



Друзьянова Варвара Петровна  
Семенова Ольга Пантелеймоновна

# **ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ БИОГАЗА ДО КАЧЕСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА**

Учебное пособие

Чебоксары 2018

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Северо-Восточный федеральный университет  
имени М.К. Аммосова»

В.П. Друзьянова, О.П. Семенова

# **ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ БИОГАЗА ДО КАЧЕСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА**

Учебное пособие

Чебоксары 2018

УДК 66.07 (075.8)  
ББК 31.354я73  
Д76

*Авторы:*

*Друзьянова Варвара Петровна  
Семенова Ольга Пантелеймоновна*

*Рецензенты:*

*Кокиева Галия Ергешевна*, д-р техн. наук, профессор кафедры  
«Технологические системы в АПК» инженерного факультета  
ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия»

*Бояршинов Анатолий Леонидович*, канд. техн. наук, доцент,  
заведующий сектором «Эргономика северной техники» ФГБУН Якутский  
научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

**Д76 Друзьянова В. П. Технология очистки биогаза до качества моторного топлива : учебное пособие / В. П. Друзьянова, О. П. Семенова. – Чебоксары: ИД «Среда», 2018. – 104 с.**

*Дизайн обложки:* Фирсова Надежда Васильевна, дизайнер

**ISBN 978-5-6041637-2-6**

В данной работе описана оригинальная технология очистки биогаза для доведения его до оптимальных параметров моторного топлива. Впервые в качестве наполнителя в фильтре очистки предложено использование природного минерала – цеолита.

Биогаз получается при переработке органического отхода животноводства, в данном случае навоза крупного рогатого скота, в анаэробной психрофильной установке. В свою очередь, психрофильная анаэробная технология разработана авторами на базе автодорожного факультета ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им.М.К.Амосова».

Даже частичный перевод техники на биогаз позволил бы снизить потребление жидких нефтяных топлив в аграрном секторе. В итоге снижение затрат на транспортировку жидкого топлива обеспечило бы высвобождение значительных средств, которые можно направлять на решение других проблем.

Пособие предназначено для студентов автотранспортной и агроинженерной направленности, магистрантов, аспирантов и преподавателей.

ISBN 978-5-6041637-2-6  
DOI 10.31483/a-31  
DOI 10.31483/r-21585

УДК 66.07 (075.8)  
ББК 31.354я73  
© Друзьянова В.П., Семенова О.П., 2018.  
© Издательский дом «Среда», 2018.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	<b>5</b>
<b>Глава 1. Современное состояние проблемы обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве. Цель и задачи исследования</b> .....	<b>8</b>
1.1. Источники загрязнения окружающей среды агропромышленного комплекса Республики Саха (Якутия) .....	8
1.2. Существующие технологии очистки газовых выбросов от вредных компонентов .....	10
1.3. Пути обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве при эксплуатации мобильных машин .....	13
1.3.1. Двигатель как источник вредных выбросов в окружающую среду .....	15
1.3.2. Особенности использования альтернативных видов топлива для повышения экологической безопасности .....	19
1.4. Возможность использования природного цеолита в фильтрах очистки газов .....	28
<b>Глава 2. Методический комплекс для проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса очистки биогаза</b> ....	<b>36</b>
2.1. Математическое описание процесса очистки биогаза .....	40
2.2. Математическая модель процесса очистки биогаза фильтром с природным цеолитом .....	48
<b>Глава 3. Разработка фильтра очистки биогаза с природным цеолитом</b> .....	<b>53</b>
3.1. Программа экспериментального исследования .....	53
3.1.1. Выбор фильтрующего элемента для фильтра очистки биогаза .....	54
3.1.2. Определение порозности фильтрующего элемента .....	56
3.1.3. Определение степени очистки биогаза .....	58
3.1.4. Определение зависимости степени очистки биогаза от конструктивных параметров фильтра .....	59
3.1.5. Определение зависимости перепада давления в фильтре от порозности цеолита .....	60
3.1.6. Определение степени влияния разработанного фильтра очистки биогаза на рабочий процесс двигателя .....	62
3.2. Методика планирования эксперимента .....	65
3.3. Ротatableное планирование второго порядка .....	66
3.4. Обоснование выбора основных параметров фильтра очистки биогаза с природным цеолитом путем априорного ранжирования .	69
<b>Глава 4. Результаты экспериментальных исследований разработанных фильтров очистки биогаза</b> .....	<b>72</b>
4.1. Результаты экспериментальных исследований качества очистки биогаза фильтрами с различными материалами .....	72
4.2. Результаты исследования порозности фильтрующего материала .....	73

4.3. Результаты эксперимента по определению эффективности очистки биогаза.....	74
4.4. Результаты обоснования конструктивных параметров фильтра..	75
4.5. Результаты стендовых испытаний влияния концентрации метана в биогазовом топливе на характеристики двигателя .....	76
4.6. Проверка адекватности математической модели .....	78
4.7. Эколого-экономическая оценка применения средств снижения вредных выбросов мобильных машин, эксплуатируемых в аграрном секторе Республики Саха (Якутия) .....	81
4.7.1. Расчёт капитальных затрат на модернизацию топливной системы автомобиля.....	84
4.7.2. Расчет основных технико-экономических показателей .....	85
4.7.3. Расчет предотвращенного ущерба окружающей среде территории Республики Саха (Якутия) от вредных выбросов мобильных машин, эксплуатируемых в сельскохозяйственном производстве...86	
<b>Заключение .....</b>	<b>88</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>90</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Республике Саха (Якутия) накоплен уникальный опыт ведения сельского хозяйства в экстремальных климатических условиях Севера. Адаптированы, разработаны и применяются различные технологии на вечной мерзлоте. Для агропромышленного производства остаются актуальными вопросы повышения надежности техники, улучшения условий труда, снижения травматизма и заболеваемости, а также обеспечения экологической безопасности. Ведущие производители мобильной сельскохозяйственной техники обращают особое внимание не только на совершенствование конструкций, повышения надежности, но и на устранение их вредного воздействия на окружающую среду и человека.

Главная особенность Якутии – это тонко организованная структура мерзлотных почв, поэтому особенно бережно следует относиться к ним как при их возделывании, так и при утилизации отходов сельскохозяйственного производства. На наш взгляд, в связи с повсеместным ухудшением экологической обстановки, необходимо внедрять и использовать щадящие биотехнологии в сельском хозяйстве республики.

Рост численности населения и интенсификация сельского хозяйства привели к увеличению загрязнения окружающей среды вредными веществами. Их большое количество поступает в атмосферу, почву, водные источники, обуславливая отрицательное воздействие на окружающую среду и человека. Рост загрязнения биосферы и миграции токсичных веществ сопровождается загрязнением кормов сельскохозяйственных животных, продуктов питания и приводит к глобальным экологическим проблемам.

В Якутии развиты следующие отрасли аграрного производства – оленеводство, охотничий и пушной промыслы, рыболовство, разведение молочное скотоводство, свиноводство и птицеводство, которые ежегодно генерируют миллионы тонн сельскохозяйственных отходов животного и растительного происхождения.

Эти отходы, без предварительной обработки и обеззараживания вносятся на поля в качестве удобрений, тем самым причиняя серьезные экологические проблемы. Выделения животных, стойловый навоз и другие сельскохозяйственные отходы смываются талыми и ливневыми водами попадая в природные водотоки и водоисточники. Загрязненные сточные воды содержат большое количество патогенных микроорганизмов и биогенных элементов.

Бесконтрольное использование сельскохозяйственных отходов является весьма опасным для окружающей среды и здоровья людей. В связи с этим значительно обостряется проблема выращивания и производства экологически чистой растениеводческой и животноводческой продукции. Обеспечение экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве во многом зависит не только от внедрения природосообразных систем, ведения земледелия, но и от внедрения малоотходных ресурсосберегающих технологических процессов.

Как отмечено в работах [32–47], в настоящее время в Якутии имеются трудности с доставкой традиционных видов топлив (угля, нефтепродуктов и т. п.) для обеспечения транспорта, эксплуатируемого в сельскохозяйственном производстве в отдаленных районах Республики Саха (Якутия). В сельскохозяйственном производстве РС (Я) основным потребителем жидких топлив нефтяного происхождения является автотранспорт и сельскохозяйственная техника.

Одним из способов решения экологических и энергетических проблем является переработка сельскохозяйственных отходов, с получением органических удобрений и моторного биогаза. Кроме того, при переработке отходов не только улучшается санитарное состояние прифермерских территорий, но и уничтожаются возбудители инфекционных заболеваний, исчезает неприятный запах гниющих растений, гибнут семена сорняков.

Постоянный рост цен на нефтяное топливо, а также полное его отсутствие во многих сельских местностях также подталкивают к развитию биогазовой индустрии. Авторы работ [32–46] информируют, что средний уровень газификации в России составляет менее чем 70% в городах и не более 50% в сельской местности. Отмечают, что в ряде регионах страны степень газификации составляет менее 10%. По данным, имеющимся у «Межрегионгаза», подобная ситуация с газификацией наблюдается во многих субъектах Северо-Западного, Дальневосточного, Уральского и Сибирского федеральных округов.

Для агропромышленного комплекса складывается ситуация, при которой применение современных биогазовых технологий является не только выгодным, но и единственно возможным способом обеспечить свои энергетические потребности, особенно для удаленных регионов России.

На этапах производства, снабжения, хранения и применения нефтяного топлива в него попадают и образуются загрязнения в виде

механических примесей, воды и других веществ, которые вызывают его потери, износы и простои сельскохозяйственной техники.

Одним из способов обеспечения экологической безопасности при эксплуатации мобильных машин в сельскохозяйственном производстве является использование альтернативных видов топлива – биогаза получаемого непосредственно в месте образования отходов животноводства.

На состав биогаза влияют многие факторы: расположение животноводческого комплекса, вид кормов, состояние условия окружающей среды, период выдержки сброживаемого навоза, температуры процесса (мезофильный, термофильный, психрофильный), влажность навоза, частота перемешивания субстрата в метантенке.

Однако использование биогаза в качестве альтернативного топлива полностью не решает проблемы обеспечения экологической безопасности. Существенное влияние загрязненное топливо оказывает на топливные системы машин, вызывая повышенный износ топливных насосов, забивку фильтров, коррозию, оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Таким образом, становится очевидным необходимость использования дополнительной очистки моторного биогаза, полученного на животноводческих комплексах.

Использование фильтров для очистки биогаза улучшает качество топлива, снижает вредное воздействие выбросов на окружающую среду, повышает работоспособность мобильных машин в условиях отдаленности районов республики, где также существует проблема доставки запасных частей и агрегатов для сельскохозяйственных машин.

Актуальность работы подтверждается выполненными исследованиями в рамках федеральной научно-технической программы по государственному заказу Министерства образования и науки РФ на тему «Разработка технологии получения возобновляемого энергетического ресурса из биомассы для использования в распределенной системе энергоснабжения региона», проект № 4279.



## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**

В настоящее время в аграрном секторе Якутии преобладают мелкие крестьянские и личные подсобные хозяйства. Производимый навоз животных, заполнив отведенные под них площади на подворьях фермеров, бесконтрольно вывозится в близлежащие открытые местности и поля. При этом возникает не только экологическая угроза, но и серьезная опасность распространения возбудителей различных заболеваний, ухудшающих состояние здоровья людей.

Животноводческие фермы расположены непосредственно в населенных пунктах, производят не только товарную продукцию, но и органические отходы. Низкие температуры способствуют сохранению болезнетворной, патогенной микрофлоры и семян сорных растений в кучах навоза, в весенний период времени с тальми водами они попадают в озера и водоемы. Земли поселений, открытые водоемы интенсивно загрязняются органическими и биогенными веществами биологических отходов животного происхождения. Происходит разрушающее воздействие необработанного бесподстильного навоза на экологическую обстановку Якутии.

С.В. Мельников отмечал, что проблема рационального использования навоза как органического удобрения для создания собственной кормовой базы при одновременном соблюдении требований охраны окружающей среды от загрязнения отходами животноводства имеет исключительно важное народнохозяйственное значение.

В сельской местности РС (Я) живет до 40% населения, занятого животноводством и растениеводством. Сельское хозяйство Якутии рассматривается, в первую очередь, как основа сохранения этноса. В сложных экономических условиях, последствиях финансового экономического кризиса, постоянного роста стоимости на минеральные удобрения и энергоносители, труднодоступности и отдаленности населенных пунктов и в связи с суровыми климатическими особенностями региона, необходимым является развитие нетрадиционных подходов к производству доступных удобрений, полу-

чений и использовании альтернативных источников энергии [43; 45; 46].

Кроме того, для реализации Федерального закона Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные объекты Российской Федерации», наиболее актуальным и востребованным является применение биогазовой технологии. Как известно, использование данной технологии дает возможность получения не только биогаза – резервного источника энергии, но и значительно улучшить экологическую обстановку [43; 45; 46].

Таким образом, использование биогазовых установок обеспечивает фактически безотходное производство, что в условиях действия ФЗ-88 «О техническом регламенте на молоко и молочную продукцию», требующего строгого соблюдения санитарных требований, может положительно повлиять на развитие аграрного сектора республики [43; 45; 46].

В Якутии на сегодняшний день содержится 199 229 гол. КРС [45]. Если считать, что с одной средней головы КРС в сутки выход навоза составляет 25 кг, то ежедневно образуется 4 981 т навоза. Годовой объем производимого навоза КРС составляет около 1 195 374 т. Таким образом, полученным навозом можно удобрить 29 884 га пахотных земель, что соответствует 28,5% от всей площади.

Оценивая состояния животноводства и растениеводства республики за последние 5 лет, следует констатировать значительные негативные количественные и качественные изменения. Если на предприятиях государственной формы собственности применяются различные технологии, включая и технологии переработки производимого навоза КРС, то в частных хозяйствах процесс утилизации отходов полностью отсутствует.

Из вышеизложенного следует, что в агропромышленном секторе Якутии имеется достаточно острая проблема – отсутствие технологий по переработке и утилизации производимого навоза сельскохозяйственных животных. Если навоз КРС должным образом не перерабатывается и не подготавливается как удобрение, то становится весьма опасным источником загрязнения окружающей среды – из 1 т навоза ежедневно может выделяться до 6 кг CO<sub>2</sub>, что пагубно сказывается на состоянии окружающей среды, вызывая парниковый эффект [38–49].

## 1.2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ВРЕДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Вопросами процесса очистки топлив от твердых частиц на основе различных фильтровальных элементов, определения оптимальных параметров фильтров посвящены труды многих исследователей.

В работе Н.А. Кузнецовой рассмотрен процесс очистки газовых выбросов от вредных примесей в аппаратах с объемной сетчатой псевдоожиженной насадкой (ОСПН). Достоинства такой насадки состоят в том, что она имеет развитую удельную поверхность контакта фаз, малую насыпную плотность, обладает большой порозностью, способностью накапливать значительное количество жидкости внутри объема насадки [70; 71].

В работе А.П. Усачева предложено техническое решение двухступенчатой очистки природного газа от твердых, жидких и вязких примесей. Фильтрующими элементами явились: плетеная металлическая сетка для первой ступени очистки и волокнистый нетканый материал для второй [119]. В трудах А.П. Усачева и С.В. Густова предложена математическая модель оптимизации геометрических параметров газовых фильтров, доказано оптимальное отношение высоты и диаметра корпуса фильтра, расположенного в обогреваемом помещении газораспределительных пунктов природного газа газораспределительных систем ОАО «Газпром газораспределение» [116].

В работе А.Б. Купавых рассмотрена возможность подготовки нефтяных газов вихревыми закручивающими устройствами. В качестве абсорбента использовался собственный газовый конденсат [72].

А.В. Новичковым получены теоретические зависимости для нахождения значения конструктивных параметров фильтра-влагоотделителя для топливной системы трактора ХТЗ-150К-09 и предложена конструкция фильтра-влагоотделителя, фильтрующим элементом, которого являлся полиакриламидный полимер марки В-415К. В фильтре-влагоотделителе фильтрующий элемент находился внутри адсорбционной кассеты. При нахождении значений конструктивных параметров фильтра-влагоотделителя исследователь рассматривал следующие параметры: диаметр адсорбера, высоту слоя адсорбента в адсорбере, высоту адсорбционной кассеты, число адсорбционных кассет [86].

В работе Т.А. Готовцевой предложена и запатентована новая конструкция секционного топливного фильтроэлемента объемного типа из деформируемых открытопористых пенополиурета-

нов [30]. По результатам моделирования фильтрационных процессов разработан синергетический критерий оценки необходимого уровня очистки топлива, учитывающий сбалансированное соотношение затрат на очистку топлива и ремонт топливной аппаратуры. Установлены зависимости между пропускной способностью, ресурсом разработанного топливного фильтроэлемента и качеством очистки. Предложен критерий оценки целесообразного качества очистки топлива в топливных системах машин по минимальным суммарным затратам на очистку топлива и ремонт топливной аппаратуры, получены зависимости пропускной способности, качества очистки и ресурса топливного фильтроэлемента новой конструкции из деформируемого пористого материала, обладающего повышенным ресурсом.

Д.В. Халтуриным обоснован способ повышения работоспособности тракторов в зимних условиях эксплуатации за счет использования фильтра грубой очистки, выполняющего одновременно функции нагревателя топлива. В качестве фильтроматериала был предложен иглопробивной материал [120].

А.Л. Новоселовым, А.А. Мельберт и другими предложены методы очистки отработавших газов дизелей мобильных машин в каталитических нейтрализаторах с пористыми фильтрами, полученные с применением технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3, с. 76–80].

В.В. Бразовским, Г.В. Медведевым, Н.П. Тубаловым, Д.Н. Титовым и другими предложены статистические модели процесса фильтрования полидисперсных систем с различными свойствами [18, с. 76].

К наиболее распространенным методам очистки биогаза относятся: химико-физический метод; биологический метод; комбинированный метод; мембранный метод; криогенный метод и очистка газа молекулярными ситами.

В основу химико-физического метода лежит добавление железосодержащих субстратов. Преимуществом является то, что кроме  $H_2S$ , этот метод позволяет очистить от силиконов и галогенных соединений. Недостатком является проблема утилизации наполненных серой резервуаров, по причине высоких затрат на обслуживание этот метод в настоящее время почти не применяется.

Биологический метод очистки от серы путем направленного нагнетания небольшого количества воздуха в газовую камеру ферментатора получила широкое распространение. Благодаря деятельности серных бактерий (*sulfobakteroxydans*) при подаче воздуха, сероводород превращается в элементарную серу, а также серные кислоты и воду. При этом сера выпадает в виде желтова-

того осадка на поверхности субстрата и при вносе в грунт используется в качестве питательного вещества для растений.

Для получения хорошего результата необходимо выполнение следующих условий: бактерии должны содержаться в самом субстрате, а не внедряться в него извне; они нуждаются в воздухе для преобразования сероводорода в элементарную серу, а также площадь для заселения, которая должна быть влажной и пребывать в теплой среде с поступлением питательных веществ. В качестве площади заселения выступают внешние стенки ферментатора и поверхность субстрата, причем  $1 \text{ м}^2$  поверхности засчитывается как  $20 \text{ м}^3$  биогаза. Метод зависит от температуры окружающей среды. При низких температурах возникает потребность в больших площадях заселения, таких, как имеют биогазовые установки накопительного типа.

Комбинация из химико-физического и биологического метода очистки применяются в первую очередь там, где требуется почти чистый газ с примесями не более  $5 \text{ ppm}$ , как, например, это требуется в случае подачи в газоцентрали или при использовании биогаза в топливных элементах или в качестве топлива. По причине высоких затрат и дорогостоящей технологии, этот метод не получил большого признания в производстве биогаза на сельскохозяйственных установках.

Мембранный метод разделения основан на пропускании через мембрану сжатого компрессором биогаза: давление биогаза при помощи компрессора повышают до 10 и более атмосфер и подают его в мембранный модуль. В итоге затраты на самообеспечение такой установки достигают до 30% от выработанной энергии.

Существенные потери энергии свойственны криогенному методу – для того чтобы заморозить углекислый газ, нужно потратить значительную часть энергии, произведенной установкой.

Молекулярные сита позволяют производить из биогаза чистый метан, для этого из смеси фильтрами улавливаются углекислый газ, водяной пар и сероводород. Если молекулярные сита перегружены этими веществами, то их можно очистить при помощи продувания воздухом или регенерацией при нагревании. На практике такой способ едва ли применяется, но в будущем он может приобрести существенно большее значение, если возникнет потребность в производстве чистого метана для применения как топливного элемента.

Таким образом, вышеизложенные методы, кроме очистки газа молекулярными ситами имеют следующие недостатки: потребление электроэнергии, необходимость в больших первичных капи-

тальных затратах. Поэтому для очистки биогаза от сероводорода, углекислого газа и водяных паров необходимо разрабатывать более приемлемые методы [19; 60; 63; 65; 91; 92].

Для широкого и эффективного применения в условиях Якутии ни один из приведенных способов очистки биогаза не подходит по причине жестких природно-климатических условий и низкого технического уровня сельхозпроизводства.

Очистка биогаза молекулярными ситами имеет следующие достоинства, выгодно отличающих его от других методов и способов очистки [19; 92]:

- минимальная стоимость материалов;
- простота изготовления и эксплуатации фильтра;
- низкая стоимость адсорбера и возможность его регенерации, что делает этот метод надежным средством защиты узлов и агрегатов двигателей от коррозии.

Природные цеолиты проявляют ионообменные и адсорбционные свойства, которые в сочетании с жестким размером входных каналов обладают свойствами молекулярных сит, благодаря чему они нашли широкое применение во многих отраслях народного хозяйства, в том числе и в практике очистки биогаза [60; 63; 64; 66; 67; 68; 90].

### **1.3. ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

Проблема обеспечения экологической безопасности при эксплуатации мобильных машин в животноводстве, растениеводстве связана с решением инженерных задач, направленных на уменьшение их вредного воздействия на окружающую среду и человека и является актуальной в настоящее время [3, с. 76–80].

В России ограничения на вредные выбросы для дизельных, бензиновых двигателей, используемых в качестве энергетических установок мобильной техники, определены нормативными документами. Часто решение задач сокращения вредных выбросов находится в противоречии с требованиями улучшения топливной экономичности и в связи с ограниченностью ресурса применяемого топлива. Этот путь решения проблемы неприемлем для области механизации сельского хозяйства.

Обеспечение экологической безопасности при использовании мобильных машин для механизации производственных процессов может идти по нескольким направлениям [76; 77].

Одно из направлений связано с выбором видов мобильных машин, то есть подбор техники необходимой мощности, мобильности, с наименее токсичными двигателями.

Результаты расчета экологического ущерба, наносимого окружающей среде, позволяют оценить целесообразность работ в этом направлении.

Второе направление связано в основном с обеспечением безопасных условий труда, так как вредные выбросы двигателей мобильных машин оказывают вредное воздействие и на состояние здоровья обслуживающего персонала. Здесь решение вопроса возможно за счет проведения организационных мероприятий, сокращения времени использования мобильных машин на различных технологических операциях. Использование специальной тары, упаковки продукции дает возможность сократить время, затрачиваемое на погрузочно-разгрузочных работах, способствует не только снижению себестоимости переработки грузов, но и решению целевой задачи – обеспечения экологической безопасности при использовании мобильных машин. Однако это направление является предметом отдельного исследования.

Представляет интерес использование каталитической нейтрализации и фильтров очистки отработавших газов, не требующие вмешательства в конструкцию двигателя [3, с. 76–78]. Однако и этот метод имеет свои недостатки, особенно при эксплуатации мобильных машин в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Использование альтернативных топлив, наряду с имеющимися нерешенными вопросами, имеет множество преимуществ по сравнению с традиционными видами топлив. В частности перевод бензинового двигателя на биогаз, получаемый в месте его образования – на животноводческих комплексах имеет важное народно-хозяйственное значение для географически удаленных районов России. Однако использование биогаза без очистки его от вредных компонентов также сказывается на экологической обстановке и здоровье населения.

### 1.3.1. ДВИГАТЕЛЬ КАК ИСТОЧНИК ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Проблемой обеспечения экологической безопасности при эксплуатации мобильных машин на технологических операциях (погрузка, разгрузка и транспортировка кормов и готовой продукции) в сельскохозяйственном производстве остается актуальной. Несмотря на введенные в России ограничения на вредные выбросы двигателей мобильных машин, проблема воздействия вредных выбросов мобильных машин на окружающую среду остается нерешенной. Часто решение задач сокращения вредных выбросов находится в противоречии с требованиями улучшения топливной экономичности, ограниченностью ресурсов и т.д. Удовлетворение этих противоречивых требований возможно несколькими путями: применением наименее токсичных двигателей, регулировок топливной аппаратуры, использованием антидымных присадок, альтернативных топлив, фильтров очистки отработавших газов, каталитических нейтрализаторов и др.

Однако экологическую опасность представляют не столько количественные показатели распространенности транспортных средств, сколько наличие на них двигателей внутреннего сгорания, выбрасывающих в окружающую среду большое количество вредных веществ с выхлопными (отработавшими) газами. При сравнительно небольшой массе двигатель развивает значительную мощность, относительно экономичен и надежен, работает на сравнительно недорогом топливе, приспособлен к работе в разнообразных условиях и обеспечивает автотракторной технике высокие тяговые и динамические свойства практически в любых природно-климатических зонах и в широком диапазоне температур окружающей среды.

Потребность государств в увеличении парка мобильной сельскохозяйственной техники постоянно растет [78–80].

Количество и состав вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания зависит в основном от конструкции и качества применяемого топлива. В продуктах неполного сгорания топлива – выхлопных газах – основными вредными веществами являются диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), оксид углерода (CO), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксид азота ( $\text{NO}_x$ ), летучие углеводороды (ЛОС) и производные от них твердые частицы [73].

