

**А. В. Алексеева
И. А. Савватеева
В. П. Друзьянова**

**АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО
ИЗ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА**

Монография

Научное электронное издание

Чебоксары
Издательский дом «Среда»
2025

УДК 631.3.004.(075.08)

ББК 40.7

А47

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор кафедры

«Технологические системы АПК» ФГБОУ ВО АГАТУ

Дринча Василий Михайлович;

канд. техн. наук, заведующий кафедрой

«Технологические системы АПК» ФГБОУ ВО АГАТУ

Дондоков Юрий Жигмитович

Алексеева А. В.

А47 Альтернативное топливо из пиролизного газа:

монография / А. В. Алексеева, И. А. Савватеева,

В. П. Друзьянова. – Чебоксары: Среда, 2025. – 115 с. –

1 CD-ROM. – Загл. с титул. экрана. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-907965-62-1

В монографии обоснована эффективность использования пиролизной технологии для утилизации твердого бесподстильного навоза животных, с получением сопутствующего продукта – пиролизного газа – альтернативного источника энергии.

Сформулированные конструкторские решения позволят предприятиям машиностроения создавать и проектировать недорогие и простые установки, позволяющие утилизировать твердый бесподстильный навоз в зольное удобрение и альтернативный энергоноситель и пониженном количестве остаточных продуктов и при минимальных затратах энергии. Разработанная математическая модель, отражающая основные параметры для эффективной работы установки пиролиза, может использоваться при проектировании установок пиролиза различной мощности.

Внедрение установок пиролиза с повышенной эффективностью позволит улучшить экологическую обстановку и предложить решение топливно-энергетической проблемы путем производства альтернативного топлива в виде пирогаза и производства удобрений в виде золы, содержащего легкорастворимый и доступный растениям калий.

Минимальные системные требования:

PC с процессором Intel 1,3 ГГц и выше ; 256 Мб (RAM) ; Microsoft Windows, MacOS ; дисковод CD-ROM ; Adobe Reader

DOI 10.31483/a-10745

ISBN 978-5-907965-62-1

© А. В. Алексеева, И. А. Савватеева,
В. П. Друзьянова., 2025

© ИД «Среда», оформление, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. БЕСПОДСТИЛОЧНЫЙ НАВОЗ – АГРЕССИВНЫЙ ЗАГРЯЗНИТЕЛЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	12
1.1. Характеристики видов навоза	12
1.2. Твердый навоз – вид отхода животноводства	24
1.3. Технологии по применению бесподстилочного навоза	26
1.4. Способы переработки бесподстилочного навоза	27
1.5. Биотермохимические основы процесса пиролиза	29
Выводы по главе 1	34
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.1. Пиролизный метод утилизации отходов	35
2.2. Патентные исследования по теме работы	38
2.3. Схема пиролиза по Глушкову В.А.	42
2.4. Существующие математические модели процесса пиролиза	47
2.5. Модернизация математической модели Глушкова В.А. по процессу пиролиза растительного сырья	53
Выводы по главе 2	55
Глава 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	57
3.1. Методика экспериментальных исследований	57
3.2. Методика проведения экспериментальных исследований процесса пиролиза твердого бесподстилочного навоза КРС	68
3.3. Методика определения влажности и зольности	71
3.4. Планирование и обработка результатов эксперимента	72
Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	76
4.1. Результаты экспериментальных исследований по определению выходных параметров установки	76

4.2. Результаты эксперимента по выходу объема пирогаза при разных влажностях и фракций	79
4.3. Результаты моделирования процесса пиролизной утилизации твердого бесподстилочного навоза	84
Выводы по главе 4	89
Глава 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА МЕТОДОМ ПИРОЛИЗНОЙ УТИЛИЗАЦИИ.....	90
Рекомендации производству	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Агропромышленный комплекс – лидер среди производственных отраслей по количеству образующихся вредных отходов. Отходы, получаемые при ведении сельского хозяйства, наносят огромный вред экологии. Без очистки, утилизации, переработки они отравляют почву, водоемы, негативно влияют на атмосферу. При этом сельский «мусор» путем применения соответствующей технологии переработки может преобразоваться в сырье для удобрений, кормов или топлива. В настоящее время существуют различные технологии, позволяющие организовать малоотходное или безотходное производство.

Результатами производства сельскохозяйственных ферм являются не только животноводческие продукты, но и органические отходы, как бесподстилочный навоз. В нынешнее время, последствия отсутствия систем утилизации навоза наносят колоссальный экологический вред. Отрицательные значения температур окружающего воздуха способствуют консервации вредоносной, злокачественной микрофлоры и семян сорных растений в содержании навоза. С потеплением вся эта отрицательная составляющая распространяется вместе с талыми водами, что впоследствии попадает во все источники воды. В результате возникает некий побочный эффект вечной мерзлоты, который наносит губительное влияние окружающей среде Якутии.

Разведение сельских животных на частных подворьях, на специализированных предприятиях приводит к образованию основной массы отходов. На долю животноводства приходится более половины от общей массы отходов, образуемых в отрасли. При этом переработке подлежат не более десяти процентов вредных веществ.

Основные виды отходов животноводства.

1. Продукты жизнедеятельности зверей и птиц – навоз или помет.
2. Неочищенные стоки. Мясоперерабатывающие и молочные производства связаны с попаданием в канализацию кровяных телес, остатков внутренних тканей туш, иных твердых отходов. При отсутствии должных систем очистки они загрязняют водоемы, грунтовые воды.
3. Вредные газы. Негативно влияет на окружающую среду метан, образующийся в скоплениях навоза при складировании в ямы.

Этот газ – одна из главных причин глобального парникового эффекта.

С помощью переработки можно снизить негативное воздействие отходов животноводства на экологию. К примеру, при контролируемом процессе пиролиза растительные отходы, пластмассы, резина, отработанные масла, перерабатываются в альтернативное топливо.

Республика Саха (Якутия) характеризуется значительными объемами земельных ресурсов, при этом территории, подходящие для сельскохозяйственных разработок освоения, достаточно ограничены. Учитывая данные статистики развития растениеводства и животноводства в республике за последние несколько лет, можно сделать вывод о негативной динамике показателей результатов деятельности агропромышленного комплекса. Большинство сельскохозяйственных предприятий всех форм хозяйствования, используют в своей деятельности устаревшие технологии и ручной труд, что, в свою очередь, является серьёзным препятствием к дальнейшему развитию, повышению производственного потенциала и снижает экономическую эффективность отрасли в целом [1; 4; 7; 9; 113; 123; 124].

На сегодняшний день в Якутии крупнорогатый скот в основном содержат в примитивных строениях для скота национального типа – «хотонах», которые в силу в своей конструктивных особенностей не позволяют установить в них технологическое оборудование. При этом, большинство процессов на якутских фермах производятся вручную. Автоматизированным способом осуществляется лишь процесс удоя молока с помощью доильных установок [7; 14; 70; 118; 119; 134]. В хозяйствах Якутии для содержания животных (КРС) не предусмотрено специализированных подстилок, а органические отходы в виде навоза периодически вывозят на полях или другие открытые участки местности. Учитывая экстремальные климатические условия региона Якутии, навоз, вывезенный в зимний и весенний период, не оттаивает весьма продолжительное время, в результате чего затрудняется процесс обработки почвы и предпосевная подготовка. Так как Республика Саха (Якутия) расположена в районе вечной мерзлоты, содержащийся в органических отходах животных патогенные микроорганизмы на протяже-

нии долгих лет способны сохранять свою жизнеспособность и патогенность, устойчивы к воздействию внешних факторов. В соответствии с данными Якутского научно-исследовательского института сельского хозяйства, сроки выживания патогенности микроорганизмов в навозе следующие: кишечная палочка – до 1,5 лет; золотистый стафилококк – до 2 лет; микобактерии туберкулёза – до 4 лет; мытный стрептококк – до 1 года [63].

На конец 2020 года количество крупно - рогатого скота, лошадей, свиней, оленей по Республике Саха (Якутия) составляет 540 тыс. голов. Ежегодно они производят до 2 729 170 т навоза. В настоящее время отсутствуют технологии по переработке и обезвреживанию производимого навоза, наносится огромный вред хрупкой экологии Крайнего Севера. Известно, что 1 т свежего навоза поглощает за сутки до 5 т кислорода, при использовании в виде удобрения в почву вносится до 14 млн семян сорных растений и выбрасывается ощутимый объем углекислого газа и метана в атмосферу. Естественное перепревание навоза в условиях Якутии, происходит в течении 36–48 месяцев.

Образуемый органических отход животных не перерабатывается и не обеззараживается и отсутствуют утилизации его системы. Неблагоприятно низкие температуры поддерживают сохранению патогенной, болезнетворной, микрофлоры и семян сорных растений в кучах навоза, а по весне с талыми водами попадают они в водоемы и озера. Ввиду того, что частные фермы локализованы в местах поселения, то в данное время села опоясаны хаотично стаскиваемыми кучами твердого навоза. Тем самым наносится огромный вред окружающей среде, создаются благоприятные условия для сохранения семян сорных растений, возбудителей различных болезней и размножения мелких грызунов. Из года в год агрессивные кучи засохшего твердого необеззараженного навоза возрастают. Происходит разрушающее воздействие необработанного бесподстилочного навоза на хрупкую природу Якутии, обостряемое обратной реакцией вечной мерзлоты [69; 122; 128]. Проведённые теоретические исследования позволили наметить пути решения изложенной отраслевой задачи путем внедрения новых технологических решений, так как исключается возможность приме-

ния существующих технологий в природно-климатических и сложившихся условиях ведения производства в аграрном секторе Якутии.

Актуальность работы заключается в следующем.

1. Количество крупнорогатого скота, лошадей, свиней, оленей на конец 2020 года по Республике Саха (Якутия) составляет 540 тыс. голов. Они ежедневно образуют органические отходы в виде навоза. При этом в настоящее время в аграрном секторе Якутии отсутствуют технологии по переработке и обезвреживанию производимого навоза животными.

2. Известно, что 1 тонна свежего навоза поглощает в сутки до 5 тонн кислорода, а при использовании необеззараженного навоза в виде удобрения в почву вносится до 14 млн семян сорных растений и выбрасывается ощутимый объем углекислого газа и метана в атмосферу. Естественное перепревание навоза в условиях Якутии происходит в течение 36–48 месяцев.

3. Чтобы стабилизировать, и в перспективе улучшить экологическую ситуацию в Республике Саха (Якутия), предлагается внедрить пиролизную технологию утилизации твердого бесподстилочного навоза крупнорогатого скота.

Научная гипотеза. Внедрение пиролизной технологии позволит своевременно утилизировать производимый твердый бесподстилочный навоз и получить дополнительное топливо в виде пирогаза и доступное зольное удобрение.

Цель исследования – обоснование и внедрение пиролизной технологии утилизации твердого бесподстилочного навоза крупнорогатого скота для фермерских хозяйств Якутии.

Задачи исследования.

1. Дать анализ традиционных способов и устройств по получению энергоносителей из органической массы и обосновать вид установки пиролиза для утилизации твердого бесподстилочного навоза КРС.

2. Провести анализ математических моделей пиролизной технологии и разработать модель, отражающую основные параметры эффективной работы, предлагаемой пиролизной установки.

3. Обосновать схемы и элементы конструкции установки для пиролиза органического сырья, обеспечивающих повышение их эффективности и снижение удельных затрат на выработку единицы объема топливного газа.

4. Провести экспериментальные исследования и дать эколого-экономическую эффективность предлагаемой пиролизной технологии.

Объект исследования. Пиролизная установка ГВА-1 в технологию утилизации твердого бесподстилочного навоза.

Предмет исследования. Технологический процесс пиролитической утилизации твердого бесподстилочного навоза в топливный газ и золу.

Научная новизна работы. Предложен наиболее подходящий для утилизации твердого бесподстилочного навоза КРС пиролизный способ, произведена оценка образуемого альтернативного количества топливного газа и способов повышения эффективности процесса.

Теоретически обоснована структура предлагаемой математической модели, отражающей основные параметры эффективной работы установки пиролиза при утилизации твердого бесподстилочного навоза.

Теоретическая и практическая значимость работы. Обоснована эффективность использования пиролизной технологии для утилизации твердого бесподстилочного навоза животных, с получением сопутствующего продукта – пиролизного газа – альтернативного источника энергии. Пиролизная технология позволяет наметить пути выхода из энергетического кризиса и улучшить экологию, за счет возможности преобразования твердого бесподстилочного навоза КРС в зольное удобрение, содержащее доступный и легкорастворимый растениям калий, кальций, фосфор, сера, магний, марганец, бор, и другие микро- и макроэлементы.

Сформулированные конструкторские решения позволят предприятиям машиностроения создавать и проектировать недорогие и простые установки, позволяющие утилизировать твердый бесподстилочный навоз в зольное удобрение и альтернативный энергоноситель и пониженном количестве остаточных продуктов и при минимальных затратах энергии. Разработанная математическая

модель, отражающая основные параметры для эффективной работы установки пиролиза, может использоваться при проектировании установок пиролиза различной мощности.

Внедрение установок пиролиза с повышенной эффективностью позволит улучшить экологическую обстановку и предложить решение топливно-энергетической проблемы путем производства альтернативного топлива в виде пирогаза и производства удобрений в виде золы, содержащего легкорастворимый и доступный растениям калий.

Методология и методы исследований. Использованы эмпирические и теоретические методы исследования, которые базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях системного анализа, математического моделирования. В исследовательской деятельности использован математический аппарат линейного программирования, дифференциального и интегрального исчисления. Полученные в ходе проведения экспериментов результаты подвергнуты обработке в соответствии с современными методами теории вероятностей, математической статистики и перспективного планирования экспериментальных исследований с применением специализированных программ.

Положения, выносимые на защиту:

- технические решения на модернизацию пиролизной установки ГВА-1;
- математическая модель пиролизной технологии утилизации твердого бесподстилочного навоза;
- технология утилизации твердого бесподстилочного навоза с получением альтернативного топлива в виде пирогаза и доступного удобрения в виде золы.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных данных подтверждается сходимостью теоретических обоснований и экспериментальных показателей, находящихся в рамках доверительных интервалов.

Материалы диссертационного исследования докладывались на:

- XI Международной научно-технической конференции: Приборостроение в XXI веке - 2015. Интеграция науки, образования и производства, г. Ижевск, 2015 г.;
- XVI Всероссийском научно-практическом конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Нерюнгри, 2016 г.;

- 106-й Международной научно-технической конференции: Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации, г. Иркутск, 2019 г.;
- VIII Национальной научно-практической конференции с международным участием «Чтения И. П. Терских», посвященной 85-летию Иркутского ГАУ: Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК, г. Иркутск, 2019 г.;
- XIV International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2021”. E3S Web of Conferences, Rostov-on-Don, 2021;
- International Science and Technology Conference "Earth Science". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vladivostok, 2021;
- Всероссийской научно-практической конференции «Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития», 2021 г., г. Благовещенск.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы 12 научных работах, в том числе: 3 статьи в изданиях, индексируемом в международной цитатно-аналитической базе данных Scopus, 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 патент на изобретение.

ГЛАВА 1 БЕСПОДСТИЛОЧНЫЙ НАВОЗ – АГРЕССИВНЫЙ ЗАГРЯЗНИТЕЛЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1. Характеристики видов навоза

Навоз – является органическим отходом жизнедеятельности разных видов животных, состоящий из смеси так и твердых, так и жидких выделений. Существует несколько разновидностей навоза, которые зависят от способа и условий содержания КРС [1; 36]: подстилочный навоз, бесподстилочный навоз, навозную жижу.

Подстилочный навоз - состоит из твердых и жидких выделений различных домашних животных и подстилки. Ценность навоза в качестве удобрения, его структурный состав находятся в прямой зависимости от вида животного и материала используемого в качестве подстилки, также имеет значения такие факторы, как состав корма и условия хранения удобрения [1; 7; 46].

Таблица 1.1

Состав свежего подстилочного навоза (%) в зависимости от вида животного и подстилки, согласно [1, 7]

Состав	На соломенной подстилке					На торфе	
	смешанный	КРС	Лошадей	овец	свиней	КРС	Лошади
Вода	75,0	77,3	71,3	64,6	72,4	77,5	67,0
Органическое вещество	21,0	20,3	25,4	31,8	25,0	-	-
Азот:							
общий	0,5	0,45	0,58	0,83	0,45	0,60	0,80
аммонийный	0,15	0,14	0,19	-	0,20	0,18	0,28
Фосфор	0,25	0,23	0,28	0,23	0,19	0,22	0,25
Калий	0,60	0,50	0,63	0,67	0,60	0,48	0,53
Кальций	0,35	0,40	0,21	0,33	0,18	0,45	0,44
Магний	0,15	0,11	0,14	0,18	0,09	-	-

Овечий и конский органический отход по содержанию питательных элементов превосходит навоз свиней и крупнорогатого скота (КРС). При скормливания концентрированных комбикормов

в навоз поступает больше питательных элементов, чем при кормлении сухим кормами [1; 103; 104].

Навоз на торфяной подстилке богаче азотом, чем навоз на соломе. Отклонения по химическому составу навоза довольно значительны, поэтому для правильного определения дозы внесения нужно определить его химический состав. Если такой возможности нет, можно воспользоваться данными представленных ниже таблицы [2; 105; 146].

Таблица 1.2

Химический состав полуперепревшего подстилочного навоза, согласно [2; 146]

Вид животных	Содержание при естественной влажности								
	Азот		Фосфор	Калий	Органическое вещество	Золы	Влажность	pH	C:N
	общий	Аммиач- ный							
КРС	0,54	0,07	0,28	0,60	21	14	65,0	8,1	19
Свиной	0,84	0,15	0,58	0,62	21	17,4	60,7	7,9	13
Конский	0,50	0,09	0,26	0,59	22,6	8,4	69,0	7,9	21
Овечий	0,86	0,14	0,47	0,88	28,0	23,0	49,0	7,9	17

Подстилочный навоз богат микроэлементами, количество которых в его структуре весьма разнообразна.

Особое значение в объеме получаемого навоза имеет подстилочный материал. Подстилка надлежащего качества способна значительно увеличить и улучшить микробиологические характеристики навоза. Свойство навоза за счет поглощения аммиака из органических отходов, а, следовательно, сокращает потери азота [7; 146].

По степени разложения различают (рис. 1.1) [146].

Свежий навоз

- слаборазложившаяся масса, солома в которой сохраняет первоначальный цвет и прочность [50].

Полуперепревший навоз

- масса, потерявшая 10 - 30 % первоначальной массы и органического вещества. Солома в перепревшем навозе приобретает темно-коричневый цвет, теряет прочность и легко разрывается.

Перепревший навоз

- однородная масса, содержит 50 % от исходной массы и органического вещества. В ней невозможно определить даже отдельные элементы подстилочных материалов.

Перегной

- рыхлая землистая темная однородная масса, содержит не более 25 % массы и органического вещества от исходной величины свежего навоза [4]

Бесподстилочный навоз

- полидисперсная суспензия из твердых и жидких выделений животных, часто с примесью воды, обладает текучестью. Текучесть бесподстилочного навоза упрощает уборку животноводческих помещений

Рис. 1.1. Виды навоза по степени разложения

Бесподстилочный навоз, также различают по степени содержания воды (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Виды бесподстилочного навоза по степени содержания воды

№	Наименование	Процент содержания воды
1	Полужидкий	≤ 90% воды
2	Жидкий	90–93 % воды
3	Навозные стоки	≥ 93% воды

Бесподстилочный навоз содержит все необходимые растениям питательные элементы. Содержание аммиачного азота составляет 50–70% общего азота, и первую удобряемую культуру это удобрение может обеспечить азотом в 2–3 раза лучше, чем эквивалентная доза по общему азоту подстилочного навоза [4; 15; 102; 103; 146].

При условии внесения в качестве удобрения фосфора и калия в равных дозах, их действие на растения подстилочного навоза будет эквивалентно.

Вместе с этим в процессе разбавления бесподстилочного навоза водой содержание в нем питательных элементов сокращается прямо пропорционально. При долгосрочном хранении навоза существенно сокращается содержание в нем азота: например, при хранении в течение 3–4 месяцев потеря азота составляет от 10 до 12%.

Органическое вещество составляет 70–80 % сухой массы, а соотношение С:N значительно хуже, чем у подстилочного навоза.

Состав свежего полужидкого бесподстилочного навоза представлен в таблице 1.4 [4; 106].

