 7 B60S5/02, B67DD5/00 / Слепцов О.Н., Девянин С.Н., Кузнецов И.В., Гуднев В.И., Воловик Е.Л., Симоненко С.В., Харитонов В.С.; заявл. 31.07.2003. – 5 с.

126. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг // М.: ИЛ, 1956. – 244 с.

127. **Рыбаков, К.В.** Фильтрация авиационных масел и специальных жидкостей / К.В. Рыбаков, В.П. Коваленко. – М.: Транспорт, 1977. – 192 с.

128. **Удлер, Э.И.** Фильтрация нефтепродуктов / Э.И. Удлер. – Томск: Изд. ТГУ, 1988. – 216 с.

129. **Коваленко, В.П.** Использование ПГС-полимеров для очистки жидкостей в сельскохозяйственном производстве / В.П. Коваленко, К.Я. Лесной, С.С. Гусев, Н.Н. Леонов // Вестник МГАУ, сер. «Технический сервис в АПК». – 2003. – Вып. 1. – С. 10–16.

130. **Удлер, Э.И.** Фильтрация углеводородных топлив / Э.И. Удлер. – Томск: ТГУ, 1981. – 152 с.

131. **Рыбаков, К.В.** Обезвоживание авиационных горючесмазочных материалов / К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, В.П. Коваленко. – М.: Транспорт, 1979. – 182 с.

132. **Козловский, В.П.** Надежность гидравлических агрегатов / В.П. Козловский. – М.: Машиностроение, 1974.

133. **Воюцкий, С.С.** Физико-химические основы пропитывания и импергирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров / С.С. Воюцкий. – Л.: Химия, 1969. – 336 с.

134. **Зимон, А.Д.** Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

135. **Кельцев, Н.В.** Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1976. – 512 с.

136. **Бухалов, В.А.** Современный экспресс-метод инструментального контроля чистоты промышленно-авиационных ГСМ / В.А. Бухалов, Е.В. Лесников // В кн. «Материалы заседаний комитета по авиа ГСМ». Инф. сборник № 3. – М., 2008. – 84 с.

137. **Штеренлихт, Д.В.** Гидравлика. – М.: Энергоиздат, 1991. – 521 с.

138. **Большаков, Г.Ф.** Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. – М.: Недра, 1974. – 320 с.

139. **Рыбаков, К.В.** Обезвоживание авиационных горючесмазочных материалов / К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин, В.П. Коваленко. – М.: Транспорт, 1979. – 182 с.

140. **Кладов, А.В.** Совершенствование средств подогрева мазута в вертикальных резервуарах / А.В. Кладов, В.П. Добровольсков, В.П. Коваленко // Научно-технический сборник УФ ВАТТ. – 2003. – № 35.

141. **Коваленко, В.П.** Обеспечение температурного режима котельного топлива при выдаче его со складов сельскохозяйственных предприятий / В.П. Коваленко, А.В. Кладов, Ф.С. Макушев // Вестник МГАУ «Технический сервис в АПК». 2004. – Вып. 1 (6). – С. 102–107.

142. **Бронштейн, И.Н.** Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1983. – 608 с.

143. **Соколов, Е.Я.** Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

144. **Басаргин, Б.Н.** Исследование гидродинамики и массообменной способности аппаратов инжекторного типа: дис. ... д.т.н. – Ярославль, 1974. – 315 с.

145. **Марков, В.А.** Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания: монография / В.А. Марков, С.Н. Девянин, С.А. Зыков, С.М. Гайдар. – М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. – 292 с.

146. **Дерффель, К.** Статистика в аналитической химии. – М.: Мир, 1994. – 268 с.

147. **Алназарова, С.А.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.А. Алназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

148. Руководство по испытаниям технических средств службы горючего. – М.: Воениздат, 1989. – Кн. 2. – 418 с.

149. ГОСТ 33–2000. Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости. Расчет динамической вязкости. – М.: Изд-во Стандартов, 2001. – 20 с.

150. ГОСТ 5985–79. Нефтепродукты. Метод определения кислотности и кислотного числа. – М.: Изд-во Стандартов, 1993. – 10 с.