Самым агрессивным компонентом, содержащимся в выбросах мобильных машин, является бенз(а)пирен. Он вызывает поражение органов дыхательных путей и кровеносной системы. По данным ГБУ «Якутский республиканский медицинский информаци-



онно-аналитический центр» (ЯРМИАЦ) первичная заболеваемость всего населения в 2016 году повысилась на 3,1%, составив 1065,0 на 1000 населения (2013 г. – 1032,8). В структуре первичной заболеваемости всего населения на протяжении 3 лет лидирует болезнь органов дыхания – 256,0 на 1000 населения [88].

Вместе с передвигающимися массами воздуха бенз(а)пирен разносится по большой площади, а выпадая вместе с твердыми частицами из воздуха (например, при осадках) попадает в почвенные слои, водоемы, на поверхности строений. Если в средней полосе России большая часть бенз(а)пирена нейтрализуется почвой, то в Якутии ввиду наличия мерзлоты с каждым разом только накапливается. В данное время в г. Якутске имеется более 101 тыс. автомобилей, из которых 60% эксплуатируется круглогодично [32]. От общего количества автомобилей (101265 ед.) в год образуется около 200 кг твердых углеводородов. Из этого объема 2% приходится на долю бенз(а)пирена, что составляет около 405060 кг/год, плотность которого на территории г. Якутска составляет 0,33 г/м<sup>3</sup>. Согласно государственному нормативу (ГН2.1.6.1338–03) среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК) бенз(а)пирена должна быть не более 0,1 мкг/м<sup>3</sup>. В нашем случае 0,033 г/м<sup>3</sup> = 904,1 мкг/м<sup>3</sup>, что превышает ПДК в 2700 раз! [38; 88].

Соотношение вредных выбросов в выхлопных газах зависит и от оборотности двигателей. В выхлопных газах мощных низкооборотных двигателей первое место занимают оксиды азота 49%, затем сажа 20,5%, альдегиды 19,5%, оксид углерода 10,5%, углеводороды 0,5%. В выхлопных газах высокооборотных двигателей мобильных машин последовательность другая: оксид углерода 75%, оксиды азота 16,5%, альдегиды 8%, углеводороды 0,5%.

В механизмах образования различных токсичных веществ имеются принципиальные различия. В связи с этим не представляется возможным снизить вредность выхлопных газов каким-либо одним универсальным средством. На практике решение этой проблемы обычно идет преимущественно по двум направлениям – уменьшение вредности газов в процессе их образования и снижение вредности отработавших газов. Однако в последние годы все больше внимания уделяется применению альтернативных видов топлива и, в первую очередь, природному газу – пропану или метану, тем самым решая задачу ресурсосбережения.

Источниками этих газов являются крупные месторождения в недрах земной коры. В тоже время метан в промышленных региональных масштабах можно получать из отходов сельскохозяйственной деятельности.

**Глава 1. Современное состояние проблемы обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве. Цель и задачи исследования**

Большое внимание теперь уделяется замене жидких нефтяных топлив сжиженным углеводородным газом и сжатым природным газом (метаном), а также спиртосодержащими смесями. Применение газообразных топлив обеспечивает некоторое улучшение экологических показателей мобильных машин (таблица 1.1) [7; 8].

К преимуществам газового топлива относятся высокое октановое число, в связи с чем возникла необходимость в использовании альтернативного вида топлива – биотоплива.

Таблица 1.1

Выбросы вредных веществ мобильных машин,  
работающих на различных видах топлива

Вид моторного топлива	Выбросы вредных веществ, г/испытание		
	Оксид углерода	углеводороды	Оксиды азота
Бензин АИ-92	42	8,5	9,1
Сжиженный нефтяной газ	19	4,8	8,7
Сжатый природный газ	8,5	4,5	8,5
Бензинометанольная смесь	32	5,4	7,6

Биотопливо представляет собой любое жидкое или твердое топливо из возобновляемого сырья. Биогаз – это смесь из 50–80% метана  $\text{CH}_4$ , 20–50% углекислого газа  $\text{CO}_2$ , 1% сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и незначительных следов азота  $\text{N}_2$ , кислорода  $\text{O}_2$ , и водорода  $\text{H}_2$ , а так же продуктов метанового брожения органических веществ растительного и животного происхождения, осуществляемого специфическим природным биоценозом анаэробных бактерий различных физиологических групп (рис. 1.1). Энергия, заключенная в 1 м<sup>3</sup> биогаза (20–25 МДж), эквивалентна энергии 0,6 м<sup>3</sup> природного газа, 0,74 л нефти или 0,66 л дизельного топлива.

Соотношение  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  зависит от исходного субстрата и характеристики процесса брожения.

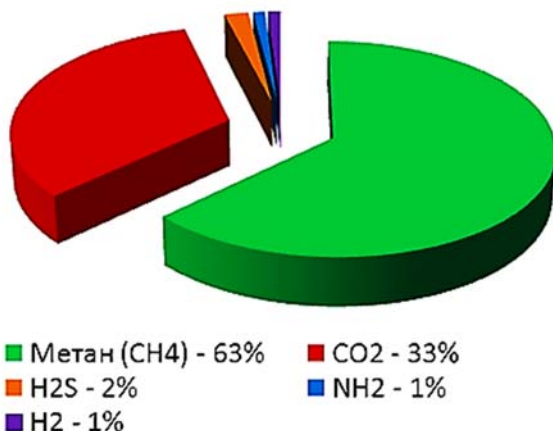


Рис. 1.1. Содержание примесей в биогазе, получаемом из различного сырья

По своему химическому составу, биогаз напоминает природный газ и может быть применен в автотракторных двигателях внутреннего сгорания. По данным Шведских и Швейцарских ученых, биогаз может использоваться в ДВС, так как по экологическим характеристикам биогаз на 75% чище дизельного топлива и на 50% чище бензина. Токсичность биогаза для человека на 60% ниже традиционного топлива. Продукты его сгорания практически не содержат канцерогенных веществ. Влияние отработавших газов двигателей, работающих на биогазе, на разрушение озонового слоя на 60–80% ниже, чем у нефтяных видов топлива [32; 35].

Однако создание ДВС, работающих на газе с такой низкой теплотой сгорания как у биогаза, представляет определенные трудности. Они обусловлены необходимостью сохранения мощности и экономичности работы базового двигателя на эксплуатационных режимах, сохранения его надежности, обеспечения устойчивости на всех режимах, минимальных конструктивных доработок базового двигателя и т. д. В этой связи, целесообразнее использовать не биогаз, а получаемый из него биометан. Для этого из биогаза удаляют CO<sub>2</sub>, аммиак, сероводород и другие примеси. Очистка биогаза от оксида углерода (CO<sub>2</sub>) может производиться различными способами. К наиболее распространенным методам относятся: промывка газов через жидкие поглотители (например, воду), вымораживание, адсорбция при низких температурах, после чего полученный газ имеет практически

однородный состав, содержащий 90,97%  $\text{CH}_4$  с теплотой сгорания 35,40 МДж·м<sup>3</sup> [32; 92].

Одной из глобальных мировых тенденций является расширение использования альтернативных видов моторных топлив.

В настоящее время наиболее реальной альтернативой нефтяным моторным топливам является газомоторное топливо: биотопливо на основе растительных масел и биомассы; природный газ – метан в сжатом и сжиженном виде; сжиженный углеродный газ [7; 8; 19; 31].

### 1.3.2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

По физическому состоянию горючие газы делятся на две группы: сжатые и сжиженные. Если критическая температура углеводородов ниже обычных температур при эксплуатации автомобилей, то их применяют в сжатом виде, а если выше-то в сжиженном виде под давлением 1,5-2,0 МПа. Основные требования, предъявляемые к газообразным топливам, приведены на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Требования, предъявляемые к газообразным топливам

Промышленность выпускает сжиженный нефтяной газ (СНГ) для автомобилей двух марок: СПБТЗ – смесь пропана и бутана техническая зимняя; СПБТЛ – смесь пропана и бутана техническая летняя.

В состав СНГ добавляют специальные вещества (одоранты), имеющие сильный запах, т.к. СНГ не имеет ни цвета ни запаха, и обнаружить их утечку сложно. Для этой цели используют этилмеркаптан  $\text{C}_2\text{H}_4\text{SH}$ , имеющий резкий неприятный запах, который ощущается уже при концентрации 0,19 г. на 1000 м<sup>3</sup> воздуха.

Эксплуатационные свойства автомобилей с газовыми двигателями, работающими на СНГ, в сравнении с автомобилями, работающими на бензине, оцениваются следующим образом:

- показатели качества до  $-5^{\circ}\text{C}$  равноценны; при более низких температурах запуск холодного двигателя затруднен;
- показатели динамичности автомобиля ухудшаются на 5...8%;
- повышается мощность и улучшается топливная экономичность двигателей, так как детонационная стойкость СНГ выше, чем у бензина, и можно форсировать двигатель по степени сжатия;
- снижается токсичность отработавших газов: по оксиду углерода – в 3...4 раза, по оксидам азота – в 1,2...2,0 раза, по углеводородам – в 1,2...1,4 раза;
- периодичность смены масла увеличивается в 2,0...2,5 раза;
- межремонтный ресурс двигателя увеличивается в 1,4...2,0 раза;
- трудоемкость технического обслуживания и ремонта возрастает на 3...5%, но эти затраты перекрываются экономией от увеличения межремонтного ресурса двигателей.

В настоящее время выпускаются газобаллонные автомобили двух типов: со специальными двигателями, предназначенными для работы на СНГ и имеющими резервную систему питания для кратковременной работы на бензине; с универсальными двигателями, допускающими работу, как на СНГ, так и на бензине (у автомобилей этой группы мощность снижается примерно на 10%).

Для сжатых газов основными компонентами являются метан  $\text{CH}_4$ , оксид углерода  $\text{CO}$  и водород  $\text{H}_2$ . Получают сжатые газы из горючих газов различного происхождения – природных, попутных нефтяных, коксовых и других. Их называют сжатыми природными газами (СПГ). Содержание метана в СПГ составляет 40–80%, критическая температура метана составляет минус  $82^{\circ}\text{C}$ , поэтому без охлаждения СПГ перевести в жидкое состояние нельзя. Существует две марки СПГ – А и Б, которые отличаются содержанием метана и азота.

Газобаллонные установки для СПГ рассчитаны на работу при давлении 19,6 МПа. Баллоны для СПГ изготавливаются толстостенными и имеют большую массу. Так, батарея из восьми 50-литровых баллонов весит более 0,5 т, то существенно снижается грузоподъемность автомобиля. Кроме этого пробег автомобиля на одной заправке при работе на СПГ в 2 раза меньше, чем на бензине. Более перспективна криогенная технология хранения СПГ в сжиженном виде.

**Глава 1. Современное состояние проблемы обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве. Цель и задачи исследования**

Метан имеет высокую детонационную стойкость, поэтому двигатели можно форсировать по степени сжатия. Метан легче воздуха, поэтому при утечках скапливается в верхней части помещения.

СПГ воспламеняется в камере сгорания при температуре 635...645°C, что значительно выше температуры воспламенения бензина. Это затрудняет пуск двигателя, особенно при низких температурах воздуха. В то же время по опасности воспламенения и пожароопасности СПГ значительно безопаснее бензина. В таблице 1.2 приведены преимущества и недостатки СПГ по сравнению с бензином [7; 8].

С учетом достоинств и недостатков автомобилей, работающих на СПГ, определена область их рационального использования – перевозки в крупных городах и прилегающих к ним районах.

Таблица 1.2

**Преимущества и недостатки СПГ**

Преимущества СПГ	Недостатки СПГ
<ul style="list-style-type: none"><li>– повышается срок службы моторного масла в 2,0...3,0 раза;</li><li>– увеличивается ресурс двигателя на 35...40% вследствие отсутствия нагара на деталях цилиндро-поршневой группы;</li><li>– увеличивается на 40% срок службы свечей зажигания;</li><li>– на 90% снижается выброс вредных веществ с отработавшими газами, особенно CO.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– цена автомобиля возрастает примерно на 27%;</li><li>– трудоемкость ТО и ТР возрастает на 7...8;</li><li>– мощность двигателя снижается на 18...20%, время разгона увеличивается на 24...30%, максимальная скорость уменьшается на 5...6%, максимальные углы преодолеваемых подъемов уменьшаются на 30...40%, эксплуатация автомобиля с прицепом затрудняется;</li><li>– дальность езды на одной заправке не превышает 200...250 км; грузоподъемность автомобиля снижается на 9...14%.</li></ul>

На рисунке 1.3 приведена классификация существующих альтернативных топлив [92]:

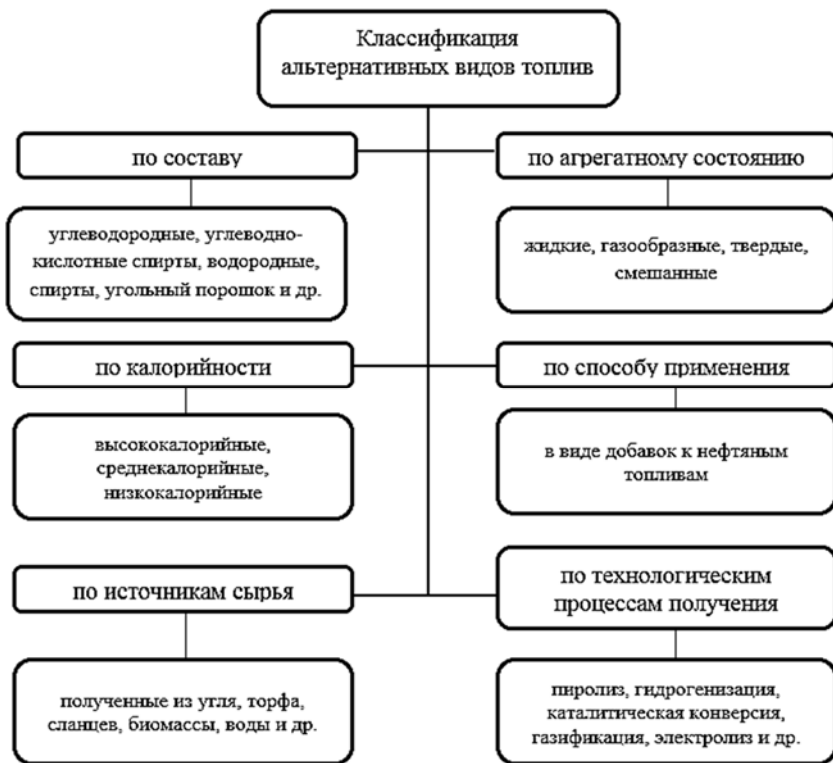


Рис. 1.3. Классификация альтернативных видов топлив

В настоящее время эксплуатируется значительное количество мобильных машин, работающих на природном газе. Это объясняется, прежде всего, тем, что современные двигатели для перевода на природный газ требуют лишь небольшие конструктивные изменения в системе питания топливом, в установке угла опережения зажигания и в системе смазки. Для обеспечения достаточного запаса газа на борту мобильной машины, он предварительно должен быть сжат (КПГ) или сжижен (СПГ). Октановое число природного газа составляет 100–110 единиц, низшая теплота сгорания – 32–36 МДж/кг.

При эксплуатации двигателя на природном газе существенно уменьшается токсичность по CO – в 4–6 раз, по  $C_nH_m$  – в 1,3–1,9 раза,

по  $\text{NO}_x$  – в 1,3 раза; в газодизеле – дымность на 50–70% меньше, чем в дизелях, содержание канцерогенных веществ уменьшается в 5–7,5 раз,  $\text{NO}_x$  остается на том же уровне, что и в дизеле, но в газодизеле больше выбросов  $\text{C}_n\text{H}_m$  и альдегидов.

Необходимость быстрого перехода на газовые альтернативные топлива связана с переоборудованием топливной аппаратуры существующих транспортных средств (ТС), которая дает возможность работать на двух видах топлива – бензине и газе (в зависимости от их наличия). Но при этом ухудшаются энергетические показатели ТС на 15–20%.

Во многих странах мира (США, Канада, Новая Зеландия, Аргентина, Нидерланды, Франция, Китай и др.) перевод транспортного средства на газовое топливо поднят до ранга государственной политики как путь к решению экологических проблем. Для этого разработаны и внедряются нормативно-законодательные базы: ценовая, налоговая, тарифная, кредитная. Такая политика дает ощутимые результаты. Так, в Нидерландах 50%, в Италии – более 20%, в Австрии – 95%, в Дании – 87% автобусного парка работает на газовом топливе [92].

Водород – наиболее экологически чистое топливо с неограниченными запасами в природе  $\text{H}_2$  входит в состав 90% компонентов, имеющих в окружающей среде, и более, чем в треть компонентов на поверхности земли. Его основные недостатки в качестве топлива при применении на транспортных средствах: высокая энергия, которая нужна для его сжатия, и очень низкая удельная энергоемкость. Есть проблемы и с хранением его на борту автомобиля, особенно в криогенных баках, но основной проблемой является высокая стоимость его получения.

Более перспективным является применение водорода на транспортных средствах в виде топливных элементов, особенно с применением протонных обменных мембран (Protonexchangemembrane). Первые автомобили с топливными элементами уже продемонстрировали фирмы Toyota, Honda, Volkswagen, BMW, Nissan, Hyundai, но для наладки их промышленного производства требуется время.

Главными преимуществами использования топлива на базе этанола: является образование меньшего количества токсичных веществ, снижение при сгорании содержания озона в воздухе. Недостатками использования этанола в качестве моторного топлива является его низкая энергоемкость, более высокая стоимость по сравнению с бензином и меньшая продолжительность пробега на одной заправке.



Применение рапсового масла в странах Европы (Германия, Франция, Бельгия, Италия, Польша) рапсу уделяется большое внимание. При сгорании топлива из рапсового масла выхлопные газы содержат на 20–25% меньше вредных веществ, а тем самым значительно уменьшая угрозу парникового эффекта.

Свойства метиловых эфиров соевого масла (МЭСМ) отличаются от аналогичных свойств дизельного топлива (меньшее значение  $H_u$ , большая плотность, коэффициент поверхностного натяжения и др.). Поэтому для эффективного использования МЭСМ в качестве биотоплива необходимо изменить некоторые конструктивные и регулировочные параметры дизеля [92].

Биогаз представляет собой высококачественное альтернативное топливо. Так как биогаз состоит в основном из метана, его легко адаптировать ко всем существующим процессам, где используется природный газ. Биогаз относится к наиболее экологически чистым видам моторного топлива. По сравнению с другими видами нефтяного топлива биогаз при работе двигателей дает наименьшее количество выбросов двуокиси углерода и твердых частиц. Известно, что двигатель, работающий на газовом топливе, работает тише и меньше вибрирует, чем нефтяной двигатель, что способствует улучшению условий труда механизаторов и обеспечению экологической безопасности, снижает риск пожаров и взрывоопасности [21].

По данным шведских и швейцарских ученых, биогаз на 75% экологичнее дизельного топлива и на 50% бензина.

Перед применением в двигателях мобильных машин биогаз лучше подвергать обогащению до уровня метана 95%, очистке, сушке и компримировать. Энергетический эквивалент биогаза составляет 9–10 (кВт·ч/м<sup>3</sup>). В таблицах 1.3 и 1.4 приведены свойства биогаза и других альтернативных моторных топлив, по сравнению с бензином.

Физико-химические и экологические свойства обогащенного, очищенного биогаза и природного газа практически идентичны, поэтому для них может применяться одна и та же топливная аппаратура. Однако существует отличие между природным газом и биогазом: при сгорании последнего в атмосферу выбрасывается такое же количество CO<sub>2</sub>, которое было из него удалено при переработке. Биогаз считается абсолютно сбалансированным биологическим топливом [92].

Таблица 1.3

## Свойства альтернативных видов топлива

Показатели	Бензин	Природный газ	Биогаз	Этанол	Метанол	Рапсовое масло
Низшая теплота сгорания, $H_u$ , кДж/кг	44000	33802,6	29850	41900	21500	37100
Высшая теплота сгорания, $H_o$ , кДж/м <sup>3</sup>	34500–35600	32186	32300	–	26230	39500
Границы зажигания в смеси с воздухом по коэффициенту избытка воздуха	0,29–1,18	–	0,65–1,8	0,9–1,1	0,7–1,0	–
Температура самовоспламенения, °С	467–527	40–680	685–747	423	464	329
Теоретически необходимое количество воздуха для возгорания топлива, м <sup>3</sup> /кг	12,35	9,52	–	6,53	6,45	12,6
Температура кипения, °С	33–168	–	–161,3	365	338	–
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	700–760	0,717	0,71–0,74	0,75	0,791	0,877
Октановое число	7-98	110	126	125	125	

Таблица 1.4

## Свойства биогаза и составляющих смеси газов (СНГ)

Показатель	Метан	Состав СНГ				Бензин
		Этан	Пропан	Бутан (норм.)	Пентан	
Химическая формула	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Смесь
Молекулярная масса, кг/моль	16,0	30,0	44,0	5,0	72,0	114,0
Плотность газовой фазы при нормальных условиях (0°С, 760 мм рт. ст.) кг/м <sup>3</sup>	0,717	1,36	2,01	2,70	3,22	–
Относительная плотность газовой фазы (по воздуху)	0,554	1,048	1,562	2,091	2,488	
Плотность жидкости при нормальных условиях (0°С, 760 мм рт. ст.) кг/м <sup>3</sup>	–	446	509	582	625	720–740
Критическая температура	–82,1	32,3	96,8	152,0	196,0	–
Низшая теплота сгорания: объемная, МДж/м <sup>3</sup> массовая, МДж/кг	33,7	60,0	85,5	111,5	137,5	43,9
	48,7	47,0	45,7	45,4	45,1	
Стехиометрический коэффициент: объемный, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> массовый, кг/кг	9,52	16,7	23,9	30,95	38,1	–
	17,2	16,05	15,7	15,35	15,3	14,5
Низшая теплотворность газовой воздушной смеси ( $\alpha=1,0$ ), МДж/м <sup>3</sup>	3,22	3,40	3,46	3,41	3,52	–

Октановое число (по моторному методу)	110	108	105	94	70	72–84
Цетановое число	10	–	16	25	30	–
Температура воспламенения (при нормальном атмосферном давлении), °С	640–680	508–605	510–580	475–550	475–510	270–330

Лидером по использованию биогаза является Китай, который в 70-е годы XX в. совершил «большой биогазовый скачок», в результате которого более 60% всего автопарка страны, в том числе в сельской местности, работает на биогазе. Производство биогазовых двигателей в Китае к концу 80-х годов XX в. было засекречено. В настоящее время Китай экспортирует их более чем в 20 стран мира.

В условиях отдаленных сельских районов, возможно, использование биогаза, как альтернативного топлива для заправки авто-тракторной техники, для сжигания в котлах отопления помещений, газовых конфорках подогрева воды.

Однако решая проблему обеспечения экологической безопасности в местах получения биогаза на животноводческих комплексах, при использовании в качестве моторного топлива, необходимо предусмотреть систему очистки его от вредных компонентов. При этом использование фильтров очистки биогаза для решения вопросов обеспечения экологической безопасности является наиболее целесообразным с экономической точки зрения.

### **1.4. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА В ФИЛЬТРАХ ОЧИСТКИ ГАЗОВ**

В 2001 году С.А. Молчанов впервые установил, что силикагель способен поглощать из природного газа вредные примеси. Для очистки был предложен комбинированный слой силикагеля и цеолита и определены химические закономерности процесса очистки [81].

В исследованиях В.И. Земскова и Г.М. Харченко выявлена зависимость коэффициента проницаемости фильтровальной перегородки из цеолита от размеров частиц (эквивалентного диаметра). С увеличением размеров частиц цеолита повышается и значение коэффициента проницаемости [60; 122].

В работе [82] показана целесообразность применения в процессах очистки газов от сернистых соединений модифицированным клиптонтилолит в комбинации с синтетическими цеолитами. Установлено, что зависимость высоты работающего слоя выражается степенным уравнением. Получено уравнение для расчета минимальной высоты слоя адсорбента в зависимости от режимных параметров процесса очистки.

Исследователями О.А. Калиминовой и др., сообщается о применении на Оренбургском газоперерабатывающем заводе двухстадийной очистки природного газа от сернистых соединений [62].

Исследователями Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова Е.В. Каратаевой и В.В. Аньшаковой обоснованы возможности применения природных цеолитов месторождения Хонгуруу в качестве сорбентов для очистки нефти и сточных вод от нефтепродуктов и для эффективной очистки нефтесодержащих вод с химической точки зрения провели исследования [63; 64].

Большое внимание уделено исследователями Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова вопросам каталитической очистки отработанных газов с дизельными двигателями, в частности использованию в качестве фильтрующих элементов размола руды природных цеолитов [77–80].

Цеолиты – кристаллические «нано» пористые твердые тела с диаметром пор приблизительно 1 нм, являются хорошими сорбентами для многих органических и неорганических веществ, молекулы которых меньше диаметра пор цеолитов. Высокие молекулярно-ситовые свойства позволяют использовать их в различных сферах деятельности человека: в очистке воды, производстве минеральных удобрений, земледелии, животноводстве и птицеводстве, в качестве дезодоранта животноводческих помещений, при производстве цемента [66; 67].