Таблица 1.4
Химический состав бесподстилочного навоза и помёта

Компоненты	Навоз крупнорогатого скота		Навоз свиной, комплекс 108 000 голов	Навоз овец	Куриный помёт	
	Комплекс 10 000 бычков	Комплекс 2000 коров			Сырой	Термически высушенный
Сухое вещество	14,5	10,0	9,8	28,3	36,0	83
Азот общий	0,77	0,43	0,72	0,95	2,10	4,54
Фосфор (P ₂ O ₅)	0,44	0,28	0,47	0,22	1,44	3,65
Калий (K ₂ O)	0,76	0,50	0,21	0,75	0,64	1,74

Что касается навоза, производимого в хозяйствах Якутии, то по виду он относится к навозной жиже [139].

Навозная жижа – ценное азотно-калийное удобрение, по эффективности применения не уступает минеральным удобрениям. Представляет собой перебродившую мочу животных, стекающую в жижесборники животноводческих помещений и навозохранилищ [1; 19].

В содержании навозной жижи имеются следующие компоненты: азот, оксид калия, оксид фосфора (рис. 1.2)

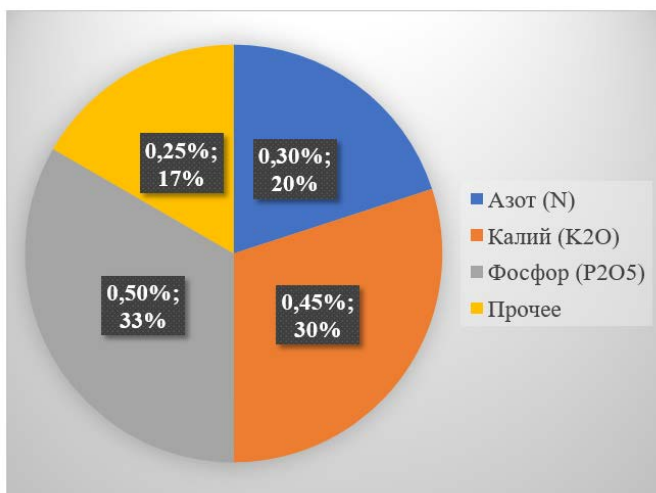


Рис. 1.2. Содержание навозной жижи

Структурный состав микроэлементов в органические отходы напрямую зависит от вида животного, от качества корма, а также в технологии накопления и способов хранения. Содержание азота при этом колеблется в пределах 0,1–1%, содержание калия – 0,2–1,2% [4; 146].

Выход жидкого навоза от одной головы крупнорогатого скота составляет 55 кг в сутки, свиньи – 50 кг. По содержанию питательных веществ, свиной навоз не менее ценен, чем навоз крупнорогатого скота. В жидком навозе 50–70% азота находится в растворимой форме, которая хорошо усваивается растениями в первый год. Остальную часть составляет органически связанный (белковый) азот, который позднее также превращается в доступную для растений форму по мере минерализации органического вещества. Содержащийся в жидком навозе главным образом органически связанный фосфор используется растениями лучше, чем фосфор минеральных удобрений. Калий в жидком навозе представлен исключительно растворимой формой и легко усваивается растениями [16].

При применении органического отхода необходимо соблюдать следующие рекомендации:

– не рекомендуется долго хранить, необходимо использовать накопленный для удобрения навоз в кратчайшие сроки иначе это грозит массовому накоплению в местах хранения, а, следовательно, о распространении болезнетворных микроорганизмов и загрязнению окружающей среды в целом; целесообразно незамедлительно использовать навоз в качестве удобрения на полях;

– осенью на малоемких почвах (песчаные, супесчаные, легкосуглинистые) его вносят с соломой (торфом) или под озимые культуры для предотвращения вымывания питательных элементов; в зимний период органические отходы не вносят на площади, которые весной подвержены на затопление;

– при углублении пахотного горизонта навоз вносят на вывернутый слой под перепашку и дискование;

– в районах республики, которые характеризуется засушливым климатом навоз вносят под отвальную обработку, которую чередуют с безотвальной; минимальные дозы при сплошном внесении под пропашные 25 т/га, под зерновые культуры 15 т/га; меньшие дозы недостаточно эффективны, и их сложно равномерно вносить.

Бесподстилочный навоз вносят в основной прием осенью. При этом перед внесением разбрасывают по полю торф или солому, и удобрение сразу же заделывают на глубину 8–10 см, а через 2–3 недели проводят зяблевую вспашку. Весной жидкий навоз вносят по оставшейся на поле с осени соломе. Бесподстилочный навоз используется для некорневой подкормки при использовании технологии удобрительного полива полей.

По данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия) по состоянию на 1 января 2021 года имелось следующее поголовье сельскохозяйственных животных по категориям хозяйств (табл. 1.5) [138].

При пересчёте на количество голов были использованы следующие категории:

- сельскохозяйственные организации;
- крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели;
- хозяйства населения.

Таблица 1.5

Структура поголовья сельскохозяйственных животных
по категориям хозяйств от 1 января 2021 г.

	2017	2018	2019	2020	2021
Сельскохозяйственные организации					
крупный рогатый скот	18,5	18,3	18,2	17,5	13,4
в том числе коровы	21,3	20,5	20,9	19,7	16,1
свиньи	55,7	57,1	59,8	64,4	64,5
лошади	26,1	24,7	22,4	21,3	20,3
олени	95,8	96,8	94,0	95,3	94,4
козы	-	1,0	3,0	2,6	6,4
овцы	48,0	35,1	44,1	26,6	14,6
птицы	94,2	93,6	92,9	93,8	93,5
Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели					
крупный рогатый скот	29,0	29,0	27,8	27,2	28,7
в том числе коровы	30,1	30,2	29,2	30,1	31,4
свиньи	20,3	18,5	16,0	15,0	16,1
лошади	40,8	42,2	40,9	40,2	38,8
олени	0,4	1,1	3,0	3,2	3,0
козы	16,9	12,8	19,6	20,4	23,9
овцы	37,8	36,8	12,1	8,6	53,5
птицы	1,0	1,2	1,5	1,2	1,4
Хозяйства населения					
крупный рогатый скот	52,6	52,7	54,0	55,3	57,9
в том числе коровы	48,6	49,3	49,9	50,2	52,5
свиньи	24,1	24,4	24,2	20,6	19,4
лошади	33,1	33,1	36,8	38,5	40,9
олени	3,9	2,1	2,9	1,5	2,6
козы	83,1	86,2	77,4	77,0	69,7
овцы	14,2	28,1	43,8	64,8	31,9
птицы	4,8	5,2	5,7	5,0	5,1

На 1 января 2021 года поголовье крупного рогатого скота в хозяйствах всех категорий составило 800 тыс. голов, в том числе коров – 100,0 тыс. голов с увеличением на 1% по сравнению с уровнем 2019 года.

По сравнению с соответствующим периодом предыдущего года увеличение поголовья крупного рогатого скота, в том числе коров отмечается в подсобных хозяйствах несельскохозяйственных организаций, крестьянских (фермерских) хозяйствах, хозяйствах населения.

За 2020 год отелилось 87,2% от всего маточного поголовья скота, получено 64,3 тыс. телят, что на 2,5% больше уровня 2019 года.

Валовый надой молока в хозяйствах всех категорий республики составил 162,4 тыс. т. с ростом на 0,6% по сравнению с 2019 годом. Увеличение объемов производства молока достигнуто сельскохозяйственными организациями (на 4,6%) и крестьянскими (фермерскими) хозяйствами (на 6,0%).

Средний удой молока от 1 коровы в сельскохозяйственных предприятиях по сравнению с 2019 годом увеличился на 4,2% и составил 2481 кг. Благодаря мерам господдержки Минсельхоза России К(Ф)Х «Кэскил» Амгинского, ООО «Батамайское» Ленского, «Солоонун» Мегино-Кангаласского, ИП КФХ Герасимов В.А. Намского, ИП КФХ Бурнашев А.С. Усть-Алданского, ООО «Конезавод Берте» Хангаласского, СПК К(Ф)Х «Мындагай» Чурапчинского районов и ООО «Багарах» г.Якутск извне республики завезено 721 голова племенного крупного рогатого скота симментальской, холмогорской, калмыцкой, сычевской породы.

За счет собственных источников К(Ф)Х «Ил-Тосхол» Сунтарского района, АО «Сахаплемябьединение» Мирнинского района, ИП КФХ Слепцов А.П. Намского районов и ООО «Экоферма «Туймаада» г. Якутск из Орловской, Иркутской областей и Красноярского края завезено 398 голов симментальской, черно-пестрой, красно-пестрой породы крупно -рогатого скота.

Нормативными правовыми актами администраций 17 муниципальных районов и города Якутск определены 34 заготовительные организации по приему сырого молока.

За 2020 год заготовлено 79,9 тыс. т. молока (99,0% к годовому плану и 101,3% к 2019 году). В среднем по республике закупочная цена за литр молока составила 45,1 рублей.

В связи с внесением изменений в Порядок предоставления субсидии на финансовое обеспечение части затрат на создание условий для специализированных скотоводческих хозяйств молочного

и мясного направления в части поддержки организованных хозяйств, у которых имеется от 25 дойных коров, а не от 100 коров как было ранее, количество участников программы финансового оздоровления скотоводческих хозяйств по сравнению с 2019 годом увеличилось в 3 раза. 192 скотоводческим хозяйствам, в том числе 145 К(Ф)Х предоставлены средства субсидии в размере 348,4 млн рублей. Получатели господдержки получают продукции сельского хозяйства в 2,5 млрд рублей, надоят молока в объеме 38,0 тысяч т., ожидается повышение размера среднемесячной заработной платы на 10% до 35,6 тысяч рублей.

В Республике Саха (Якутия) якутский скот разводят в 15-ти районах – Амгинском, Верхневилуйском, Верхнеколымском, Верхоянском, Горном, Жиганском, Мегино-Кангаласском, Мирнинском, Намском, Нюрбинском, Оймяконском, Сунтарском, Таттинском, Хангаласском, Эвено-Бытантайском районах и г. Якутск.

На начало 2021 года поголовье якутской породы скота в хозяйствах всех категорий составило 2095 голов с увеличением на 3,7% от прошлого года, в том числе коров – 856 голов с увеличением на 6,2% [93].

Государственное казенное предприятие Республики Саха (Якутия) «Якутский скот» занимается разведением якутской аборигенной породы скота на территории Мирнинского, Оймяконского, Верхневилуйского, Амгинского, Горного, Намского, Эвено-Бытантайского районов. На 1 января 2021 года в отделениях ГКП РС(Я) «Якутский скот» содержится 815 голов якутского скота, в том числе 273 голов коров.

За отчетный период деловой выход телят составил 80,6%, получено 168 голов. Сохранность взрослого поголовья скота составила 97,1%. Валовой надой молока составил 16,7 т. Удой молока с 1 коровы – 778 кг. За 2020 год реализовано 3,1 т. Молока.

ГКП РС (Я) «Якутский скот» получено свидетельство Минсельхоза России о включении в племенной регистр генофондных питомников по разведению якутской породы крупного рогатого скота. Также получена декларация о соответствии техническим условиям производства якутского национального продукта «Арыы», дающее право на реализацию масла из молока якутской коровы. В отделении «Куллэги» Амгинского района за летний период впервые по специальной технологии произведено 0,4 т. сливочного масла от молока

якутской коровы, пробная партия которого было представлено на осенней воскресной ярмарке в г. Якутске.

Завершены работы по приему-передаче имущества отделения Сюльдюкар совхоза «Новый» ПАО «АЛРОСА» в ГКП РС (Я) «Якутский скот». С 4 отделений (Амгинского, Верхневилуйского, Горного, Намского) в с. Сюльдюкар доставлены 148 голов якутского скота, 4 головы жеребцов-производителей, 2 головы рабочих лошадей.

В 2020 году на поддержку базовых хозяйств по разведению якутского скота КФХ «Наахара» Амгинского, СПОК «Сылгыбыт» Горного, К(Ф)Х Семенов В.А. Верхневилуйского, ИП К(Ф)Х Дмитриев А.Н. Мегино-Кангаласского, К(Ф)Х «Эльгыйское» Сунтарского, ИП К(Ф)Х «Байагантай» Таттинского, К(Ф)Х Иванов А.С. Хангаласского районов предоставлены субсидии в размере 5,8 млн рублей по ставке 15 000 тыс. рублей на условную голову.

По итогам отчетного года поголовье якутского скота в базовых хозяйствах по сравнению с 2019 годом увеличилось на 7% до 594 голов, в том числе коров на 0,8% до 252 голов.

В 2020 году в рамках модернизации производственных объектов отраслей животноводства введено 4 животноводческих комплекса на 480 голов К(Ф)Х «Болугур» Амгинского, К(Ф)Х «Крестях» Сунтарского, ИП ГК(Ф)Х «Львова А.Е.» Хангаласского, ИП ГКФХ «Левина А.В.» Кобяйского районов.

За счет заемных средств Фонда поддержки агропромышленного комплекса РС(Я) построены животноводческие комплексы для нужд ГКП РС(Я) «Якутский скот» в с. Сюльдюкар Мирнинского района на 200 голов, в с. Ергелех Намского района на 150 голов.

Всего по Якутии план заготовки молока в 2020 году составляет 80 706,0 т. сырого молока, в том числе по 3 группе районов – 80 000,01 т. На 27.08.2020 года заготовлено 54527,57 т. молока, что составляет 67,56 % от годового плана.

По 3 группе районов, на 28.08.2020 заготовлено 54208,45 т, что составляет 67,76% от годового плана (80 000,01 т.). По графику (январь–август 2020 г. план составляет – 56 492,59 т.) 95,96 % [92; 93].

На поддержку и переработку продукции скотоводства на 2020 год предусмотрена субвенция в размере 2 800 000,42 тыс. рублей [92].

Самое большое поголовье молочного скота содержится в зоне центральной Якутии (59,7 тыс. голов), наименьшее количество – в промышленной зоне южной Якутии (370 голов) [31]. На 1 января 2021 года в хозяйствах всех категорий насчитывалось 180,9 тыс. (-2,4 тыс.) голов крупного рогатого скота, из них коров 72,1 тыс. (+1,4 тыс.) голов, 21,6 тыс. (100%) свиней, 182,8 тыс. (-0,2 тыс.) лошадей, 157,4 тыс. (+5,3 тыс.) оленей [92].

За 2019 год объем производства скота и птицы на убой (в живом весе) 36,9 тыс. т. (+1,5 тыс. т.), яйца куриные 133,6 млн. штук [50] производство молока в 2020 году 162,4 тыс. т. (+0,4 %) [51] Средний надой молока от коровы в 2019 году в хозяйствах всех категорий 2290 кг (-7 кг) [31].

Доля коммерческого производства молока по республике сейчас варьируется в промежутке 60-66%, в то время как другая часть 34–40% остаются продуктами питания для местного населения. В настоящее время, в республике функционируют 352 молочного предприятия, включая 16 пищекомбинатов, 24 молокозавода, 233 маслоцеха и 79 хозяйств по сдаче молока. Весь их объем составляет в год более 100 тыс. т товарного продукта. По данным последних 4 лет, каждый житель республики потребляет 283-286 кг. молока и молочного продукта. Данные животноводческого производства таковы: доля личных подсобных хозяйств составляет 52,7%, а крестьянско-фермерские хозяйства производят 35,1% переработанного молока. Анализ последних 5 лет показывает, что увеличение количества дойных коров в крестьянских (фермерских) хозяйствах (на 59,7%), дало следующий результат: показатели объема молока в крестьянских (фермерских) хозяйствах выросли в 3 раза (от 13,8% до 35,1%), производство молока в личных подсобных хозяйствах уменьшилось на 22% [31].

Основное отличие в технологии содержания КРС в Республике Саха (Якутия) – бесподстильное содержание.

Таким образом, в животноводческом секторе республики преобладают частные фермерские хозяйства, в которых отсутствует механизация трудоемких процессов. Что касается производимого бесподстилочного навоза, то в настоящее время этот отход никоим образом не перерабатывается и не утилизируется. Между тем, ежегодный выход навоза КРС в республике составляет 540 тыс. т/год. Ввиду того, что частные фермы локализованы в местах поселения,

то в данное время села опоясаны хаотично стаскиваемыми кучами твердого навоза. Тем самым наносится огромный вред окружающей среде, создаются благоприятные условия для сохранения семян сорных растений, возбудителей различных болезней и размножения мелких грызунов.



Рис. 1.3. Вид накопленных куч твердого навоза, загрязняющих и опоясывающих населенные пункты

Анализ современного состояния животноводства Якутии позволил сделать следующие выводы [58]:

1. Наиболее острым является проблема утилизации производимого твердого бесподстилочного навоза крупнорогатого скота. Неорганизованное хранение навоза приводит к интенсивному загрязнению окружающей среды.

2. В связи с тем, что постепенное массовое накопление органических отходов оказывает выраженное негативное влияние, как на экологическую ситуацию в целом, так на животных и на человека в частности, освоение технологии по утилизации твердого бесподстильного навоза крупнорогатого скота является важным неотъемлемым элементов эффективного животноводства.

Для поиска решения данной проблемы, возникает необходимость проведения анализа существующих методов и способов переработки бесподстильного навоза КРС.

1.2. Твердый навоз – вид отхода животноводства

Отходы животноводства делятся на 5 классов опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду. Классификация отходов в зависимости от источника их образования и других факторов приводится в Федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО) (рис. 1.4).

В ФККО входят следующие группы отходов:

- 1.Отходы разведения крупнорогатого скота (1 12 100 00 00 0).
- 2.Отходы разведения и содержания лошадей и прочих животных семейства лошадиных отряда непарнокопытных (1 12 200 00 00 0).
- 3.Отходы разведения свиней (1 12 500 00 00 0).
- 4.Отходы разведения сельскохозяйственной птицы (1 12 700 00 00 0).

Рис. 1.4. Федеральный классификационный каталог отходов (ФККО)

Каждая группа включает в себя органические отходы разных видов в зависимости от стадии перепревания (свежий либо перепревший). По мере перепревания происходит потеря влаги из навоза и протекает естественное микробиологическое разложение органических соединений. В результате процесса перепревания навоз имеет более низкий класс опасности, чем в исходном состоянии. Таким образом, свежие органические отходы животных, в том числе крупного и мелкого рогатого скота и других (пушных зверей,

конский, верблюжий и диких животных), изначально относящиеся к IV классу опасности, после перепревания соответствуют V классу, а свежие органические отходы свиней и помет птиц – IV классу опасности вместо III класса.

Отходы животноводства необходимо карантинировать и обеззараживать. Обеззараживание может проводиться химическим или термическим методом в короткие сроки либо естественным путем. Согласно РД-АПК 1.10.15.02-08 естественное биологическое обеззараживание осуществляется путем выдерживания в секционных навозохранилищах или прудах-накопителях в течение 12 месяцев [28; 29; 33; 53; 55].

Сроки выдерживания отходов животноводства при использовании биологического метода:

1. В открытых хранилищах:
 - навоз крупнорогатого скота – 6 месяцев;
 - навоз свиней – 12 месяцев.
2. Помета в пометохранилищах – 3–6 месяцев.

Таким образом, процесс обеззараживания отходов животноводства из свежего состояния до состояния, в котором их можно использовать как удобрение, довольно сложный, может осуществляться разными способами и занимать длительное время (до 36–48 месяцев в условиях Якутии).

В связи с вступлением в силу Федерального закона от 17.06.2019 г. №141-ФЗ «О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях» статья 8.2 Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях (далее – КоАП РФ) претерпела значительные изменения, которые касаются дифференциации ответственности за разные виды нарушений при обращении с отходами, составы административных правонарушений с учетом экологических требований, установленных Федеральным законом от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».

С 17.06.2019 года отдельными частями статьи 8.2 КоАП РФ предусмотрена ответственность за: несоблюдение требований в области охраны окружающей среды при сборе, накоплении, транспортировании, обработке, утилизации или обезвреживании отходов производства и потребления [111].

1.3. Технологии по применению бесподстилочного навоза

Приняты следующие технологические схемы по использованию бесподстилочного навоза (рис. 1.5).