151. ГОСТ 10577–78. Нефтепродукты. Метод определения содержания механических примесей. – М.: Изд-во Стандартов, 1996. – 8 с.

152. ГОСТ 2477–65. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – М.: Изд-во Стандартов, 1997. – 2 с.

153. ГОСТ 5066–91. Топлива моторные. Методы определения температуры помутнения, начала кристаллизации и кристаллизации. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 14 с.

154. ГОСТ 20287–91. Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания. – М.: Изд-во Стандартов, 2002. – 10 с.

155. ГОСТ 8489–85. Топлива моторные. Метод определения фактических смол (по Бударову). – М.: Изд-во Стандартов, 1988. – 10 с.

156. Инструкция об организации обеспечения качества горючего в Вооруженных силах РФ. – М.: Воениздат, 1994. – 224 с.

157. **Ечин, А.И.** Исследование гигроскопичности синтетических масел / А.И. Ечин, Г.Т. Новосартов, Е.А. Попова, Т.Б. Кондратьева // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1980. – С. 25–26.

158. **Ечин, А.И.** Разработка путей повышения гидролитической стабильности синтетических масел: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 178 с.

159. ГОСТ 2917–76. Масла и присадки. Методы определения коррозионного воздействия на металлы. – М.: Изд-во Стандартов, 1976. – 8 с.

160. ГОСТ 9.030–74. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких и агрессивных сред. – М.: Изд-во Стандартов, 1992. – 16 с.

161. ГОСТ В.28.569–90. Рекомендуемая система покрытий и защиты наружных и внутренних поверхностей технических средств службы горючего. – М.: Изд-во Стандартов, 1991. – 11 с.

162. Руководство по испытаниям технических средств службы горючего. – М.: Воениздат, 1989. – Кн. 2. – 418 с.

163. **Кутателадзе, С.С.** Основы теории теплообмена. – М.-Л., Машгиз, 1962. – 456 с.

164. **Рыбаков, К.В.** Приборы для определения содержания воды и механических примесей в нефтепродуктах / К.В. Рыбаков, Е.Н. Жулдыбин. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1968. – 50 с.

165. **Ничуговский, Г.Ф.** Определение влажности химических веществ. – Л.: Химия, 1977. – 200 с.

166. **Лебедев, В.В.** Химические и физико-химические методы обезвоживания топлив / В.В. Лебедев, В.П. Коваленко, А.В. Симоненко, В.В. Мороз // Тракторы и сельхозмашины. – 2002. – № 7. – С. 21–22.

167. **Гусев, С.С.** Эффективность регенерации отработанных нефтяных масел с помощью ПГС-полимеров / С.С. Гусев, В.П. Коваленко, Е.Н. Пирогов, Е.А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. Технический сервис в АПК. – 2004. – № 1. – С. 102–107.

168. **Леонов, И.Н.** Разработка гидродинамических фильтров с фильтрующими материалами из полимерных материалов / И.Н. Леонов, В.П. Коваленко, Е.Н. Пирогов, Е.А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. Технический сервис в АПК. – 2004. – № 1. – С. 108–111.

169. **Коваленко, В.П.** Очистка нефтепродуктов и регенерация отработанных масел с помощью пористых полимеров / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. Технический сервис в АПК. – 2005. – № 1. – С. 138–141.

170. **Коваленко, В.П.** Утилизация нефтеотходов с использованием электромагнитного поля / В.П. Коваленко, С.А. Нагорнов, С.В. Романцова, Е.А. Улюкина // Авто-грин. – Декабрь-январь-февраль 2005/2006. – С. 15–16.

171. **Коваленко, В.П.** Использование электрокрекинга при переработке нефтесодержащих отходов / В.П. Коваленко, Н.М. Лихтерова, В.Н. Торховский, Е.А. Улюкина // Авто-грин. – Декабрь-январь-февраль 2005/2006. – С. 16–17.

172. **Коваленко, В.П.** Современные методы утилизации нефтесодержащих отходов в сельскохозяйственном производстве / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, С.А. Нагорнов, Н.М. Лихтерова // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2006. – № 3. – С. 91–94.