Цеолиты являются природными минералами со структурой, напоминающей тонкопористую губку, в полостях которой размещены слабо связанные с основным алюмосиликатным каркасом катионы Ca, Mg, Na, и K компенсирующие его отрицательный заряд. Эти катионы свободно обмениваются с катионами внешней среды (вода, почва) при комнатной температуре. Часть молекул воды также может удаляться из цеолита при нагреве в определенном диапазоне температур (200°C) без разрушения его структуры и свободно поглощаться при соответствующих условиях. Могут адсорбироваться более крупным по размерам, молекулы газа и органические соединения. При этом цеолит, проявляя молекулярно-ситовый эффект, поглощает только те молекулы, которые по размерам и конфигурации соответствуют размерам окон алюмокислотного каркаса цеолита [63; 64].

Цеолиты являются распространенным и дешевым минеральным сырьем, обладают уникальным спектром физико-химических, адсорбционных свойств.

Месторождения цеолитов распространены в США, Японии, КНР, Турции, Грузии, Армении, Греции, Украине и т. д., а в России – в Приморье, Якутии, Сибири, Забайкалье, на Сахалине, Камчатке.

В Сунтарском районе Республики Саха (Якутия) имеются большие запасы цеолитов. Хонгуриновское месторождение находится в 35 км от ближайшего населенного пункта с. Кемпендэй. Сложная транспортная развязка предопределяет сезонную разработку цеолитовых пород. На месторождении Хонгуруу завершены разведочные работы и утверждены запасы 11462 тыс. тонн. Оно подготовлено к промышленному освоению и разрабатывается дешевым открытым способом. В практике добычи цеолитового сырья участки месторождений с запасами 5 млн тонн разведуют с учетом эксплуатации 25 лет. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что Хонгуриновское цеолитовое месторождение может обеспечить нужды Республики Саха (Якутия) в цеолитовом сырье в течение многих столетий.

Сунтарский цеолит – «Хонгурин», в данное время применяется в качестве биодобавки при вскармливании сельскохозяйственных животных, в производстве закладочной смеси подземных рудников АК «АЛРОСА», очистке воды, применение в материалах дорожно-строительного назначения и проведение научно-практических исследований возможных вариантов использования данного минерала.

Обзор литературы показывает, что цеолит Хонгуриновского месторождения (Хонгурин) не уступает по макро- и микроэлементному составу, физико-химическим свойствам цеолитам других месторождений России и СНГ, которые широко используются в практике.

Хонгурин в качестве фильтрующего материала позволяет увеличить производительность на 30–35%; его грязеемкость возрастает практически на 80–100%; емкость в отношении остаточного алюминия в 1,5–5,0 раз выше по сравнению с кварцевым песком; применение Хонгурина в качестве фильтрующей загрузки имеет преимущества по всем технологическим параметрам, за исключением показателей измельчаемости и истираемости [66–68].

Цеолит Якутского месторождения Хонгуруу – природный минерал, основным компонентом которого является клиноптилолит (содержание 80%), общая кристаллохимическая формула которого  $(\text{Na}, \text{K}) \cdot (\text{Al}_6 \text{Si}_{30} \text{O}_{72}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ . Хонгурин благодаря каркасной алюмосиликатной структуре проявляет высокие адсорбционные свойства. Частицы цеолита аморфны и изотропны, их форма приближается к сферической, диаметр частиц составляет 1,6...4 мкм. В порошке отдельные частицы образуют ассоциаты от 10 до 100 мкм. Цеолиты относятся к классу нанодисперсных наполнителей за счет наличия нанопор (3,5–4,1 нм), являющихся функциональными структурными элементами данного модификатора [83–85].

Цеолитовый туф месторождения «Хонгуруу» Сунтарского района Республики Саха (Якутия) – представляет собой измельченную горную породу светло-зеленого цвета, состоящую из минералов клиноптилолит-гейландитового ряда (70–90%), кварца, полевых шпатов, обломков кремнистых пород, биотита, кальцита, вулканического стекла и глинистых минералов. Цеолит Хонгуринского месторождения назван – Хонгурин.

Цеолитовое сырье месторождения Хонгуруу в отличие от сырья других аналогичных месторождений СНГ и России характеризуется исключительно высоким содержанием минералов клиноптилолит-гейландитового ряда (содержание цеолитов в породе 70–98%).

В таблицах 1.5–1.7 приведены химический состав цеолитового сырья, месторождения Хонгуруу; физико-химические свойства природных цеолитов [66-68] и физико-механические и химические свойства цеолита «Сокирнит» [58; 60; 122].

Таблица 1.5

Химический состав цеолитового сырья, месторождения Хонгуруу

Химический состав, %								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+ Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	примеси
64,11	12,16	1,08	2,62	1,88	3,30	0,13	8,89	4,26

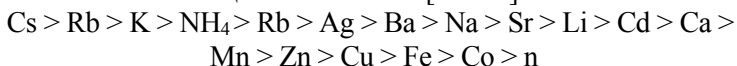
По своей кристаллической структуре цеолиты состоят из алюмокремнийкислого каркаса, который содержит пустоты и каналы, где размещены катионы щелочно-земельных металлов и молекулы воды. После удаления воды в процессе осушения цеолит представляет собой микропористую кристаллическую «губку» с содержанием пор до 50% от объема каркаса. Именно эта характеристика определяет актуальность и необходимость применения цеолитовой продукции в различных отраслях производства.

В структуре клиноптилолита имеются четыре типа канала аналитического сечения. Каналы вдоль оси цеолитов размером в 0,705 x 0,425 и 0,46 x 0,395 нм образованы соответственно 10- и 8-членными кольцами из Al-Si тетраэдров. Они пересекаются каналами образованными 8-членными кольцами с эффективным диаметром 0,54 x 0,39 и 0,52 x 0,39 нм. В структуре гейландита имеются еще 6-, 5-, 4-членные кольца соответственно с меньшими размерами окон [66–68].



Цеолиты обладают избирательной адсорбцией веществ с критическим диаметром молекул не более 0,5 нм. Для различных типов цеолитов эффективный диаметр окон составляет 0,3–0,9 нм (например, клиноптилолит 0,44–0,5 нм) [66–68].

Изучение ионообменных свойств высококремнистых цеолитов клиноптилолит–гейландитового ряда, к которым принадлежат цеолиты месторождения Хонгуруу, выявило закономерность в селективности поглощения катионов [66–68]:



Данный перечень катионов показывает возможность получения для тех или иных целей модифицированные формы цеолитов самого различного состава. При этом в зависимости от ионного радиуса катионов, могут существенно варьировать размеры полостей (каналов) и тем самым менять в широких пределах адсорбционные и молекулярно – ситовые свойства.

Большинство из приведенного выше ряда – это катионы токсичных тяжелых металлов, которые, попадая в окружающую среду в повышенных дозах, создают опасную экологическую ситуацию. К ним относятся Pb, Hg, Cd, Mn, Zn, Cu, CO, Ni. Сюда же можно отнести и радионуклиды: Cs, и Si. Некоторые из тяжелых металлов, а именно: Mn, Zn, Cu, Fe, Co, Mo – являются микроэлементами, необходимыми для нормального функционирования организма людей, животных, а также для роста развития растений, если их содержание в пище, питьевой воде, почве соответствует предельно допустимым концентрациям (ПДК). Также катионы щелочноземельных элементов Ca и Mg, щелочных металлов Na и K с соответствующими анионами образуют макроминеральный состав воды и оцениваются в качестве физиологически необходимых элементов для организма человека.

В силу вышеуказанных факторов природные цеолиты могут служить, в зависимости от поставленных задач, и весьма высокоэффективными поглотителями катионов тяжелых металлов из почвы, питьевых, промышленных и сточных вод, носителями макро- и микроэлементов питания растений, адсорбентами для воды, различных газов. Эти уникальные свойства лежат в основе их широкого практического применения во всем мире в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства и в целях охраны окружающей среды, в частности, в технологии очистки питьевой воды.

Для определения качества фильтрующих материалов особое значение придается их плотности, межзерновой пористости, строению поверхности зерен и подбору оптимального гранулометрического состава [19; 60; 122].

Таблица 1.6

## Физико-химические свойства природных цеолитов [66–68]

Материал	Плотность г/см <sup>3</sup>	Насыпная объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Измельчаемость, %	Истираемость, %	Коэффициент формы зерен	Коэффициент фильтрации*	Коэффициент проницаемости*
Сокирницы	2,1–2,2	950–1080	56,3–60,4	0,6–1,9	0,3–0,7	–	–	–
Тедзами	2,0–2,2	800–900	50–62	–	–	–	–	–
Пегасское (Хорунжина, Поздняковский, 1994)	2,25	1150	51,7–56,8	1,5	0,06	2,73	–	–
Хонгурин								
Отчет НИИ Химии Горьковского ун-та, (1990)	2,2	0,87	52–57	2,1	0,49	–	–	–
Хорунжина, Поздняковский, (1994)	2,08	0,98	56,3–60,4	2,2	0,57	2,75	–	–
Герасимова, (2003)	2,41	1,68	31	–	0,40	–	–	–

Цеолитовый фильтр задерживает молекулы  $\text{CO}_2$ , имеющие размер сопоставимый с размерами микропор цеолита, например в цеолите «Сокирнит» микропоры имеют размер 0,4 нм, а размер молекулы  $\text{CO}_2$  равен 0,31 нм. Размеры молекулы  $\text{CH}_4$  показаны на рисунке 1.4, они менее 200 ppm, поэтому свободно будут проходить через цеолитовый фильтр, что и требуется. То есть на выходе из фильтра будет очищенный метан [60].

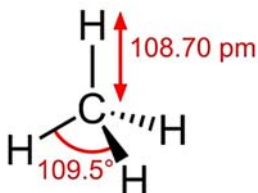


Рис. 1.4. Схема молекулы  $\text{CH}_4$

Таблица 1.7

Физико-механические и химические свойства  
цеолита «Сокирнит» [60]

Вид	Значение
Внешний вид (appearance)	гранулы светло-серого цвета (palegrey)
Запах (odour)	нет (odourless)
Коэффициент пористости (porosity)	0,38–0,46
Плотность (density)	2,2–2,3 г/см <sup>3</sup>
Механическая прочность (mechanical strength)	
а) истираемость (grateness)	не более 0,32–0,5%
б) измельчаемость (detachability)	не более 0,62–1,86%
Твёрдость по Моосу (Mohs hardness)	3,5–4,0
Объёмная масса (Volumeweight)	1040–1080 кг/м <sup>3</sup>
Эффективный диаметр пор	0,4 nm (4 angstrom, 4Å)
Значение pH (pH-value)	6,8–7,2
Адсорбционная ёмкость по воде (waterabsorbing capacity)	34–38%
Площадь макропор (macropore)	18–21 м <sup>2</sup> /г
Площадь микропор (micropore)	1–2 м <sup>2</sup> /г
Температура дегидратации (dehydration temperature)	270–300°C
Температура размягчения (softening temperature)	1 260°C
Температура плавления (melting temperature)	1 340°C

**Глава 1. Современное состояние проблемы обеспечения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве. Цель и задачи исследования**

Химическая и реактивная устойчивость	
прирост окисляемости	не более 0,07–0,42 мг/дм <sup>3</sup>
прирост сухого остатка	не более 9,0–11,0 мг/дм <sup>3</sup>
прирост кремнекислоты	не более 0,6–3,4 мг/дм <sup>3</sup>
Термическая устойчивость (thermicstability)	выше 450°С
Растворимость в воде	–
Опасное разложение	нет
Опасные полимеризации	нет

Состав биогаза и необходимость удаления вредных примесей в зависимости от способа его использования приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8

Состав биогаза и необходимость удаления вредных компонентов в зависимости от способа использования

Способ использования биогаза	Необходимость удаления (+) компонентов			
	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>
Взвешенные частицы	+	+	–	–
Бытовые газовые плиты	+	+	–	–
Стационарные газовые двигатели	+	частичное удаление	–	–
Топливо для автомобильных двигателей	+	+	+	+
Подпитка сети природного газа	+	+	+	

Результаты сравнения размеров молекул газов и пор цеолита приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9

Сравнение размеров молекул газов и цеолита

Размеры	Размеры пор цеолита	Размеры молекул, нм				
		H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	NH <sub>3</sub>
Единица концентрации в миллионных долях (ppm)	300–500	7,2	0,31	29	17,5	28,2
Размеры молекул / пор	0,3–0,5	10,2	0,57	0,276	20,38	19,96

Таким образом, была выявлена возможность использования природного цеолита Хонгуринаского месторождения в качестве фильтрующего элемента в фильтре очистки биогаза для обеспечения экологической безопасности.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ БИОГАЗА**

Методический комплекс исследований (табл. 2.1) был представлен в виде двух частей:

– параметрическим комплексом, включающим разработку технологической схемы линии очистки и подачи биогаза в топливную систему двигателя; обоснование конструктивных параметров фильтра и фильтрующего элемента;

– экспериментальным комплексом, который включал: обоснование параметров фильтровальной перегородки; для обеспечения требуемых свойств биогаза; исследование зависимости свойств биогаза от параметров процесса фильтрации; лабораторный анализ показателей биогаза.

Формирование показателей качества биогаза зависит от специфических особенностей процесса и разработанного оборудования. Разработка оборудования (эффективных элементов) очистки биогаза с качественными показателями работы, отвечающими требованиям ГОСТ и включала в себя несколько технологических подходов, а именно, разработку принципиальной схемы и конструкции оборудования для очистки биогаза с последующим контролем состава моторного топлива после очистки.

Исследования, проведенные по методике, представленной в таблице 2.1, позволили создать иерархическую систему исследования, включающую отдельные подсистемы, в качестве которых выбирались показатели (характеристики), подводящие их к общему знаменателю.

Таблица 2.1

## Методический комплекс проведения исследований

Методический комплекс						
Параметрический комплекс			Комплекс качественных показателей моторного топлива			
Технологическая схема линии очистки и подачи биогаза в топливную систему двигателя	Конструктивные параметры фильтра	Параметры фильтровального элемента	Свойства биогаза	Зависимость показателей качества от параметрического комплекса	Лабораторный анализ показателей качества	
	Исследование рабочего процесса фильтров					
Анализ и обоснование параметров рабочего процесса подачи биогаза в топливную систему 1. Выявление эксплуатационных факторов. Разработка математической модели 2. Выявление качественных факторов	Теоретическое	Экспериментальное				
	Разработка математической модели очистки биогаза фильтром с цеолитом $\Delta P = f(v_{\text{вых}}, v_{\text{вх}}, \mu, H, Q)$ $E = f(C_{\text{п}}, C_{\text{д}})$	Исследование зависимостей $P = f(Q, \xi)$ $\Delta P = f(d, Q, V_{\text{нас}}, k_0, \xi, d_{\text{н}}, d_{\text{вн}})$ $\xi = f(V_{\text{пор}}, V_{\text{ц}})$ $\xi = f(d_{\text{н}})$ $E = f(d_{\text{ф}})$ $E = f(H/d_{\text{ф}})$	Исследование зависимости $\text{CH}_4 = f(c_1, c_2, c_3, c_4)$	Исследование зависимости $y = \theta_0 + \sum_{i=1}^k \theta_i x_i + \sum_{i,j=1}^k \theta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \theta_{ij} x_i^2$ $E = f(H/D, \xi, m)$	Определение параметров $C = f(\text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{O}, \text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{NH}_3, \text{воздух}, \text{H}_2\text{O})$	
	Теория фильтрования биогаза, математическая модель процесса очистки биогаза $\Delta P = P_{\text{н}} - P_{\text{в}} = \frac{\mu \cdot d^2 \cdot Q}{V_{\text{нас}} \cdot k_0} \left\{ \xi_0 \ln \left( \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \right) - (\xi_0 - 1) \left[ 1 - \frac{d_{\text{вн}}}{(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})} \ln \left( \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \right) \right] \right\}$ Метод априорного ранжирования $W = f(S, m, k)$			$\text{CH}_4 = f(H/d_{\text{ф}})$		



Примечание: где  $v_{\text{вых}}$  – скорость газа на выходе с адсорбера,  $\text{мс}^{-1}$ ;  $v_{\text{вх}}$  – скорость газа на входе в адсорбер,  $\text{мс}^{-1}$ ;  $v_n$  – скорость потока в адсорбере,  $\text{мс}^{-1}$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость газа,  $\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $P$  – давление, Па;  $P_n$  – давление на выходе, Па;  $P_{\text{в}}$  – давление на входе, Па;  $d_n$  – наружный радиус адсорбера, м;  $d_{\text{в}}$  – внутренний радиус адсорбера, м;  $d_{\text{ц}}$  – диаметр фракций цеолита, мм;  $d_{\text{ф}}$  – диаметр фильтра, м;  $H_{\text{в}}$  – максимальная высота адсорбера, м;  $H_0$  – начальная высота адсорбера, м;  $S$  – сумма квадратов отклонений;  $z$  – количество экспертов;  $n$  – число факторов;  $c_1$  – концентрация после очистки с древесной стружкой, %;  $c_2$  – концентрация после очистки с активированным углем, %;  $c_3$  – концентрация после очистки с металлической стружкой, %;  $c_4$  – концентрация после очистки с природным цеолитом, %;  $V_{\text{пор}}$  – объем пор,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{ц}}$  – суммарный объем частиц цеолита,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{нас}}$  – насыпной объем цеолита,  $\text{м}^3$ ;  $k$  – коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ ;  $k_0$  – требуемый коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ ;  $Q$  – расход топлива,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\xi$  – коэффициента порозности слоя фильтрующего элемента;  $\xi_0$  – требуемая степень порозности слоя фильтрующего элемента;  $m$  – масса цеолита, гр;  $E$  – степень очистки газов, %;  $C_{\text{д}}$  – содержание метана в биогазе до очистки;  $C_{\text{п}}$  – содержание метана в биогазе после очистки.

Методика исследований процесса очистки биогаза в вертикальных фильтрах (таблица 2.1) является фундаментом многоступенчатой и многозвенной структуры технологической схемы линии очистки и подачи биогаза в топливную систему двигателя мобильной машины, которая включала:

1. Обоснование и разработку вертикального цеолитового фильтра очистки биогаза:

– разработку математической модели процесса очистки биогаза в вертикальных фильтрах на основе теории фильтрации;

– исследование свойств цеолита, конструктивных параметров фильтра и их влияния на процесс очистки;

– разработку фильтра для очистки биогаза;

– исследование качественных показателей очищенного биогаза.

2. Разработку математических моделей: производительности фильтра  $W = f(S, m, k)$ , перепада давления при очистке  $\Delta P = f(d, Q, V_{нас}, k_0, \xi, d_n, d_{вн})$ , фактора качественной очистки адсорбентом  $CH_4 = f(c_1, c_2, c_3, c_4)$ , эффективности очистки фильтра  $E = f(H/D, \xi, m)$ .

3. Определение параметров фильтровальной перегородки:

– зависимостей коэффициента порозности от размерных характеристик фильтрующего материала  $\xi = f(d_{ц})$ ;

– зависимости проницаемости фильтровальной перегородки от размерных характеристик фильтрующего материала  $k = f(d, \xi)$ .

4. Определение свойств биогаза:

– зависимости периода выдержки сбраживаемого навоза, температуры процесса (мезофильный, термофильный, психрофильный), от влажности навоза, частоты перемешивания субстрата в метантенке.

Комплекс качественных показателей очищенного биогаза включал:

– исследование зависимости качества на выходе биогаза из фильтра и эквивалентного диаметра частиц цеолита.

5. Лабораторный анализ качественных показателей очищенного биогаза предусматривает определение следующих показателей:

– массовой доли вредных примесей ( $II$ );

– эквивалентного диаметра частиц фильтрующего материала-цеолита ( $d_{ц}$ ), коэффициента проницаемости цеолитовой фильтровальной перегородки ( $k$ ), коэффициента порозности  $\xi$ .



## 2.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ БИОГАЗА

Биогаз относится к суспензиям с газообразными дисперсной и дисперсионной фаз. В работах В.А. Жужжикова, Н.Н. Малахова, С.Т. Панфилова, А.В. Логинова [54; 55] шламовое и закупорочное фильтрование – две основные группы, на которые разделяют процессы фильтрования. В процессах первой группы фильтрование происходит на шлеме, отложившемся поверх фильтрующего материала. Устья пор фильтрующего материала при этом перекрываются частицами дисперсной фазы, и их слой нарастает в процессе фильтрования. По мере его нарастания увеличивается сопротивление фильтра. Наличие в фильтруемой суспензии коагулирующих и пептирующих веществ может во много раз увеличить сопротивление осадка. Шламовое фильтрование реализуется для маловязких жидкостей, содержащих большое количество взвешенных частиц. В этом случае слой шлама на поверхности фильтрующего материала быстро растет. В начале процесса, когда слой фильтрата невелик, наблюдается проскок частиц через фильтр. Этот начальный период фильтрования называют периодом обдержки фильтра. Размеры пор фильтрующего материала для шламового фильтрования выбирают мелкими, чтобы частицы не проникали в них и не закупоривали фильтр. Закупорочное фильтрование реализуется при малом размере частиц и их небольшом количестве. В связи с малым количеством частиц шлам на поверхности фильтрующего материала не образуется в течение длительного времени. В этом случае единственно эффективным является задерживание частиц внутри пор фильтрующего материала. Зачастую реализуется комбинированное протекание процесса фильтрования (шламовое и закупорочное). Более того, шламовое и закупорочное фильтрование можно рассматривать как крайние случаи общего комбинированного процесса. Обзор исследований с образованием осадка расширяет возможности анализа, поэтому мы остановились на анализе таких исследований. При анализе процесса фильтрования необходимо учитывать действие различных факторов, которые подразделяют на макрофакторы и микрофакторы. Первые характеризуются тем, что их можно без затруднений измерить с необходимой точностью; к ним относятся плотность, температура, давление, время, вязкость, концентрация, поверхность перегородки, скорости фильтрования и оседания частиц, их масса, объем фильтрата. Вторые отличаются тем, что непосредственное измерение их с необходимой точностью за-

труднительно; к ним принадлежат, в частности, активная пористость, характерный размер, форма и удельная поверхность частиц или пор, активная толщина двойного электрического слоя, степень пептизации или агрегирования частиц. Следует иметь в виду, что даже небольшие изменения в интенсивности микрофакторов могут привести к изменению сопротивлений осадка в несколько раз.

При образовании осадка на его удельное сопротивление значительно влияют пористость, извилистость пор и характеристики твердых частиц. Сопротивление фильтровальной перегородки  $R_{фп}$  и разность давлений до и после неё  $\Delta P$  учитывается в основном общепринятом уравнении фильтрования с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке уравнением [72; 81; 82]:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \Delta P / [\mu (\frac{r_0 x_0 V}{S} + R_{фп})] \quad (2.1)$$

где  $V$  – объем фильтрата, м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поверхности фильтрования, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время процесса, с;

$\Delta P$  – разность давлений до и после фильтровальной перегородки, Па;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$r_0$  – удельное объемное сопротивление осадка, м<sup>-2</sup>;

$x_0$  – отношение объема осадка к объему фильтрата;

$R_{фп}$  – сопротивление фильтровальной перегородки, м<sup>-1</sup>.

Влияние пористости осадка, извилистости пор, размера, удельной поверхности и сферичности частиц обычно учитывается в удельном сопротивлении осадка, которое является общим эмпирическим параметром фильтрования. Влияние перераспределения давления, граничного сопротивления, миграции и оседания частиц, их пептизации и агрегирования, а также других факторов не учитывается в основном уравнении фильтрования. При достаточно интенсивном действии таких факторов возникает несоответствие между уравнением и практическими данными.

Каждое уравнение с образованием осадка отражает одновременно общую и частную особенности процесса. Общая особенность состоит в том, что скорость процесса прямо пропорциональна движущей силе (разности давлений) и обратно пропорциональна сопротивлению, а частная особенность определяется характером сопротивления. При проектировании фильтровальных установок необходимо ориентироваться на результаты экспериментального исследования частного процесса в соответствующих

условиях. Во многих работах отмечается вероятностный, а не детерминистический характер процессов фильтрования и повышенная сложность их по сравнению с рядом других процессов химической техники, а также затруднения, связанные с развитием и усовершенствованием теории фильтрования; большое несоответствие между математическим описанием и практическим осуществлением процессов фильтрования. Во многих работах отмечается расхождение между теорией и практикой процессов разделения суспензий на фильтре при масштабировании; несовершенство теоретических моделей для решения практических задач фильтрования; недостаточное внимание исследованию процессов разделения неоднородных систем по сравнению с другими областями техники.

В области фильтрования применяются как физические модели в виде установок небольшого масштаба, так и математические модели. Основная общая особенность моделей обоих видов состоит в том, что путем изменения условий на установке небольшого масштаба или в математической модели можно определить направление и степень влияния отдельных факторов на течение процесса и отыскать оптимальные условия его проведения. Математическое описание, как основа математического моделирования применительно к процессам фильтрования с образованием осадка, отличается специфическими сложностями в связи с трудно регулируемым влиянием микрофакторов. Поэтому особое значение приобретает полнота математического описания, поскольку даже небольшие изменения в интенсивности микрофакторов могут изменить в несколько раз величину параметра оптимизации.

В общем случае в математическое описание входят макро- и микрофакторы, причем они отражают свойства фильтрата, условия фильтрования и конструкцию фильтра.

Математическое описание, в которое входят только макрофакторы, состоит в общем случае из системы алгебраических и дифференциальных уравнений, включающих в себя лишь величины, измеримые с достаточной точностью. Характер таких величин разнообразен. Они могут быть переменными процесса (время, объем, скорость, разность давлений); параметрами процесса, находимыми статистическим путем и объединяющими действие микрофакторов (удельное сопротивление осадка, сопротивление перегородки); коэффициентами пропорциональности и показателями степени в эмпирических соотношениях.

Такое математическое описание после составления алгоритма и подтверждения адекватности модели позволяет путем расчета

различных вариантов процесса определить практически точное экстремальное значение параметра оптимизации, характеризующего фильтровальную установку. Эта математическая модель применима при проектировании. В каждом отдельном случае вопрос о допустимости переноса данной математической модели на сходные фильтраты, условия фильтрации необходимо решать после экспериментального исследования.