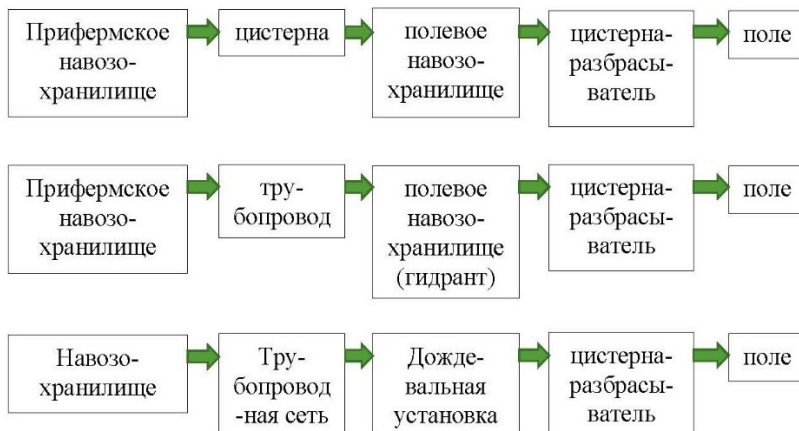


Рис. 1.5. Схемы по использованию бесподстилочного навоза

Первая схема неприемлема для использования в условиях Якутии, так как применяется на крупных животноводческих хозяйствах. При этом, в хозяйствах отсутствует трубопровод для перекачивания из прифермского хранилища в полевое. В этом случае его выгружают в цистерны-разбрасыватели, вывозят в поле и заполняют полевые навозохранилища для хранения до внесения. В период внесения навоз из прифермских и полевых хранилищ грузят в цистерны-разбрасыватели, вывозят в поле, разбрасывают по поверхности, а затем, как только возможно, заделывают в почву.

Вторая схема не подходит для хозяйств нашего региона, так как у них отсутствуют трубопроводные сети и дождевальные установки. Транспортировка жидкого навоза из прифермского хранилища в полевые должна осуществляться по трубам с последующим внесением цистернами-разбрасывателями, что позволяет снизить транспортные издержки, повысить производительность труда. В первой и второй схемах разбавление водой не предусмотрено.

Третью схему применяют при наличии трубопроводной сети и установок для дождевания. Поэтому исключается возможность ее применения в хозяйствах Якутии.

Таким образом, все три вышеназванные схемы подходят для применения в крупных животноводческих комплексах промышленного типа, соответственно, не подходят для внедрения в фермерские хозяйства РС (Я).

1.4. Способы переработки бесподстилочного навоза

Необходимо подчеркнуть тот факт, что бесподстилочный навоз по сравнению с подстилочным оказывает негативное экологическое воздействие на окружающую среду в большей степени, в силу таких характерных физических свойств, как высокая степень текучести и растворимости в воде, быстрая всасываемость в почву и др. При этом бесподстилочный навоз представляет серьезную опасность, являясь источником возбудителей инфекций и инвазий как в зоне животноводческих ферм, так и за пределами их территорий. Также непосредственная угроза возникает при хранении инфицированных отходов на открытых местностях, что приводит к постепенному распространению микроорганизмов на растения, а, следовательно, возникает риск заражения людей и животных [25–27, 94].

При использовании бесподстилочного навоза в качестве удобрения, стремятся обеспечить максимальное сохранение питательных веществ, содержащихся в нем, и уничтожить семена сорных трав и болезнетворных бактерий [6; 10; 11; 17; 18; 21; 22; 78–81; 95]. Поэтому, в настоящее время используются следующие методы и способы: физические, химические и биологические (рис. 1.6).

Однако все вышеназванные способы не подходят для утилизации твердого бесподстилочного навоза. Они применяются только для свежего бесподстилочного навоза.

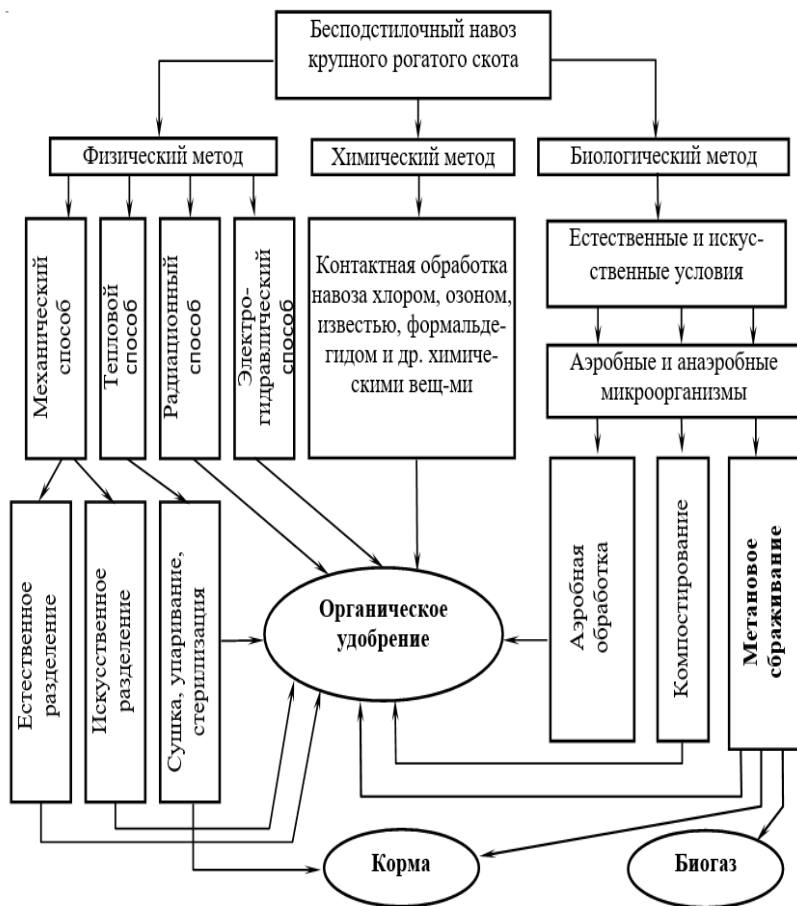


Рис. 1.6. Методы и способы переработки бесподстильного навоза крупнорогатого скота [66]

Как отмечалось в разделе 1.1, в настоящее время производимый бесподстильный навоз не обеззараживается и не утилизируется, стаскивается в близлежащие открытые местности. Между тем, ежегодный выход навоза КРС в республике составляет 540 тыс. т/год. Таким образом, образовались угрожающие объемы твердого необработанного навоза вокруг мест поселений, возникла необходимость их утилизации.

На наш взгляд, для использования в природно-климатических, экономических и социальных условиях Республики Саха (Якутия) наибольший интерес представляет технология утилизации бесподстилочного навоза крупнорогатого скота в пиролизных установках.

Известна технология Глушкова В.А. – пиролиз растительного сырья (биомассы): древесной щепы, опилки. Поскольку твердый навоз можно соотнести к растительному остатку, то, на наш взгляд, вероятность его утилизации по пиролизной технологии весьма высока.

1.5. Биотермохимические основы процесса пиролиза

Пиролиз – термическое разложение органических соединений без доступа воздуха. Пиролиз также можно назвать сухой перегонкой, а в качестве сырья могут различные газообразные углеводороды (этан, пропан), сырая нефть, соединения, содержащие органические компоненты, также как древесины, уголь, торф и т.д. [92; 93].

Российские химики Юлия Всеволодовна Лермонтова и Александр Александрович Летний [115] впервые в истории химической науки обратили внимание на то, что каменный уголь дает светильный газ (смесь водорода, метана, окиси углерода и других горючих газов, получаемые при пиролизе каменного угля или нефти), худший по качеству, чем газ нефтяного происхождения. А уже в 1877 году эффект пиролиза углеводородов был запатентован Александром Александровичем Летним.

Ещё в 1875 он обнаружил, что при температуре выше 300°C тяжёлые нефтяные остатки частично разлагаются на более легкие продукты – бензин, керосин, газы. В 1877 году впервые выделил из нефти ароматические углеводороды (бензол, толуол, ксилол, антрацен и др.); установил важные закономерности процесса пиролиза нефти. Практически в это же время были построены первые заводы в Киеве и Казани. Для получения газа для освещения, пиролизу подвергали керосин. Большой толчок к развитию промышленного применения технологии пиролиза дала Первая мировая война, когда возникла большая потребность в толуоле – сырья для производства тротила. В XX веке существенный вклад в разработку новых направлений пиролиза древесины внес профессор Тищенко Д.В. [115] (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Направления пиролиза древесины профессора Тищенко Д.В.

Проблема состоит в том, что в большинстве отходов содержится фосфор, хлор и сера. Сера и фосфор в окисленной форме летучи и наносят вред окружающей среде. Хлор активно реагирует с органическими продуктами пиролиза с образованием стойких ядовитых соединений (например, диоксины) [71].

Фильтрация дыма от указанных выше соединений является сложным и дорогостоящим. При этом на сегодняшний день проблема утилизации вышедших из эксплуатации автомобильных шин и резинотехнических изделий является значимым фактором, оказывающим влияние на экологию и на экономику всех развитых стран мира. В то же время существенной проблемой является невосполнимость природных источников топлива, что в свою очередь предполагает необходимость использования вторичных ресурсов с максимальной эффективностью [73].

Шины и полимеры представляют собой ценное сырье, в результате их переработки методом низкотемпературного пиролиза (до 500°С) получаются жидкие фракции углеводородов (синтетическая нефть), углеродистый остаток (технический углерод), металлокорд и горючий газ. В то же время, если сжечь 1 т шин, то в атмосферу выделится 270 кг сажи и 450 кг токсичных газов [115].

Для пиролизных установок нет необходимости строить капитальные сооружения и высокие дымовые трубы. Установки могут монтироваться под навесом или в ангарах легкого типа на бетонном основании [117].

Авторы работы [85] говорят о том, что более высокая ценность отдельных химических продуктов по сравнению с топливом могла бы сделать выгодным извлечение этих продуктов даже при их небольших концентрациях. Интегральный подход к проблеме получения химических продуктов и топлива открывает широкие возможности в этом направлении.

Продуктами процесса пиролиза являются, следующие виды продуктов (рис. 1.8).

Жидкие продукты

- Жидкие продукты пиролиза вызывают большой интерес вследствие их высокой энергетической плотности и потенциальной возможности использования их в качестве жидкого топлива. Выход жидкости может достигать до 80% массы сухого сырья, пиротопливо может использоваться в качестве заменителя котельного топлива

Твердым продуктом

- Твердым продуктом процесса пиролиза является углистое вещество, выход которого может достигать 30-35% массы сухого сырья при карбонизации и медленном пиролизе. Углистое вещество может использоваться в качестве топлива, а также для технологических нужд промышленности (для очистки воды и газов)

Газообразные продукты

- Газообразные продукты пиролиза представляет собой обычно среднекалорийный газ (14-16 МДж/м³), а при частичной газификации – низкокалорийный газ (4-8 МДж/м³). Выход газообразного топлива может доходить до 70% массы сухого сырья при высокотемпературном быстром пиролизе. Состав газа зависит от сырья и параметров процесса. Газообразные продукты имеют высокий уровень углеводородов (в частности, метана). Теплотворная способность повышается, если использовать газ, пока он горючий, и содержит относительно много смол. Такой газ обычно используется в самом процессе пиролиза для поддержания температуры процесса и сушки исходного сырья. Очистка пиролизного газа от паров смолы является трудновыполнимой технической задачей, требующей значительных энергетических и аппаратных ресурсов

Химические продукты

- Химические продукты. В составе продуктов пиролиза выявлено несколько сотен химических составляющих. Все большее внимание уделяется регенерации отдельных химических соединений (гидроксикислотный альдегид) или их семейств из продуктов пиролиза

Рис. 1.8. Виды продуктов процесса пиролиза

В ходе рассматриваемого нами процесса происходят затраты теплоты сгорания, количество которой может составлять до 10% от количества теплоты, выделяемой при сжигании сухой резины. Но иногда, например, во время производства угля, когда происходит активная потеря летучих продуктов, значение данного показателя может быть значительно выше. В настоящее время выделяют несколько видов технологии пиролиза резины в зависимости от некоторых факторов [142]:

– при нагревании до 650°C с высокой скоростью нагрева различают быстрый и медленный пиролиз;

– в зависимости от среды, в которой происходит процесс пиролиза, выделяют вакуумный, гидропиролиз и метанопиролиз

При высоких скоростях нагрева (1000–10000°С/с) до 650°С происходит конденсация промежуточных жидких продуктов. Доля образующегося углистого вещества минимальна, а при определенных обстоятельствах углистое вещество вообще не образуется. При более высоких температурах процесса основным продуктом является газ. Пиролиз при высоких скоростях нагрева известен как быстрый, огневой или ультрапиролиз (различия между этими видами пиролиза определены не четко).

Принципиальное отличие схем пиролиза от схем газификации состоит только в том, что в пиролизных установках внутреннее пространство реактора герметично изолировано от внешней среды (в силу анаэробности процесса).

Глушковым В.А. было проведено сравнение параметров разных способов утилизации отходов [23; 42; 43; 45; 81; 107]. Результаты приведены на следующей таблице (табл. 1.6).

Таблица 1.6
Сравнение параметров процессов газификации при разных способах утилизации

№	Технология	Выход энергоносителя с 1 кг биомассы	Теплотворная способность энергоносителя	Энергетический выход с 1 кг биомассы	Технологичность энергоносителя
1	Сжигание топливной щепы	1 кг щепы	11,1 МДж/кг	11,1 МДж/кг	Низкая
2	Сжигание пеллет	0,5 кг пеллет	17,6 МДж/кг	8,8 МДж/кг	Средняя
3	Анаэробная ферментация	0,06 м3 биогаза	21 МДж/кг	1,3 МДж/кг	Высокая
4	Пиролиз	1 кг биомассы	14-16 МДж/кг	23-27 МДж/кг	Высокая

Из таблицы 1.6 видно, что пиролиз более предпочтителен по сравнению с другими способами, поскольку при нем не происходит окисления органического сырья и минимизируются зольные остатки; больше параметр энергетического выхода с 1 кг биомассы.

Выводы по главе 1

1. Количество крупнорогатого скота, лошадей, свиней, оленей на конец 2020 года по Республике Саха (Якутия) составляет 540 тыс. голов. Они ежедневно образуют органический отход в виде бесподстильного навоза. В настоящее время в аграрном секторе Якутии отсутствуют технологии по утилизации производимого навоза, что приводит к многолетним накоплениям твердого навоза в населенных пунктах республики. Происходит разрушающее воздействие необработанного бесподстильного навоза на хрупкую природу Якутии, обостряемое обратной реакцией вечной мерзлоты.

2. Применяемые в настоящее время способы и методы по переработке, обеззараживанию и утилизации бесподстильного навоза применимы только для свежего или жидкого его состояния, отсутствуют технологии для утилизации твердого бесподстильного навоза.

3. Наиболее оптимальным для утилизации твердого бесподстильного навоза, на наш взгляд, является пиролизный способ, позволяющий получать топливный газ и доступное удобрение в виде золы.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Пиролизный метод утилизации отходов

Пиролиз – процесс термического разложения сырья с влажностью до 50% без доступа кислорода в огнеупорных установках – пиролизных печах [114].



Рис. 2.1. Процесс термического разложения без доступа воздуха

Этот метод термической обработки отходов обеспечивает их высокоэффективное обезвреживание и использование в качестве топлива и химического сырья, что способствует созданию малоотходных и безотходных технологий и рациональному использованию природных ресурсов [100].

В зависимости от температуры процесс пиролиза имеет следующие виды (рис. 2.2).

В зависимости от температуры, при которой протекает пиролиз, различается:

1. *Низкотемпературный пиролиз или полукоксование* (450–550 °С). Для данного вида пиролиза характерны максимальный выход жидких и твердых (полукокс) остатков и минимальный выход пиролизного газа с максимальной теплотой сгорания. Метод подходит для получения первичной смолы – ценного жидкого топлива, и для переработки некондиционного каучука в мономеры, являющиеся сырьем для вторичного создания каучука. Полукокс можно использовать в качестве энергетического и бытового топлива.
2. *Среднетемпературный пиролиз или среднетемпературное коксование* (до 800 °С) дает выход большего количества газа с меньшей теплотой сгорания и меньшего количества жидкого остатка и кокса.
3. *Высокотемпературный пиролиз или коксование* (900–1050° С). Здесь наблюдаются минимальный выход жидких и твердых продуктов и максимальная выработка газа с минимальной теплотой сгорания – высококачественного горючего, годного для далеких транспортировок. В результате уменьшается количество смолы и содержание в ней ценных легких фракций.

Рис. 2.2. Виды процесса пиролиза

Пиролизный метод термической обработки растительных и иных отходов гарантирует высокоэффективное обезвреживание при их применении в качестве химического сырья, что способствует созданию малоотходных и безотходных технологий и оптимальному применению природных ресурсов.

По итогам утилизации растительных и твердых отходов в пиролизной установке образуется пиролизный газ с высокой теплотой сгорания и различные твердые вещества, которые идут на вторичное использование экологических продуктов.

Многотопливный пиролизный реактор автономных химических энергокомплексов специализирован для генерации горючего пиролизного газа из широкого спектра твердых углеродсодержащих материалов, подлежащих утилизации. Эти материалы, в то же время, являются потенциальными нетрадиционными возобновляемыми топливами, взамен традиционных топлив нефтяного происхождения, ископаемого угля и природного газа [121].

К числу такого бросового сырья можно отнести (рис. 2.3).

К числу такого бросового сырья можно отнести:

- ТБО: бумагу; картон; текстиль; различные пластики; торф и прессованную из торфа тару.
- Отходы резинотехнических изделий, включая автомобильные отработанные покрышки.
- Всевозможную нетоварную древесину, включая отходы с различными пропитками (шпалы, телеграфные столбы, фанера, древесностружечные и древесноволокнистые материалы).
- Отходы растениеводства с/х: лузгу подсолнечника; жмых; солому; костру; листву; кукурузные початки; корзиночки подсолнечника; стебли сорняков; плодовые косточки; скорлупу орехов.
- Отходы животноводства с/х: помет и навоз животных; иловые осадки и т.д.
- Возможно использование жидких горючих отходов (отработанные масла, отходы лакокрасочных производств и т.д.) в качестве пропитки для вышеперечисленных твердых топлив.

Рис. 2.3. Виды бросового материала

Из всего многообразия твердых топлив и их смесей вырабатывается газ примерно одинакового состава.



Рис. 2.4. Схема элементов пиролизного газа [6]

По нашему мнению, для Республики Саха (Якутия) наибольший интерес для использования в природно-климатических, экономических и социальных условиях представляет технология утилизации в пиролизных установках твердого бесподстилочного навоза крупнорогатого скота.

2.2. Патентные исследования по теме работы

Впервые в истории химической науки на то, что каменный уголь дает светильный газ (смесь водорода, метана, окиси углерода и других горючих газов, получаемые при пиролизе каменного угля или нефти), худший по качеству, чем газ нефтяного происхождения обратили внимания российские химики Юлия Всеволодовна Лермонтова и Александр Александрович Летний. А в 1877 году Александром Александровичем Летним был запатентован эффект пиролиза углеводородов [142].

Ещё в 1875 он обнаружил, что при температуре выше $300^{\circ}C$ тяжелые нефтяные остатки частично разлагаются на более легкие

продукты – бензин, керосин, газы. В 1877 году впервые выделил из нефти ароматические углеводороды (бензол, толуол, ксилол, антрацен и др.); установил важные закономерности процесса пиролиза нефти. Практически в это же время были построены первые заводы в Киеве и Казани. Для получения газа для освещения, пиролизу подвергали керосин. Большой толчок к развитию промышленного применения технологии пиролиза дала Первая мировая война, когда возникла большая потребность в толуоле – сырье для производства тротила. В XX веке существенный вклад в разработку новых направлений пиролиза древесины внес профессор Тищенко Д.В.

Процесс пиролиза углеводородов (300–500°C) (газовых углеводородов, прямогонного бензина, атмосферного газойля) является основным источником получения этилена и одним из главных источников получения пропилена, дивинила, бензола и ряда других продуктов. В 1877 году процесс пиролиза (крекинга) нефтегазового сырья был запатентован российским инженером химиком Александром Александровичем Летним.

Пионером по изучению и внедрению пиролизной технологии в России является Александр Александрович Летний. После него данной технологией занимались и внедряли Бакаев В.В., Косивцов Ю.Ю., Бондалетов В.Г., Добровольский И.П., Копытов В.В., Шахтахтинский Т.Н., Ибрагимов Ч.Ш., Мамедов З.А., Юсубов Ф.В., Кельцев Н.В., Глушков В.А. и др. [13; 24; 42; 52; 72; 76; 87; 91; 97; 142; 144; 145].

В середине XX века существенный вклад в теорию термической переработки отходов внес коллектив исследователей под руководством Корякина В.И. [85, 86].

На данный момент вопросами практической реализации установок пиролиза занимается производственная фирма «Синтур» из Екатеринбурга [42].

А более весомые отечественные исследования связаны, в первую очередь, с именем П.А. Боброва, изучавшего разложение целлюлозы, лигнина, древесины и торфа [125].