173. **Коваленко, В.П.** Применение трибоэлектризаторов для очистки нефтепродуктов в сельскохозяйственном производстве / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Н.Е. Кабдин, О.С. Аверьянов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2006. – № 3. – С. 116–117.

174. **Коваленко, В.П.** Ускоренные методы контроля чистоты биотоплива для дизеля / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.Н. Приваленко, О.Н. Шайдунова, Е.А. Островский // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2007. – № 2. – С. 69–71.

175. **Коваленко, В.П.** Использование продуктов растительного происхождения в качестве добавок к смазочным и гидравлическим маслам / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Н.Н. Тупотилов, В.В. Остриков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2007. – № 3/1. – С. 85–87.

176. **Коваленко, В.П.** Новые средства очистки нефтепродуктов на сельскохозяйственных предприятиях / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Техника и оборудование для села. – 2007. – № 2. – С. 24–26.

177. **Коваленко, В.П.** Разработка фильтроэлементов для очистки рабочих жидкостей в гидравлических системах сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, И.А. Королев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2008. – № 1. – С. 47–52.

178. **Коваленко, В.П.** Восстановление эксплуатационных свойств фильтрующих элементов для очистки рабочих жидкостей гидравлических систем с.-х. техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, И.А. Королев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» – 2008. – № 3. – С. 107–111.

179. **Коваленко, В.П.** Оборудование для получения смесового биотоплива на основе рапсового масла / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, М.Л. Насоновский, Е.А. Островский // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2008. – № 4 (29). – С. 48–52.

180. **Коваленко, В.П.** Применение регенерируемых фильтроэлементов для очистки топлива, масел и рабочих жидкостей при заправке мобильной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, И.А. Королев // Международный технико-экономический журнал. – 2008. – № 2. – С. 5–10.

181. **Коваленко, В.П.** Очистка компонентов смесового биотоплива с помощью ПГС-полимеров / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Е.А. Островский // Международный технико-экономический журнал. – 2008. – № 2. – С. 10–16.

182. **Коваленко, В.П.** Пути обеспечения температурного режима рапсового масла при нефтескладских операциях и приготовлении смесового биотоплива для дизельных двигателей / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Е.А. Островский // Международный научный журнал. – 2008. – № 2. – С. 22–27.

183. **Улюкина, Е.А.** Использование смесового топлива в дизельных двигателях сельскохозяйственной техники / Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев, О.Н. Шайдурова // Международный научный журнал. – 2008. – № 2. – С. 31–34.

184. **Коваленко, В.П.** Исследование стабильности смесового биотоплива для дизелей при хранении / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, О.Н. Шайдурова // Международный технико-экономический журнал. – 2008. – № 4. – С. 75–77.

185. **Коваленко, В.П.** Проверка эффективности экспресс-метода контроля загрязненности рапсового масла и смесового биотоплива / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Е.А. Островский // Международный научный журнал. – 2008. – № 5. – С. 58–60.

186. **Улюкина, Е.А.** Новые методы утилизации нефтеотходов сельскохозяйственного производства / Е.А. Улюкина, В.П. Коваленко, С.А. Нагорнов, Н.М. Лихтерова // Техника и оборудование для села. – 2008. – № 9. – С. 42–45.

187. **Коваленко, В.П.** Зависимость содержания растворенной воды в рапсовом метилэфире от его температуры / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Буяков // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 3. – С. 80–82.

188. **Коваленко, В.П.** Современные методы утилизации нефтеотходов / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Н.М. Лихтерова, С.А. Нагорнов // Химическая техника. – 2009. – № 5. – С. 41–43.

189. **Коваленко, В.П.** Обеспечение температурного режима при подогреве вязких и застывающих жидкостей / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Е.А. Островский, С.А. Галко // Химическая техника. – 2009. – № 6. – С. 28–29.

190. **Коваленко, В.П.** Источники попадания влаги в рапсовый метилэфир при транспортировании и хранении / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Буяков // Международный научный журнал. – 2009. – № 3. – С. 75–80.

191. **Коваленко, В.П.** Совместимость конструкционных материалов с рапсовым метилэфиром / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев, О.Н. Шайдурова, А.С. Буяков // Международный научный журнал. – 2009. – № 4. – С. 42–45.