Осложнения, связанные с использованием микрофакторов в математическом описании, обусловлены, в первую очередь, затруднениями в точном измерении их действительной величины, а это влияет на установление точных зависимостей определяемого параметра данного микрофактора.

В исследованиях Д.Е. Шкоробада [127] указано, что в настоящее время существует большое несоответствие между сложными математическими описаниями и применяемыми на практике уравнениями. Приведено математическое описание процесса фильтрации – в наиболее общей форме, состоящее из системы уравнений в частных производных и включающее в себя векторы скорости твердых частиц.

Для описания фильтрационного движения (рис. 2.1) система уравнений Навье-Стокса в проекциях на оси  $X$  и  $Y$  и уравнение неразрывности течения принимают вид [127]:

$$\begin{cases} \mu \left( \frac{d^2 v_x}{dX^2} + \frac{d^2 v_x}{dY^2} + \frac{d^2 v_x}{dY^2} \right) = \frac{dP}{dX} \\ \mu \left( \frac{d^2 v_y}{dX^2} + \frac{d^2 v_y}{dY^2} + \frac{d^2 v_y}{dY^2} \right) = \frac{dP}{dY} \\ \frac{dv_x}{dX} + \frac{dv_y}{dY} = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$$v_x = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h v_x dZ = \frac{h^2}{3\mu} * \frac{dP}{dX}; \quad v_y = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h v_y dZ = \frac{h^2}{3\mu} * \frac{dP}{dY} \quad (2.3)$$

$$v_{x,max} = - \frac{h^2}{2\mu} * \frac{dP}{dX}; \quad v_{y,max} = - \frac{h^2}{2\mu} * \frac{dP}{dY}; \quad (2.4)$$

При граничных условиях  $v_x = v_y = 0$  и  $Z = \pm h$

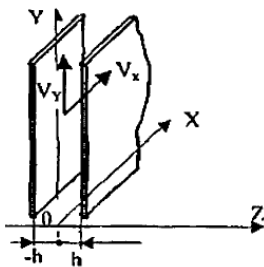


Рис. 2.1. Описание фильтрационного движения

Основным результатом полученных выражений является констатация пропорциональной зависимости между скоростью течения и перепадом давлений на пористом материале, а также зависимости скорости течения от квадрата диаметра капилляра или квадрата ширины щели.

По выражению Дарси обобщением экспериментальных данных о гидравлических сопротивлениях пористых тел [1; 10; 53; 74; 122]:

$$\Delta P = \begin{cases} k * \frac{L}{d} * \frac{\rho * v^2}{2} & \text{— для трубопроводов} \\ v * \frac{k * H * \mu}{d^2} & \text{— для пористых фильтров} \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $v$  – скорость фильтрационного течения жидкости, м/с;  
 $d$  – средний диаметр пор фильтра, м.

Для пористых фильтров его выражают в виде [53, 122]:

$$k = \rho \xi g / \mu, \quad (2.6)$$

где  $\xi$  – пористость фильтра (отношение объема пор к общему его объему).

Связь коэффициента фильтрования Дарси (коэффициента сопротивления  $k$ ) и числа Рейнольдса в слое определяется уравнением Эргана [53, 112]:

$$k = 300[(1 - \xi)/Re] + 3,5 \quad (2.7)$$

где  $k$  – безразмерная величина.

В предположении, что фильтрующая перегородка имеет параллельные капилляры постоянной длины и постоянного сечения [53; 112]:

$$(\xi dV)/z = 2\pi r L dr, \quad (2.8)$$

где  $\xi$  – коэффициент пористости;

$z$  – число капилляров;

$r$  – радиус капилляра, м;

$L$  – длина капилляра, м.

Решение этого уравнения [112]:

$$V = [(\pi Lz)/\xi] r_0^2 = (f_K Lz)/\xi, \quad (2.9)$$

где  $f_K$  – площадь капилляра, м<sup>2</sup>.

Из уравнения (2.9) следует, что количество жидкости (газа), профильтрованной до заполнения всех видов капилляров осадком, пропорционально первоначальному объему капилляров  $f_K Lz$  и обратно пропорционально содержанию в жидкости осадка. Величина  $V$  не зависит от вязкости фильтрата. Указанная зависимость позволяет определять время работы фильтра до полного заполнения пор, то есть периодичность очистки. Вышесказанное утверждение дает качественное представление о процессе фильтрования без образования осадка.

Максимальное количество фильтрата  $(Q\tau)_{max} = Q\tau_{max}$ , которое может быть пропущено через фильтр при закупорочном фильтровании [98]:

$$\begin{aligned} Q\tau_{max} C &= V_{пор}, \\ Q\tau_{max} &= V_{пор}/C, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;

$\tau_{max}$  – время работы фильтра, с;

$V_{пор}$  – объем пор, м<sup>3</sup>;

$C$  – концентрация твердой фазы в суспензии, кг/м.

Для закупорочного фильтрования важен выбор фильтрующего материала. Фильтрующий материал должен иметь поры, поперечные размеры которых уменьшаются по ходу фильтрата. В цеолите зазоры между частицами имеют большие размеры по сравнению с порами в самих частицах. При этом более мелкие частицы задерживаются более глубокорасположенными порами. Важен также правильный выбор объемов фильтрующего материала, занятых соответствующими порами.

Для процесса фильтрования с закупориванием пор получено общее уравнение [98]:

$$R/R_{\Phi\pi} = \left( \frac{kN_n}{[kN_n - \frac{q_{oc}}{a}]} \right) \quad (2.11)$$

где  $N_n$  – количество пор;

$q_{oc}$  – масса твердых частиц, находящихся на 1 м<sup>2</sup> фильтровальной перегородки, кг/м<sup>2</sup>;

$a$  – масса одной твердой частицы, кг;

$k$  и  $s$  – постоянные в данных условиях опыта.

Для процесса фильтрования с полным закупориванием пор [98] при  $k = s = 1$ .

$$R/R_{\text{фп}} = \left( \frac{N_n}{N_n - \left( \frac{q_{oc}}{a} \right)} \right) \quad (2.12)$$

Отношение  $q_{oc}/a$  выражает число твердых частиц, находящихся на 1 м фильтровальной перегородки, а разность  $N_n - \left( \frac{q_{oc}}{a} \right)$  соответствует числу незакрытых пор, находящихся на той же единице площади.

Поскольку  $R_{\text{фп}}$  и  $N_n$  в данных условиях постоянны, уравнение (2.12) показывает, что сопротивление фильтровальной перегородки, в которой часть пор закрыта частицами осадка, обратно пропорционально числу не закрытых пор.

Для процесса фильтрования с постепенным закупориванием пор  $\kappa > 1$  и  $s > 1$ , причем  $\kappa$  и  $s$  возрастают с повышением концентрации и зависят от формы пор и твердых частиц. Эта зависимость проявляется более резко при разделении полидисперсных суспензий.

Закономерности фильтрования с закупориванием пор тесно связаны с особенностями структуры и свойств фильтровальных перегородок. В работе Н.Р. Грейса исследовалось распределение пор в некоторых типах перегородок. Были выведены уравнения фильтрования при постоянной разности давлений и постоянной скорости процесса с учетом структуры исследованных фильтровальных перегородок. Установлено, что для сжимаемых осадков отношение  $R_{\text{фп}}/t_0$  при изменении разности давлений остается постоянным [98].

Наблюдается отклонение от закономерностей фильтрования с закупориванием пор, обусловленное различными причинами, в частности набуханием материала фильтровальной перегородки в процессе фильтрования, особенностями распределения пор в фильтровальной перегородке. Отклонения могут быть вызваны также непостоянством во время работы разности давлений. По истечении определенного времени набухание материала фильтровальной перегородки прекращается, и она достигает стабильного состояния. Наблюдается также переход к стадии фильтрования с постепенным закупориванием пор. Отмечается большое влияние на процесс разделения мало концентрированных суспензий распределения твердых частиц по толщине фильтровальной перегородки. При достаточной толщине ее наблюдается задержание твердых частиц в основном в том слое фильтровальной перегородки, который соприкасается с разделяемой суспензией. Для данного процесса характерно торможение твердых частиц примесей в порах лобового слоя фильтровальной перегородки, в результате чего концентрация указан-

ных частиц в порах повышается до тех пор, пока не создадутся благоприятные условия для образования над порами сводиков [98].

При изменении направления движения газа в извилистой поре сила инерции приближает твердую частицу к стенкам поры, что сопровождается торможением частицы и уменьшением глубины ее проникновения в пористый слой. При увеличении силы трения, обусловленной повышением вязкости жидкости, приближение твердой частицы к стенкам поры затрудняется, и глубина ее проникновения в пористый слой увеличивается. Для исследования данного процесса определяются следующие величины [98]:

- начальная скорость фильтрования;
- продолжительность срока службы фильтровальной перегородки;
- степень очистки фильтруемой суспензии.

Установлено, что осаждение сферических частиц под действием силы тяжести начинается на нижних поверхностях горизонтальных пор при скоростях суспензии, меньших некоторого определенного значения. При уменьшении поперечного сечения пор вследствие осаждения на ней частиц скорость суспензии возрастает и становится больше упомянутого значения, отложение частиц прекращается и устанавливается стационарное состояние.

В случае наличия угловатых частиц происходит полное закупоривание некоторых пор. Наиболее склонны к закупориванию верхние поры [98]. При увеличении размера частиц наблюдается образование осадка. На основании полученных экспериментальных данных выполнен теоретический анализ процесса фильтрования с постепенным закупориванием пор и получены уравнения для определения перепада давления и производительности центрифуги по объему фильтрата.

При исследовании процесса фильтрования с закупориванием пор на центрифугах следует учитывать, что значительную роль играют поверхностные явления. Это обусловлено малыми размерами частиц суспензии и пор фильтровальной перегородки [111].

В [127] рассмотрены математические модели течения суспензии в пористой среде и получены уравнения, описывающие кинетику накопления и вымывания частиц. Распределение пор по размеру определено методом капиллярного давления. Скорость возрастания перепада давлений при глубинном фильтровании в связи с задержанием твердых частиц в порах перегородки представляет сложное явление, зависящее от многих факторов осаждения частиц.

При анализе процесса на основе модели с неоднородными порами найдено, что скорость изменения разности давлений зависит



от двух факторов: начальное распределение пор по размерам; скорость закупоривания единичной поры [127].

Скорость закупоривания является функцией ряда переменных, например, поперечного размера поры, положения по толщине перегородки, времени. Установлено, что наклон линии в координатах «степень задерживания – разность давлений» при малых степенях задерживания определяется обоими упомянутыми факторами.

Применительно к каждому исследуемому процессу фильтрации с закупориванием пор используют уже известные закономерности с учетом вероятных отклонений в соответствии с особенностями процесса. Это обстоятельство учитывается в последующих исследованиях. Использование закономерностей должно основываться на правильном понимании явлений, происходящих при осаждении твердых частиц суспензии в порах фильтровальной перегородки, в частности, с учетом фильтрации.

## 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ БИОГАЗА ФИЛЬТРОМ С ПРИРОДНЫМ ЦЕОЛИТОМ

Разработанный цеолитовый фильтр для очистки биогаза относится к условно сплошному цилиндрическому типу фильтрующего элемента. Для таких фильтров применим закон Дарси, который определяет расход однородной жидкости через пористую среду при ламинарном режиме потока следующей формулой:

$$Q = (k \cdot F \cdot (P_1 - P_2)) / \mu \cdot L \quad (2.13)$$

где:

$Q$  – расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$k$  – коэффициент проницаемости,  $\text{м}^2$ ;

$F$  – площадь фильтрации пористой среды,  $\text{м}^2$ ;

$(P_1 - P_2)$  – разность давлений, созданных на концах испытуемого образца, Па;

$L$  – длина испытуемого образца породы, м;

$\mu$  – абсолютная вязкость жидкости, Па·с.

На основании закона Дарси определяют коэффициент проницаемости  $k$  – существенную величину для характеристики физических свойств нефтеносных пород.

$$Q = \frac{k \Delta P}{\mu L} \cdot F \quad (2.14)$$

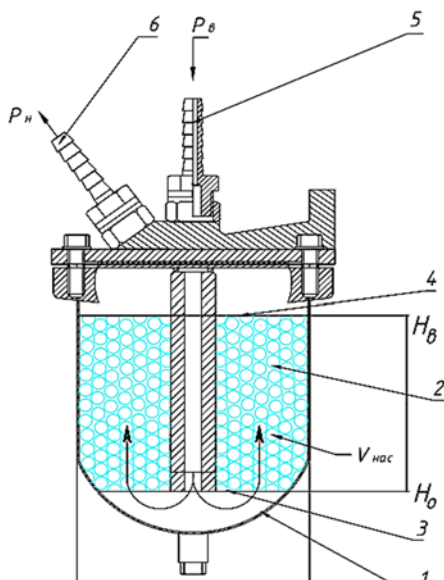


Рис. 2.1. Фильтр очистки биогаза: 1 – корпус фильтра; 2 – природный цеолит; 3 – нижняя сетчатая перегородка; 4 – верхняя сетчатая перегородка; 5 – штуцер для подвода газа; 6 – штуцер для отвода газа

Дифференциальная форма закона Дарси, для условно сплошного цилиндрического пористого фильтрующего элемента имеет вид:

$$v_{\text{ВЫХ}} = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dH}, \text{ мс}^{-1} \quad v_{\text{ВХ}} = v_{\text{Н}} \frac{d_{\text{Н}}}{d_{\text{В}}}, \text{ мс}^{-1} \quad (2.15)$$

где  $v_{\text{ВЫХ}}$  – скорость газа на выходе с адсорбера,  $\text{мс}^{-1}$ ;

$v_{\text{ВХ}}$  – скорость потока в адсорбере,  $\text{мс}^{-1}$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость газа,  $\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$P$  – давление, Па;

$d_{\text{Н}}$  – наружный радиус адсорбера, м;

$d_{\text{В}}$  – внутренний радиус адсорбера, м.

Исследователями [60, 122] получено решение уравнения Дарси для цилиндра с постоянным коэффициентом проницаемости  $k$ . В нашем случае  $k$  зависит от коэффициента порозности  $\xi$ .

$$k = \frac{k_0}{\xi}, \quad (2.16)$$

где  $\xi = V_{\text{пор}}/V_{\text{ц}}$ ,

$V_{\text{пор}}$  – объем пор,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{ц}}$  – суммарный объем частиц цеолита,  $\text{м}^3$

$k_0$  – требуемый коэффициент проницаемости.

Для твердых пористых материалов коэффициент проницаемости уменьшается обратно пропорционально коэффициенту наполненности фильтрующим элементом.

Исследователями В.И. Земсковым, Г.М. Харченко выявлена зависимость коэффициента проницаемости фильтровальной перегородки и адсорбента от размеров частиц. С увеличением размеров частиц адсорбента повышается и значение коэффициента проницаемости [60; 122].

Зная связь коэффициента Дарси и числа Рейнольдса, на основании уравнения (2.7), находим число Рейнольдса по следующей формуле:

$$Re = \frac{300 \cdot (1-\xi) \cdot \pi \frac{d^2}{4} \cdot (1-\xi^2)}{0,246 \cdot \xi^2} \quad (2.17)$$

При технологически реальном способе формирования рассматриваемого фильтра переменную по диаметру условного цилиндра, степень уменьшения можно аппроксимировать формулой, описывающей линейное уменьшение порозности и проницаемости цеолита через степень уменьшения при каждом сечении по диаметру  $d$ .

$$\xi = \xi_0 - x \frac{(d-d_{\text{ВН}})}{(d_{\text{Н}}-d_{\text{ВН}})}, \quad (2.18)$$

где  $x$  – коэффициент пропорциональности,

$\xi_0$  – требуемая степень порозности слоя фильтроэлемента, обеспечивающая требуемую тонкость очистки и соответствующую максимальную проницаемость материала на выходе.

Коэффициент пропорциональности находим и граничного условия:  $\xi=1$  т.е.  $x=\xi_0-1$ .

Тогда:

$$\xi = \xi_0 - (\xi_0 - 1) \frac{(d-d_{\text{ВН}})}{(d_{\text{Н}}-d_{\text{ВН}})} \quad (2.19)$$

Подставляя (2.16) в (2.13) с учетом (2.19) и разделяя переменные, имеем:

$$\frac{dP}{dd} = - \frac{v_{\text{Н}} H_m \mu}{H_0} \cdot \frac{[\xi_0 - (\xi_0 - 1) \frac{(d-d_{\text{ВН}})}{(d_{\text{Н}}-d_{\text{ВН}})}]}{k_0}, \quad (2.20)$$

Интегрируя на границах рисунка 2.1, получаем формулу для расчета перепада давления топлива при прохождении через слой фильтрующего материала:

$$\Delta P = P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}} = \frac{v_{\text{Н}} \mu d}{k_0} \left\{ \xi_0 - (\xi_0 - 1) \cdot \left[ 1 - \frac{d_{\text{ВН}}}{(d_{\text{Н}} - d_{\text{ВН}})} \ln \left( \frac{d_{\text{Н}}}{d_{\text{ВН}}} \right) \right] \right\}. \quad (2.21)$$

Выражая скорость потока в фильтре через расход топлива  $Q$  и по его насыпному объему:

$$v_H = \frac{d \cdot Q}{V_{\text{нас}}}, \quad (2.22)$$

где  $d$  – диаметр выходного отверстия, м;

$V_{\text{нас}}$  – насыпной объем цеолита,  $\text{м}^3$ .

И, преобразуя (2.22), получим формулу гидравлической характеристики фильтра с учетом конструкции и всех основных параметров:

$$\Delta P = P_H - P_B = \frac{\mu \cdot d^2 \cdot Q}{V_{\text{нас}} \cdot k_0} \left\{ \xi_0 \ln \left( \frac{d_H}{d_{BH}} \right) - (\xi_0 - 1) \cdot \left[ 1 - \frac{d_{BH}}{(d_H - d_{BH})} \ln \left( \frac{d_H}{d_{BH}} \right) \right] \right\}. \quad (2.23)$$

или

$$Q = \frac{\Delta P \cdot V_{\text{нас}} \cdot k_0}{\mu \cdot d_{ц}^2} \left\{ \xi_0 \ln \left( \frac{d_H}{d_{BH}} \right) - (\xi_0 - 1) \cdot \left[ 1 - \frac{d_{BH}}{(d_H - d_{BH})} \ln \left( \frac{d_H}{d_{BH}} \right) \right] \right\}^{-1}$$

при  $d_{BH} = 0$        $Q = \frac{\Delta P \cdot V_{\text{нас}} \cdot k_0}{\mu \cdot d_{ц}^2} \cdot (1 - \xi_0) = \frac{\Delta P \cdot V_{\text{нас}} \cdot k_0}{\mu \cdot d_{ц}^2} \cdot (1 + \varepsilon) \quad (2.24)$

Теоретические предпосылки перепада давления газа, рассчитанные по данной математической модели, подтверждаются результатами экспериментов при различных порозностях.

При постоянных значениях:  $\mu, V_{\text{нас}}, \xi_0, k_0, d_{ц}$

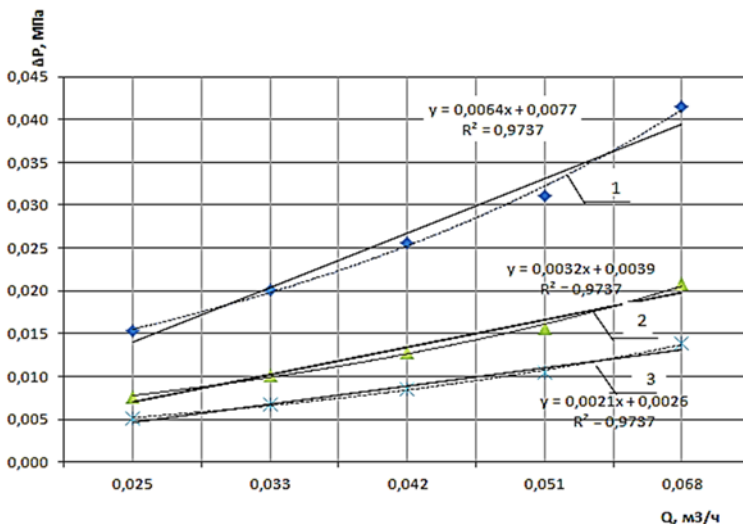


Рис. 2.2. Характер изменения перепада давления на фильтрующем элементе от расхода газа при порозностях: 1) 1–0,35; 2) 2–0,6; 3) 3–0,8; точки – экспериментальные данные; кривая – расчетные значения

Особенностью структуры фильтрующего материала обеспечивает процесс фильтрования с постепенным закупориванием пор, что определяет ресурс работы фильтрующего элемента от начального  $\Delta P_0$  до критического перепада давления  $\Delta P_{кр}$  за определенное время  $\tau$ . Описание закона фильтрации с постепенным закупориванием пор имеет следующий вид:

$$\Delta P_{кр} = \frac{\Delta P_0}{(1-\alpha\tau)^2} \quad (2.25)$$

где  $\alpha = \frac{C_0 * V_{нас}}{\xi_0 * \pi (d_n^2 - d_v^2) * H_{фэ}}$ ;

$C_0$  – концентрация вредных примесей;

$V_{нас}$  – насыпной объем цеолита, м<sup>3</sup>;

$\xi_0$  – требуемая степень порозности слоя фильтроэлемента;

$d_n$  – наружный диаметр фильтра, м;

$d_{вн}$  – внутренний диаметр фильтра, м;

$H_{фэ}$  – высота слоя адсорбента, м.

Из выражения (2.25) получена формула зависимости безразмерного ресурса фильтрующего элемента  $\Omega$  от соотношения диаметров при различных степенях порозности, позволяющая оптимизировать конструктивные параметры фильтрующего элемента.

$$\Omega = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \left( \frac{\Delta P_0}{\Delta P_{кр}} \right)^{\frac{-1}{2}} \right] \quad (2.26)$$

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРА ОЧИСТКИ БИОГАЗА С ПРИРОДНЫМ ЦЕОЛИТОМ

### 3.1. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Программа проведения экспериментальных исследований включала 3 этапа. Структура проведения исследований представлена на рис. 3.1.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном оборудовании, конструкции которого обеспечивали получение оценочных показателей рабочих процессов адсорбции вредных примесей биогаза.

На базе ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» была изготовлена стационарная установка очистки биогаза от вредных примесей и проведены исследования процесса адсорбции.

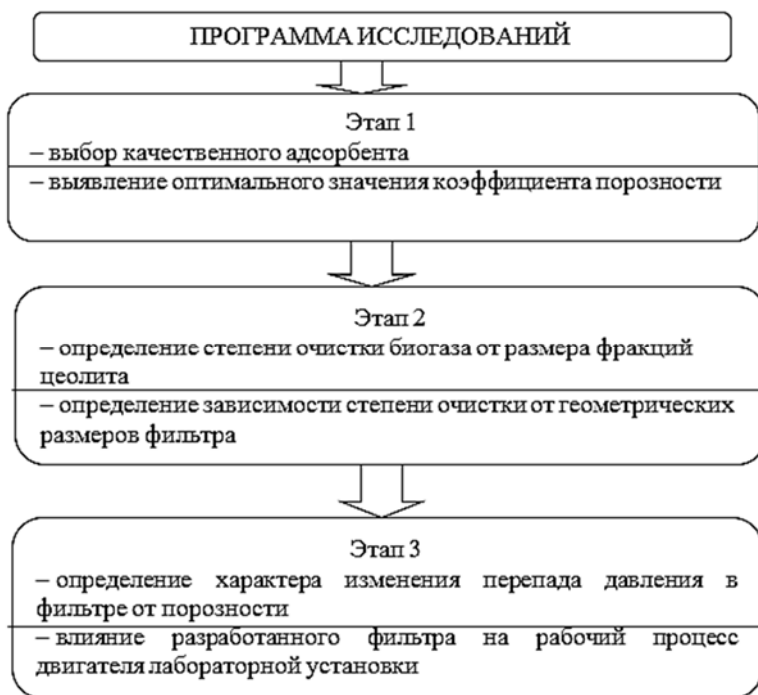


Рис. 3.1. Программа проведения исследований

### 3.1.1. ВЫБОР ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ФИЛЬТРА ОЧИСТКИ БИОГАЗА

Для экспериментальных исследований по оценке и сравнению распространенных фильтрующих материалов были изготовлены 4 фильтра со следующими наполнителями: древесная стружка, активированный уголь, металлическая стружка и природный цеолит (рис. 3.2).

Изготовленные фильтры были компактны, просты в изготовлении, используемые материалы имели низкую стоимость. Биогаз в фильтры поступал самотеком.

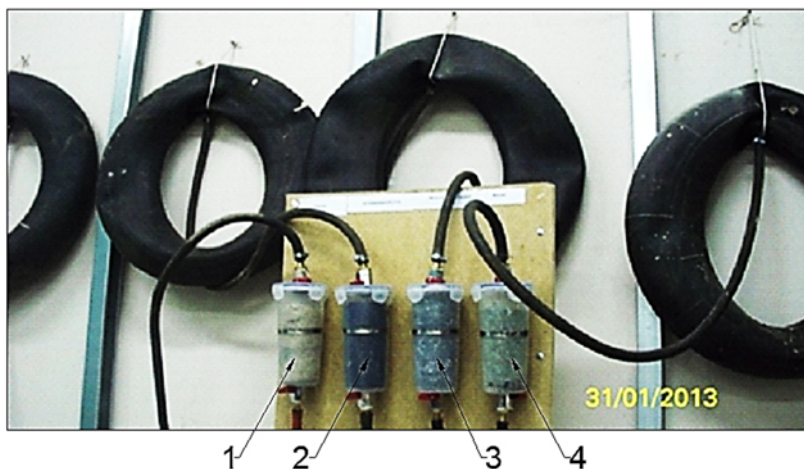


Рис. 3.2. Виды фильтров с наполнителями: 1 – древесная стружка; 2 – активированный уголь; 3 – металлическая стружка; 4 – природный цеолит

Экспериментальные исследования были проведены в период с 2014 по 2016 годы на базе лаборатории ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». Биогаз получали на лабораторной установке, по технологической схеме процесса анаэробного сбраживания бесподстильного навоза КРС в психрофильном периодическом режиме (рис. 3.3).