Следует отметить, что вышеприведенные технологии направлены на получение жидкого альтернативного топлива, имеют в своем составе сложные устройства и оборудование, весьма внушительны по своим габаритам и требуют специальных помещений,

значительных площадей и сооружения автономных электростанций. Поэтому однозначно исключается возможность их внедрения в аграрный сектор Якутии.

В животноводстве республики Якутия преобладают малые фермерские хозяйства. Поэтому малогабаритная и мобильная технология Глушкова В.А. как нельзя лучше подходит для внедрения в эти хозяйства (рис. 2.5). Его разработка отмечена Золотой медалью РАН в 2009г. Она позволяет полностью разлагать твердые растительные вещества (биомассы) с получением смеси газов, пригодных для использования в качестве альтернативного топлива – в системе отопления помещений, при приготовлении пищи и как моторное топливо [42].

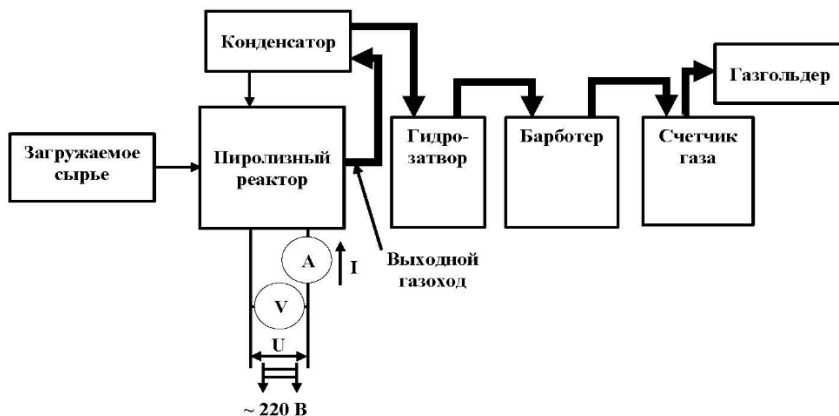


Рис. 2.5. Принципиальная схема пиролизной технологии Глушкова

На основании вышесказанного была разработана система обеззараживания, переработки бесподстильного навоза новым способом – технологией пиролизной утилизации твердого бесподстильного навоза (рис. 2.6).

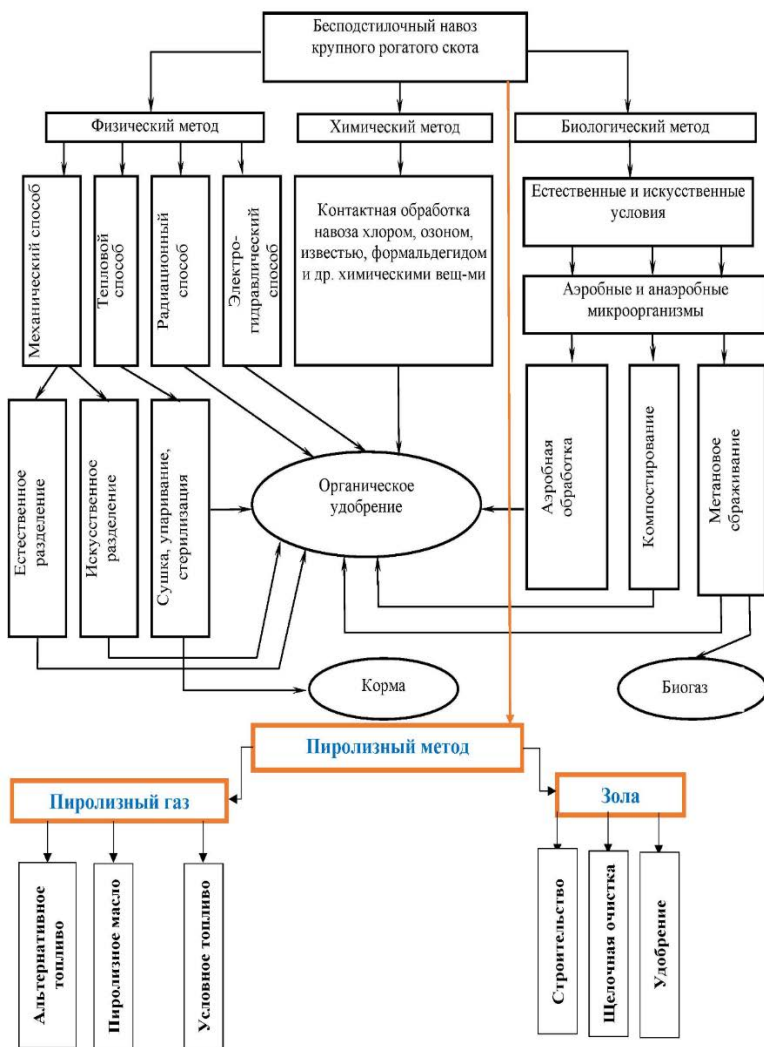


Рис. 2.6. Предлагаемая модернизированная схема по способам и методам утилизации навоза КРС – жидкого и твердого

В пиролизной установке для утилизации также могут использоваться: органические бытовые отходы, полиэтилены, ТБО, отходы лесной промышленности (щепа, ветки).

Преимуществами применения технологии пиролиза является то, что:

1) можно перерабатывать несортированные твердые бытовые отходы, канализационный ил, нефтяные остатки, бумажную пульпу, смешанные пластики и измельченные остатки автомобилей, резину и автопокрышки, аккумуляторные батареи, отходы деревообработки, медицинские отходы и т.д.

2) пиролизная установка не образует сточных вод, что является экологическим преимуществом и удешевляет систему.

3) другим важным экологическим фактором является эффективное снижение первоначальных объемов отходов, которые предназначены для захоронения на полигонах.

4) безвредные остатки пиролизного производства могут также использоваться в дальнейшем, например, при дорожном строительстве, покрытии кортов спортивных площадок и т.д.

2.3. Схема пиролиза по Глушкову В.А.

Используя системный анализ известных схем, описанный в работе Глушкова В.А. [42], необходимо определить способ повышения эффективности процесса пиролиза органического сырья с предложением конструкторских решений.

В работе [42–44; 116], на основе обобщения имеющихся данных, Глушковым составлена и проанализирована традиционная схема утилизации органического сырья и произведена оценка материально-энергетического баланса традиционного процесса пиролиза (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Схема системы «Пиролизная установка» и ее материально-энергетического баланса

Указано, что автором предложено использовать топливные свойства не только полученного газа, но и жидкого пиролизата, топливной составляющей которого являются пиролизные смолы для повышения энергетических показателей процесса [42].

Так как непосредственное использование смол в качестве топлива сопряжено с большими техническими трудностями, требуется преобразовать их в более приемлемый вид топлива. Поэтому предлагается возвращать смолы в реактор для их термической деструкции, в результате которой сложные углеводороды разлагаются на более простые, причем при пиролизе тяжелых молекул образовавшихся смол образуются легкие молекулы топливных газов. В результате увеличивается общее количество топливного газа при пиролизе растительной массы с возвратом пиролизных смол, а значит, увеличивается и общая энергия от пиролизного газа. В доказательство к этому на рисунке 2.8 [42] приведены изменения, внесенные в традиционную систему пиролиза, и материально-энергетический баланс, характеризующий произошедшие изменения.

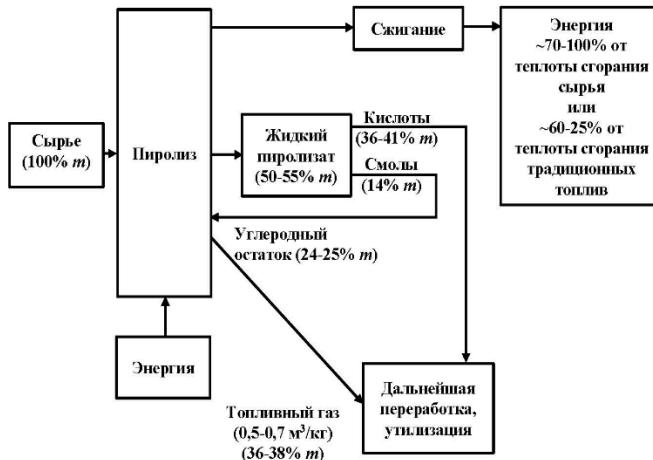


Рис. 2.8. Схема материально-энергетического баланса разработанного процесса пиролиза

Таким образом, по итогам подведенным Глушковым [42], можно сказать, что энергия от сжигания топливного газа, образованного при такой организации процесса пиролиза растительного

сырья, увеличивается в два раза. Отдельно отмечено, что при этом одновременно уменьшается количество остаточных продуктов реакции.

Кроме прямого сжигания в топках, одним из наиболее эффективных направлений использования в энергетике твёрдых топлив и горючих отходов промышленного и сельскохозяйственного производств является их предварительная переработка в горючие газы различного назначения [82; 108; 110]. Получаемый в газогенераторах газ может быть использован как топливо в энергетических установках, технологических процессах, транспортных и стационарных силовых машинах.

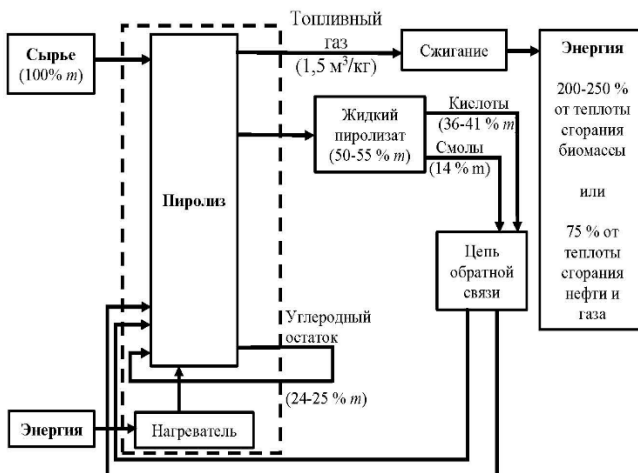


Рис. 2.9. Схема пиролиза в установке ГВА-1

Биомасса – это углеводородные материалы, которые в основном содержат углерод и водород, а также кислород, азот и серу. Некоторые виды биомассы содержат значительные количества неорганических веществ. Концентрация золы может составлять от 1 до 15%, определяется наличием неорганических компонентов [42–44; 127; 131]. К биомассе относятся различные натуральные материалы и продукты их переработки, а также сельскохозяйственные, промышленные и муниципальные отходы, такие, как растительное сырье, торф, отходы древесины, жом, отходы бумаги, отходы производства, а также использования натуральных и искусственных волокон и тканей, опилки, солома, отходы пищевых производств,

отходы животноводства, некоторые виды медицинских отходов, водоросли и отходы их переработки и др. Биомасса относится к возобновляемым ресурсам. По различным оценкам общая биомасса живых организмов биосферы может составлять от $1,8 \cdot 10^{12}$ т до $2,4 \cdot 10^{12}$ т сухого вещества.

Глушковым В.А. проведен анализ технико-экономических показателей различных технологий переработки растительного сырья (биомассы) (табл. 2.1, 2.2).

Таблица 2.1

Технико-экономические показатели различных технологий переработки биомассы в топливо

№	Способы утилизации/ Основные параметры	Прямое сжигание	Газификация	Пиролиз
1	Теплотворная способность топлива	10 - 17,5 МДж/кг	4 - 6 МДж/м ³	14 - 16 МДж/м ³
2	Экологичность технологии	Экологическая чистота	Наличие утилизируемой минеральной золы	Наличие утилизируемого жидкого пиролизата и угля
3	Сфера применения	Выработка тепла и электроэнергии	Энергоснабжение в случаях, когда не критична плотность энергии	Энергоснабжение и питание силовых установок
4	Ресурсозатратность	Низкая	Средняя	Средняя
5	Качество получаемого энергоносителя	Неуниверсальный (однородные плотные pellets, брикеты, щепа)	Универсальный (топливный газ)	Универсальный (топливный газ)
6	Экономические показатели	Себестоимость твердого топлива 1426 - 2065 руб./т у.т.	Себестоимость топливного газа 8851 руб./т у.т.	Себестоимость зависит от направленности процесса: на пиролизный газ или твердый остаток
7	Потенциал повышения энергетического выхода	Нет	Нет	Да

Таблица 2.2

Сравнение ожидаемого эффекта от внедрения новой технологии
пиролитической переработки биомассы
с существующими технологиями

№	Обобщенный показатель	Прямое сжигание	Газификация	Пиролиз	Пиролизная регенерация
1	Количество энергоносителя с 1 кг биомассы	1 кг пеллет / брикетов / щепы	2 м ³ топливного газа	0,3-0,4 м ³ топливного газа	2 м ³ топливного газа
2	Энергетическая ценность энергоносителя	10 - 17,5 МДж/кг	4 - 6 МДж/м ³	14 - 16 МДж/м ³	Не менее 16–18 МДж/м ³
3	Количество энергии с 1 кг биомассы	10 - 17,5 МДж	8 - 12 МДж	4,2 – 6,4 МДж	Не менее 24–27 МДж

Таким образом, по результатам вышеприведенных показателей, Глушковым предложены сравнительные характеристики технологий по утилизации и переработке биомассы в следующем виде (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Сравнительные характеристики технологий
по переработке биомассы

	Технология	Выход энергоносителя с 1 кг биомассы	Теплотворная способность энергоносителя	Энергетический выход с 1 кг биомассы	Технологичность энергоносителя
1	Сжигание топливной щепы	1 кг щепы	11,1 МДж/кг	11,1 МДж/кг	Низкая
2	Сжигание пеллет	0,5 кг пеллет	17,6 МДж/кг	8,8 МДж/кг	Средняя
3	Анаэробная ферментация	0,06 м ³ биогаза	21 МДж/кг	1,3 МДж/кг	Высокая
4	Пиролиз	1 кг биомассы	14-16 МДж/кг	23-27 МДж/кг	Высокая

Из таблицы 2.3 мы видим, что по сравнению с другими технологиями пиролизная технология утилизации биомассы существенно превосходит по энергетическому выходу с 1 кг сырья.

На базе лаборатории автодорожного факультета Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова для обоснования выходных параметров процесса пиролиза проведен эксперимент в период с 2013 г. по 2021 г.

2.4. Существующие математические модели процесса пиролиза

Известные модели процесса пиролиза, разработанные учеными или группами ученых зарубежных фирм, используются для расчета состава продуктов пиролиза углеводородного сырья на промышленных производствах разных стран [96].

Группа ученых известной нидерландской фирмы разработали методологию с использованием программы моделирования пиролизных печей SPYRO для проектирования печей по заказу, являющейся собственностью компании.

Программа моделирует процесс пиролиза различного углеводородного сырья от этана до лигроина, кинетическая модель включает механизм из 2000 реакций [98].

Математическая модель Валеева И.А., касательно процесса пиролиза древесины, учитывает предварительную подсушку, кинетику, количество выхода летучих продуктов и охлаждение готового древесного угля. Данная позволяет определить количество сухого остатка, выделившихся летучих и продолжительность всего процесса получения угля с учётом времени охлаждения готового продукта в зависимости от давления в аппарате:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{K \Delta t F_{KM}}{\rho_{ср} V_{св} c_{Mcp}} \quad (2.1)$$

где, dT – температура;

τ – время;

K – кинетическая константа скорости пиролиза;

Δt – движущая сила процесса теплопередачи;

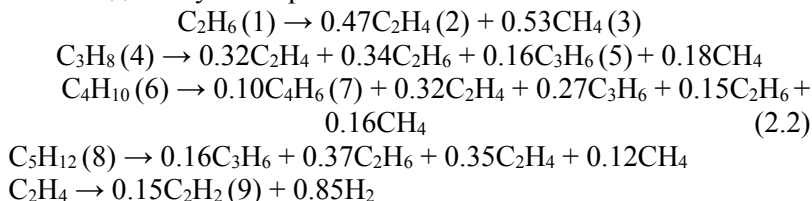
$\rho_{ср}$ – плотность среды;

$V_{св}$ – объем свободный;

c_{Mcp} – удельная теплоемкость материала среды.

Одной из основных задач в процессе пиролиза является выбор оптимального режима работы в зависимости от состава сырья и выхода целевых продуктов. Для решения этой проблемы, была разработана модель, использующая кинетическую схему, которая включает как первичные реакции разложения углеводородов, так и побочные реакции образования кокса, а также описание его отложения на стенках змеевика [32].

Был проведен анализ пиролиза пропан-бутановой фракции на основании кинетической модели, предложенной в работе Жорова Ю.М., Васильевой Н.И. и Панченкова Г.М. [8; 109]. Полученная кинетическая модель процесса включает в себя 8 реакций, которые приведены ниже, при этом, согласно этой схеме превращений, в них взаимодействуют 12 различных компонентов:



Данная схема процесса, несмотря на некоторую упрощенность модели вызванную причинами, приведенными выше, позволяет проводить расчеты концентраций интересующих компонентов представленной реакционной смеси при самых разных термодинамических условиях.

Из полученной схемы превращений, составлена математическая модель Долганов Игорь Михайлович кинетики пиролиза [54]. Соответственно, она включает в себя, во-первых, систему из 7 экспоненциальных алгебраических уравнений для расчета констант скоростей соответствующих реакций, общий вид которой для каждой из них, кроме последней, приведен ниже [54]:

$$\frac{dC_{12}}{dt} = K_8 C_{12} - \exp(0,023 \cdot C_{12} - 1) \cdot G^{0,8} \cdot (D - 2 \cdot \delta)^{-1,8} \quad (2.3)$$

где G – массовый расход сырья, кг/с;

D – диаметр трубки, мм;

δ – толщина отложений кокса;

K_i – константа скорости реакции i ;

C_i, C_k – концентрация компонента i ;

t – время контакта;

Таким образом, была разработана и получена математическая модель пиролиза углеводородного сырья, и был протестирован ее функционал. В дальнейшем автор пишет о том, что планирует вести работу в направлении увеличения количества задействованных компонентов, разработать механизмы, моделирующие динамику концентраций этих компонентов в реальном времени, то есть, сделать модель полностью нестационарной, а также создать систему, прогнозирующую состояние системы, которая будет производить расчеты на основе данных, накопленных за все время производства [54].

Моделирование химического процесса является необходимым инструментом как на этапе проектирования реактора (особенно для конструкций сложной геометрии) с целью изучения процесса в широком спектре различных условий протекания реакции и технологических режимов и для оптимального управления процессом [12]. При выборе условий проведения химико-технологических процессов решающее значение имеют вопросы определения скорости химических превращений, изучаемые химической кинетикой. Кинетические уравнения являются первоосновой математической модели химического процесса и реактора, так как содержат необходимую информацию об основных закономерностях химических превращений. Термическое разложение предельных углеводородов сопровождается разнообразными и многочисленными параллельными процессами, что приводит к образованию десятка веществ и возможности протекания сотни реакций. Состав продуктов пиролиза более чем многообразен и варьируется в широких пределах в зависимости от типа сырья и технологических условий проведения реакции. Именно поэтому исследователями предложены многочисленные кинетические схемы для описания процессов пиролиза углеводородов на различных лабораторных и промышленных установках и накоплено значительное количество экспериментальных данных [74; 75; 83; 90].

Изначально процесс построения кинетической модели пиролиза был основан на теории цепных реакций и осуществлялся вручную [83; 90; 135]. Непосредственно пиролиз пропана представляет собой радикально-цепной процесс, протекает в соответствии с механизмом Райса –Герфелда –Косякова и включает в себя три стадии [73; 84]:

- 1) инициирование цепи;

- 2) продолжение цепи;
- 3) обрыв цепи.

Математическая модель А.В. Собкалова на исследования процесса перевода термопластичных материалов в термореактивные на примере автомобильных шин [126; 137]. Модель позволяет количественно прогнозировать влияние переменных технологических параметров на режимы работы и конструкцию печи для получения готовой углеродосодержащей продукции.