192. **Коваленко, В.П.** Процесс обводнения рапсового метилэфира при хранении / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Буяков // Международный научный журнал. – 2009. – № 3. – С. 81–84.

193. **Коваленко, В.П.** Очистка рапсового метилэфира от механических загрязнений и воды / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Буяков, С.А. Галко // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 4. – С. 54–59.

194. **Коваленко, В.П.** Механизм обезвоживания рапсового метилэфира с помощью пористых полимерных материалов (ПГС-полимеров) / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Буяков, С.А. Галко // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 4. – С. 71–75.

195. **Коваленко, В.П.** Исследование взаимодействия метилового эфира рапсового масла с конструкционными материалами / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев, О.Н. Шайдурова, А.С. Буяков // Международный научный журнал. – 2009. – № 5. – С. 36–40.

196. **Коваленко, В.П.** Экспериментальное исследование процесса взаимодействия рапсового метилэфира с водой / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Буяков, С.А. Галко // Международный научный журнал. – 2009. – № 5. – С. 40–43.

197. **Коваленко, В.П.** Очистка нефтесодержащих поверхностных вод на объектах системы нефтепродуктообеспечения сельскохозяйственных предприятий / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.Ю. Грушин, Ш.А. Давлетьяров // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 5. – С. 40–45.

198. **Улюкина, Е.А.** Взаимодействие различных видов биотоплива на основе рапсового масла с конструкционными материалами / Е.А. Улюкина, В.П. Коваленко, Н.Н. Пуляев, О.Н. Шайдурова, А.С. Буряков // Международный технико-экономический журнал. – 2010. – № 3. – С. 88–91.

199. **Буряков, А.С.** Устройства для очистки автомобильных топлив и масел от механических загрязнений и воды / А.С. Буряков, В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Косых, Е.Н. Пирогов // Международный технико-экономический журнал. – 2010. – С. 97–103.

200. **Коваленко, В.П.** Влияние загрязнения нефтепродуктов на состояние окружающей среды при эксплуатации мобильной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Международный технико-экономический журнал. – 2010. – № 5. – С. 87–90.

201. **Коваленко, В.П.** Техническое обеспечение использования альтернативного биотоплива / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2010. – № 2 (41). – С. 62–65.

202. **Коваленко, В.П.** Эффективная очистка ТСМ / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Сельский механизатор. – 2011. – № 2. – С. 34–35.

203. **Галко, С.А.** Гидродинамические фильтры-водоотделители для очистки нефтепродуктов / С.А. Галко, Е.А. Улюкина, В.П. Коваленко, А.Н. Воробьев, О.В. Ерохин, А.И. Косых // Международный технико-экономический журнал. – 2011. – № 2. – С. 111–115.

204. **Улюкина, Е.А.** Перспективы использования альтернативных топлив при эксплуатации сельскохозяйственной техники / Е.А. Улюкина // Международный технико-экономический журнал. – 2011. – № 2. – С. 116–120.

205. **Улюкина, Е.А.** Исследование физико-химических свойств биотоплив на основе растительных масел / Е.А. Улюкина, В.П. Коваленко, Н.Н. Пуляев, А.Н. Приваленко // Международный научный журнал. – 2011. – № 4. – С. 79–83.

206. **Коваленко, В.П.** Современные методы очистки автомобильных топлив от механических загрязнений и воды / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.Н. Воробьев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2011. – № 2. – С. 21–23.

207. **Нагорнов, С.А.** Рекомендации по обеспечению чистоты дизельного топлива при складских и заправочных операциях в сельскохозяйственном производстве / С.А. Нагорнов, В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина. – Тамбов, 2011. – 38 с.

208. **Нагорнов, С.А.** Рекомендации по приготовлению, хранению смесового топлива и заправке сельскохозяйственной техники / С.А. Нагорнов, А.Н. Зазуля, С.В. Романцова, В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина. – Тамбов, 2012. – 51 с.