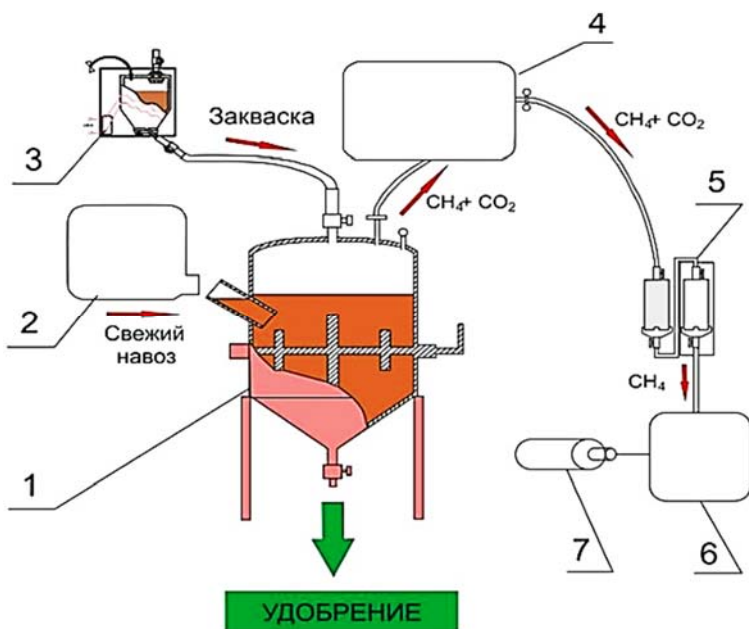


Рис. 3.3. Принципиальная схема лабораторной установки анаэробной переработки бесподстилочного навоза КРС:  
 1 – метантенк; 2 – емкость для гомогенизации нативного навоза с водой; 3 – адаптационная установка; 4 – сухой газгольдер;  
 5 – фильтр для очистки биогаза; 6 – компрессор высокого давления; 7 – газовый баллон

В начале процесса в установке 3 осуществлялась адаптация мезофильных метаногенов к психрофильным условиям, подготавливалась закваска, ускоряющая процесс анаэробного разложения свежего навоза КРС.

В емкости 2 исходные компоненты навоза и воды гомогенизировались, подготавливался свежий навоз для переработки. Далее, из установки 3 в метантенк 1 подавалась закваска, а из емкости 2 на закваску загружался подготовленный свежий навоз.

Сброженный субстрат – эффлюент, основной продукт анаэробной технологии, является качественным органическим удобрением. Кроме этого, путем дальнейшей обработки, эффлюент можно применять в качестве витаминной добавки при вскармливании сельскохозяйственных животных.



Образовавшийся в процессе биогаз – сопутствующий продукт анаэробного сбраживания – собирался в сухом газгольдере 4, откуда всасывался компрессором высокого давления 6. При этом проходил через фильтр с цеолитовым наполнителем 5, очищался от вредных примесей – сероводорода, углекислого газа и паров воды. Очищенный биогаз компрессором 6 загружался в газовые баллоны 7.

Перемешивание производилось ручной мешалкой ежедневно, в одно и то же время. Здесь достигалась основная цель перемешивания – высвобождение образованного биогаза, перемешивание субстрата и бактерий (прививка), предотвращение участков разной температуры внутри метантенка, обеспечение равномерного распределения популяций бактерий, предотвращение формирования пустот и скоплений, уменьшающих эффективную площадь метантенка [32]. Средняя производительность данной технологии составляла 0,3 м<sup>3</sup> биогаза в сутки. Исходя из этого, возможно получать 0,18 м<sup>3</sup>/сут. природного газа. Таким образом, при условии обеспечения фермерских хозяйств республики биогазовыми установками, возможно получение 16,9 тыс. м<sup>3</sup> биогаза в сутки [46].

Далее, полученный биогаз с одинаковой концентрацией метана, подавался в разработанные фильтры с различными фильтрующими элементами. Время и условия проведения эксперимента были одинаковы. Очищенный биогаз пропускали через газоанализатор АМТ-03 и получали необходимые результаты.

#### **3.1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОЗНОСТИ ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА**

Наиболее простым и экономичным способом очистки биогаза является сухая очистка в фильтре, в котором в качестве адсорбера применяется природный цеолит. На основании обзора и анализа применяющихся фильтров в системе питания автомобиля с газовым оборудованием, было выявлено, что фильтры в топливной системе должны быть компактными и иметь разборную конструкцию для замены фильтрующего элемента. Таким образом, при разработке фильтра использовали корпус от фильтра грубой очистки топлива автомобиля КамАЗ-740.

При этом были введены следующие изменения (рис. 3.4):

- установлены входные и выходные штуцера;
- изготовлен переходник, для крепления крышки корпуса и газопровода;
- установлена перегородка к газопроводу.

Разработанная конструкция фильтра с цеолитом представлена на рис. 3.4. В качестве адсорбента был использован природный цеолит.

Данный фильтр работал следующим образом. Биогаз поступал в корпус фильтра 2 через штуцер подвода газа 10, пройдя по центральному каналу 9 и проходя вверх (метан легче воздуха) сквозь нижнюю перегородку 1 фильтрующего элемента, попадал в слой гранул цеолита, где происходила очистка от вредных примесей биогаза: сероводорода, углекислого газа, которые оседали в порах цеолита.

Очищенный биометан проходил верхнюю перегородку и выходил через выходной штуцер 7, затем подавался в баллон через компрессор. По мере загрязнения фильтра Ф1, в технологическую схему очистки биогаза подключался фильтр Ф2 и проводилась регенерация адсорбентов фильтра Ф1, путем нагревания до 200°C.

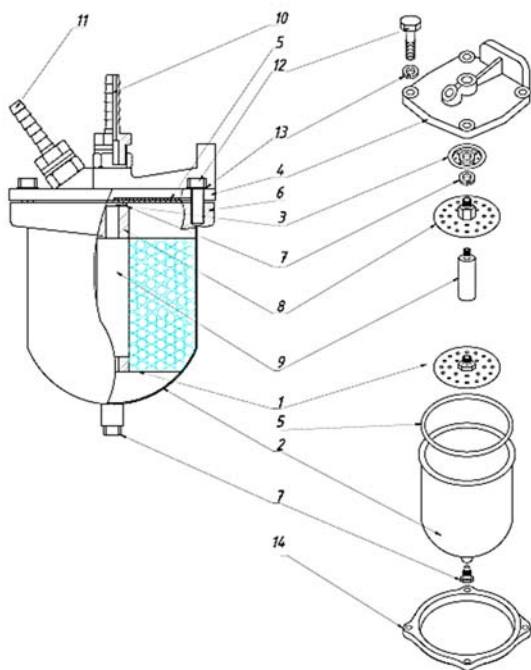



Рис. 3.4. Фильтр очистки биогаза: 1 – нижняя перегородка фильтрующего элемента; 2 – корпус фильтра; 3 – распределитель; 4 – крышка фильтра; 5 – кольцо уплотнительное; 6 – фланец стакана; 7 – шайба пружинная 14; 8 – верхняя перегородка фильтрующего элемента с переходником; 9 – центральный канал; 10 – штуцер подвода биогаза; 11 – штуцер отвода биогаза; 12 – болт М13; 13 – шайба пружинная 13; 14 – фланец стакана;  – цеолитовые гранулы

Адсорбенты выгружались через съемную крышку 4 и загружались в сушильный шкаф. Далее процесс очистки повторялся.

После разработки конструкции фильтра, были определены зависимости адсорбционных свойств цеолита от размера фракций. Для этого в разработанный фильтр насыпали цеолит, измерив его насыпной объем и определяли суммарный объем частиц цеолита. Подавая биогаз одинаковой концентрации, измеряли концентрацию биогаза на выходе с фильтра газоанализатором АМТ-03. Анализ показателей биогаза, получаемого из органических отходов, показал, что содержание в нем  $\text{CH}_4$  составляло в среднем от 65 до 85%.

#### 3.1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ БИОГАЗА

Для опытов использовали биогаз, с содержанием метана 65%. Биогаз поступал после предварительной очистки при выходе из биореактора в газгольдер. В качестве адсорбента использовали природный цеолит с размером фракций 0,005; 0,004; 0,003; 0,002 м. В фильтры загружали цеолит определенной фракции и пропускали биогаз, затем меняли фракции цеолита и повторяли эксперимент. Перед началом каждого опыта измеряли состав биогаза относительно  $\text{CH}_4$  газоанализатором АМТ-3 (рисунок 3.5) до и после очистки фильтром. По окончании каждого опыта производили замер адсорбентов путем взвешивания на лабораторных весах модели АСОМЖВ-1 (рис 3.6).

Эффективность очистки газа определяли по формуле [26]:

$$E_{\text{очистки}} = \left( \frac{C_{\text{п}} - C_{\text{д}}}{C_{\text{п}}} \right) * 100\%, \quad (3.1)$$

где  $E$  – степень очистки газов, %;  $C_{\text{д}}$  – содержание метана в биогазе до очистки;  $C_{\text{п}}$  – содержание метана в биогазе после очистки.



Рис. 3.5. Газоанализатор АМТ-03



Рис. 3.6. Лабораторные весы АСОМ JW-1

### **3.1.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ БИОГАЗА ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА**

Следующим этапом явилось определение конструктивных параметров фильтров. Для этого использовали фильтры различных размеров: высотой – 0,5; 0,4;0,3; 0,2; 0,15 м и диаметром – 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; 0,14 м соответственно номеру опыта в проводимом эксперименте. Все фильтры наполняли цеолитом фракции 0,004 м и пропускали биогаз с различным содержанием метана, затем определяли степень очистки. До и после очистки фильтром, в каждом опыте, измеряли состав биогаза на содержание  $\text{CH}_4$  газоанализатором АМТ-3. По окончании каждого опыта производили замер адсорбентов путем взвешивания на лабораторных весах модели АСОМJW-1.

Схема движения газа в фильтре и в фильтровальной перегородке представлена на рис. 3.7.

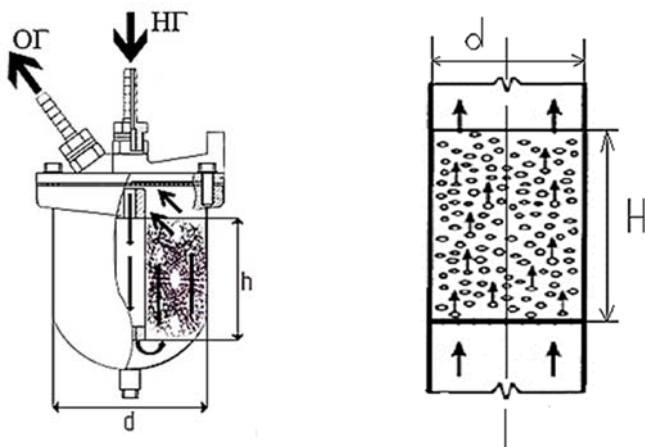


Рис. 3.7. Движение биогаза: а) разработанном фильтре на основе цеолита; б) в фильтрующем элементе

Устанавливали определенное значение изучаемых факторов: концентрация метана до и после очистки  $C_{д}, C_{п}$ ; скорость подачи газа  $v$ ; влажность биогаза  $\psi$ ; температура  $T$ ; диаметр и высота фильтра  $d$  и  $H$ ; размеры фракций цеолита  $d_{ц}$ . Перед каждым экспериментом измеряли состав биогаза относительно  $CH_4$  газоанализатором АМТ-3, исходный биогаз из газгольдера подавали в фильтр с цеолитом, на определенное время, открывая входной и выходной штуцера на фильтре. Выходной штуцер присоединяли со вторым газгольдером. По истечении времени биогаз со второго газгольдера повторно измеряли газоанализатором. После проведения опытов меняли размеры фракций цеолита в фильтре, диаметр и высоту фильтра и повторяли опыты. Результаты вносили в журнал экспериментального исследования, рассчитав эффективность очистки и коэффициент порозности  $\xi$ .

### 3.1.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ В ФИЛЬТРЕ ОТ ПОРОЗНОСТИ ЦЕОЛИТА

Стендовые исследования проводились для установления влияния концентрации метана в биогазовом топливе на характеристики двигателя.

Эксперименты проводились с использованием экспериментальной установки по исследованию характеристики работы двигателя (рис. 3.8). Стенд доукомплектовали газобаллонным оборудованием ГБО-2 и установкой очистки биогаза (рис. 3.9 и 3.10).

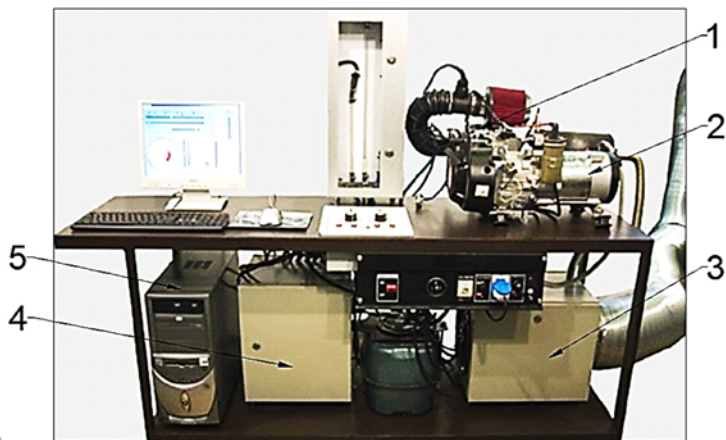


Рис. 3.8. Экспериментальная установка по исследованию характеристики работы двигателя: 1 – одноцилиндровый четырехтактный двигатель воздушного охлаждения; 2 – генератор, блока нагрузки; 3 – блок электронных модулей; 4 – блок питания установки; 5 – персональный компьютер измерительного комплекса с установленным оборудованием National Instruments



Рис. 3.9. Вид модернизированного стенда с установленным ГБО – 2: 1 – насос, 2 – ТЭН, 3 – редуктор низкого давления, 4 – расширитель

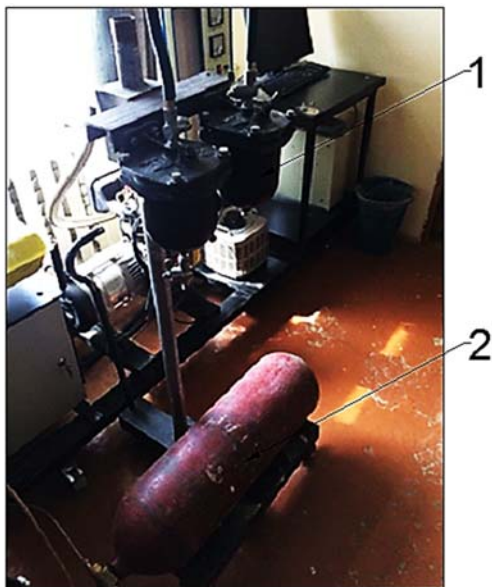


Рис. 3.10. Установка очистки биогаза:  
1 – разработанный фильтр, 2 – метановый баллон

### **3.1.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТАННОГО ФИЛЬТРА ОЧИСТКИ БИОГАЗА НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВИГАТЕЛЯ**

На рис. 3.11 приведена схема подключения разработанного фильтра с цеолитом в газобаллонное оборудование инжекторного двигателя.

В газобаллонном оборудовании двигателя внутреннего сгорания имелся штатный газовый клапан-фильтр, который очищал газ от взвесей и смолистых отложений. Далее очищенный газ по трубопроводу поступал в двухступенчатый редуктор-испаритель. В метановых установках использовался трехступенчатый редуктор. Каждая ступень последовательно снижала давление газа до близко к атмосферному. Под действием разряжения, создаваемого во впускном коллекторе работающего двигателя, газ из редуктора по шлангу низкого давления через дозатор поступал в смеситель, установленный между воздушным фильтром и дроссельными заслонками карбюратора.

Для обеспечения работоспособности двигателя на биогазе в качестве моторного топлива содержание метана должно быть не

менее 80%. В целях качественной очистки биогаза было предложено дополнительно встроить автономный фильтр с цеолитовым наполнителем в систему питания двигателя.

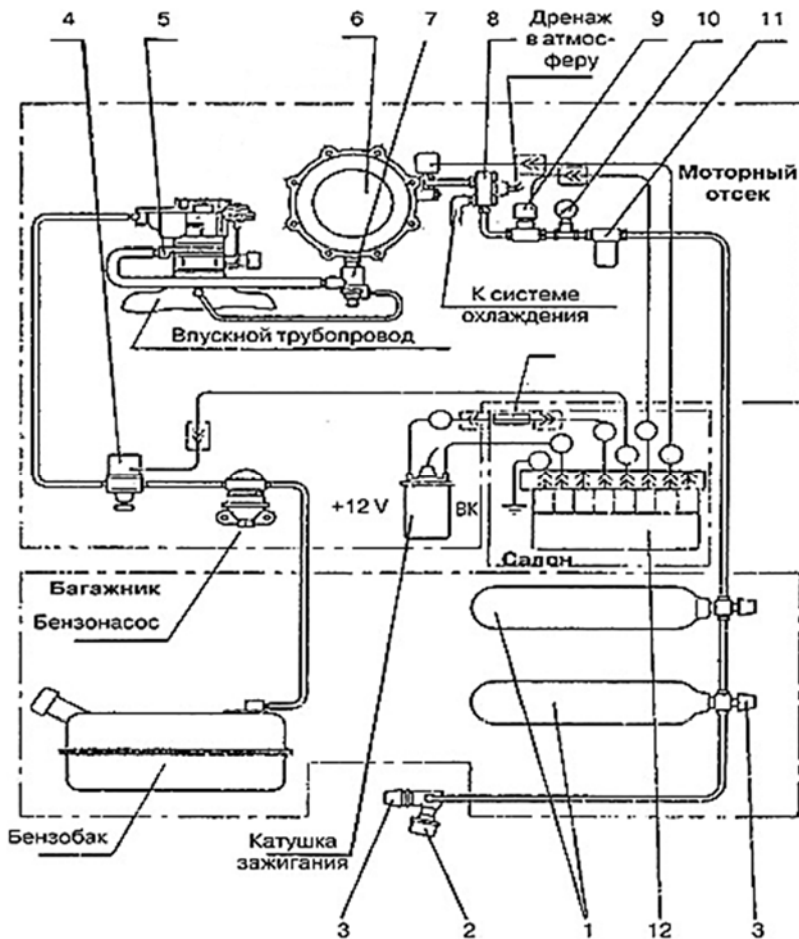


Рис. 3.11. Схема основных элементов ГБО, работающих на биогазе: 1 – баллоны биогазовые; 2 – узел заправочный выносной; 3 – вентиль; 4 – электромагнитный бензиновый клапан; 5 – смеситель газа; 6 – редуктор низкого давления; 7 – экономайзер; 8 – редуктор высокого давления; 9 – клапан электромагнитный газовый; 10 – манометр; 11 – разработанный биогазовый фильтр; 12 – электронный блок; 13 – предохранитель



Биогаз хранился в двух баллонах (1), установленных в багажнике автомобиля. Они были стянуты стальными хомутами и закреплены на кронштейнах. Баллоны поставлялись в комплекте с вентилями.

Через выносной заправочный узел (2), вентили (3) биогаз поступал в баллоны по трубопроводам высокого давления, затем к электромагнитному газовому клапану (9), рассчитанному на 20 МПа, предварительно пройдя очистку от твердых примесей в газовом фильтре (11). Манометр давления (10), установленный за газовым фильтром, осуществлял контроль наличия газа в баллонах. После открытия электромагнитного газового клапана биогаз подавался к редуктору высокого давления (8), где давление газа снижалось до 0,6–1,1 МПа. Затем по трубопроводу газ попадал в редуктор низкого давления (РНД) (6). При редуцировании (снижение давления) в редукторе высокого давления, температура газа снижалась. К редуктору высокого давления по водяному рукаву подавался теплоноситель от системы охлаждения двигателя. В РНД давление газа продолжало снижаться до величины, близкой к атмосферному давлению. РНД был оборудован экономайзером (7), обеспечивающим обогащение газозвушной смеси при полностью открытой дроссельной заслонке карбюратора.

По газовому рукаву биогаз поступал в смеситель (5), где он дозировался и смешивался с воздухом, после чего газозвушная смесь попадала в цилиндры двигателя. Чтобы перекрыть подачу бензина на время работы двигателя на газовом топливе, в бензопроводе между бензонасосом и карбюратором устанавливался электромагнитный бензиновый клапан.

Электромагнитными клапанами управлял электронный блок (12). Электрические схемы подключают к аккумуляторной батарее с помощью электропроводов через плавкий предохранитель (13), предназначенный для защиты всей системы от короткого замыкания и рассчитанный на ток в 3 А.

В состав лабораторного стенда входило газобаллонное оборудование 2 поколения фирмы «Lovato», разработанный автономный фильтр, газовый баллон высокого давления. Редуктор-испаритель закрепляли на раме лабораторного стенда, для его подогрева разработали ТЭН, мощностью 1,2 кВт, который был также закреплен на раме. Фильтр и газовый баллон были закреплены в отдельном модуле (рис. 3.10).

Биогаз поступал из баллона в фильтр под давлением, далее из фильтра проходил к нагретому редуктору-испарителю, где под действием температуры испарялся. Проходя мембраны ГБО давление

понижалось до атмосферного. Далее биогаз подавался в топливную систему двигателя.

### 3.2. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Степень очистки биогаза от вредных примесей зависит от порозности, физико-механических свойств фильтрующего элемента, температуры, давления. В этих условиях, в виду сложности процесса, не поддающегося адекватному описанию средствами классической механики и математики, весьма результативным является применение математических методов планирования эксперимента [112].

Применение математических методов планирования эксперимента позволяет при поиске области оптимума, определять необходимое число опытов и расположение экспериментальных точек в факторном пространстве на основании математических правил. В случае использования математических методов планирования некоторую зависимость, представляющую собой геометрическую поверхность (поверхность отклика) аппроксимируют полиномом:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (3.2)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} \dots$  – теоретические коэффициенты регрессии;  $x_i, x_j$  – факторы, определяющие функцию отклика;  $y$  – параметр процесса, подлежащей оптимизации (поверхность отклика). После этого уравнение (3.1) принимает вид:

$$\hat{y} = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (3.3)$$

где  $\hat{y}$  – расчетное значение параметра оптимизации.

Уравнение (3.3) может быть интерпретировано как уравнение некоторой поверхности в  $n$ -мерном пространстве. При трех независимых переменных, например, оптимальные условия проведения изучаемого процесса можно представить с помощью контурных поверхностей в трехмерном пространстве (гиперболоидов, эллипсоидов и т.п.). Нахождение геометрического образа, соответствующего изучаемой функции отклика, облегчает интерпретацию результатов экспериментов.

При формализации априорных сведений об объекте исследования по литературным данным или по результатам опроса специалистов, рекомендуется применять метод априорного ранжирования факторов. На стадии движения в область оптимума эффективными являются методы кругого восхождения или последовательное симплек-планирование. При описании области оптимума возможно применение

ние центрального композиционного ротатабельного или ортогонального планирования второго или третьего порядка. Схема решения задачи в общем виде предполагает наблюдение под влиянием факторов на параметр оптимизации, а затем поиск связи между ними. Связь эта, выявляемая в результате опытов, представляется в виде приведенного уравнения регрессии (3.3).

Методика исследования состоит из следующих этапов: предварительное изучение объекта; выбор параметра оптимизации, проведение экспериментов и построение математической модели, оценка адекватности и ее математическая интерпретация, обоснование технологических и конструктивных параметров.

В связи с тем, что математические методы планирования эксперимента основаны на кибернетическом представлении об объекте исследования, весь процесс влияния факторов на свойства представляется в виде «черного ящика», и лицо, принимающее решение на первом этапе исследования, по сути, абстрагируется от механизма явления, от механизма влияния факторов. Он лишь меняет входы в «черный ящик» и, соответственно этому, получает разные выходы из ящика. Принципы построения такой модели соответствуют априорным представлениям об объекте исследования при решении многофакторных задач с учетом того, что эти задачи должны быть решены при неполном знании механизма явлений.

### 3.3. РОТАТАБЕЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ВТОРОГО ПОРЯДКА

При исследовании области оптимума необходимо тщательное изучение поверхности отклика. Из-за большой кривизны поверхности отклика линейную модель применять уже нельзя. Чаще всего для описания области оптимума используют полиномы второй степени [4; 112].

Часть поверхности отклика вблизи оптимума является почти стационарной областью. При описании почти стационарной области чаще всего используют центральное композиционное ротатабельное униформ-планирование второго порядка, которое является наиболее эффективным [4; 112].

Перед началом эксперимента проводилось кодирование по формуле:

$$x_i = \frac{x_i - x_{oi}}{\varepsilon}, \quad (3.4)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора (безразмерная величина);  
 $x_i$  – натуральное значение фактора;

$x_{oi}$  – натуральное значение некоторого фактора на нулевом уровне.

$\varepsilon$  – натуральное значение интервала варьирования.