Предложенные уравнения имеют следующий вид:

$$\Delta T_s = \frac{-[U_2(T_g - T_s) + U_2(T_w - T_s)]\Delta x - Q_D + \lambda_{VM}\Delta Y_N + \lambda_{H_2O}\Delta Y_5 + RT_1\Delta H_{RT_1} + RT_2\Delta H_{RT_2}}{(Y_1 + \Delta Y_2)C_{p1} + (Y_2 + \Delta Y_2)C_{p2} + (Y_5 + \Delta Y_2)C_p} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_g = & \left\{ -[U_2(T_g - T_s) + U_1(T_g - T_w)]\Delta x - RT_1(H_1 - H_2) - \right. \\ & RT_2(H_1 - 2H_2) + \frac{H_{H_2}\Delta Y_1}{18,016} + H_{VM,T_3}\Delta Y_2 + \frac{EH_{T_s}}{12,01} + \frac{DEH_{H_2,T_s}}{2,016} - \\ & \left. RT_3\Delta H_{RT_s} - RT_4\Delta H_{RT_4} - \Delta Y_5 H_{fuel} + Q_{VM} - D_{heat} + Q_{H_2} \right\} / \\ & \left\{ \sum_{i=4}^{10} C_{p_i}(Y_t + \Delta Y_t) + C_{FN}Y_N \right\} \quad (2.5) \end{aligned}$$

$$T_w = \frac{(U_1 + U_5)(U_1 T_g + U_5 T_s) + U_1 U_5 T_g}{((U_1 + U_5)(U_1 + U_5) + U_1 U_5)} \quad (2.6)$$

$$T_{wo} = \frac{U_1 T_w + U_5 T_a}{U_1 + U_5} \quad (2.7)$$

где, T_s , T_g , T_w , T_{wo} и T_a – температуры твердой и газовой фаз, внутренней стенки, наружной стенки и воздуха, соответственно, °K;

U_1 до U_5 – коэффициенты теплопередачи между газом и внутренней стенкой, газом и твердым телом, внутренней стенкой и твердым веществом, внутренней стенкой и наружной стенкой, наружной стенкой и воздухом, Вт/м²K;

Значения Y_1 до Y_5 и Y_N – скорость потока углеродосодержащего материала, летучих веществ и влаги в слое углеродосодержащего материала, а также углеродосодержащей мелочи, топлива, кислорода, водорода, диоксида углерода, оксида углерода, воды и азота в потоке газовой фазы, м/с, соответственно;

Значения C_{p_i} являются теплоемкостями соответствующих материалов, Дж/К;

Значения λ_{VM} и λ_{H_2O} – теплота испарения летучих веществ и воды, Дж/кг, соответственно;

Q_D – теплота разложения углеродосодержащего материала, Дж/кг;

Значения ΔH – тепловой эффект соответствующих химических реакций, Дж/моль;

Значения H , H_1 , H_2 – энтальпия соответствующих веществ, Дж;

D_E – эффективная скорость разложения углеродосодержащего материала, кДж/моль;

E – скорость уноса углеродосодержащей мелочи, м/с;

Q_{VM} – теплота разложения летучих веществ;

D_{heat} – теплота излучения, поглощаемая холодным газом от пламени.

Данная модель удовлетворительно описывает реальные изменения технологических параметров процессов окислительного пиролиза резинотехнических материалов. Например, выход углеродосодержащего продукта (пирокарбона) спрогнозирован с отклонением + 0,7 %. Наиболее важным технологическим фактором, который оказывает влияние на выход пирокарбона, является унос углеродосодержащей мелочи.

Математическая модель Глушкова В.А. для установившегося режима в виде регрессионной зависимости количества энергии, требуемого для процесса, от массы загружаемого растительного сырья [44; 133]:

$$Q(m) = 605,7 \cdot m \quad (2.8)$$

где Q – в Ватт-минутах;

m – в граммах.

Произведен анализ существующих моделей, описывающих процесс пиролиза (табл. 2.4)

Таблица 2.4

Модели, описывающие процесс пиролиза

№	Автор	Модель
1	Валеев И.А.	$\frac{dT}{d\tau} = \frac{K\Delta t F_K M}{\rho_{cp} V_{cv} c_{Mcp}}$ <p>Данная модель позволяет определить количество сухого остатка, выделившихся летучих веществ и продолжительность всего процесса получения угля с учётом времени охлаждения готового продукта в зависимости от давления в аппарате.</p>
2	Долганов И.М. Бунаев А.А. Долганова И.О. Чиркина Н.А.	$\frac{dC_{12}}{d\tau} = K_8 C_{12} - \exp(0,023 \cdot C_{12} - 1) \cdot G^{0,8} \cdot (D - 2 \cdot \delta)^{-1,8}$ <p>Математическая модель описывает процесс пиролиза углеводородного сырья.</p>
3	Собкалов А.В. Пименова М.А. Ивахнюк Г.К.	$T_w = \frac{(U_1 + U_5)(U_1 T_g + U_5 T_s) + U_1 U_5 T_g}{((U_1 + U_5)(U_1 + U_5) + U_1 U_5)}$ $T_{wo} = \frac{U_1 T_w + U_5 T_a}{U_1 + U_5}$ <p>Эта модель позволяет количественно прогнозировать влияние переменных технологических параметров на режимы работы и конструкцию печи для получения готовой углеродосодержащей продукции</p>
4	Глушков В.А.	$Q(m) = 605,7 \cdot m,$ <p>Математическая модель пиролизной установки для установившегося режима в виде регрессионной зависимости количества энергии, требуемого для процесса, от массы загружаемого растительного сырья (биомассы)</p>

Таким образом, можно констатировать, что существующие в настоящее время математические модели процесса пиролиза:

- применимы для описания химических реакций, протекающих внутри пиролизной установки при утилизации углеводородного сырья (формулы 1–3);

- модель Глушкова В.А. описывает процесс утилизации растительного сырья (биомассы) и подходит для адекватного описания процесса пиролиза твердого бесподстильного навоза.

2.5. Модернизация математической модели Глушкова В.А. по процессу пиролиза растительного сырья

Изучены математические модели пиролизного процесса. Обнаружено что подавляющее количество моделей описывают химический процесс, протекающий в тех или иных реакторах. На сегодняшний день только модель Глушкова В.А. описывает технологический процесс пиролиза.

Модель процесса пиролиза в установившемся режиме по Глушкову имеет вид:

$$Q(m) = 605,7m \quad (2.9)$$

где Q – требуемое количество энергии, в Ватт-минутах;

m – масса твердого отхода, г.

При переводе минуту в секунды, уравнение (2.9) примет следующий вид:

$$Q(m) = K_{\pi} \cdot m = 0,16m \quad (2.10)$$

где $K_{\pi} = 0,16$ – коэффициент пиролизации сырья при установившейся температуре в термореакторе 300°C .

Следует отметить, что данная модель учитывает только массу утилизируемого сырья, а такой значимый параметр как влажность, не берется во внимание. В связи с этим, предлагаем внести коррективы.

Известно, что масса – это физическая величина, которая является мерой инертности тела:

$$m = \rho V \quad (2.11)$$

где ρ – плотность пиролиза, кг/м^3 ;

V – объём пиролизного газа, м^3 .

Сырье примем за твердое сыпучее вещество и для определения его объема будем пользоваться формулой для прямого кругового цилиндра:

$$V = \pi r^2 h \quad (2.12)$$

где, r – радиус термореактора, м;

h – высота заполнения термореактора, м.

С учетом формулы (2.11) формула (2.12) примет вид:

$$m = \rho \cdot \pi r^2 h \quad (2.13)$$

Известно, что относительная или рабочая влажность W_p любого материала определяется по следующей формуле [138]:

$$W_p = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

где W_p – относительная, или рабочая, влажность, %;

m – масса образца во влажном состоянии, г;

m_0 – масса того же образца, высушенного до постоянного значения, г.

Тогда массу образца во влажном состоянии можно определить по формуле:

$$m = \frac{(m - m_0) \cdot 100\%}{W_p} \quad (2.15)$$

Приравняем формулы (2.13) и (2.15) и выразим массу через влажность, плотность и объем:

$$\begin{aligned} \frac{(m - m_0) \cdot 100\%}{W_p} &= \pi r^2 h \cdot \rho \\ (m - m_0) \cdot 100\% &= \pi r^2 h \cdot \rho \cdot W_p \\ m - m_0 &= \frac{\pi r^2 h \cdot \rho \cdot W_p}{100\%} \\ m &= \frac{\pi r^2 h \cdot \rho \cdot W_p}{100\%} + m_0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

С учетом равенства (2.16) уравнение (2.10) примет следующий вид:

$$Q(m) = 0,16 \cdot \left(\frac{\pi r^2 h \cdot \rho \cdot W_p}{100\%} + m_0 \right) \quad (2.17)$$

Таким образом, получена зависимость, описывающая процесс пиролиза позволяющая рассчитывать требуемый расход энергии на перерабатываемую массу сырья с учетом ее объема и влажности.

Основываясь на предварительно полученной формуле (2.17), построили график зависимости требуемого количества энергии на утилизацию твердого отхода от влажности сырья.

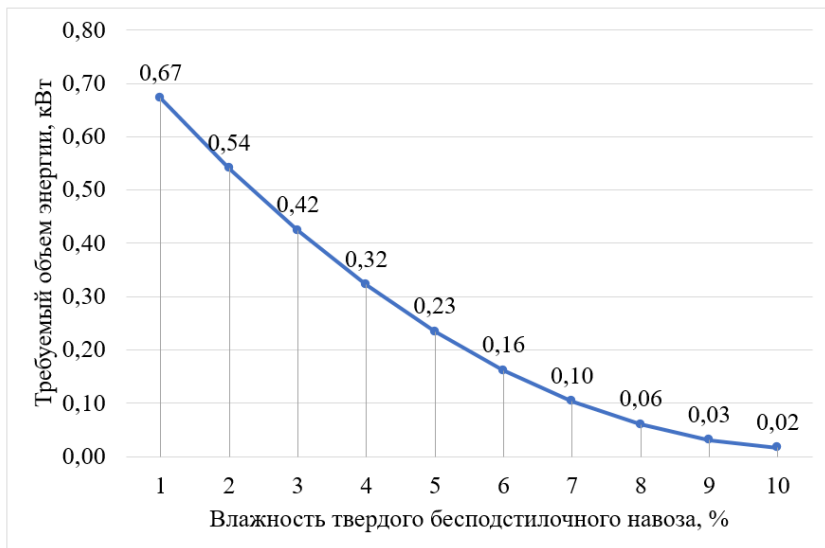


Рис. 2.10. График зависимости требуемого количества энергии на утилизацию твердого отхода от влажности сырья

Анализируя полученную зависимость (рис. 2.10) можно сделать вывод, что с повышением влажности сырья объём получаемой энергии снижается.

Выводы по главе 2

1. Существующие в настоящее время математические модели, описывающие процесс пиролиза, носят аналитический характер и их практическое применение затруднительно; они применимы для описания химических реакций, протекающих внутри пиролизной установки и разработаны для процесса пиролиза углеводородного сырья.

2. На наш взгляд, после необходимых модернизаций, модель Глушкова В.А., описывающий процесс утилизации растительного сырья, можно применить для описания процесса пиролиза твердого бесподстилочного навоза.

В результате, получена зависимость, описывающая процесс пиролиза для установки Глушкова, позволяющая рассчитывать требуемый расход энергии на перерабатываемую массу твердого бесподстилочного навоза с учетом его объема и влажности.

$$Q(m) = 0,16 \cdot \left(\frac{\pi r^2 h \cdot \rho \cdot W_p}{100\%} + m_0 \right)$$

В формуле коэффициент 0,16 – это коэффициент пиролиза сырья по Глушкову В.А. при установившейся температуре в термореакторе 300°C.

Основными факторами, при помощи которых процесс пиролиза будет управляться, являются: W – влажность твердого навоза, %; h – высота наполнения твердого навоза в термореакторе, соответственно фактор заполнения термореакторе и размеры фракции навоза, мм; r – радиус термореактора, соответственно процесс пиролиза самого термореактора, мм.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения и обоснования полученных во второй главе теоретических выводов, проведены экспериментальные исследования по утилизации твердого навоза путем пиролиза.

Внедрение пиролизной технологии утилизации твердого навоза уменьшит агрессивное воздействие твердого навоза на экологию мерзлотных почв, снизит процесс оттайки мерзлоты, а сопутствующими продуктами будут альтернативное топливо в виде пирогаза и доступное удобрение в виде золы.

3.1. Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования пиролизной установки ГВА-1 проведены по следующей методике (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Пошаговая структура методики экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на установке «Пиролизная установка Глушкова ГВА-1» (ИжГТУ) (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Общий вид пиролизной установки ГВА-1:
1 – термореактор; 2 – гидрозатвор; 3 – электронный блок контроля и управления; 4 – рама; 5 – газовое оборудование

Основные параметры пиролизной установки:

- Масса: ~ 300 кг.
- Габаритные размеры: 1590x1350x930 мм.
- Максимальный объем загрузки: 0,08 м³.
- Максимальная масса загрузки (исходя из плотности до 200 кг/м³): 16кг.
- Максимальная производительность по газу: 40 м³/час.
- Выработка газа: 1,7 м³ с 1 кг биомассы.
- Теплотворная способность газа: 15–18 МДж/м³.
- Мощность нагревателя: 6 кВт.

Установка ГВА-1 состоит из следующих узлов и деталей (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Описание составляющих пиролизной установки ГВА-1

В термореактор (1) вмонтированы датчики температуры и датчик давления, сигналы которых поступают на электронный блок управления (4). Последний также соединяется с персональным компьютером для обмена данными. Выходной газоход термореактора (1) соединяется с гидрозатвором (2). Гидрозатвор (2) предназначен, во первых, для предотвращения попадания кислорода воздуха внутрь термореактора (1), а во вторых, для осаждения из проходящего через них газосодержащихся в нем жидкого пиролизата

и различных взвесей. Выход гидрозатвора (2) соединен со счетчиком газа (5), который через патрубок соединяется с газовой горелкой. Сигнал с электронного преобразователя счетчика газа также подается на электронный блок управления (4).

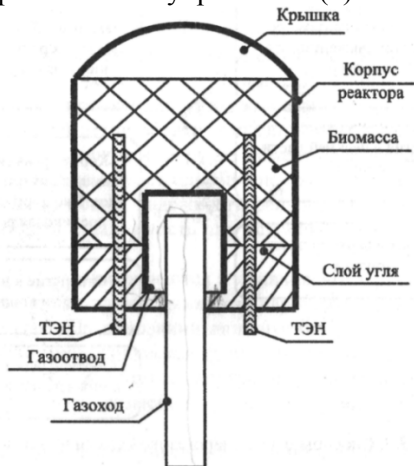


Рис. 3.4. Общий вид терморектора пиролизной установки ГВА-1

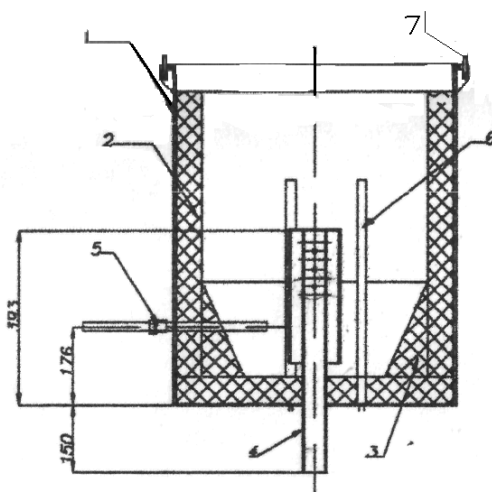


Рис. 3.5. Реакционная камера в сборе:

- 1 – корпус; 2, 3 – футеровка стенок; 4 – газопровод; 5 – термопара;
6 – ТЭН; 7 – откидной болт

В эксперименте фиксировались начальные, промежуточные и конечные значения параметров и факторов.

В начале эксперимента фиксировались:

- m – масса загружаемого твердого бесподстилочного навоза, г;
- W – влажность навоза, %;
- h – фракция загружаемого навоза, мм;
- начальные показания газового счетчика, куб. м;

В процессе эксперимента фиксировались следующие показатели:

- текущее время;
- начало выхода газа по времени;
- показания газового счетчика, куб. м.

По завершении эксперимента фиксировались следующие данные:

- общий выход пиролизного газа, куб. м;
- продолжительность эксперимента по времени, мин;
- общее время эксперимента, мин;
- m , масса несгоревшего навоза, г.

При этом процесс пиролиза осуществлялся в следующем порядке: в первую очередь нагревали загруженное сырье и начинали его переработку. Начальным этапом был переходный процесс, при котором скорость выработки топливного газа интенсивно возрастала. По окончании переходного процесса скорость выработки приобретала постоянный характер, то есть, наступала стадия так называемого периода устойчивой выработки

Перечень используемого оборудования и приборов приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1



Приборы и оборудование

	Оборудование, марка	Внешний вид	Технические характеристики
1	Весы лабораторные ВК-300		Весы предназначены для измерений массы легких и сверхлегких предметов в лабораториях предприятий, аптеках, ломбардах, ювелирных мастерских. Весы позволяют работать в счетном режиме, режиме процентного взвешивания и подсчитывать суммарную массу товара. Встроенный аккумулятор обеспечивает автономную работу весов до 24 часов. Обмен информацией с внешними устройствами реализован по интерфейсу RS-232.
2	Бюксы алюминиевые		Материал стенок бюкса – алюминий. Поэтому следующие параметры следующие параметры бюкса являются параметрами этого металла: плотность – 2700 кг/куб.м; температура плавления – 650 С; теплопроводность – 203,5 Вт/(м*К); предел прочности на растяжение – 220 МПа.
3	Тигли фарфоровые		Фарфоровые тигли можно нагревать до температуры 1200°С. Соответствуют требованиям ГОСТ 9147-80

Продолжение таблицы 3.1

	Оборудование, марка	Внешний вид	Технические характеристики
4	Сушильный шкаф ШС-40		<p> Диапазон температуры, °C +50...- +250(350) Точность поддержания температуры, °C - ±5 Дискретность установки температуры, °C - 0.1 Размер рабочей камеры (Ш*В*Г), мм - 350*350*350 Объем рабочей камеры, л - 42 Время выхода на режим не более, ч - 1,5 Нормальные условия эксплуатации: температура окружающего воздуха, °C - +15...+30 относительная влажность воздуха, % - 30-80 атмосферное давление, кПа - 84-106 Напряжение питающей сети, В - 220±22 Частота питающей сети, Гц - 50±0.5 Потребляемая мощность не более, Вт - 900 Габаритные размеры (Ш*В*Г), мм - 640*780*650 </p>
5	Муфельная печь SNOL 4/1100		<p> Максимальная температура нагрева: 1100 Время разогрева электропечи до номинальной температуры без садки, мин: 110 Объем камеры, л: 4 Размеры рабочей камеры (ширина): 120 Размеры рабочей камеры (высота): 100 Размеры рабочей камеры (глубина): 295 Габаритные размеры (ширина): 440 Габаритные размеры (высота): 500 Габаритные размеры (глубина): 615 Масса, кг: 41 Номинальная мощность, кВт: 3.7 Напряжение питающей сети, В: 220 Материал: керамика Производитель: AB UMEGA-GROUP </p>

Продолжение таблицы 3.1

	Оборудование, марка	Внешний вид	Технические характеристики
6	Эксикатор		Сосуд диаметром от 15 до 30 см (вместительностью от 100 до 300 мл), в котором поддерживается определенный уровень влажности воздуха – около 0 %. Он состоит из емкости, изготовленной из толстого высококачественного боросиликатного или лабораторного стекла, реже из полимерных материалов с крышкой, внутри которого находится осушитель.
7	Счетчик газа Элехант СГБ-4.0		Бытовой газовый счетчик Элехант СГБ-1,8 используется для фиксации расхода объема потребленного газа. Диапазон расхода газа, кубм/ч от $Q_{min} = 0,03$ до $Q_{max} = 1,8$ Пределы допустимой относительной погрешности измерения объема газа, $\% \pm 2,5$ (при расходе от Q_{min} до $0,2 Q_{max}$) $\pm 1,5$ (при расходе от $0,2 Q_{max}$ до Q_{max}) Габариты 110 x 66 x 65 мм Присоединительная резьба G1/2 по ГОСТ 6357-81 Диаметр условного прохода, 15 мм Наименьшая цена деления отсечного устройства счетчика 0,001 м³ Температура окружающей среды, -10...+50 °С Относительная влажность от 30 да 80 % (при температуре не выше +25 °С) Срок службы не менее 12 лет Масса не более 0,3 кг Режим работы непрерывный

Продолжение таблицы 3.1

	Оборудование, марка	Внешний вид	Технические характеристики
8	Сито		Сетчатый тест - сито от 100 – 600 мм, лабораторное стандартное сито, из нержавеющей стали, изготовлен из высококачественного материала, прочный и практичный в использовании
9	Газгольдер компрессор- «Расширитель- ный бачок за- крытого типа Wester WRV 50»		Объем 50 л Присоединительная резьба, 3/4 дюйм Диапазон рабочих температур от -10 до +100°С Рабочее давление до 0,6 мПа Материал фланца металл Размер 365 x 555 мм

Продолжение таблицы 3.1

	Оборудование, марка	Внешний вид	Технические характеристики
10	Компрессор-поршневой низкого давления SKAT КПП-230-24		<p>Поршневая группа компрессора SKAT КПП-230-24 приводится в движение валом однофазного асинхронного электрического двигателя. Такое устройство называется прямым приводом. Алюминиевая головка цилиндра и чугунный блок оснащены ребрами для оптимального охлаждения. Защитный кожух закрывает вращающиеся детали электродвигателя и создает направленный поток воздуха для охлаждения головки, блока цилиндра и электродвигателя.</p> <p>Компрессоры укомплектованы воздушным фильтром, шасси, компрессорным маслом и быстроразъемом, необходимым для подключения пневмоинструмента</p>
11	Пиролизная установка ГВА - 1		<p>Масса: ~ 300 кг.</p> <p>Габаритные размеры: 1590х1350х930 мм.</p> <p>Максимальный объем загрузки: 0,08 м³.</p> <p>Максимальная масса загрузки (исходя из плотности до 200 кг/м³): 16кг.</p> <p>Максимальная производительность по газу: 40 м³/час.</p> <p>Мощность нагревателя: 6 кВт</p>
12	Тара		Пластмассовая тара с объемом 14 л.