209. **Улюкина, Е.А.** Улучшение эксплуатационных свойств современных и перспективных моторных топлив для сельскохозяйственной техники: дис. ... доктора техн. наук. – М., 2012. – 346 с.

210. **Коваленко, В.П.** Снижение износа деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 9. – С. 12–15.

211. **Девянин С.Н.** Исследование стабильности биотоплива на основе растительных масел / С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – 2012. – № 5 (56). – С. 19–21.

212. **Коваленко, В.П.** Очистка дизельного топлива от механических примесей, эмульсионной воды и продуктов окисления с применением пористых наноматериалов / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, В.В. Коновалов // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – № 16-4. – С. 136–139.

213. **Коваленко, В.П.** Методы экспресс-контроля биотоплив при эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Новик // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IV Международной научно-практической конференции; под ред. А.В. Павлова. – 2013. – С. 148–151.

214. **Коваленко, В.П.** Устройство для комплексной очистки топлива при заправке сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, В.В. Коновалов // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 1. – С. 24–28.

215. **Коваленко, В.П.** Контроль качества нефтепродуктов при эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Новик, А.Н. Приваленко // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2013. – № 1 (57). – С. 32–35.

216. **Коваленко, В.П.** Удаление загрязнений из нефтепродуктов самоочищающимся фильтром / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, С.С. Гусев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2013. – № 3 (59). – С. 35–37.

217. **Коваленко, В.П.** Удаление фактических смол из дизельного топлива при заправке сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.Н. Приваленко, В.В. Коновалов // Международный технико-экономический журнал. – 2013. – № 1. – С. 108–110.

218. **Коваленко, В.П.** Экспресс-контроль качества моторных масел при эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.С. Новик, С.А. Нагорнов, В.В. Остриков // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – № 16-4. – С. 140–143.

219. **Коваленко, В.П.** Использование динамического бака-отстойника для разделения нефтесодержащих продуктов зачистки технологического оборудования / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.Н. Зотов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2014. – № 3. – С. 42–46.

220. **Коновалов, В.В.** Обеспечение чистоты дизельного топлива при заправке сельскохозяйственной и транспортной техники / В.В. Коновалов, В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина // Технология колесных и гусенчных машин. – 2014. – № 3. – С. 10–17.

221. **Улюкина, Е.А.** Свойства биотоплив растительного происхождения / Е.А. Улюкина, С.А. Нагорнов, С.В. Романцова // Наука в центральной России. – 2014. – № 2(8). – С. 62–69.

222. **Коваленко, В.П.** Очистка нефтесодержащих вод в динамическом баке-отстойнике / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, А.Н. Зотов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2014. – № 2 (62). – С. 15–19.

223. **Зазуля, А.Н.** Расширение сырьевых ресурсов для производства биодизельного топлива / А.Н. Зазуля, С.В. Романцова, Е.А. Улюкина // Наука в центральной России. – 2014. – № 4 (10). – С. 40–48.

224. **Коваленко, В.П.** Современные средства очистки горюче-смазочных материалов фильтрованием / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, С.А. Галко, Ф.Е. Шарыкин // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 4 (8). – С. 50–56.

225. **Коваленко, В.П.** Перспективы использования сжатого природного газа при эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, А.В. Тодорив // Наука в центральной России. – 2015. – № 5 (17). – С. 62–68.

226. **Коваленко, В.П.** Обеспечение чистоты топлив и масел при эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, М.А. Липаева // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2015. – № 3 (67). – С. 44–50.

227. **Коваленко, В.П.** Очистка нефтесодержащих вод на объектах нефтепродуктообеспечения сельскохозяйственных предприятий / В.П. Коваленко, Е.А. Улюкина, М.А. Липаева // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2015. – № 5 (69). – С. 26–31.

228. **Марков, В.А.** Метилловый эфир подсолнечного масла как экологический компонент нефтяных моторных топлив / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 4 (46). – С. 29–41.

229. **Марков, В.А.** Использование смесей дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла в качестве моторного топлива / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев // Грузовик. – 2016. – № 1. – С. 37–48.

230. **Улюкина, Е.А.** Устройства для очистки топлив и масел при эксплуатации сельскохозяйственной техники / Е.А. Улюкина // Известия Международной академии аграрного образования. – 2017. – № 35. – С. 167–170.