Верхний уровень варьирования фактора обычно обозначается через +1, а нижний через -1. В центре эксперимента факторы имеют нулевой уровень 0.

$$\varepsilon = \frac{x_i^B - x_i^H}{2}, \quad (3.5)$$

где  $x_i^B$  – значение фактора на верхнем уровне;

$x_i^H$  – значение фактора на нижнем уровне.

Уровни и интервалы варьирования факторов, используемых в эксперименте, определялись исходя из средневзвешенных размеров гранул цеолита, массы цеолита в фильтре и отношения высоты фильтра к диаметру [4, 112].

Данная методика проведения эксперимента известна и изложена в работах С.В. Мельникова, А.Л. Миткова, В.Б. Тихомирова [112].

Задачей данного этапа исследования являлось детальное изучение области оптимума с целью получения адекватной математической модели следующего вида:

$$y = \vartheta_0 + \sum \vartheta_i x_i + \sum_{i < j} \vartheta_{ij} x_i x_j + \sum \vartheta_{ij} x_i^2, \quad (3.6)$$

Опыты проводились в трехкратной повторности, а результаты сравнивались по всем принятым показателям. Обработка данных проводилась в следующей последовательности по программе Statistica13.6.

Коэффициенты регрессии модели  $\vartheta_0$ ,  $\vartheta_i$ ,  $\vartheta_{ij}$  и  $\vartheta_{ii}$  находим по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_0 &= aN^{-1} \sum_n Y_n - \vartheta N^{-1} \sum_n \sum_n x_{in}^2 Y_n; \\ \vartheta_i &= \lambda_2^{-1} N^{-1} \sum_n x_{in} Y_n; \\ \vartheta_{ij} &= \lambda_3^{-1} \times N^{-1} \times \sum_n x_{in} x_{jn} \times Y_n; \\ \vartheta_{ii} &= -\vartheta N^{-1} \sum_n Y_n + CN^{-1} \sum_n X_{in}^2 Y_n - dN^{-1} \sum_i \sum_n X_{in}^2 Y_n; \end{aligned} \right\} (3.7)$$

где  $aN^{-1}$ ,  $\vartheta N^{-1}$ ,  $\lambda_2^{-1} N^{-1}$ ,  $\lambda_3 N^{-1}$ ,  $CN^{-1}$  и  $dN^{-1}$  – табличные значения.

Статистический анализ уравнения регрессии производился по следующим формулам:

$$\begin{aligned} S^2 \{e_o\} &= a N^{-1} S^2 y; & S^2 \{e_i\} &= \lambda_2^{-1} N^{-1} S^2 y; \\ S^2 \{e_{i,j}\} &= \lambda^{-1} N^{-1} S^2 y; & S^2 \{e_{ij}\} &= (c \times d) N^{-1} S^2 y; \\ cov\{e_o, e_{i,j}\} &= -e N^{-1} S^2 y; & cov\{e_{ii}, e_{jj}\} &= -d N^{-1} S^2 y; \end{aligned} \quad (3.8)$$

Для проверки адекватности модели второго порядка ротatableльного плана рассчитывали следующие величины: имея опыты в центре эксперимента, определялась сумма квадратов  $S_E$ , связанная с дисперсией ошибки опыта

$$S_E = \sum_{n=1}^{n_o} (y_{ou} - \bar{y}_o)^2, \quad (3.9)$$

при степенях свободы  $f_E = n_o - 1$

Остаточная сумма квадратов  $S_R$ , связанная с остаточной дисперсией:

$$S_R = \sum_{n=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_n)^2, \quad (3.10)$$

Сумма квадратов, связанная с дисперсией адекватности:

$$S_{ad} = S_R - S_E \quad (3.11)$$

С числом степеней свободы:

$$f_{ad} = N - \frac{(k+2)(k-1)}{2} - (n_o - 1), \quad (3.12)$$

При проверке адекватности представления результатов эксперимента полиномами второй степени использовался  $F$ -критерий Фишера, вычисляемый по формуле:

$$F_{расч.} = \frac{S_{ad} / f_{ad}}{S_E / f_E}, \quad (3.13)$$

При проверке гипотезы адекватности необходимо, чтобы расчетное значение  $F$ -критерия было меньше табличного с принятым уровнем вероятности.

Табличное значение  $F$ -критерия были выбраны по таблице с учетом степеней свободы.

Значимость коэффициентов регрессии определяли по  $t$ -критерию путем нахождения доверительного интервала для коэффициента регрессии [112]:

$$\Delta b_i \geq \pm \frac{S_y \cdot t_{кр.}}{\sqrt{N}}, \quad (3.14)$$

Табличное значение  $t$ -критерия принималось при числе средней свободы  $f=N(m-1)$  и уровне значимости 0,05 [112]. Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительно-го интервала.

### **3.4. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА ОЧИСТКИ БИОГАЗА С ПРИРОДНЫМ ЦЕОЛИТОМ ПУТЕМ АПРИОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ**

Выбор основных параметров и уровни варьирования является одним из ответственных этапов исследования.

Априорное ранжирование факторов основано на том, что факторы, которые согласно априорной информации могут иметь существенное влияние, ранжируются в порядке убывания вносимого ими вклада. Вклад каждого фактора оценивается по величине ранга - места, которое отведено исследователем (специалистом при опросе, автором статьи и т. п.) данному фактору при ранжировании всех факторов с учетом их предполагаемого влияния на параметры оптимизации, количественно неизвестного. При сборе мнений путем опроса специалистов каждому из них предлагалось заполнить анкету, где были перечислены факторы, их размерность и предполагаемые интервалы варьирования. Заполняя анкету, специалист определял место факторов в ранжированном ряду, и имел возможность включения дополнительных факторов или высказать мнение об изменении интервалов варьирования (таблица 3.1).

Выбор основных параметров и уровни варьирования являются одними из ответственных этапов исследования. Для получения адекватной информации был использован метод априорного ранжирования факторов. Получены мнения специалистов путем опроса (рис. 3.12).

Для экспертной оценки уровня влияния фильтра с цеолитом на качество очистки биогаза были предложены следующие параметры:  $x_1$  – размер гранул цеолита, мм;  $x_2$  – масса цеолита в фильтре, г;  $x_3$  – отношение высоты фильтра к диаметру;  $x_4$  – концентрация метана в биогазе, %;  $x_5$  – давление подачи биогаза, МПа;  $x_6$  – влажность биогаза, %;  $x_7$  – температура биогаза, К.

Тогда коэффициент конкордации:

$$W = \frac{12S}{z^2(n^3 - n)} = \frac{12 \cdot 546}{5^2(7^3 - 7)} = 18,15$$

$S$  – сумма квадратов отклонений;

$z$  – количество экспертов;

$n$  – число факторов.

Значимость коэффициента конкордации проверяли по критерию  $\chi^2$ -Пирсона

$$\chi^2 = z(n-1)W = \frac{S}{\frac{1}{12}zn(n-1)} = \frac{546}{\frac{1}{12} \cdot 5 \cdot 7(7-1)} = \frac{546}{17,5} = 31,2$$

при  $f=n-1=6$  – число средней свободы критерий Пирсона составил:

$$\chi^2 = 12,592$$

В связи с тем, что табличное значение  $\chi^2_{\text{табл.}}$  меньше расчетного, можно с достоверностью утверждать, что мнение специалистов относительно степени влияния факторов согласуется в соответствии с коэффициентом конкордации  $W=18,15$ . Это позволило построить среднюю априорную диаграмму рангов для рассматриваемых факторов.

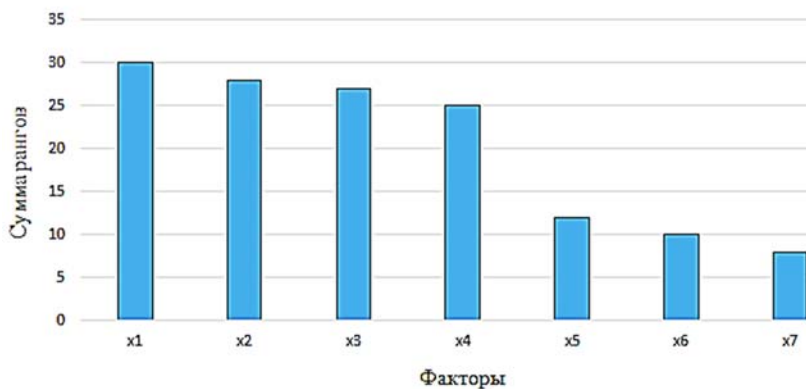


Рис. 3.12. Средняя априорная диаграмма рангов при изучении процесса:  $x_1$  – средневзвешенные размеры гранул цеолита, мм;  $x_2$  – масса цеолита в фильтре, г;  $x_3$  – отношение высоты фильтра к диаметру;  $x_4$  – концентрация метана в биогазе, %;  $x_5$  – влажность биогаза, %;  $x_6$  – давление подачи биогаза, МПа;  $x_7$  – температура биогаза, К

Из диаграммы, приведенной на рисунке 3.12 видно, что распределение не является равномерным, возрастание – немонотонное. Поэтому по результатам априорного ранжирования были определены наиболее влияющие факторы:  $x_1$  – размер гранул цеолита, мм;  $x_2$  – масса цеолита в фильтре, г;  $x_3$  – отношение высоты фильтра к диаметру.

Таблица 3.1

## Факторы и область их исследования

Фактор	Обозначение	Уровень реального значения			Код	Уровень кодированного значения фактора		
		Нижний	Основной	Высокий		Нижний	Основной	Высокий
Средневзвешенные размеры гранул цеолита, мм	d	2	4	6	x <sub>1</sub>	-1	0	+1
Масса цеолита в фильтре, г	m	500	750	1000	x <sub>2</sub>	-1	0	+1
Отношение высоты фильтра к диаметру	H/d	2,5	3,25	4	x <sub>3</sub>	-1	0	+1

Таблица 3.2

## Матрица плана и уровня варьирования факторов

Обозначение	Фактор			Y % метана из биогаза
	Средневзвешенные размеры гранул цеолита, мм	Масса цеолита в фильтре, г	Отношение высоты фильтра к диаметру	
1	1	1	0	70
2	-1	-1	0	80
3	1	-1	0	75
4	-1	1	0	82
5	1	0	1	76
6	-1	0	-1	85
7	1	0	-1	72
8	-1	0	1	87
9	0	1	1	92
10	0	-1	-1	78
11	0	1	-1	90
12	0	-1	1	84
13	0	0	0	95
14	0	0	-1	90
15	0	0	1	84



## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ ФИЛЬТРОВ ОЧИСТКИ БИОГАЗА

### 4.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ БИОГАЗА ФИЛЬТРАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Результаты экспериментальных исследований по выявлению качества очистки биогаза 4 фильтрами с различными материалами: 1 – древесная стружка, 2 – активированный уголь, 3 – металлическая стружка; 4 – природный цеолит приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Компонентный химический состав биогаза до и после очистки фильтрами с различными материалами

Наименование компонента	Концентрация биогаза до очистки, об. %	Концентрация после очистки с древесной стружкой, об. %	Концентрация после очистки с активированным углем, об. %	Концентрация после очистки с металлической стружкой, об. %	Концентрация после очистки с природным цеолитом, об. %
двуоксид углерода	33.8410	27.8580	14.228	27.8580	6.6646
метан	66.1420	72.1420	85.7720	72.1420	93.3354
этилен	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
бутан	0.0120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
гексены	0.0019	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
гексаны	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
бензол	0.0019	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Как показали эксперименты, наивысшая степень очистки биогаза выявлена при применении цеолита в качестве адсорбента. Концентрация метана после очистки биогаза природным цеолитом составила 93,3354%, что на 22,7% больше при использовании фильтров с металлической стружкой и активированным углем и на 29,1% больше при использовании в качестве наполнителя древесной стружки. Таким образом, для очистки биогаза от вредных

примесей было рекомендовано использование фильтров с наполнителем из природного цеолита [102].

#### 4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОЗНОСТИ ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

Экспериментальные данные, представленные в таблице 4.2, позволили определить порозность фильтрующего материала и цеолита.

Таблица 4.2

Экспериментальные данные коэффициентов порозности ( $\xi$ )

№ опыта	Диаметр частиц d, м	Объем цеолита насыпной $V_{нас}, \text{м}^3$	Объем пор $V_{пор}, \text{м}^3$	Суммарный объем частиц цеолита $V_{ц}, \text{м}^3$	Коэффициент порозности $\xi = V_{пор}/V_{ц}$
1	0,005	0,004	0,001	0,003	0,333
2	0,004	0,006	0,002	0,004	0,500
3	0,003	0,008	0,003	0,005	0,600
4	0,002	0,01	0,004	0,006	0,667

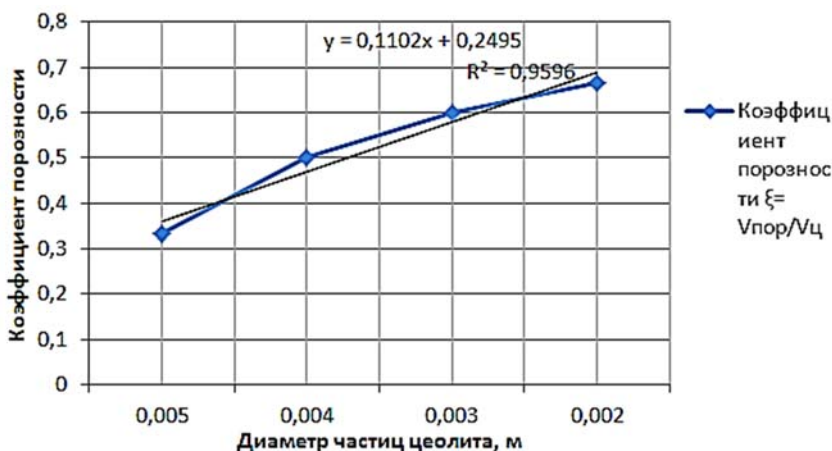


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента порозности  $\xi$  от эквивалентного диаметра частиц цеолита

Из приведенных данных видно, что коэффициент порозности перегородки из цеолита увеличивался с ростом диаметра частиц цеолитовых фракций, оказывая влияние на проницаемость цеолитовой фильтровальной перегородки [102–107].

### 4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ БИОГАЗА

Степень эффективности очистки газа определяли по формуле (3.1).

Таблица 4.3

Эффективности очистки биогаза в зависимости от размера фракций цеолита

№ опыта	Диаметр частиц d, м			
	0,002	0,003	0,004	0,005
	Эффективность очистки, E, %			
1	56	73	92	80
2	62	75	95	76
3	66	83	92	75
4	63	88	90	81
5	62	83	86	78
среднее значение опытов	62	80	91	78

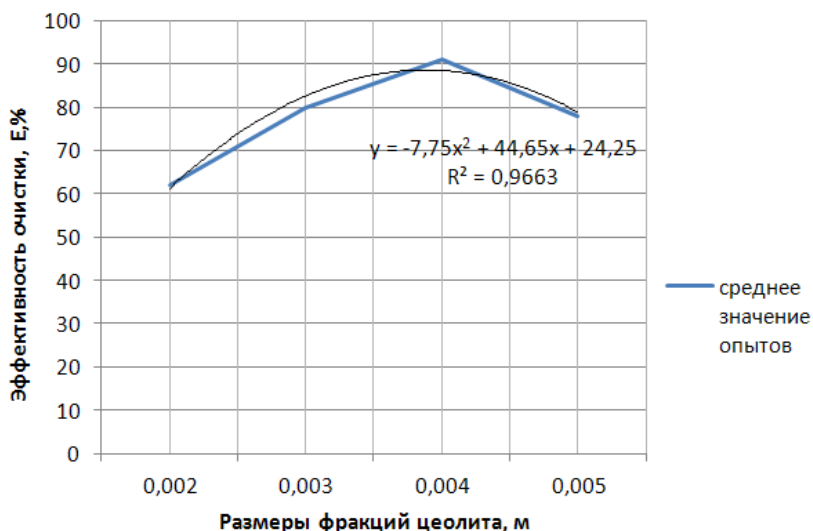


Рис. 4.2. Зависимость эффективности очистки биогаза от размера фракций цеолита

Сравнительные испытания в идентичных условиях эффективности очистки биогаза показали, что фильтр со средневзвешен-

ными диаметрами частиц цеолитов 0,004 м показал максимальный процент очистки [102–107].

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения находили по формуле:

$$\varepsilon = t_{ct}S(A) \quad (4.1)$$

где  $t_{ct}$  – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности  $P$  и числа результатов наблюдений  $n_n$  находили по таблице справочного приложения указанного ГОСТ.

Нами была принята доверительная граница случайной погрешности опыта 5% при доверительной вероятности 0,95.

Проводили две повторности опыта и по их результатам  $x_1$  и  $x_2$ , измеряемой величины (полноты просеивания компонентов), вычисляли величины  $A$ ,  $S(A)$  и  $\varepsilon$ . Если полученная величина  $\varepsilon$  оказывалась больше 5%, то проводили третью повторность, вновь вычисляли указанные величины и сравнивали  $\varepsilon$  с 5%. За достаточное количество повторных опытов принимали то, при котором  $\varepsilon < 5\%$ .

#### 4.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА

В целях обоснования конструктивных параметров разработанного фильтра очистки биогаза с природным цеолитом были проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности разработанной конструкции. Были получены результаты, представленные в таблице 4.4.

Зависимость эффективности очистки биогаза от высоты и диаметра фильтра приведена на рис. 4.3.

Таблица 4.4

Результаты эффективности очистки биогаза в зависимости от конструктивных параметров фильтра

Номер опыта	1	2	3	4	5
	H1/d1	H1/d2	H1/d3	H1/d4	H1/d5
H/d	2,5	1,9	1,5	1,3	1,1
E, %	42	38	35	45	40
	H2/d1	H2/d2	H2/d3	H2/d4	H2/d5
	H/d	3,3	2,5	2,0	1,7
E, %	82	55	37	32	30
	H3/d1	H3/d2	H3/d3	H3/d4	H3/d5
	H/d	5,0	3,8	3,0	2,5

## Глава 4. Результаты экспериментальных исследований разработанных фильтров очистки биогаза

E, %	32	82	85	76	66
	H4/d1	H4/d2	H4/d3	H4/d4	H4/d5
H/d	6,7	5,0	4,0	3,3	2,9
E, %	50	56	90	92	88
	H5/d1	H5/d2	H5/d3	H5/d4	H5/d5
H/d	8,3	6,3	5,0	4,2	3,6
E, %	50	53	60	78	86

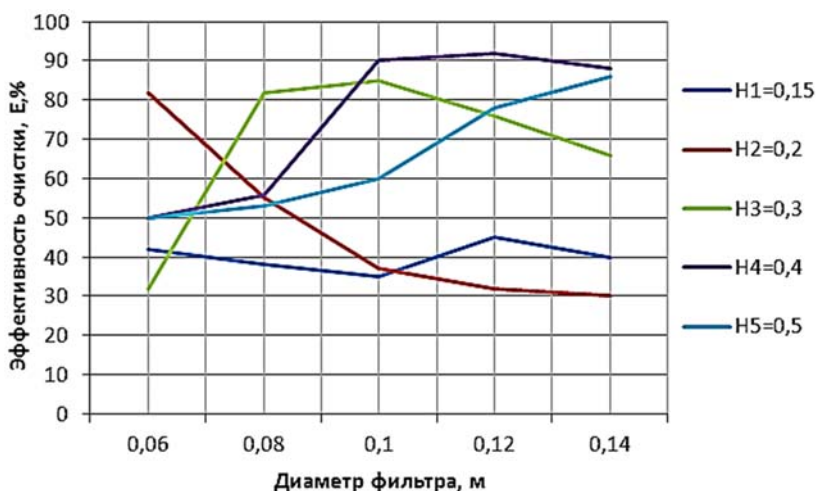


Рис. 4.3. Зависимость эффективности очистки биогаза от соотношения H/d фильтра

Как показали экспериментальные исследования, максимальная эффективность очистки биогаза была получена при соотношениях высоты и диаметра корпуса фильтра  $H/D = 3,0 : 4,2$ .

### 4.5. РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В БИОГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

Получены экспериментальные данные стендовых исследований по влиянию концентрации метана биогазового топлива на выходные параметры двигателя в условиях, имитирующих эксплуатационные.

Влияние концентрации метана в биогазовом топливе на выходные параметры двигателя оценивалось анализом результатов полного многофакторного эксперимента, основными факторами варьирования в котором выступали: состав биогазового топлива, нагрузка,

эффективная мощность, угол опережения зажигания [50–52]. На рис. 4.4 приведены результаты влияния содержания метана на параметры двигателя.

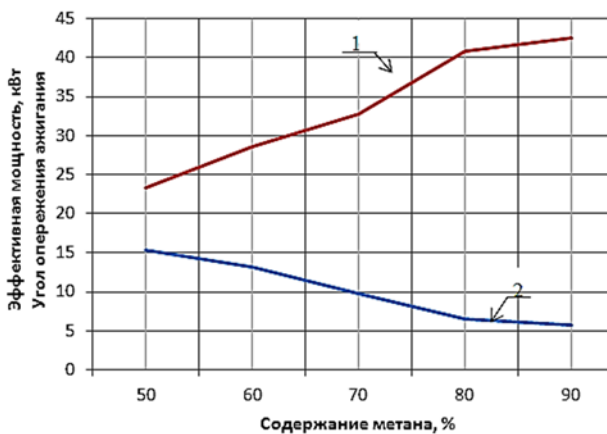


Рис. 4.4. Влияние содержания метана на параметры двигателя:  
линия 1 – зависимость эффективной мощности ( $N_e$ ),  
линия 2 – зависимость угла опережения зажигания ( $\Theta$ )  
от концентрации метана ( $C_{CH_4}$ )

На рис. 4.5 приведены результаты влияния угла опережения зажигания ( $\Theta$ ) от нагрузки двигателя.

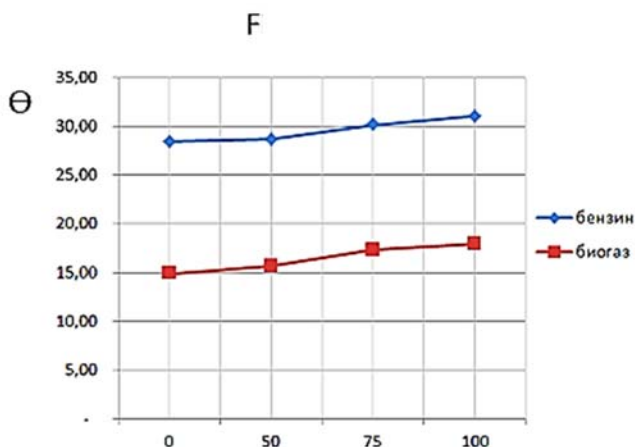


Рис. 4.5. Влияние угла опережения зажигания ( $\Theta$ )  
от нагрузки двигателя

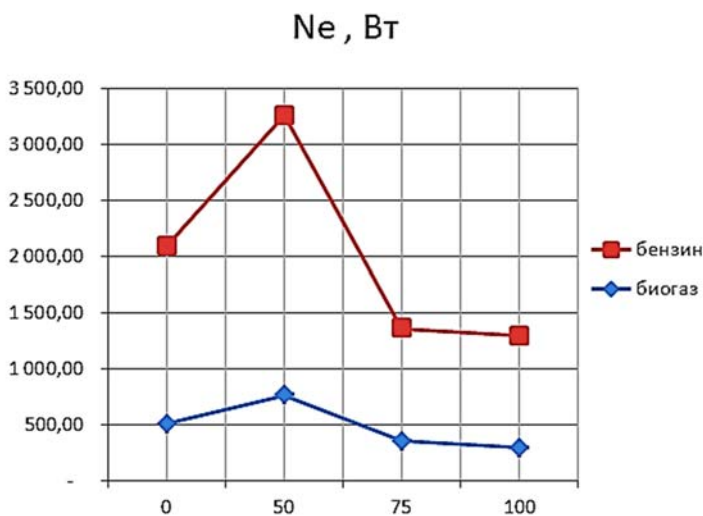


Рис. 4.6. Мощность, развиваемая двигателем

Из приведенных данных видно, что чем выше концентрация метана в биогазе, тем идет повышение эффективной мощности, а угол опережения зажигания понижается. А также угол опережения зажигания при работе на бензиновом топливе больше почти в два раза, чем на биогазовом топливе, что дает воспламенение рабочей смеси и с увеличением нагрузки УОЗ повышается. Мощность, развиваемая двигателем при работе на биогазе, снижается на холостом ходу на 24%; при нагрузке 50 Вт – 23%; при нагрузке 75 Вт – 25%; при нагрузке 100 Вт – 22%.

#### 4.6. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Полученное линейное уравнение после проверки гипотезы адекватности не может быть принятой, так как расчетное значение критерия Фишера ( $F_p$ ) превышает его табличного значения ( $F_m$ ). Поэтому для дальнейшего исследования, необходимо использовать планирование второго порядка, позволяющее получить поверхность отклика с помощью уравнения второй степени. Для реализации эксперимента использовали не композиционный план второго порядка для трех факторов. После расчета коэффициентов регрессии было получено уравнение:

$$Y = 14,1635 + 18,9471 * x + 0,1051 * y - 2,3606 * x * x - 0,0035 * x * y - 5,5077 E - 5 * y * y \quad (4.2)$$

Оценка адекватности теоретических и экспериментальных исследований проводилась по критерию Фишера, где  $F_{\text{расч}} = 0,25 < F_{\text{табл}} = 3,22$  при 95%-ной достоверности. Поэтому гипотезу об адекватности уравнения (4.2) можно считать верной. Среднеквадратическая ошибка не превышала 3,5%.

Канонический анализ математической модели (4.2) позволил получить наглядное представление о геометрическом образе изучаемой функции отклика.