Окончание таблицы 3.1

	Оборудование, марка	Внешний вид	Технические характеристики
13	Газоанализатор «Автотест - 01.03М»		<p>Газоанализатор CO, CH_4, CO_2, O_2, тахометр, автоматическое вычисление коэффициента избытка воздуха (λ - параметра), II класс точности. Один буквенно-цифровой дисплей.</p> <p>Диапазон измерения содержания углеводорода CH_4 - 0-3000 млн^{-1}</p> <p>Пределы допускаемой погрешности CH_4. Абсолютная погрешность $\pm 20 \text{млн}^{-1}$</p> <p>Пределы допускаемой погрешности CH_4. Относительная погрешность $\pm 6\%$</p> <p>Диапазон измерения содержания оксида углерода CO 0-7%</p> <p>Пределы допускаемой погрешности CO. Абсолютная погрешность $\pm 0.2\%$</p> <p>Пределы допускаемой погрешности CO. Относительная погрешность $\pm 6\%$</p> <p>Диапазон измерения содержания диоксида углерода 0-16%</p> <p>Пределы допускаемой погрешности CO_2. Абсолютная погрешность ± 1</p> <p>Пределы допускаемой погрешности CO_2. Относительная погрешность $\pm 6\%$</p>

При определении влажности и зольности с каждого опыта брали по четыре пробы.

Пошаговый ход действий при определении влажностей (W) следующий:

1. Бюксы вымыть, высушить при температуре 100°C, взвесить (m_3).
 2. Положить в бюксы твердый навоз – навеска 2/3...3/4 объема бюксы. Наполненные бюксы взвесить (m_1).
 3. Высушить в течение 1...2 часа при температуре 80...90°C.
 4. Поднять температуру в сушильном шкафе до 105 °C и сушить в течение 1 часа.
 5. Охладить в эксикаторе высушенную навеску (m_2).
- Определяем влажность по формуле [34]:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

3.2. Методика проведения экспериментальных исследований процесса пиролиза твердого бесподстилочного навоза КРС

Эксперименты проводятся в одинаковых условиях: сырье - измельченный твердый бесподстилочный навоз разной фракции и влажности, забирается в тару объемом 14 л; рабочая температура в термореакторе 300°C; время эксперимента 1 час 20 мин. Ход процесса пиролиза: нагрев загруженного сырья до 300°C, далее его переработка. Вначале проходил переходный процесс, когда возрастала скорость выработки топливного газа. По завершении переходного процесса устанавливался период устойчивой выработки.

Экспериментальные исследования проводили в три этапа: подготовительный, пиролиз твердых фракций бесподстилочного навоза, сбор показателей по выходу пирогаза.

Первый этап – подготовительный;

- измельчение твердого бесподстилочного навоза;
- распределение через сито на группы в зависимости от размеров фракций;
- определение влажностей твердого бесподстилочного навоза;
- забор фракций навоза в тару объемом 14 л;
- взвешивание фракций навоза.

Фиксируются: масса загружаемого измельченного твердого бесподстилочного навоза – m , г; влажность навоза – W , %; фракция загружаемого навоза – h , мм; начальные показания газового счетчика, куб.м; высота загруженного навоза в термореактор, мм.

Твердый бесподстилочный навоз крупнорогатого скота измельчается на мелкие фракции (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Общий вид измельченного твердого навоза

Определяется влажность твердого навоза по известной принятой методике. Далее распределяется твердый навоз по группам влажности и размерам фракции. Группировка по размерам фракции осуществляется путем пропускания измельченного навоза через сито (рис. 3.7).





Рис. 3.7. Процесс разделения измельченного навоза на фракции

Продолжительность подготовительного этапа 3-4 часа.

Второй этап – загружается в термореактор измельченный твердый бесподстилочный навоз и проводятся эксперименты для трех различных фракций. Выявляются наиболее оптимальные значения влажности и размера фракции, способствующие эффективной пиролизной утилизации.

После того, как твердый бесподстилочный навоз загружают в термореактор пиролизной установки ГВА-1, осуществляют проверку степени заполнения воды в гидрозатворе, герметичности пиролизной установки, в то же время снимают показания с газового счётчика и производят запуск пиролизной установки.

В процессе работы установки фиксируют следующие показатели: текущее время – t , мин; начало выхода газа по времени, мин; показания газового счетчика, куб. м.

Последним этапом является сбор данных – третий этап. При котором фиксируют: общий выход пиролизного газа, куб. м; продолжительность эксперимента по времени, мин; общее время эксперимента, мин; масса несгоревшего навоза, г.

3.3. Методика определения влажности и зольности

Загружаемый твердый бесподстилочный навоз имеет влажность от 1% до 10%. При этой влажности навоз может утилизироваться путем пиролиза, потому что процесс пиролиза происходит при твердом и сухом сырье.

Анализы проводили по общепринятым методикам с использованием: весов лабораторных равноплечих класса 3 модели ВЛР-1, с допустимой погрешностью ± 10 мг; сушильного прямоугольного шкафа ШС-40; муфельной печи; эксикатора; бюксов и тиглей.

При определении влажности и зольности эффлюента с каждого опыта брали по три пробы.

При определении влажности бюксы, вымытые и высушенные при температуре 105°C , взвешивали (m_3). Затем в бюксы загружали нативный навоз (приготовленный к загрузке навоз, шлам) – навеска $2/3 \dots 3/4$ объема бюксы. Наполненные бюксы взвешивали (m_1) и высушивали в течение $5 \dots 6$ часов при температуре $80 \dots 90^{\circ}\text{C}$. Затем, повышали температуру в сушильном шкафу до 105°C и сушили в течение $15 \dots 18$ часов. Охлажденную в эксикаторе высушенную навеску взвешивали (m_2). Влажность определяли по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

При определении зольности, заранее вымытые и высушенные тигли взвешивали (m_5). Затем, взвешивали в тиглях массу (m_6), высушенную при определении влажности. Ставили тигли в муфельную печь, включали печь, устанавливали температуру в 600°C и в течение $20 \dots 30$ мин постепенно сжигали высушенную массу. Тигли с золой охлаждали в эксикаторе в течение $5 \dots 10$ часов и взвешивали (m_4). Зольность определяли по формуле:

$$Z = \frac{m_4 - m_5}{m_6 - m_5} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

3.4. Планирование и обработка результатов эксперимента

Для составления плана эксперимента важно точно выбрать факторы и определиться с параметром процесса, которые соответствуют поставленным целям исследования и дают наиболее полную характеристику проводимому эксперименту [5; 35; 99].

Переход от натуральных переменных к кодированным осуществляется двумя операциями – центрированием и масштабированием [4; 20; 30; 39; 47; 62; 64; 74; 77; 140; 143]. Центрирование – перенос начала координат системы кодированных факторов в центр эксперимента с координатами в натуральных переменных:

$$X_{0i} = 0,5 (X_{i \text{ MAX}} + X_{i \text{ MIN}}) \quad (3.4)$$

Масштабирование – изменение центрированных числовых значений факторов в раз:

$$Ц = 1 / \Delta X \quad (3.5)$$

где ΔX – полудиапазон изменения i – го фактора, вычисляемый по формуле:

$$\Delta X = 0,5 (X_{\text{MAX}} - X_{\text{MIN}}) \quad (3.6)$$

Кодированные переменные вычисляются по формуле (3.6), а возврат от них к натуральным значениям осуществляем по (3.7).

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i \quad (3.7)$$

$$X_i = x_i \Delta X_i + X_{0i} \quad (3.8)$$

Кодирование параметров и возврат от них к натуральным значениям осуществляется в той же последовательности.

Обработку результатов эксперимента производим по методу наименьших квадратов (МНК) [4; 20; 39; 41; 64; 69; 74; 77]. МНК состоит в том, чтобы минимизировать сумму квадратов отрезков, характеризующих расхождение между экспериментальными точками и полученным уравнением. МНК гарантирует, что остаточная сумма квадратов минимально возможная.

Для движения к точке оптимума составляется линейная модель

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + \dots b_k x_k \quad (3.9)$$

Для любого числа факторов коэффициенты будут вычисляться по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i x_{ji}}{N} \quad (3.10)$$

где $j = 0, 1, 2, \dots, k$ – номер фактора. Ноль записана для вычисления b_0 .

Так как каждый фактор (кроме X_0) варьируется на двух уровнях $+1$ и -1 , то вычисления сводятся к приписыванию столбцу Y знаков соответствующего фактору столбца и алгебраическому сложению полученных значений. Деление результата на число опытов в матрице планирования дает искомый коэффициент.

При проверке гипотезы о пригодности модели или о значимости коэффициентов, используем один из статистических методов – регрессионный анализ.

Находим дисперсию в каждом опыте. Дисперсия обозначается $S_{\{Y\}}^2$ и выражается формулой:

$$S_{\{Y\}}^2 = \frac{\sum_1^n (Y_q - \bar{Y})^2}{n - 1} \quad (3.11)$$

где $(n - 1)$ – число степеней свободы, равное количеству опытов минус единица;

Y_q – результат отдельного опыта;

\bar{Y} – среднее арифметическое всех результатов.

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n} = \frac{\sum_1^n Y_q}{n} \quad (3.12)$$

Корень квадратный из дисперсии, взятый с положительным знаком, называется средним квадратическим отклонением, стандартом или квадратичной ошибкой:

$$S_{\{Y\}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y_q - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad (3.13)$$

Стандарт имеет размерность той величины, для которой он вычислен.

После вычисления коэффициентов, проверяется адекватность полученной модели.

Для проверки гипотезы об адекватности используем F-критерий, называемый критерием Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{Ад}}^2}{S_{\{Y\}}^2} \quad (3.14)$$

где $S_{\text{Ад}}^2$ – дисперсия адекватности или остаточная дисперсия.

$$S_{\text{Ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta Y_i^2}{f} \quad (3.15)$$

где f – число степеней свободы.

$$f = N - (k + 1) \quad (3.16)$$

Удобство использования критерия Фишера состоит в том, что проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением. В технических задачах, как правило, используется уровень значимости 0,05. Если рассчитанное значение F-критерия превышает табличное, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.

Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо. Её осуществляем проверкой по t-критерию Стьюдента, а также построением доверительного интервала.

Прежде всего, находится дисперсия коэффициента регрессии $S_{\{b_j\}}^2$. Она определяется по формуле:

$$S_{\{b_j\}}^2 = \frac{S_{\{Y\}}^2}{N} \quad (3.17)$$

Доверительный интервал (Δb_j):

$$(\Delta b_j) = \pm t S_{\{b_j\}} \quad (3.18)$$

Здесь t – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялась $S_{\{Y\}}^2$, и выбранном

уровне значимости (обычно 0,05); $S_{\{b_j\}}$ - квадратичная ошибка коэффициента регрессии

$$S_{\{b_j\}} = +\sqrt{S_{\{b_j\}}^2} \quad (3.19)$$

Формула для доверительного интервала запишется в следующей эквивалентной форме:

$$\Delta b_j = \pm \frac{t \cdot S_{\{Y\}}}{\sqrt{N}} \quad (3.20)$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Доверительный интервал задается верхней и нижней границами $b_j + \Delta b_j$ и $b_j - \Delta b_j$.

Значимость коэффициентов по t – критерию Стьюдента вычисляем по формуле:

$$t = \frac{|b_j|}{S_{\{b_j\}}} \quad (3.21)$$

Вычисленное значение t – критерия сравнивается с табличным при заданном α и соответствующем числе степеней свободы. Если вычисленное значение больше табличного, то коэффициент считается значимым.

Критерий Стьюдента также можно использовать для отброса ошибочных опытов по формуле:

$$t \leq \frac{Y - \bar{Y}}{s} \quad (3.22)$$

Опыт считается бракованным, если экспериментальное значение критерия t по модулю больше табличного значения [55; 56].

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты экспериментальных исследований по определению выходных параметров установки

Для обоснования и уточнения эксплуатационных и выходных параметров установки ГВА-1 проведены натурные опыты на сосновых опилках. При исследованиях выявлены следующие недостатки в конструкции установки и неисправности:

1. Недостаточная герметичность термореактора.
2. Из гидрозатвора вода обратно попадает в термореактор.
3. Открытые ТЭНы из-за налипания оплавленных отходов часто выходят из строя.

При первом запуске из-за недостаточной герметичности термореактора, газ не был получен. Из-за больших потерь мощности, оптимального давления в термореакторе не установилось, также были изношены сами болтовые соединения.

Эксперименты проводились при следующих параметрах окружающей среды и утилизируемого сырья, результаты натурных опытов по пиролизу сосновых опилок приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Выходные параметры процесса пиролиза сосновых опилок

Исходные параметры	Выходные параметры
Температура окружающей среды $T_{\text{окр.с}} = 20-21^{\circ}\text{C}$	Потребление электроэнергии $W = 3-3,3 \text{ кВт}$
Масса сырья $m_{\text{сырья}} = 2,5 \text{ кг}$	Объем полученного газа $V_{\text{п.г}} = 0,103-0,105 \text{ м}^3$
Начальная температура сырья $T_{\text{нач}} = 10-11^{\circ}\text{C}$	Масса отработавшего сырья $m_{\text{отр.с}} = 0,500-0,55 \text{ кг}$
Начальная влажность сырья $H_{\text{сырья}} = 55-58\%$	Масса не сгоревшего сырья $m_{\text{ост}} = 1,95-2 \text{ кг}$
Начальная фракция сырья $d_{\text{сырья}} = 7-8 \text{ мм}$	Время эксперимента $t_{\text{эк}} = 112 \text{ мин}$
Описание сырья: растительная биомасса твердое состояние, щепа древесная (сосна)	Потенциальный выход газа $m_{\text{пот}} = 2,3-2,5 \text{ м}^3$
	«Потерянный» объем газа $V_{\text{потер}} = 1,15-1,25 \text{ м}^3$

Заявленные параметры установки ГВА – 1 были следующие: 10 кг опилок были утилизированы за 8 ч с получением 40 куб.м пирогаза. Соответственно из 1 кг опилок они получали 4 куб.м пирогаза.

В наших опытах из 1 кг опилок получено 0,2 куб.м пирогаза. И в том, и в другом вариантах влажность опилок составляла 15–20 %, дисперсность – 1–5 мм и плотность 150–200 кг/куб.м. Таким образом, заявленные Глушковым В.А. параметры не подтвердились.

В ходе исследований явилось то, что при остывании термореактора вода, накопленная в гидрозатворе, в связи с перепадом температуры и давления, перекачивается обратно в емкость термореактора. В целях устранения данной проблемы установили обратный клапан (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Общий вид установки ГВА-1 с обратным клапаном

Также в установку ГВА-1 нами были добавлены кожухи на электронагреватели патронного типа (ТЭН) в количестве трех штук (рис. 4.2). Кожухи установлены для исключения налипания продуктов сгорания на поверхности ТЭНов. Вследствие чего срок службы нагревателей значительно увеличен. Изоляция ТЭНов: на три ТЭНа были одеты трубы длиной 300 мм с диаметром 22 мм. Последующие эксперименты проводили на установке с защитными кожухами на ТЭНах.

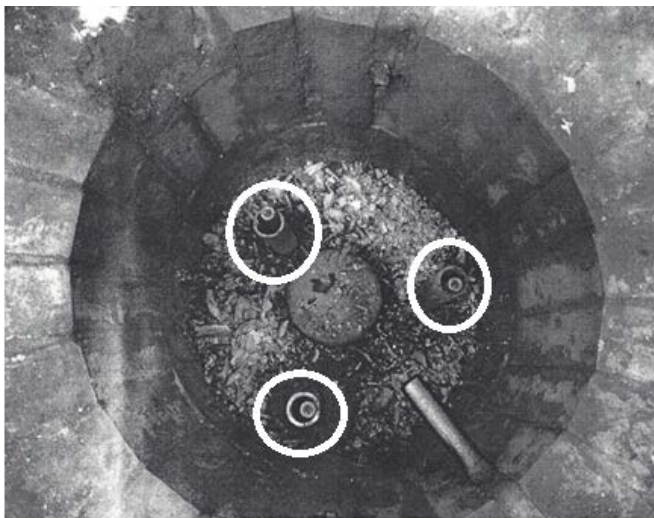


Рис. 4.2. Общий вид ТЭНов с кожухами

Допустимая максимальная температура нагрева ТЭНа достигает до 300°C . Материал трубы подобран исходя из температуры плавления металла.

Температура плавления стали $1300\text{--}1400^{\circ}\text{C}$, что в пределах допустимой максимальной температуры ТЭНов, поэтому можем использовать сталь любой марки. Для разработки защитных кожухов, мы использовали стальную трубу диаметром 25 мм и высотой 1,35 м.

На этапе проведенные циклы работ по ознакомлению и устранению недостатков пиролизной установки ГВА-1 Глушкова В.А. и были устранены следующие позиции [130].

1. Слабая герметичность термореактора.
2. Водяной конденсат обратно закачивается в термореактор.
3. Термоэлектрические нагреватели (ТЭНы) открытые, поэтому в процессе утилизации отходов происходит налипание продуктов сгорания на поверхности ТЭНов, что выводит их из строя.

4.2. Результаты эксперимента по выходу объема пирогаза при разных влажностях и фракций

Количество крупнорогатого скота, лошадей, свиней, оленей на конец 2020 года по Республике Саха (Якутия) составляет 540 тыс. гол., которые ежедневно образуют органический отход в виде навоза. Вместе с тем, в настоящее время, в аграрном секторе Якутии отсутствуют технологии по переработке и утилизации производимого навоза. Известно, что 1 т свежего навоза поглощает за сутки до 5 т кислорода, а при использовании в виде удобрения, вместе с навозом в почву вносится до 14 млн семян сорных растений и выбрасывается значительный объем углекислого газа и метана в атмосферу. Негативное воздействие навоза на атмосферу сохраняется до его естественного перепревания, которое в условиях Якутии происходит в течении 36 - 48 месяцев. Учитывая вышеизложенные факты, мы предлагаем способ снижения воздействия навоза на окружающую среду – внедрение пиролизной технологии утилизации твердого навоза

Согласно п. 3.2 на первом этапе эксперимента проводились работы по измельчению твердого навоза на три фракции:

- от 1 мм до 30 мм;
- от 31 мм до 60 мм;
- от 61 мм до 90 мм.

Для пиролиза подобраны фракции со следующими влажностями:

- 1 группа – $W = 3-4\%$;
- 2 группа – $W = 6-7\%$;
- 3 группа – $W = 9-10\%$.

Опытов проведено всего 9 – для каждой группы влажностей забраны все три фракции измельченного навоза.

Определяли высоту заполнения термореактора при загрузке разной фракции измельченного навоза.

Как отмечалось выше, дозы загружаемой массы измельченного навоза забирались в тару объемом 14 л. Таким образом, на рисунке 4.3 показана диаграмма по уровню заполнения термореактора установки ГВА-1 различными массами измельченного твердого навоза.