231. **Коваленко, В.П.** Перспективы эксплуатации сельскохозяйственной техники на сжатом природном газе / В.П. Коваленко, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, А.В. Тодорив // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2017. – Т. 16. – № 7. – С. 313–315.

232. **Улюкина, Е.А.** Обеспечение чистоты нефтепродуктов при эксплуатации сельскохозяйственной техники / Е.А. Улюкина // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – № 41-1. – С. 155–158.

233. **Улюкина, Е.А.** Гидродинамические фильтры для очистки моторных топлив / Е.А. Улюкина // Доклады ТСХА: материалы международной научной конференции. – 2018. – С. 149–151.

234. **Нагорнов, С.А.** Технология получения смесового моторного топлива / С.А. Нагорнов, А.Ю. Корнев, М.Ю. Левин, В.Ф. Калинин, С.В. Романцова, Е.А. Улюкина // Цифровизация агропромышленного комплекса: сборник научных статей. – 2018. – С. 89–91.

235. **Улюкина, Е.А.** Обеспечение чистоты моторного топлива при эксплуатации сельскохозяйственной техники: монография. – М.: МЭСХ, 2018. – 160 с.

236. **Улюкина, Е.А.** Особенности применения биотоплива в сельскохозяйственном производстве / Е.А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2019. – № 6 (94). – С. 23–27.



237. **Улюкина, Е.А.** Перспективы применения биотоплива при эксплуатации сельскохозяйственной и мобильной техники / Е.А. Улюкина // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 57. – С. 183–193.

238. **Дедов, А.В.** Влияние скорости фильтрации топлива гидрофобными сетками на эффективность его обезвоживания / А.В. Дедов, Н.М. Лихтерова, Ф.Е. Шарыкин, Е.А. Улюкина // Материаловедение. – 2020. – № 6. – С. 33–36.

239. **Dedov, A.V.** Effect of the rate of fuel filtration by hydrophobic grids on the efficiency of its dehydration / A.V. Dedov, N.M. Likhterova, F.E. Sharykin, E.A. Ulyukina // Inorganic Materials: Applied Research. – 2021. – Т. 12. – № 1. – С. 147–150.

240. **Улюкина, Е.А.** Эксплуатационные свойства биотоплив на основе эфиров растительных масел / Е.А. Улюкина, В.Е. Коноплев, М.В. Тачаев // В сборнике: Чтения академика В.Н. Болтнского. – М., 2021. – С. 285–291.

241. **Улюкина, Е.А.** Стохастическая модель предварительной очистки дизельных топлив в многоканальном гидродинамическом фильтре / Е.А. Улюкина, В.А. Львов, Ф.Е. Шарыкин // Наука в центральной России. – 2023. – № 1 (61). – С. 124–132.

242. **Улюкина, Е.А.** Экспериментальное исследование эффективности гидродинамического фильтрования дизельного топлива / Е.А. Улюкина, А.В. Орешенков, Ф.Е. Шарыкин // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25 – № 2. – С. 34–40.

243. **Улюкина, Е.А.** Исследование свойств стохастической модели процесса предварительной очистки дизельного топлива в гидродинамическом фильтре / Е.А. Улюкина, В.А. Львов, Ф.Е. Шарыкин // Известия Международной академии аграрного образования. – 2023. – Вып. № 67. – С. 188–194

244. **Улюкина, Е.А.** Очистка дизельного топлива с применением гидродинамического фильтра оригинальной конструкции / Е.А. Улюкина, А.В. Орешенков, Ф.Е. Шарыкин // В сб. научных докладов Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства», – Тамбов: Изд-во В.В. Першина, 2023. – С. 231–234.

245. **Улюкина, Е.А.** Обеспечение температурного режима котельного топлива при его выдаче со складов АПК / Е.А. Улюкина, М.А. Карапетян, С.С. Гусев, А.А. Андреев // Известия Международной академии аграрного образования. – 2024. – № 72. – С. 151–156.