Во-первых, после рассмотрения влияния факторов  $x_1$  и  $x_2$  на показатель эффективности очистки биогаза при стабилизации  $x_3$  на нулевом уровне и дифференцирования по  $x_1$  и  $x_2$  уравнение (4.2) в канонической форме имеем:

$$Y = 14,1635 + 0,1051 * x + 18,9471 * y - 5,5077E-5 * x * x - 0,0035 * x * y - 2,3606 * y * y \quad (4.3)$$

Каноническое уравнение (4.3) в геометрическом образе было представлено в виде эллиптического параболоида, поверхность имеющего экстремум. При этом коэффициенты уравнения имеют одинаковые знаки, и центр фигуры находится вблизи центра эксперимента (рис. 4.7).

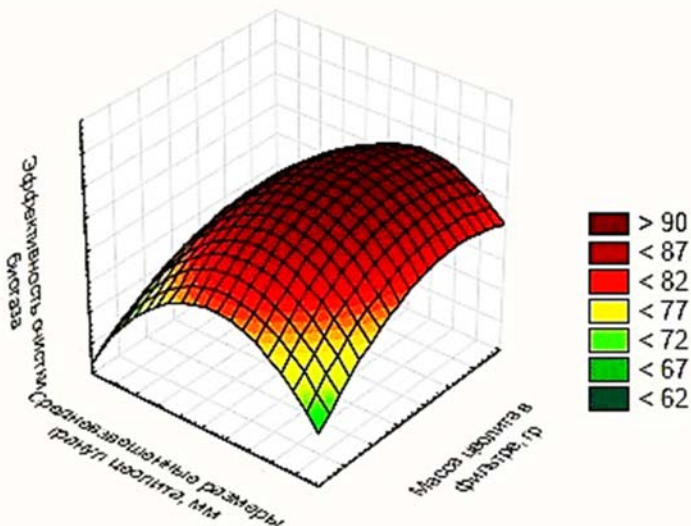


Рис. 4.7. Поверхность отклика, характеризующая эффективность очистки биогаза (Y) в зависимости от средневзвешенных размеров гранул цеолита ( $X_1$ ) и массы цеолита в фильтре ( $X_2$ ) при ( $X_3$ ) на нулевом уровне



Во-вторых, рассмотрев влияние факторов  $x_1$  и  $x_3$  при стабилизации  $x_2$ , после математических преобразований, получено каноническое уравнение:

$$Y = 55,6139 + 14,9792 * x + 3,4889 * y - 2,3281 * x * x + 0,3333 * x * y - 0,5778 * y * y \quad (4.4)$$

По аналогии уравнение (4.4) в геометрическом образе представляет собой эллиптический параболоид, поверхность которого имеет экстремум, а коэффициенты уравнения имеют одинаковые знаки. Центр фигуры находится вблизи центра эксперимента (рис. 4.8).

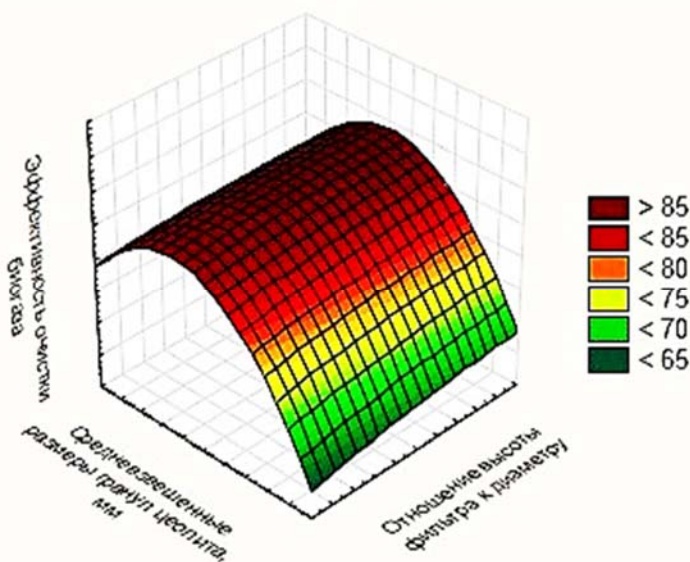


Рис. 4.8. Поверхность отклика, характеризующая эффективность очистки биогаза (Y) в зависимости от средневзвешенных размеров гранул цеолита ( $X_1$ ) и отношения высоты фильтра к диаметру ( $X_3$ ) при ( $X_2$ ) на нулевом уровне

В-третьих, при рассмотрении влияния факторов  $x_2$  и  $x_3$  при стабилизации  $x_1$ , уравнение (4.2) после преобразований имеет вид в канонической форме:

$$Y = 92,9264 + 0,0693 * x - 25,8444 * y - 2,9E-5 * x * x - 0,0053 * x * y + 4,7556 * y * y \quad (4.5)$$

Уравнение (4.5) в геометрическом образе представляет собой эллиптического параболоида, поверхность имеющего экстремум,

коэффициенты уравнения имеют одинаковые знаки, а центр фигуры находится вблизи центра эксперимента (рис. 4.9).

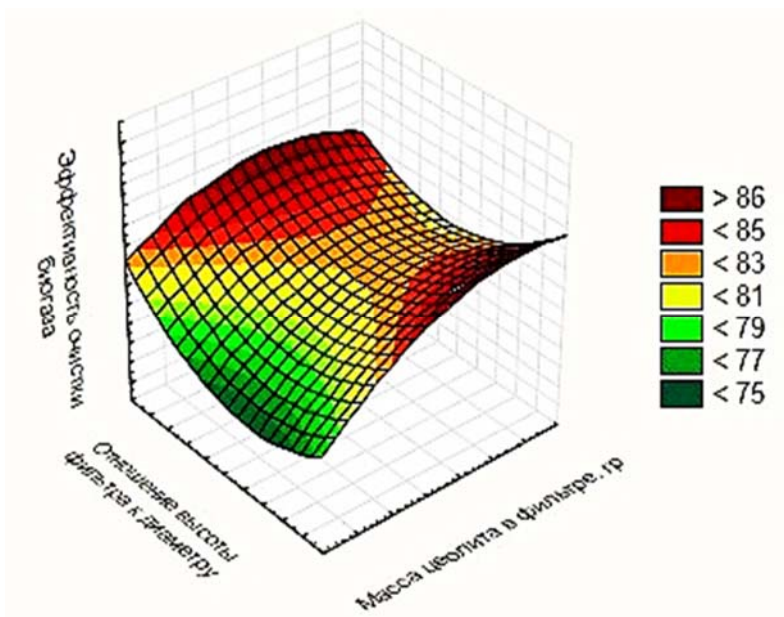


Рис. 4.9. Поверхность отклика, характеризующая эффективность очистки биогаза ( $Y$ ) в зависимости от массы цеолита ( $X_2$ ) и отношения высоты фильтра к диаметру ( $X_3$ ) при ( $X_1$ ) на нулевом уровне [102–107]

#### 4.7. ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В АГРАРНОМ СЕКТОРЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Расчеты среднего объема вредных выбросов мобильных машин в атмосферу при работе на нефтяном топливе относительно  $CO$  показывают, исходя из количества сельскохозяйственной техники с бензиновыми двигателями Якутии, числа рабочих дней в году  $D_{\text{раб.дней}} = 305$  и среднесуточного пробега автомобиля  $L_{\text{ст}} = 263100$  км/год [17].

Исходя из парка автомобильной техники с бензиновыми двигателями внутреннего сгорания, применяемых в аграрном секторе Рес-

**Глава 4. Результаты экспериментальных исследований разработанных  
фильтров очистки биогаза**

публики Саха (Якутия) на 2015 год и на основании среднегодовых пробегов рассчитаны выбросы в атмосферу относительно CO.

Таблица 4.10

Парк автомобилей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве  
(данные за 2015 год)

№	Наименование и марка автомобилей	Количество техники (шт.)	Средний суточный пробег, км	Средний годовой пробег всех автомобилей, км
1	УРАЛ-375Н	508	220	111760
2	ЗиЛ-130	704	160	112640
3	ЗиЛ-131	910	160	145600
4	ГАЗ-53А	685	180	123300
5	ГАЗ-66	945	180	170100
6	ГАЗ-33021 «Газель»	840	150	126000
7	ГАЗ-3308 «Садко»	1665	150	249750
8	УАЗ-39094 (фермер)	1754	150	263100
9	УАЗ-451ДМ	1234	150	185100
10	УАЗ-3303	1194	150	179100
	Всего	10 439	1650	1666450

Так как в агропромышленном комплексе Республики Саха (Якутия) в условиях бездорожья находятся в эксплуатации около 52% автомобилей, используемых на технологических операциях по перевозке кормов, молока и др. сельскохозяйственной продукции, то при переводе на биогаз, теоретический объем вредных выбросов CO уменьшится на 5 969, 386 т/год.

Таблица 4.11

Ожидаемый экологический эффект при переводе на биогаз

Наименование	При работе на нефтяном топливе	При переводе 40% парка на биогаз
Количество автопарка, шт.	10 439	6257
Среднегодовой пробег, км/год.	487936 560	304263 120
Выбросы в атмосферу при работе на нефтяном топливе относительно CO, т/ год	15857,938	9888,551

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности использования фильтров на основе цеолита для очистки биогаза от вредных компонентов в крестьянских хозяйствах республики.

Отсутствие химических связей между горючими компонентами в биогазовом топливе позволило рассчитать теплоту сгорания газового топлива по принципу аддитивности.

Низшую теплотворную способность при нормальных условиях (273,16 К и 101 кПа) определили по эмпирической формуле Д.И. Менделеева [28]:

$$Q_H = \alpha C + \beta H + \gamma S - \delta O - \eta W, \quad (4.17)$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $S$ ,  $W$  – содержание углерода, водорода, серы и влаги в горючем веществе, %;

$O$  – сумма кислорода и азота в горючем веществе, %;

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\eta$  – эмпирические коэффициенты.

Низшую теплотворную способность для смеси сухих горючих газов определили по формуле:

$$Q_{H\text{смеси}}^C = \sum_{i=1}^n Q_{Hi}^C * \varphi_i, \quad (4.18)$$

где,  $Q_{H\text{смеси}}^C$  – низшая теплота сгорания смеси, МДж/м<sup>3</sup>;

$Q_{Hi}^C$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го компонента смеси, МДж/м<sup>3</sup>;

$\varphi_i$  – доля  $i$ -го компонента смеси, %.

Подставляя объемные доли компонентов биогаза, получаем низшую теплоту сгорания до очистки:

$$Q_H^C = 21,18 \text{ МДж/м}^3 \quad (4.19)$$

где  $Q_H^C$  – низшая теплота сгорания до очистки биогаза;

Относительная плотность смеси биогаза вычисляется по формуле (4.20):

$$\rho_{\text{смеси}} = \sum_{i=1}^n \rho_i * \varphi_i, \quad (4.20)$$

где  $\rho_{\text{смеси}}$  – плотность смеси биогаза, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi_i$  – доля  $i$ -го компонента смеси, %.

Поскольку биогаз получается из органических отходов, то его химический состав сильно отличается. Для сравнения теплотворной способности природного газа с разными видами горючих газов введено число Воббе (Wobbe index). Природный газ с различным химическим составом и того же значения числа дает такое же количество тепла при сгорании в определенных условиях [28]. Число Воббе, характеризующее постоянство теплового потока, получаемого при сжигании биогаза разных содержаний метана:

$$W = \frac{Q}{\sqrt{\rho}}, \quad (4.21)$$

Таблица 4.11

Расчетные характеристики биогаза

Концентрация метана и примесей при соотношениях	Низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	Плотность смеси биогаза, кг/м <sup>3</sup>	Число Воббе, МДж/м <sup>3</sup>
50:50	21,18	1,237	21,06
60:40	21,56	0,916	21,45
70:30	25,13	0,855	26,73
80:20	28,69	0,79	32,60
90:10	32,26	0,72	39,83

Таким образом, из расчета видно, что после очистки разработанным фильтром на основе природного цеолита до содержания метана 90%, низшая теплота сгорания увеличивается на 11,077 МДж/м<sup>3</sup>.

По требованиям, предъявляемым к природным газам [28] установлено номинальное значение числа Воббе с отклонением от него не более  $\pm 5\%$ , чтобы учесть неоднородность и непостоянство состава природных газов 39400–52000 МДж/м<sup>3</sup>.

Исходя из этого, получаемый и очищенный биогаз при содержании метана 80 и 90% обеспечивает требуемое число Воббе [102–107].

#### 4.7.1. РАСЧЁТ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА МОДЕРНИЗАЦИЮ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ

На основании проведенных исследований установлено, что для переоборудованных на газовое топливо топливных систем сельскохозяйственных техник можно рекомендовать использование фильтра с цеолитом.

Применение данного фильтра, в сравнении с использованием штатного фильтра топливной системы, обеспечит:

- содержание метана в биогазовом топливе от 80%;
- снижение затрат на техническое обслуживание фильтров топливной системы;
- улучшение экологической обстановки Республики Саха (Якутия).

Для оценки экономической эффективности от реализации практических мероприятий приведен расчет снижения затрат.

Технико-экономические показатели вычислялись по общепринятой методике [95; 125; 126].

Таблица 4.12

Расходы на сборку фильтра

№	Наименование материалов	Кол-во	Стоимость, руб.	
			за 1 ед.	общая
1	Фильтр грубой очистки КамАЗ-740	1 шт.	1200	1200
2	Природный цеолит	1 кг	200	20
3	Медная трубка d6 мм.	1 м	200	200
4	Штуцер	2 шт.	50	100
5	Хомут червячный	2 шт.	50	100
6	Фул лента	1 шт.	100	100
7	Резиновый шланг d 10 мм	3 м	100	300
Итого			2000	

**4.7.2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

При организации полной технологической цепочки, позволяющей полноценно получать удобрение и использовать биогаз, необходимо приобрести дополнительное оборудование (таблица 4.13.).

Таблица 4.13

Перечень технологического оборудования

№	Виды расходов	Количество, шт.	Стоимость единицы, руб.	Сумма, руб.
1	Метантенк	1	82 450	82 450
2	Компрессор	1	5000	5000
3	Расходный материал и монтажные работы		30 000	30 000
4	Газгольдер	1	20 000	20 000
Итого				137 450

Для переоборудования автомобиля на газовое топливо, необходимо установить ГБО 2 поколения. Стоимость переоборудования на газобаллонное оборудование составляет 60000 рублей. Для определения окупаемости переоборудования ГБО используем следующую формулу:

$$O_{ГБО} = \frac{100 \cdot (Z_{ГБО} + Z_{уст} + Z_{ТО} + Z_{ф})}{(Ц_1 - Ц_2) \cdot L_{cc} \cdot P} \quad (4.22)$$

#### Глава 4. Результаты экспериментальных исследований разработанных фильтров очистки биогаза

где  $Z_{ГБО}$  – затраты на оборудование ГБО, руб.;

$Z_{уст}$  – затраты на установку ГБО, руб.;

$Z_{ТО}$  – затраты на гарантийное ТО, руб.;

$Z_{ф}$  – затраты на изготовление фильтра, руб.;

$\Pi_1$  – стоимость 1 л бензина АИ-92, руб.;

$\Pi_2$  – стоимость 1 л биогаза, руб.;

$L_{сс}$  – среднесуточный пробег автомобиля, км/день;

$P$  – расход бензина на 100 км пробега автомобиля, л.

В таблице 4.14 представлены экономические показатели, используемые в расчете окупаемости ГБО.

Таблица 4.14

##### Экономические показатели

№	Наименование	Обозначения	Значение
1	Затраты на оборудование ГБО, руб.	$Z_{ГБО}$	8500
2	Затраты на установку ГБО, руб.	$Z_{уст}$	5000
3	Затраты на гарантийное ТО, руб.	$Z_{ТО}$	2000
4	Затраты на изготовление фильтра, руб.	$Z_{ф}$	2000
5	Стоимость 1 литра бензина АИ-92, руб.	$\Pi_1$	50
6	Стоимость 1 литра биогаза, руб.	$\Pi_2$	15
7	Расход бензина на 100 км, л	$P$	20
8	Среднесуточный пробег автомобиля, км/день	$L_{сс}$	100
9	Срок окупаемости системы ГБО с разработанным фильтром составит		6 месяцев

Таким образом, установка системы ГБО на автомобиль с 4 цилиндровым двигателем окупится через 0,6 года.

#### 4.7.3. РАСЧЕТ ПРЕДОТВРАЩЕННОГО УЩЕРБА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Укрупненная оценка величины предотвращенного ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух может проводиться как для одного крупного источника или группы оцениваемых источников, так и для региона в целом.

При укрупненных оценках предотвращенного ущерба (либо оценке прогнозируемой величины предотвращенного ущерба) для

территории в целом, в качестве оцениваемой группы источников могут рассматриваться все источники в данном регионе, рассматриваемые как единый «приведенный» источник. В этих случаях для определения величины предотвращенного ущерба предлагается использовать усредненные расчетные значения экономической оценки ущерба на единицу приведенной массы атмосферных загрязнений (удельные ущербы) для основных экономических районов РФ [131].

$$Y_{\text{пр}}^a = Y_{\text{др}}^a \cdot (M_1^a - M_2^a) \cdot K_3^a \cdot J_d, \quad (4.23)$$

где  $Y_{\text{пр}}^a$  – величина экономической оценки удельного ущерба от выбросов загрязняющих веществ атмосферный воздух, для г-го экономического района РФ, руб./усл.т.

$M_1^a, M_2^a$  – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ соответственно на начало и конец расчетного периода в рассматриваемом регионе, усл.т.

$K_3^a$  – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России, определяется в соответствии с [131] для Республики Саха (Дальневосточный регион)  $K_3^a=1,1$ .

$J_d$  – индекс-дефлятор, для сельского хозяйства  $J_d=1,425$  (на 2017 год).

Приведенная масса загрязняющих веществ рассчитывалась по формуле:

$$M_k^a = \sum_{i=1}^N m_i^a \cdot K_{3i}^a, \quad (4.24)$$

где:  $m_i^a$  – масса выброса в атмосферной воздух i-го загрязняющего вещества или группы веществ с одинаковым коэффициентом относительной эколого-экономической опасности, т/год.

$K_{3i}^a$  – коэффициент относительной эколого-экономической опасности i-го загрязняющего вещества или группы веществ.

i – индекс загрязняющего вещества или группы загрязняющих веществ.

N – количество учитываемых групп загрязняющих веществ.

По проведенным расчетам величина удельного ущерба от вредных выбросов мобильных машин, эксплуатируемых в сельскохозяйственном производстве для Республики Саха (Якутия) составила:

$$Y_{\text{пр}}^a = 34,2 \cdot (4280-2912) \cdot 1,1 \cdot 1,425 = 73336,428 \text{ руб./усл. т.}$$



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по решению проблемы повышения экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве с использованием мобильных машин сделаны следующие выводы:

1. Изучение состояния аграрного сектора Республики Саха (Якутия) выявило неблагоприятную экологическую обстановку. Отходы животноводства, содержащие большое количество биогенных элементов и патогенных микроорганизмов без предварительной обработки вносятся на поля в качестве удобрений, смываются поверхностными водами, попадая в пищевые цепи. Вредные выбросы мобильных машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве на различных технологических операциях, в свою очередь, также наносят вред окружающей среде и здоровью обслуживающего персонала.

2. Для агропромышленного комплекса складывается ситуация, при которой применение современных биогазовых технологий является не только выгодным с экологической и экономической точки зрения, но и единственным способом обеспечить свои энергетические потребности, особенно в удаленных районах республики.

3. Для проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса очистки биогаза создан методический комплекс, позволивший разработать технологическую схему линии очистки и обосновать конструктивные параметры фильтра и фильтрующего элемента.

4. Разработана математическая модель очистки биогаза фильтром с природным цеолитом. Получена зависимость ресурса работы фильтрующего элемента от диаметров при различных степенях порозности, позволяющая оптимизировать конструктивные параметры фильтра. Обоснованы оптимальные параметры фильтра при эффективности очистки биогаза по содержанию метана до 55% при начальной концентрации метана 42%. Очищенный биогаз содержал метана 93,3%. Оптимальными параметрами явились: средневзвешенный размер частиц цеолита 0,004 м; масса цеолита в фильтре 750-800 г.; отношение высоты фильтра к диаметру 3:4.

Проведенная оценка адекватности теоретических и экспериментальных исследований по критерию Фишера показала сходимость результатов  $F_{расч} = 0,25$   $F_{табл} = 3,22$  при 95%. Среднеквадратическая ошибка составила 3,5%.

5. Разработана и обоснована конструкция фильтра очистки биогаза с природным цеолитом (Патент №162185, МПК B01D

53/00). По результатам априорного ранжирования были определены наиболее влияющие факторы – размеры гранул цеолита, масса цеолита в фильтре, отношение высоты к диаметру фильтра.

6. Результатами экспериментальных исследований доказана возможность использования цеолита в качестве фильтрующего элемента в фильтрах очистки биогаза, пригодного по своим свойствам для применения в качестве моторного топлива в двигателях мобильных машин. В результате очистки биогаза в разработанном фильтре с цеолитом получен биогаз с содержанием метана 93,33%, что на 22,7% выше, чем при очистке в фильтре с металлической стружкой и на 29,1% лучше очистки в фильтре с активированным углем.

7. Результаты экспериментальных исследований по снятию внешних скоростных характеристик двигателя при работе на бензиновом и биогазовом топливах показали, что концентрация метана после очистки биогаза природным цеолитом составила 93,3354%. Это на 22,7% выше, чем при использовании фильтров с металлической стружкой, а при использовании фильтра с активированным углем выше на 29,1%. Сравнительные испытания в одинаковых условиях по эффективности очистки биогаза показали, что фильтр с фракциями цеолита 0,004 м имел максимальную эффективность очистки. Мощность, развиваемая лабораторным одноцилиндровым двигателем при работе на биогазе, снижается на холостом ходу на 24%; при нагрузке 50 Вт на 23%; при нагрузке 75 Вт на 25%; при полной нагрузке на 22%.

8. По результатам исследований были получены оптимальные параметры фильтра: эффективность фильтра очистки биогаза составила 83 – 84% при размерах гранул цеолита 0,004 м, массе цеолита в фильтре 750 – 850 г. и отношении высоты фильтра к диаметру от 3,1 до 4,2.

9. При переводе на биогазовое топливо выбросы одного автомобиля в атмосферу относительно СО сократились на 1,6 т/год. Окупаемость капитальных затрат при переводе на биогазовое топливо составляет 0,5 года. Предотвращенный ущерб окружающей среде территории Республики Саха от вредных выбросов мобильных машин, эксплуатируемых в сельскохозяйственном производстве составил 73336,428 руб/усл.т.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адельсон, С.В. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии / С.В. Адельсон. – М.: Государственное научно-техническое изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. – 309 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 305–306.
2. Айвазян, С.А. Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Н.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 474 с.
3. Азаматов, Б.Н. Родий в составе каталитических материалов для нейтрализации отработавших газов / Б.Н. Азаматов, Е.В. Титова, Ю.В. Павлова, Н.Н. Грабовская // Новые материалы для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания; Барнаул, 2010. – С. 72–78.
4. Адлер, Ю.П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
5. Алехина, М.Б. Подбор условий предварительной активации цеолита NAX с применением метода планирования эксперимента / М.Б. Алехина, Е.Н. Иванова, С.Л. Анхазарова, Т.В. Конькова // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. – 2014. – № 2. – С. 5.
6. Алехина, М.Б. Термическая активация цеолитов типа X / М.Б. Алехина, Е.Н. Иванова, С.Л. Анхазарова. – Успехи в химии и химической технологии. Т. XXVI. – 2012. – № 8 (137). – 26 с.
7. Альтернативные виды топлива, его влияние на долговечность ДВС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=564688>
8. Альтернативное топливо для автомобилей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://altenergiya.ru/apologiya/alternativnoe-toplivo.html>
9. Баадер, В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; пер. с нем. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
10. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, микрокинетика, подобие, моделирование, проектирование / Д.А. Баранов – М.: Логос, 2000. – 480 с.
11. Бесков, С.Д. Технохимические расчеты. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1966. – 520 с.
12. Биогаз-85. Проблемы и решения: материалы сов.-фин. симп., 4–6 февр. 1985 г. – М.; Хельсинки, 1985. – 279 с.
13. Биогаз: делаем деньги из отходов производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cleandex.ru/articles/2015/12/12/biogas\\_making\\_money\\_from\\_waste](http://www.cleandex.ru/articles/2015/12/12/biogas_making_money_from_waste)

14. Биогаз – альтернативное топливо будущего / У. Громова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pronedra.ru/alternative/2012/07/10/biogaz> (дата обращения: 15.09.2013).

15. Биогазовые технологии: курс лекций / сост. Ю.В. Караева; Учр. Рос. Акад. Наук; Казан. науч. центр. РАН; Исследоват. центр проблем энергетики. – Казань, 2013. – 61 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pandia.org/text/78/567/20920.php> (дата обращения: 12.04.2015).

16. Богатырев, Т.С. Разработка технологии применения эффективных реагентов для очистки нефти от сероводорода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Т.С. Богатырев. – Астрахань, 2014. – 168 с.

17. Бортников, С.П. Основы проектирования предприятий автомобильного транспорта: учебное пособие / С.П. Бортников. – Ульяновск, УлГТУ, 2008. – 63 с.

18. Бразовский, В.В. Моделирование процесса фильтрования полидисперсной суспензии / В.В. Бразовский, Н.П. Тубалов, Д.Н. Титов // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями. – Барнаул, 2007. – С. 59–70.

19. Брук, О.Л. Фильтрование угольных суспензий / О.Л. Брук. – М.: Недра, 1978. – 272 с.