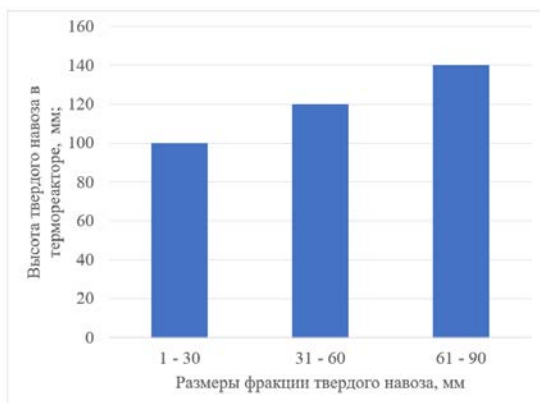


Рис. 4.3. Диаграмма по значениям заполнения реактора пиролизной установки в зависимости от размеров фракций измельченного навоза

Из диаграммы (рис. 4.3) видно, что уровень заполнения реактора пиролизной установки различается в зависимости от размеров фракций измельченного навоза.

Массы измельченного навоза взвешивались на лабораторных весах ВК-300 и результаты приведены на графике рисунка 4.4.

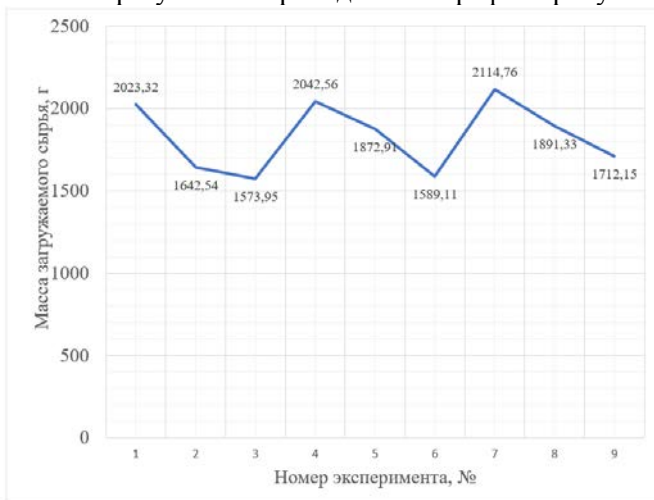


Рис. 4.4. График, описывающий массы измельченного навоза, забранных в тару объемом 14 л, г (при экспериментах)

Рабочая температура 300°C, продолжительность времени – 80 мин.

Результаты опытов отражены на рисунке 4.5 для трех групп влажностей и всех размеров фракций измельченного твердого бесподстильного навоза.

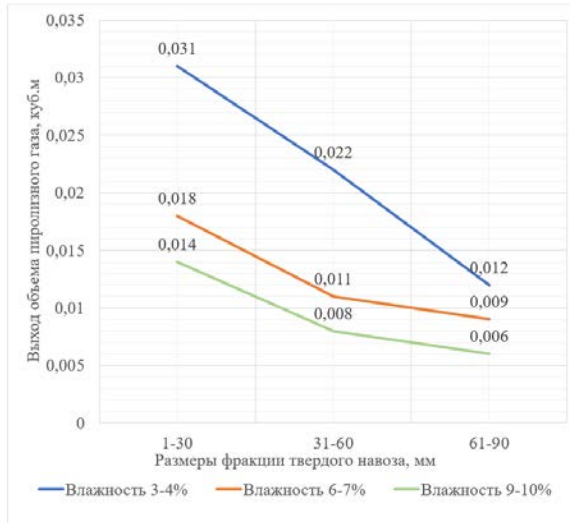


Рис. 4.5. Выход пиролизного газа в зависимости от параметров влажности и размеров фракций твердого бесподстильного навоза

Из графика (рис. 4.5) видно, что наиболее высокий показатель по выходу пиролизного газа достигнут при влажности навоза 3–4%; размере фракции от 1 мм до 30 мм и составляет 0,031 куб. м.

При влажности 6–7% выход пирогаза составляет от 0,009 до 0,018 куб. м.

Минимальные показатели по объему выхода пиролизного газа – 0,006 куб. м. – были отмечены при влажности 9–10%; размере фракции от 61 мм до 90 мм.

Таким образом, максимальный объем пирогаза с 1 кг твердого навоза КРС, равного 0,105 куб.м можно получить при следующих параметрах: влажности 3–4%; размеров фракции 1–30 мм. Следует отметить, что 0,105 куб. м пиролизного газа соответствует 0,058 кВт энергии.

Следовательно, для производства 1 кВт энергии необходим 1,81 куб. м пиролизного газа, получаемого из 17,24 кг измельченного твердого бесподстилочного навоза с влажностью 3-4% и размерами фракции 1–30 мм.

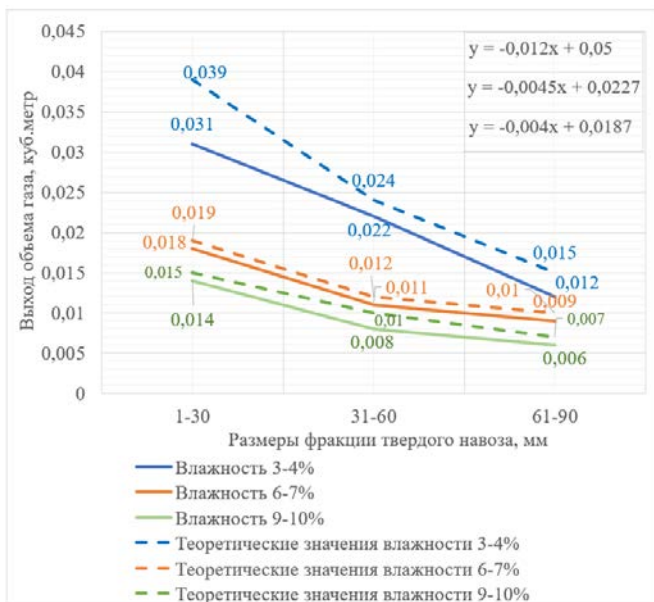


Рис. 4.6. Теоретические и экспериментальные значения выхода пиролизного газа

Как видно из графика на рисунке 4.6 отклонения экспериментальных данных от теоретических значений не превышают 5%.

Рассчитаны ожидаемые объемы количеств энергии, производимых с тех или иных объемов пиролизного газа (рис. 4.7).

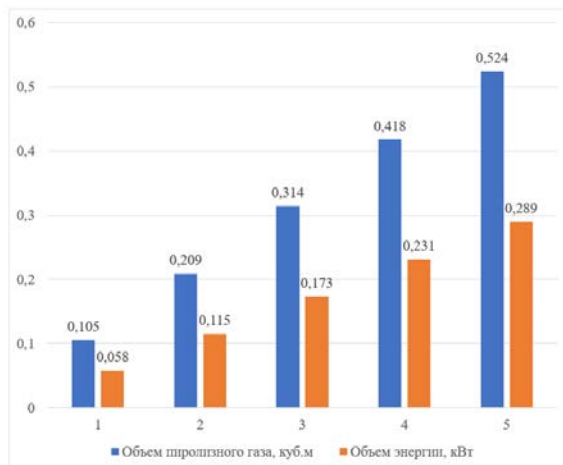


Рис. 4.7. График эквивалентных количеств энергий по соотношению к объемам пиролизного газа

После завершения экспериментов и охлаждения пиролизной установки, забрана оставшаяся масса из термореактора и уточнен вес сгоревшего твердого бесподстилочного навоза (рис. 4.8).

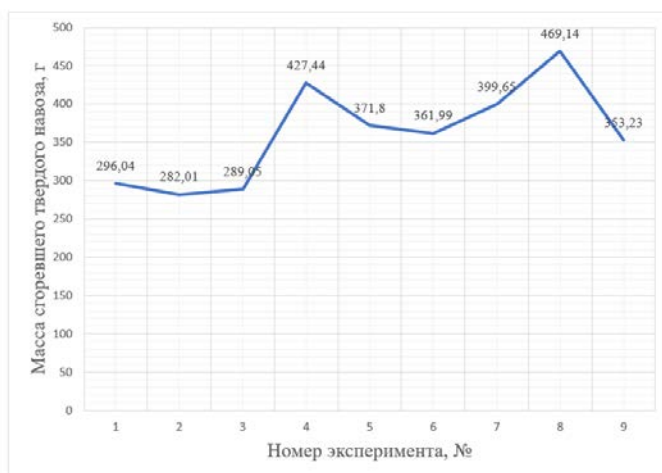


Рис. 4.8. График, описывающий массу сгоревшего твердого бесподстилочного навоза в термореакторе установки ГВА-1

В опыте №8 сгорела наибольшая масса твердого навоза, что составило 469,14 г при начальной массе твердого навоза в 1891,33 г; влажности 9–10% и размерах измельченной фракции 31–60 мм. Степень утилизации составляет 24,8 % от начальной массы навоза. Таким образом, для полной утилизации массы твердого измельченного навоза такой фракции и влажности время работы установки должно составлять минимум 240 мин.

Минимальные параметры получены в опыте №2: сгоревшая масса составила 282,01 г при влажности 3–4%, размерах фракции 31–60 мм. Степень утилизации равна 17,1 %. Соответственно, при этих параметрах измельченного навоза потребуется более 320 мин.

Неплохие результаты отмечены в опыте №4: сгоревшая масса составила 427,4 г при влажности 6–7%, размерах фракции от 1–30 мм. Степень утилизации – 20,9 %. Соответственно, при этих параметрах измельченного навоза потребуется более 250 мин.

Таким образом, эффективная пиролизная утилизация измельченного твердого бесподстилочного навоза с получением удобрения в виде золы достигается при следующих параметрах:

- влажностях от 6–10 %;
- размеров фракции от 31–60 мм.

4.3. Результаты моделирования процесса пиролизной утилизации твердого бесподстилочного навоза

В результате проведения опытов на пиролизной установке ГВА-1 получены следующие показатели по выходу объема пиролизного газа в зависимости от влажности навоза и фракции навоза. По результатам экспериментов определены значения параметров процесса пиролиза, которые отражены в таблице 4.2.

Согласно цели эксперимента, заданы значения основных факторов по обеспечению выхода объема пиролизного газа, получаемого из вердого бесподстилочного навоза крупнорогатого скота:

- влажность навоза – от 3,41% до 9,47%;
- фракция навоза – от 1 мм до 90 мм.

Таблица 4.2

Экспериментальные значения параметров
процесса пиролиза

Номер опыта	Влажность навоза, %	Фракция навоза, мм	Объем пиролиз- ного газа, м ³
1	3-4	1-30	0,031
2	3-4	31-60	0,018
3	3-4	61-90	0,014
4	6-7	1-30	0,022
5	6-7	31-60	0,011
6	6-7	61-90	0,008
7	9-10	1-30	0,012
8	9-10	31-60	0,009
9	9-10	61-90	0,006

Из таблицы 4.2 видно, что наилучший результат по объему производимого пирогаза получен в опыте №1: при влажности 3–4%, массе – 2023,32 г, размерах фракции 1–30 мм. Выход пирогаза составил 0,031 куб. м., сгорело при этом 296,04 г навоза.

В опыте №8 сгорела наибольшая масса твердого навоза, что составило 469,14 г при начальной массе твердого навоза в 1891,33 г; влажности 9-10% и размерах измельченной фракции 31–60 мм. Степень утилизации составляет 24,8% от начальной массы навоза. Таким образом, для полной утилизации массы твердого измельченного навоза такой фракции и влажности время работы установки должно составлять минимум 240 мин.

Минимальные параметры получены в опыте №2: сгоревшая масса составила 282, 01 г при влажности 3–4%, размерах фракции 31–60 мм. Степень утилизации равна 17,1%. Соответственно, при этих параметрах измельченного навоза потребуется более 320 мин.

Неплохие результаты отмечены в опыте №4: сгоревшая масса составила 427,4 г при влажности 6–7%, размерах фракции 1–30 мм. Степень утилизации – 20,9%. Соответственно, при этих параметрах измельченного навоза потребуется более 250 мин.

Таким образом, эффективная пиролизная утилизация измельченного твердого бесподстилочного навоза с получением удобрения в виде золы достигается при следующих параметрах:

- влажностях от 6–10 %;
- размеров фракции 31–60 мм.

Путем сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований, для разработки имитационной модели составлена матрица планирования [7; 9; 18; 19; 22; 25; 34; 37; 40; 43; 44; 57; 62; 64; 68; 73; 78; 80; 97; 99; 104].

По результатам опытов было решено варьировать следующими управляющими факторами:

- x_1 – влажностью твердого навоза, W (%);
- x_2 – размерами фракции навоза, h (мм).

Таким образом, матрица планирования экспериментов будет иметь следующий вид (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Матрица планирования экспериментов

Номер опыта	x_1		x_2	
	код	W , %	код	h , мм
1	-1	3,41	-1	1
2	1	9,47	-1	30
3	-1	3,41	-1	31
4	1	9,47	1	60
5	-1	3,41	1	61
6	1	9,47	1	90

Факторы в матрице представлены как в натуральных физических величинах, так и в кодированных. С алгебраической точки зрения введение кодированных переменных отражает стремление к ортогонализации систем функции. С вычислительной – к упрощению расчетов коэффициентов моделей, с общеметодической – к созданию стандартизированного набора оптимальных планов, независимых от субстанции и структуры объекта исследования [4; 21; 25; 37; 74; 81; 109; 123; 127].

Обработка результатов опытов осуществлена одним из методов статистического анализа – методом наименьших квадратов (МНК).

Каноническое уравнение процесса пиролиза получено в следующем виде:

$$Y_1 = 0,131 + 6,5 x_1 + 45,5 x_2 \quad (4.1)$$

Для проверки гипотезы об адекватности модели реальному физическому процессу использовали критерий Фишера (F-критерий), расчетное значение которого составляет 2111,74. F-статистика имеет распределение с одной и тремя степенями свободы. Табличное значение F-статистики при 5% уровне значимости равно 10,1.

Следовательно, при данном уровне значимости гипотеза о том, что уравнение регрессии незначимо, должна быть отвергнута.

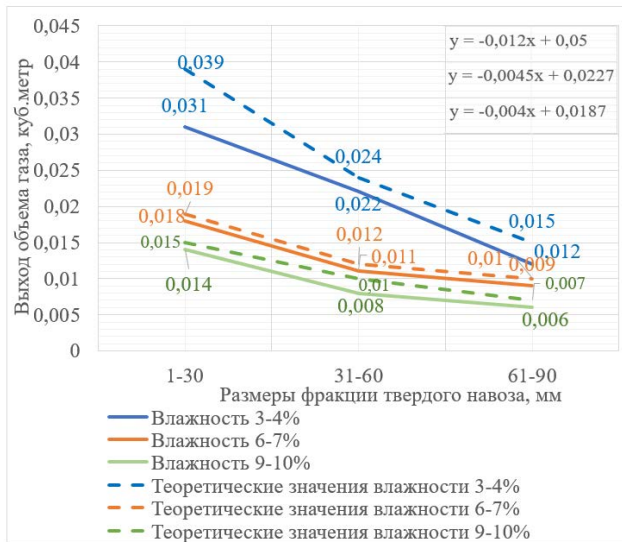


Рис. 4.9. Теоретические и экспериментальные значения выхода пиролизного газа

Как видно из графика на рисунке 4.9 отклонения экспериментальных данных от теоретических значений не превышают 5%.

Проверку значимости отдельных коэффициентов (параметров) уравнения регрессии проводили построением доверительного интервала и по критерию Стьюдента (t-критерию), который для x_1 составляет 6,5, а для x_2 – 45,5. Табличное значение t-критерия для 5-процентного уровня значимости при 10 степенях свободы равно 2,228. Следовательно, для параметров x_1 и x_2 принимается нулевая гипотеза незначимости.

Из проделанного статистического анализа модели (4.1) следует, что на количество производимой энергии с пиролизного газа существенное влияние оказывает факторы влажности и фракции твердого бесподстильного навоза. Объем пиролизного зависит от факторов влажности и фракции твердого бесподстильного навоза. Поэтому коэффициент x_2 получился минимальным.

Наилучшие показатели получены в опытах 1 и 2, из которых выбираем результат по первому опыту. Тогда, при значениях коэффициентов $b_0 = 0,131$; $b_1 = 6,5$ и $b_2 = 45,5$ имитационная модель количества пирогаза от основных факторов процесса будет иметь следующий вид:

$$Q_m = 0,131 + 6,5w + 45,5h \quad (4.3)$$

Данные экспериментальных исследований были обработаны с помощью программы Statistica и построена поверхность отклика (рис. 4.10).

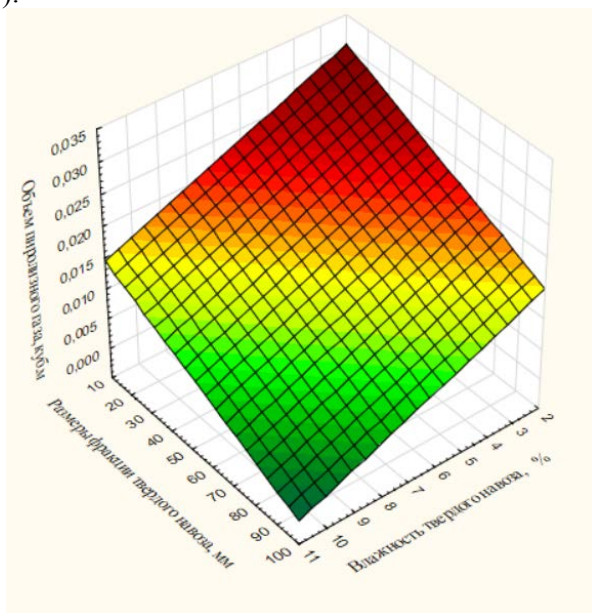


Рис. 4.10. Количество пиролизного газа, получаемое в зависимости от факторов влажности и размеров фракции твердого навоза

Выводы по главе 4

1. Проведено 9 опытов на три группы измельченного твердого бесподстильного навоза с влажностями:

1 группа – $W = 3 - 4 \%$; 2 группа – $W = 6 - 7 \%$; 3 группа – $W = 9 - 10 \%$.

Все группы проверены на следующие размеры фракции: от 1 мм–30 мм; от 31 мм – 60 мм; от 61 мм – 90 мм.

2. Максимальный объем пирогаза в 0,105 куб.м 1 кг твердого навоза КРС можно получить при следующих параметрах: влажности 3-4%; размеров фракции 1–30 мм.

Следует отметить, что 0,105 куб.м пиролизного газа соответствует 0,058 кВт энергии.

3. Наибольшая масса твердого навоза, что составило 469,14 г при начальной массе твердого навоза в 1891,33 г; влажности 9–10% и размерах измельченной фракции 31–60 мм. Степень утилизации составляет 24,8 % от начальной массы навоза. Таким образом, для полной утилизации массы твердого измельченного навоза такой фракции и влажности время работы установки должно составлять минимум 240 мин. Таким образом, эффективная пиролизная утилизация измельченного твердого бесподстильного навоза с получением удобрения в виде золы достигается при следующих параметрах: влажностях от 6–10 %; размеров фракции от 31–60 мм.

4. Основные факторы по обеспечению выхода объема пиролизного газа, получаемого из твердого бесподстильного навоза крупнорогатого скота:

- влажность навоза – от 3,41% до 9,47%;
- фракция навоза – от 1 мм до 90 мм.

Соответственно, было решено варьировать следующими управляющими факторами:

- x_1 – влажностью твердого навоза, W (%);
- x_2 – размерами фракции навоза, h (мм).

5. Имитационная модель количества пирогаза будет иметь следующий вид:

$$Q_m = 0,131 + 6,5w + 45,5h$$

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА МЕТОДОМ ПИРОЛИЗНОЙ УТИЛИЗАЦИИ

Технология переработки твердого бесподстилочного навоза с применением пиролизной установки позволяет комплексно решать ряд проблем, связанных с его утилизацией. При определении экономической эффективности внедрения пиролизной технологии важно учитывать такие положительные эффекты, как энергетические, экологические и социальные. Нами проведен расчет годового экономического эффекта от внедрения пиролизной технологии при использовании установки ГВА-1 для поголовья коров, приведенных в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Количество поголовья КРС по категориям хозяйств
от 1 января 2021 года

Крупный рогатый скот	Голов (тыс.)
Сельскохозяйственные организации	13,4
Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели	28,7
Личные подворья	57,9

Годовой экономический эффект от внедрения пиролизной установки определяется по следующей формуле [88, 120]:

$$\mathcal{E}_{ГЭ} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}_{ГЭ}$ – годовой экономический эффект, тыс. руб.;

\mathcal{E}_1 – годовой экологический эффект, тыс. руб.;

\mathcal{E}_2 – годовой экономический эффект от утилизации навоза, тыс. руб.;

Экологический эффект обусловлен: во-первых, снижением загрязнения воздушной среды от вредных выбросов при сгорании топлива; во-вторых, за счет исключения ущерба от загрязнения водоемов солями и органическими веществами.