246. **Улюкина, Е.А.** Очистка биотоплива с помощью высокопористого полимерного фильтра / Е.А. Улюкина, О.П. Андреев, С.С. Гусев,

А.А. Андреев, А.В. Меликов // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26. – № 6. – С. 71–76.

247. Фильтр для очистки жидкостей: пат. № 2370303 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> В01 D 29 /4 (2006.01) / Коваленко В.П., Пирогов Е.Н., Улюкина Е.А., Королев И.А., Островский Е.А., Давлетьяров Ш. А. – № 2008123496, заявл. 17.06.2008, опубл. 20.10.2009. – Бюл. № 29. – 8 с.

248. Самоочищающийся фильтр: Патент RU 205889 U1 / А.А. Андреев, Е.А. Улюкина, С.С. Гусев, А.С. Апатенко; опубл. 11.08.2021. – Бюл. № 23.

249. Устройство для очистки жидкостей в циркуляционных системах. Патент на изобретение № 2456055 / В.П. Коваленко, С.А. Галко, Е.А. Улюкина, А.И. Косых, О.В. Ерохин; заявка № 2010106751, опубл. 20.07.2012. МПК В 01 D 36 /00 (2006.01), бюл. № 20. – 7 с.

250. Каскадный гидродинамический фильтр-водоотделитель. Патент на изобретение № 2545332. / И.В. Ерохин, В.П. Коваленко, А.И. Косых, С.А. Нагорнов, С.В. Романцева, Е.А. Улюкина. – Заявка № 2010106751, опубл. 27.03.2015. МПК В 01 D 36 /00 (2006.01), бюл. № 9. – 7 с.

251. Устройство для очистки дизельного топлива от загрязнений. Патент на изобретение № 2524215 / В.П. Коваленко, С.А. Галко, Е.А. Улюкина, В.В. Коновалов, А.И. Косых. – Заявка № 2010106751, опубл. 27.07.2014. МПК В 01 D 36 /00 (2006.01), бюл. № 21. – 7 с.

252. Устройство для очистки жидкостей: пат. № 2426578 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> В 01 D 36 /00 (2006.01) / Коваленко В.П., Галко С.А., Пирогов Е.Н., Улюкина Е.А., Косых А.И., Буряков А.С. – № 2010106751, заявл. 26.02.2010 г., опубл. 20.08.2011. – Бюл. № 23. – 7 с.

253. Резервуар для жидкостей: пат. на полезную модель № 47335 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> В65D88/02 / Коваленко В.П., Литовченко А.В., Улюкина Е.А., Гусев С.С. – № 2005103727, заявл. 14.02.2005 г.; опубл. 27.08.2005. – Бюл. № 24. – 2 с.

254. Сигнализатор наполнения емкости жидкостью: пат. на полезную модель № 45989 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> В 65 D 90 /48/ Коваленко В.П., Литовченко А.В., Улюкина Е.А., Гусев С.С. – № 2005103728, заявл. 14.02.2005, опубл. 10.06.2005. Бюл. № 16 – 2 с.

255. Горизонтальный резервуар для вязких и застывающих жидкостей: пат. № 2393105 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> В 65 D 88 /74 (2006.01) / Коваленко В.П., Улюкина Е.А., Галко С.А., Островский Е.А., Новик А.С. – № 2009104162, заявл. 10.02.2009, опубл. 27.06.2010. – Бюл. № 18. – 7 с.

256. Устройство для очистки поступающего в топливный бак воздуха от пыли и влаги: пат. на полезную модель № 110659 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> В 01 D 46 /24 (2006.01) / Коваленко В.П., Галко С.А., Улюкина Е.А., Воробьев А.Н. – № 2011126311/05, заявл. 28.06.2011, опубл. 27.11.2011. – Бюл. № 33. – 2 с.

*Научное издание*

УЛЮКИНА Елена Анатольевна

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НЕФТЯНЫХ  
И СМЕСЕВЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

*Монография*

*Издается в авторской редакции*  
Техн. редактор *Т.Б. Самсонова*

Подписано в печать 24.10.2025. Формат 60×84/16.  
Печ. л. 14,25. Тираж 500 экз. Заказ № 647.

127412, Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2, e-mail: t\_sams@mail.ru