20. Веденев, А.Г., Веденева, Т.А. Руководство по биогазовым технологиям / Бишкек: ДЭМИ, 2011. – 84 с.

21. Великанов, Д.П. Природный газ как заменитель нефтяных топлив // Российская академия наук: журнал. – 1985. – №7. – 40 с.

22. Волкова, Н.А. Экономическая оценка инженерных проектов (методика и примеры расчетов на ЭВМ): учебное пособие / Н.А. Волкова, В.В. Коновалов, И.А. Синицын, А.С. Иванов; под ред. Н.А. Волковой. – Пенза, 2002. – 242 с.

23. Глизманенко, Д.Л. Получение кислорода / Д.Л. Глизманенко. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1965. – 508 с.

24. Глядяев, С.О. Повышение эффективности использования древесных отходов лесозаготовок путем производства и них топлива для газогенераторных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / С.С. Глядяев. – Архангельск, 2009. – 20 с.

25. ГОСТ Р 53790-2010 Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам. – М.: Стандартинформ, 2011. – 15 с.

26. ГОСТ 5542-2014 Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015. – 9 с.

27. ГОСТ Р 51251-99 Фильтры очистки воздуха. Классификация. Маркировка. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 9 с.
28. ГОСТ 22667-82 Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 3 с.
29. ГОСТ 27577-2000 Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 17 с.
30. Готовцева, Т.А. Комбинированная очистка топлива в топливных системах машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Т.А. Готовцева. – М.: 2013. – 17 с.
31. Доходы из отходов: как российские учёные получили энергию биомассы / В.В. Тепляков // Наука и технологии РФ. – 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=221&d\\_no=40356#.UwglzWJ\\_uNAhttp://www.rosbiogas.ru/literatura/biogazovie-ustanovki-prakticheskoe-posobie/ochistka-ot-seri-biogaza.html](http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=221&d_no=40356#.UwglzWJ_uNAhttp://www.rosbiogas.ru/literatura/biogazovie-ustanovki-prakticheskoe-posobie/ochistka-ot-seri-biogaza.html)
32. Друзьянова, В.П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В.П. Друзьянова. – Улан-Удэ, 2016. – 273 с.
33. Друзьянова В.П. Технические решения использования биогаза в двигателях внутреннего сгорания / В.П. Друзьянова, С.А. Петрова, М.К. Охлопкова // Наука и мир. – 2013. – № 3 (3). – С. 53–56 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://scienceph.ru/d/413259/d/science-and-world--3-\(3\)-november\\_1\\_1.pdf](http://scienceph.ru/d/413259/d/science-and-world--3-(3)-november_1_1.pdf) (дата обращения: 29.06.2014).
34. Друзьянова, В.П. Анализ способов получения альтернативной энергии в условиях Якутии / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Тинчуринские чтения: сб. тр. VII Междунар. науч. конф. – Казань, 2012. – С. 99.
35. Друзьянова, В.П. Биогаз для сжигания в котлах отопления в условиях Якутии / В.П. Друзьянова, С.А. Петрова // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф., проект Sworld. – Одесса, 2012. – Т. 9. – Вып. 3. – С. 89–92.
36. Друзьянова, В.П. Биогазовая установка для переработки отходов частных животноводческих хозяйств применительно к условиям Республики Саха (Якутия) / В.П. Друзьянова, Е.Н. Кобякова // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 31 окт. 2014 г.: в 17 ч. – Тамбов, 2014. – Ч. 17. – С. 57–61.

37. Друзьянова, В.П. Биогазовая установка для применения в частных животноводческих хозяйствах / В.П. Друзьянова, Е.Н. Кобякова // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 80-летию образования ИрГ-СХА, (28–29 апр. 2014 г., г. Иркутск). – Иркутск, 2014. – С. 132–138.

38. Друзьянова, В.П. К переработке и утилизации органических отходов сельского хозяйства / В.П. Друзьянова, Д.С. Осипов, Я.С. Семенов // Химия под знаком Сигма: исследования, инновации, технологии: материалы Всерос. науч. молодеж. шк.-конф. – Омск, 2010. – С. 230–231.

39. Друзьянова, В.П. Перспективы получения и применения биотоплива для ДВС в Якутии / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: сб. материалов IX Молодеж. междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. – Новосибирск, 2012. – Ч. 2. – С. 45–52.

40. Друзьянова, В.П. Перспективы сооружения биогазовой станции на базе Хатасского свиного комплекса Якутии / В.П. Друзьянова // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов VII всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию приборостроит. фак., (Ижевск, 15–17 нояб. 2011 г.). – Ижевск, 2012. – С. 38–40.

41. Друзьянова, В.П. Применение биогаза в двигателях внутреннего сгорания / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 15. – С. 47–51.

42. Друзьянова, В.П. Возможности использования биогаза в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. – 2013. – №6 (45). – С. 48–52.

43. Друзьянова, В.П. Применение биотехнологии в агропромышленном комплексе Якутии / А.К. Аммосова, В.П. Друзьянова // Вестник Восточно-Сибирского государственного технологического университета. – 2011. – № 2. – С. 24–27.

44. Друзьянова, В.П. Результаты экспериментального исследования автомобильного биогазового двигателя внутреннего сгорания / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Техника и технологии: роль в развитии современного общества: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 4 окт. 2013 г.: сб. науч. тр. – Краснодар, 2013. – С. 8–14.

45. Друзьянова, В.П. Технико-экономическое обоснование перевода автотранспорта на биогаз / В.П. Друзьянова, С.А. Петрова, М.К. Охлопкова // От кризиса к модернизации: мировой опыт и российская практика фундаментальных и прикладных научных разработок в образовании, языкознании, психологии, филологии: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 27–28 июня 2014 г., г. Санкт-Петербург. – СПб., 2014. – С. 47–48.
46. Друзьянова, В.П. Технология производства биогаза из органического сырья в условиях Якутии / В.П. Друзьянова, С.А. Петрова, М.К. Охлопкова // Научное обозрение. – М., 2014. – С. 156.
47. Друзьянова, В.П. Утилизация навоза крупного рогатого скота в биогазовых установках / В.П. Друзьянова // Вузовская наука – основа подготовки агроспециалистов: материалы респ. науч.-практ. конф., 27–28 марта 2003 г. – Якутск, 2003. – С. 98–99.
48. Друзьянова, В.П. Цеолит и перспективы его использования при очистке биогаза / В.П. Друзьянова, Н.В. Петров // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – №18. – С. 46–56.
49. Друзьянова, В.П. Экспериментальный стенд для исследования двигателя внутреннего сгорания на биогазовом топливе / В.П. Друзьянова, К.К. Кривошапкин, Н.В. Петров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – №1 (11). – С. 45–50.
50. Друзьянова, В.П. Оптимизация угла опережения зажигания двигателя внутреннего сгорания на биогазовом топливе / В.П. Друзьянова, А.А. Махутов, С.С. Адамов [и др.] // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 80-летию образования ИрГСХА, (28–29 апр. 2014 г., г. Иркутск). – Иркутск, 2014. – С. 115–118.
51. Друзьянова, В.П. Поиск оптимальной мощности двигателя внутреннего сгорания при переходе на биогазовое топливо путем изменения угла опережения зажигания / В.П. Друзьянова, А.А. Махутов, С.С. Адамов [и др.] // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2015. – №1 (12). – С. 42–46.
52. Друзьянова, В.П. Результаты экспериментального исследования автомобильного биогазового двигателя внутреннего сгорания / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Кабанов [и др.] // Техника и технологии: роль в развитии современного общества: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 4 окт. 2013 г.: сб. науч. тр. – Краснодар, 2013. – С. 8–14.

53. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Быков, Ю.И. Дытнерский [и др.], под ред. Ю.И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

54. Жужжиков, В.А. Фильтрование: теория и практика разделения суспензий / В.А. Жужжиков. – М.: Химиздат, 1980. – 397 с.

55. Жужжиков, В.А. Фильтрование / В.А. Жужжиков. – М.: Химия, 1971. – 420 с.

56. Захарченко, А.Н. Роль биогазовой технологии в современных системах ведения сельского хозяйства / А.Н. Захарченко, И.А. Руфай // Техника и технологии агропромышленного комплекса. – 2005. – Вып. 4 (14). – С. 39–41.

57. Земсков, В.И. Проектирование технических систем производства биогаза в животноводстве: учебное пособие / В.И. Земсков, И.Ю. Александров. – СПб.: Лань, 2017. – 320 с.

58. Земсков, В.И. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2014. – 368 с.

59. Земсков, В.И. Проектирование ресурсосберегающих технологий и технических систем в животноводстве: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2016. – 384 с.

60. Земсков, В.И. Свойства фильтрующих перегородок из природного цеолита / В.И. Земсков, Г.М. Харченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – №4. – 148 с.

61. Белаль И.С.С. Разработка мероприятий по повышению эффективности использования биогаза в условиях Республики Судан: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / И.С.С. Белаль. – М., 2007. – 189 с.

62. Калименова, О.А. Тенденция в развитии сероочистки природного газа и газового конденсата на Оренбургском ГПЗ / О.А. Калименова, С.А. Молчанов, А.И. Шкоряпкин // Химия защиты окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2006. – №3. – С. 34–36.

63. Каратаева, Е.В. Физико-химическая модификация природных цеолитов с целью улучшения их сорбционных свойств / Е.В. Каратаева, В.В. Аньшакова // На стыке наук: материалы II Международной научной Интернет-конференции: в 2 т. – Казань, 2014. – 172 с.

64. Каратаева, Е.В. Экологические аспекты применения природных и модифицированных цеолитов месторождения Хонгуруу / Е.В. Каратаева, В.В. Аньшакова // Наука и образование. – 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20788853>



65. Колобродов, В.Г. Повышение качества биогаза при помощи адсорбционных процессов / В.Г. Колобродов, Л.В. Карнацевич, М.А. Хажмурадов // Тезисы докладов II междунар.конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов». – Харьков, 2005. – С. 263–265.
66. Колодезников, К.Е. Актуальные проблемы освоения цеолитового сырья месторождения Хонгуруу: материалы научных чтений, посвященных памяти первооткрывателя месторождения. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. – 124 с.
67. Колодезников, К.Е. Комплексная программа по практическому использованию цеолитов месторождения Хонгуруу в народном хозяйстве на 1992 г.: отчет / К.Е. Колодезников, В.В. Степанов – Якутск: ЯИГН СО РАН, 1993. – 155 с.
68. Колодезников, К.Е. Перспективы применения цеолитовых пород месторождения Хонгуруу: сб. научных трудов. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1993. – 92 с.
69. Комаров, В.С. Адсорбенты и их свойства / В.С. Комаров. Минск: Наука и техника, 1977. – 432 с.
70. Кузнецова, Н.А. Интенсификация абсорбционной очистки газовых выбросов в аппаратах с объемной сетчатой псевдоожиженной насадкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Н.А. Кузнецова. – Иваново, 2007. – 18 с.
71. Кузнецова, Н.А. Характеристики псевдоожиженного слоя орошаемой насадки из полимерных материалов / Н.А. Кузнецова, М.Г. Беренгартен, М.И. Ключенкова // VIII междунар. симпозиум молодых ученых, аспирантов и студентов «Техника экологически чистых производств в XXI веке: Проблемы и Перспективы», Москва, 12–13 октября 2004 г. – 241 с.
72. Купавых, А.Б. Технология осушки газа с применением вихревых аппаратов // XVIII творческая конференция, III научно-техническая выставка молодых ученых и специалистов. – Уфа: АНК «Башнефть», 1999. – 19 с.
73. Куров, Б.А. Как уменьшить загрязнение окружающей среды автотранспортом. Россия в окружающем мире: 2000 (Аналитический ежегодник). – М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. – 328 с.
74. Малахов, Н.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / Н.Н. Малахов, Ю.М. Плаксин, В.А. Карин. – Орел: ГТУ, 2001. – 687 с.
75. Мантров, А.А. Повышение эффективности первичной очистки растительных масел с помощью центробежных очистителей: дис. ... канд. техн. наук – Саратов, СГАУ, 2002.

76. Медведев, Г.В. Модель очистки дисперсных потоков отработавших газов / Г.В. Медведев, Н.П. Тубалов, В.В. Бразовский, Д.Н. Титов // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями. – Барнаул, 2007. – С. 71–74.

77. Мельберт, А.А. Проблемы снижения вредных выбросов дизелей / А.А. Мельберт, Н.В. Батурин, Т.А. Стопорева // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями. – Барнаул, 2007. – С. 4–10.

78. Мельберт, А.А. Техногенная нагрузка на окружающую среду от транспортной деятельности / А.А. Мельберт, М.Л. Тихомиров, Ю.В. Павлова // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями. – Барнаул, 2007. – С. 10–13.

79. Мельберт, А.А. Определение стоимости капиталистической очистки газов / А.А. Мельберт, Н.В. Батурин, М.Л. Тихомиров // Экологические проблемы энергоустановок с тепловыми двигателями. – Барнаул, 2007. – С. 4–10; 26–33.

80. Мельберт, А.А. Влияние угара масла в дизеле на состав твердых частиц / А.А. Мельберт, А.В. Унгефук, А.В. Нешатаев, С.А. Голованов // Новые материалы для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания. – Барнаул, 2010. – С. 20–26.

81. Молчанов, С.А. Разработка процесса осушки и очистки природного сернистого газа силикагелем и цеолитом: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.07 / С.А. Молчанов. – М., 2001. – 110 с.

82. Морева, Н.П. Разработка процесса очистки природного газа от сернистых соединений на модифицированном клиноптилолите: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.01 / Н.П. Морева. – М., 2001. – 20 с.

83. Новгородов, П.Г. Актуальные проблемы освоения цеолитового сырья месторождения Хонгуруу: Материалы научных чтений, посвященных памяти первооткрывателя месторождения К.Е. Колодезника – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. – 124 с.

84. Новгородов, П.Г. Клиноптилолитовый туф месторождения Хонгуруу в очистке питьевой воды / П.Г. Новгородов, К.Е. Колодезников // Безопасность питьевой воды и продовольствия. – Мурманск, 1997. – 22 с.

85. Новгородов, П.Г. Местные природные материалы – лучшее сырье для изготовления нефтесорбентов / П.Г. Новгородов, Н.И. Кондратьева, К.Е. Колодезников, Р.И. Габышева // Наука и образование. – 2003. – 57 с.

86. Новичков, А.В. Улучшение очистки топлива в топливной системе сельскохозяйственных тракторов использованием фильтра-влажготделителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.В. Новичков. – Пенза, 2008. – 139 с.

87. Очистка газов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/864>

88. О республике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sakha.gov.ru/node/448>

89. Пат. №2540019 Российская Федерация, МПК С 12М 1/02. Биореактор. Оpubл. 27.01.2015 – Бюл. №3 / Е.Н. Кобякова, С. Ямпиров, В.П. Друзьянова, О.П. Семенова; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления.

90. Пат. №162185 Рос. Федерация, МПК В01D 53/00 Устройство для очистки биогаза. Оpubл: 27.05.2016 Бюл. №15 / Е.Н. Кобякова, О.П. Семенова, Д.Н. Раднаев, С.С. Ямпиров, В.П. Друзьянова; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления.

91. Паронян, В.Х. Механизм адсорбционной рафинации растительных масел / В.Х. Паронян, Ю.В. Боголюбская // Хранение и переработка сельхозсырья, 2007. – С. 22–23.

92. Петров, Н.В. Обеспечение работоспособности бензиновых двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники при переводе на биогаз корректированием регулировочных параметров двигателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Н.В. Петров. – Улан-Удэ, 2013. – 149 с.

93. Предпосылки к развитию биогазовых технологий в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosbiogas.ru/predposilki-k-razvitiyu-biogazovix-texnologij-v-rossii.html>

94. Производство биогаза в Республике Беларусь и Швеции. Обмен опытом: отч. о выполнении проекта. – CSD Uppsala Centre for Sustainable Development, 2012.

95. Разработка технических требований и технико-экономического обоснования к созданию и переоборудованию мобильной сельскохозяйственной техники, работающей на газомоторном топливе: отчет о НИР / З.А. Годжаев, Г.С. Савельев, М.Н. Кочетков, Е.В. Овчинников, А.В. Овчинников, А.В. Трубицын. – Автогазозаправочный комплекс, 2015. – 21 с.

96. Романков, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, Н.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.

97. Раднаев, Д.Н. Применение топливного фильтра на автомобиле с газобаллонным оборудованием для очистки биогаза с наполнителем из природного цеолита / Д.Н. Раднаев, О.П. Семенова // Вестник БГСХА им. В.Р. Филиппова. – 2015. – С. 88–91.

98. Рейтер, П.А. Влияние условий термической подготовки цеолитов на адсорбцию паров воды / П.А. Рейтер, С.А. Анурова // Успехи в химии и химической технологии. Т. XXII. – 2008. – С. 84–86.

99. Руководство по биогазу. От получения до использования. Изд-во: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. V. (FNR) OT Gulzow, Hofplatz 1, 18276 Gulzow–Pruzen, 2010.

100. Сатьянов, С.В. Повышение эффективности биоустановок путем получения альтернативной энергии и биоудобрений: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Сатьянов. – М.: Российский ГАЗУ, 2011. – 158 с.

101. Синицын, П.С. Совершенствование диагностирования технического состояния фильтра тонкой очистки двигателей мобильной сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / П.С. Синицын. – Рязань, 2014. – 132 с.

102. Семенова, О.П. Цеолит – наполнитель фильтра для очистки биогаза // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11. – № 4 (июль–август). – С. 47–51.

103. Семенова, О.П. Фильтр для очистки биогаза для получения моторного топлива / О.П. Семенова, В.П. Друзьянова, Е.Н. Кобякова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 2015. – С. 236–238.

104. Семенова, О.П. Применение топливного фильтра на автомобиле с газобаллонным оборудованием для очистки биогаза с наполнителем из природного цеолита / О.П. Семенова, Д.Н. Раднаев // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. – 2015. – №3 (40) (июль–сентябрь). – С. 88–91.

105. Семенова, О.П. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров фильтра для очистки биогаза / О.П. Семенова, Д.Н. Раднаев, С.С. Ямпиллов // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2016. – Т. 11. – №4 (июль–август). – С. 88–91.

106. Семенова, О.П. Математическая модель очистки биогаза / О.П. Семенова, Д.Н. Раднаев // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. – 2016. – №3 (44) (июль–сентябрь). – С. 88–91.

107. Семенова, О.П. Обоснование применения биогаза в качестве моторного топлива в фермерских хозяйствах / О.П. Семенова // *Аэкономика: экономика и сельское хозяйство*. – 2016. – №4 (12). – 13 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aecomomy.ru>
108. Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.
109. Судан CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Energy and Biomass Engineering, volume V, LCCN98-93767, ISBN0-929355-97-0 Published by ASAE 1999. – P. 140–160.
110. Таран, Н.Г. Адсорбенты и иониты в пищевой промышленности / Н.Г. Таран. – М.: Легкая промышленность, 1983. – 378 с.
111. Терешин, Б.Н. Передовые методы работы на саморазгружающих центрифугах ПС-1200 при фуговке утфелей первой кристаллизации // *Сахарная промышленность*. – 1956. – №5.
112. Тихомиров, В.Б. Математические методы планирования экспериментов при изучении нетканых материалов. – М: Лёгкая индустрия, 1968. – 156 с.
113. Удлер, Э.И. Фильтр очистки топлива и его подогрева для топливных систем сельскохозяйственных машин / Э.И. Удлер, С.А. Зыков // *Сельское хозяйство [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/2\\_KAND\\_2014/Agricole/2\\_155981.doc.htm](http://www.rusnauka.com/2_KAND_2014/Agricole/2_155981.doc.htm)
114. Удлер, Э.И. Фильтрующие топливно-масляные элементы из бумаги и картона / Э.И. Удлер, В.И. Зуев. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 1983. – 140 с.
115. Удлер, Э.И. Теоретическая оценка процессов очистки и подогрева топлива в мобильных машинах / Э.И. Удлер, П.В. Исаенко, Д.В. Халтурин, А.В. Лысунец // *Известия Томского политехнического университета* – 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ogbus\\_3\\_2014\\_p329-341\\_UsachevAP\\_ru](http://www.ogbus_3_2014_p329-341_UsachevAP_ru)
116. Усачев, А.П. Математическая модель оптимизации геометрических параметров газовых фильтров, располагаемых в обогреваемых помещениях / А.П. Усачев, С.В. Густов // *Нефтегазовое дело*. – 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2014/ogbus\\_4\\_2014\\_p279-301\\_UsachevAP\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2014/ogbus_4_2014_p279-301_UsachevAP_ru.pdf)
117. Усачев, А.П. Совершенствование принципов очистки природного газа от твердых, жидких и вязких примесей на основе двухступенчатых многоблочных фильтров с односторонним присоединением входного и выходного штуцеров / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирбков, Д.В. Салин, А.Е. Даньшев // *Нефтегазовое дело*. – 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ogbus\\_3\\_2014\\_p329-341\\_UsachevAP\\_ru](http://www.ogbus_3_2014_p329-341_UsachevAP_ru)

118. Усачев, А.П. Обоснование применения и разработка газовых фильтров – сепараторов для комплексной очистки от твердых примесей, воды, жидких углеводородов, смолистых и сажистых веществ / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, Д.В. Салин, З.М. Усуев // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ogbus\\_4\\_2015\\_p345-361\\_UsachevAP\\_ru](http://www.ogbus_4_2015_p345-361_UsachevAP_ru)

119. Усачев, А.П. Математическая модель для выбора варианта установки грубой очистки природного газа / А.П. Усачев, А.Л. Густов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2012. – №5. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ogbus\\_5\\_2012\\_p255-269\\_UsachevAP\\_ru](http://www.ogbus_5_2012_p255-269_UsachevAP_ru)

120. Халтурин, Д.В. Пути повышения защиты топливной системы мобильных машин от загрязнений / В.Д. Исаенко, Д.В. Халтурин, П.В. Исаенко // Современные достижения аграрной науки в животноводстве, растениеводстве и экономике: Сб. научн. тр. 13 региональной научно-практической конференции, ТСХИ. – Томск, 2011. – Вып. 13. – С. 154–158.

121. Харченко, Г.М. Обоснование способа очистки соевого масла и конструктивно-технологической схемы центрифуги / Г.М. Харченко // Механизация и электрификация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. ДальГАУ. Благовещенск, 1998. – Вып. 3. – С. 96–99.

122. Харченко, Г.М. Механико-технологические основы повышения эффективности процесса центробежной очистки растительных масел в условиях сельскохозяйственных предприятий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Г.М. Харченко. – Барнаул, 2009. – 463 с.

123. Харченко, Г.М. Оптимизация рабочих параметров центрифуги для очистки подсолнечного масел / Г.М. Харченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – №1. – С. 47–48.

124. Химченко, А.В. Улучшение топливной экономичности и снижение токсичности двухтактных бензиновых двигателей на частичных режимах: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.В. Химченко. – Горловка, Донецкий НТУ, 2004. – 193 с.

125. Цыбиков, Б.Б. Анализ и учет эффективности работы технических служб АТП: Методические указания к практическому занятию для студентов специальности 150200. – Омск: Изд-во Сибади, 2002. – 9 с.

126. Шпилько, А.В. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. – М.: МСХ РФ, 1998. – 220 с.

127. Шкоропад, Д.Е. Осадительное центрифугирование / Д.Е. Шкоропад // Вестник технической и экономической информации. – 1977. – №3.

128. Что такое CNG? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://secgas.com/download/chto-takoe-cng.pdf>

129. Chelishchev N.F., Berenshtein B.G., Volodin V.F. Tseolity – novyi tip mineral'nogosyr'ya (Zeolites – new type of mineral raw materials). Moscow, Nedra, 1987. – p. 176

130. Wassan, D.T. e. a. Powder Technol / D.T. Wassan, W. Wnek, R. Davies. – 1976. – V. 14. – № 2. – P. 209–228.

131. Положение о нормативах выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и вредных воздействий на него. Утв. Правительством РФ №183 от 02.03.2000 г.

132. Осмонов, О.М. Научно-технические основы создания автономных биоэнергетических установок для крестьянских хозяйств в горных районах Киргизии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / О.М. Осмонов. – М., 2012. – 251 с.

133. Осмонов, О.М. Техничко-экономическая оценка биогазовых установок/ О.М. Осмонов, А.А. Ковалев // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф., (16–17 мая 2006 г., г. Москва, ГНУ ВИЭСХ): в 5 ч. Ч. 2. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – С. 267–272.

134. Осмонов, О.М. Экономическая оценка использования биоэнергетической установки / О.М. Осмонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. – №1. – С. 32.

Для заметок



*Учебное пособие*

**ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ БИОГАЗА  
ДО КАЧЕСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА**

Чебоксары, 2018 г.

*Редакторы В.П. Друзьянова, О.П. Семенова*  
Компьютерная верстка и правка *Н.К. Толкушкина*  
Дизайн обложки *Н.В. Фирсова*

Подписано в печать 30.10.2018 г.

Дата выхода издания в свет 13.11.2018 г.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Гарнитура Times. Усл. печ. л. 6,045. Заказ К-396. Тираж 500 экз.

Издательский дом «Среда»

428005, Чебоксары, Гражданская, 75, офис 12

+7 (8352) 655-731

[info@phsreda.com](mailto:info@phsreda.com)

<https://phsreda.com/ru>

Отпечатано в Студии печати «Максимум»

428005, Чебоксары, Гражданская, 75

+7 (8352) 655-047

[info@maksimum21.ru](mailto:info@maksimum21.ru)

[www.maksimum21.ru](http://www.maksimum21.ru)