На основании этого годовой экологический эффект:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_{Г.1} + \mathcal{E}_{Г.2}, \quad (5.2)$$

где $\mathcal{E}_{Г.1}$ – годовой экономический эффект от снижения загрязнения воздушной среды от вредных выбросов при сгорании топлива, тыс. руб.;

$\mathcal{E}_{Г.2}$ – годовой экономический эффект за счет исключения ущерба от загрязнения водоемов солями и органическими веществами, тыс. руб.

Годовой экономический эффект от снижения суммарного ущерба от сокращения вредных выбросов составит:

$$\mathcal{E}_{Г.1} = \sum_{j=1}^n Y_j \cdot S_j, \quad (5.3)$$

где Y_j – ущерб от j – го компонента вредных выбросов, тыс. руб./т; S_j – снижение вредных выбросов за счет сокращения потребления топлива на базовой энергетической установке при использовании пиролиза, т/год.

Снижение вредных выбросов за счет потребления базового энергетического сырья при использовании пирогаза можно определить по формуле:

$$S_j = \frac{B_T}{10^6} \cdot s_j \cdot (V_{ПГ} - V_{БГ}) \quad (5.4)$$

где s_j – концентрация j – го компонента вредных выбросов, г/м³; $V_{ПГ}$ – объем продуктов горения при сжигании одной тонны замещающего условного топлива м³/т у. т.; $V_{БГ}$ – объем продуктов горения при сжигании одной тонны пирогаза, м³/т у. т.;

Концентрация вредных выбросов при горении пирогаза в настоящее время не установлена, однако, представляется возможным в первом приближении принять их соответствующими выбросам природного газа. Для пересчета выбросов, приходящихся на одну тонну сжигаемого топлива в условном исчислении в объемные единицы, можно применять следующие формулы [60; 67]:

– для сжигания альтернативного топлива

$$V_{ПГ} = \frac{Q_{УТ}}{Q_H^P} [\alpha(1,088Q_H^P + 66W^P - 10) + (0,053Q_H^P + 12,4W^P + 50)] \quad (5.5)$$

где Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг;
 $Q_{УТ}$ – теплота сгорания условного топлива, 7000 ккал/кг;
 α – коэффициент избытка воздуха, 1,3...1,35;
 W^P – процентное содержание влаги в топливе, %.

Годовой экономический эффект от снижения загрязнения водоемов солями и органическими соединениями определяют по формуле [65]:

$$\mathcal{E}_{\Gamma.2} = 365 \cdot n \cdot q_u \cdot \beta \cdot (\gamma_1 C_1 + \gamma_2 C_2), \quad (5.6)$$

где n – количество животных;

q_u – суточный выход навоза от одного животного, т;

γ_1 ; γ_2 – содержание в тонне навоза загрязняющих веществ;

β – коэффициент выноса загрязняющих веществ поверхностным стоком, 0,005; при неблагоприятных условиях (сильное весеннее снеготаяние, проливные дожди), 0,2;

C_1 , C_2 – удельный ущерб в рублях на килограмм загрязнителя: соответственно солей и БПК (0,016 руб./кг и 2,00 руб./кг).

По результатам экспериментов определены оптимальные значения фракций, которые отражены в таблице 5.2.

Из таблицы 5.2 видно, что наилучший результат по объему производимого пирогаза получен в опыте №1: при влажности 3–4%, массе – 2023,32 г, размерах фракции 1–30 мм. Выход пирогаза составил 0,031 куб. м., сгорело при этом 296,04 г навоза.

Таблица 5.2

Результаты экспериментальных опытов

Эксперимент	Влажность твердого навоза	Масса твердого навоза, г	Размеры фракции навоза	Выход пирогаза началось с	Выход объема газа	Остаток сырья	Итого сгорело
1	3–4	2023,32	1–30	4 мин 22 сек	0,031	1727,28	296,04
2	3–4	1642,54	31–60	5 мин 51 сек	0,018	1360,53	282,01
3	3–4	1573,95	61–90	8 мин 39 сек	0,014	1284,9	289,05
4	6–7	2042,56	1–30	5 мин 12 сек	0,022	1615,12	427,44
5	6–7	1872,91	31–60	6 мин 31 сек	0,011	1501,11	371,8
6	6–7	1589,11	61–90	7 мин 52 сек	0,008	1227,12	361,99
7	9–10	2114,76	1–30	4 мин 48 сек	0,012	1715,11	399,65
8	9–10	1891,33	31–60	7 мин 11 сек	0,009	1422,19	469,14
9	9–10	1712,15	61–90	9 мин 15 сек	0,006	1358,92	353,23

При продолжительности работы одной пиролизной установки ГВА – 1, равной 80 мин (при рабочей температуре 300°С), ее время остывания составляет 180 мин. Исходя из этого, пиролизная установка в день может запускаться 2 раза.

За день утилизируемый объем твердого бесподстилочного навоза одной установкой ГВА-1 составит 20, 23 кг. Из этой массы навоза в сутки можно получить 2,1 куб. м пирогаза, эквивалентного 1,16 кВт энергии (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Суточная производительность установки ГВА-1

№	Время работы пиролизной установки ГВА-1, мин	Объем твердого бесподстилочного навоза за 2 смены работы, г	Объем пиролизного газа, куб. м	Объем энергии, кВт
1	80	20 230	2,1	1,16

На основании полученных показателей рассчитаем экономический эффект от применения пиролизной технологии твердого бесподстилочного навоза КРС.

Таким образом из 1 кг можно получить 0,105 куб. м пирогаза, что соответствует 0,058 кВт энергии. От полученных параметров рассчитаны ожидаемые эффекты от производимого твердого бесподстилочного навоза КРС, содержащихся в хозяйствах Якутии (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Ожидаемые эффекты по видам хозяйств

№	Голов (тыс.)	Выход твердого бесподстилочного навоза, кг в день	Выход пиролизного газа, куб. м	Объем энергии, кВт
<i>Сельскохозяйственные организации</i>				
1	13,4	268 000	28 140	15 544
<i>Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели</i>				
2	28,7	574 000	60 270	33 292
продолжение таблицы 5.4				
<i>Личные подворья</i>				
3	57,9	1 158 000	121 590	67 164
Итого:	100	2 000 000	210 000	116 000

В скотопомещениях КРС содержатся восемь месяцев в году или 240 дней – продолжительность стойлового периода в условиях Якутии. Соответственно, ожидаемый годовой объем пирогаза составит:

$$116000 \times 240 = 27\,840\,000 \text{ кВт или } 27,8 \text{ МВт энергии}$$

Исходя из данной таблицы видно, что внедрение пиролизной технологии утилизации не только уменьшит агрессивное воздействие твердого бесподстильного навоза на экологию мерзлотных почв, но и пирогаза, эквивалентного 27,8 МВт энергии в год.

Кроме этого, после пиролиза получается органическое удобрение в виде золы. По результатам опытов определено, что из 1 кг твердого бесподстильного навоза получается около 10% золы. Основываясь на этот показатель, рассчитаем ожидаемый годовой выход золы:

$$2000 \times 240 = 480\,000 \text{ кг}$$

Таблица 5.5

Оценка суммарного ежегодного экономического эффекта

№	Статья	Кол-во	Тариф	Сумма, тыс. руб.	Примечание
	Экологический эффект				
1	Снижение загрязнения воздушной среды от вредных выбросов при сгорании топлива			18 310	Расчет по формуле
2	Исключение ущерба от загрязнения водоемов солями и органическими веществами			294 336	Расчет по формуле
	Сумма экологического эффекта			312 646	
	Коммерческий эффект				
3	Доходы от производства и утилизации пиролизного газа	50400	4490,53	226 323	По установленному тарифу
4	Доходы от производства и утилизации золы в качестве удобрения	48000	10000,0	480 000	По рыночной цене
	Сумма коммерческого эффекта			706 323	
	ВСЕГО			1 018 969	

Годовой экономический эффект от снижения суммарного ущерба от сокращения вредных выбросов составит:

- низшая теплота сгорания угля, ккал/кг – 5500 тыс. руб.;
- объем продуктов горения при сжигании 1 т у.т. угля, м³/т у. т - 12810 тыс. руб.;

Годовой экономический эффект от снижения загрязнения водоемов солями и органическими соединениями составит:

$$\text{Э}_{Г.2} = 365 \cdot 100 \cdot 20 \cdot 0,2 \cdot (0,016 + 2) = 294\,336\,000$$

Суммарный экономический эффект от применения пиролизной технологии утилизации навоза рассчитывается как сумма экологического и потенциального коммерческого эффекта – 1 018 969 тыс.руб.

Коммерческий эффект складывается из доходов, образующихся от производства основного и побочного продукта в виде пиролизного газа и золы. Суммарный годовой экологический эффект составил 312,6 млн руб.

Суммарный коммерческий эффект от реализации газа и золы составил 706,3 млн рублей. Совокупный экономический эффект составил 1018,9 млн рублей ежегодно. Расчет произведен укрупненным методом исходя из численности поголовья КРС по всем видам хозяйств Республики Саха (Якутия). Результаты оценки показали на наличие существенного экономического эффекта.

Рекомендации производству

На основании обоснованной эффективности предлагается внедрить в фермерские хозяйства пиролизную технологию утилизации твердого бесподстилочного навоза, содержащую следующее оборудование: модернизированную пиролизную установку ГВА-1; систему очистки и сушки пирогаза; измельчитель; сито; газогенератор (рис. 5.1).

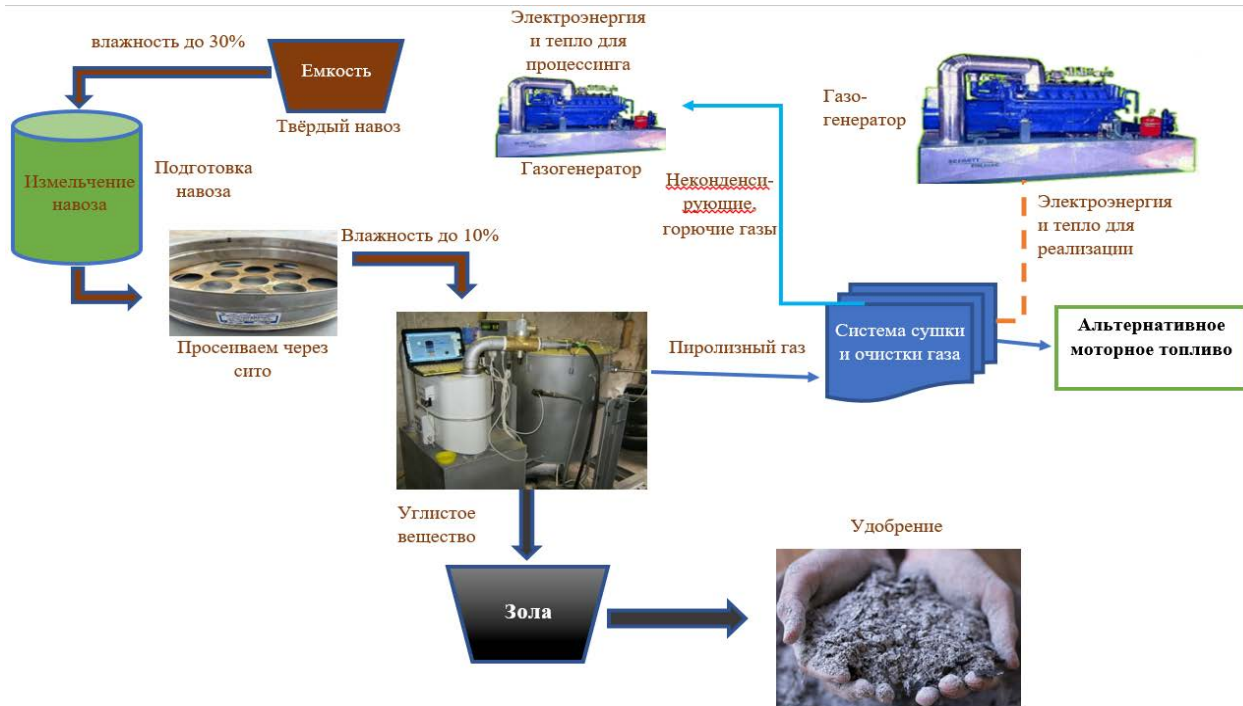


Рис. 5.1. Технологическая схема предлагаемой пиролизной технологии утилизации твердого бесподстилочного навоза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ традиционных способов и устройств по получению энергоносителей из органической массы показал, что применяемые в настоящее время способы и методы по переработке, обеззараживанию и утилизации бесподстилочного навоза применимы только для свежего или жидкого его состояния, отсутствуют технологии для утилизации твердого бесподстилочного навоза. Наиболее оптимальным для утилизации твердого бесподстилочного навоза, на наш взгляд, является пиролизный способ, позволяющий получать топливный газ и доступное удобрение в виде золы.

2. Проведенный анализ показал, что существующие в настоящее время математические модели, описывающие процесс пиролиза, носят аналитический характер и их практическое применение затруднительно; они применимы для описания химических реакций, протекающих внутри пиролизной установки и разработаны для процесса пиролиза углеводородного сырья. Получена зависимость, описывающая процесс пиролиза для установки Глушкова, позволяющая рассчитывать требуемый расход энергии на перерабатываемую массу твердого бесподстилочного навоза с учетом его объема и влажности.

3. Обоснованы схема и элемент конструкции установки для пиролиза органического сырья, обеспечивающие повышение их эффективности и снижение удельных затрат на выработку единицы объема пиролизного газа. Наиболее высокий показатель по выходу пиролизного газа достигнут при влажности навоза 3–4%; размере фракции от 1 мм до 30 мм и составляет 0,031 куб. м. Максимальный объем пирогаза в 0,105 куб. м 1 кг твердого навоза КРС можно получить при следующих параметрах: влажности 3–4%; размеров фракции 1–30 мм. Следует отметить, что 0,105 куб. м пиролизного газа соответствует 0,058 кВт энергии. Эффективная пиролизная утилизация измельченного твердого бесподстилочного навоза с получением удобрения в виде золы достигается при следующих параметрах: влажностях от 6–10 %; размеров фракции от 31–60 мм, со степенью утилизации 24,8 % от начальной массы навоза.

4. Эколого-экономическое обоснование, проведенных исследований показал, что суммарный экономический эффект от применения пиролизной технологии утилизации навоза рассчитывается как сумма экологического и потенциального коммерческого эффекта – 1 018 969 тыс. руб. Коммерческий эффект складывается из доходов, образующихся от производства основного и побочного продукта в виде пиролизного газа и золы. Суммарный годовой экологический эффект составил 312,6 млн руб. Суммарный коммерческий эффект от реализации газа и золы составил 706,3 млн. руб. Совокупный экономический эффект составил 1018,9 млн. руб. ежегодно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравин, Э. А. Агрохимия. Учебники и учебные пособия для студентов средних учебных заведений / Э. А. Муравин. – Москва: КолосС, 2003. – 384 с.
2. Агроклиматические ресурсы Якутской АССР: справочник / Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР; Якут. упр. гидрометеорол. службы. Якут. гидрометеорол. обсерватория. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. – 112 с.
3. Агропромышленный комплекс Якутской АССР: (соц.-эконом. проблемы) / Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Якут. фил., Ин-т экономики комплекс. освоения природ. ресурсов Севера (ИЭ КОПРС); отв. ред. к. э. н. Н. Н. Тихонов. – Якутск: Якут. кн. изд-во, 1988. – 190 с.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Макарова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.
5. Алексеев, Г. Н. Общая теплотехника: учеб. пособ. / Г. Н. Алексеев. – Москва: Высшая школа, 1980. – 552 с.
6. Алёшкин, В. Р. Механизация животноводства: учеб. пособие для высш. с.-х. учеб. заведений по спец. 31.13 «Механизация с.-х. пр-ва» / В. Р. Алёшкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Колос, 1993. – 317 с.
7. Аммосова, Н. И. Агропромышленный комплекс республики Саха (Якутия): состояние, динамика и проблемы развития / Н. И. Аммосова // Economic Consultant. – 2014. – №4 (8). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/agropromyshlennyy-kompleks-respubliki-saha-yakutiya-sostoyanie-dinamika-i-problemy-razvitiya> (дата обращения: 26.09.2020).
8. Аникин, Е. В. Пиролизная установка по переработке резинотехнических отходов с минимальным вредом окружающей среде / Е. В. Аникин // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – №110. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/piroliznaya-ustanovka-po-pererabotke-rezinotekhnicheskikh-othodov-s-minimalnym-vredom-okruzhayushey-srede> (дата обращения: 25.09.2020).
9. Афанасьев, Д. Е. Энергосбережение в сельском хозяйстве Якутии / Д. Е. Афанасьев. – Якутск: Полиграфист, 1995. – 221 с.
10. Ахмедов, Р. Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Р. Б. Ахмедов. – Москва: Знание, 1988. – 46 с.

11. Баадер, В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, Бренндерфер; пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного. – Москва: Колос, 1982. – 148 с.
12. Багрянцев, Г. И. Термическое обезвреживание и переработка промышленных и бытовых отходов / Г.И. Багрянцев, В. Е. Черников // Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной переработки – аналитические обзоры. – Новосибирск, 1955. – 501 с.
13. Бакаев, В. В. Моделирование систем управления сложными технологическими объектами: на примере пиролизной установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / В. В. Бакаев; Комсомольск-на-Амуре ГТУ. – Комсомольск-на-Амуре, 2002. – 184 с.
14. Баротфи, И. Энергосберегающие технологии и агрегаты на животноводческих фермах / И. Баротфи, П. Рафай; пер. с венг. Э. Шандора, А. И. Залепухина. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 227 с.
15. Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения / Г. Кориат, М. Бельке, П. Ведекинд [и др.]; предисл. и пер. с нем. П. Я. Семенова. – Москва: Колос, 1978. – 271 с.
16. Биотехнология – сельскому хозяйству / А. Г. Лобанок, М. В. Залашко, Н. И. Анисимова [и др.]; под ред. А. Г. Лобанка. – Минск: Ураджай, 1988. – 199 с.
17. Биотехнология: учеб. пособие для вузов. – В 8 кн. Кн. 1. Проблемы и перспективы / под ред. Н. С. Егорова, А. В. Олескина, В. Д. Самуилова. – Москва: Высш. шк. 1989. – 159 с.
18. Биоэнергетика: мировой опыт и прогноз развития: науч.-аналит. обзор / Л. С. Орсик, Н. Т. Сорокин, В. Ф. Федоренко [и др.]; М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации Федер. гос. науч. учреждение «Рос. науч.-исслед. ин-т информ. и технико-экон. исслед. по инженерно-техн. обеспечению агропром. Комплекса» (ФГНУ «Росинформагротех»). – Москва: Росинформагротех, 2007. – 204 с.
19. Биоэнергетика России в XXI веке. ФГБУ Российское энергетическое агентство минэнерго РФ. – Москва, 2012. – 37 с.
20. Биоэнергия. Общая информация / Агентство по возобновляемым ресурсам (FNR). – 2012. – URL: <https://edufuture.biz/index.php?title=Биоэнергия> (дата обращения 10.09.2019).

21. Биркин, С. М. Совершенствование технологии и технических средств утилизации навоза крупнорогатого скота: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. М. Биркин. – Волгоград, 2009. – 24 с.

22. Бойлс, Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки / Д. Бойлс; под ред. Е. А. Бирюковой. – Москва: ВО Агропромиздат, 1987. – 62 с.

23. Большая советская энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров; чл. гл. ред.: Н. К. Байбаков [и др.]. – 3-е изд. – В 30 т. Т. 6. Газлифт – Гоголево. – Москва: Советская энциклопедия, 1971. – 624 с.

24. Бондалетов, В. Г. Комплексная переработка жидких продуктов пиролизных производств этилена и пропилена: дис. ... д-ра техн. наук: 02.00.13 / В. Г. Бондалетов. – Казань, КНИТУ, 2014. – 376 с.

25. Бондаренко, А. М. Современные технологии переработки навоза животноводческих предприятий в высококачественные органические удобрения / А. М. Бондаренко, Л. С. Качанова // Вестник ВНИИМЖ. – 2015. – №4. – С. 135–141.

26. Бондаренко, А. М. Механизация процессов переработки навоза животноводческих предприятий в высококачественные органические удобрения: монография / А. М. Бондаренко, В. П. Забродин, В. Н. Курочкин. – зерноград: ФГОУ ВПО Азово-Черноморская гос. агроинженерная акад, 2010. – 184 с.

27. Технология и оборудование для переработки свиного навоза и его внесения / А. М. Бондаренко, Е. Н. Белоусов, Б. Н. Строгий, Т. Ф. Самойлова //Техническое оборудование для села. – 2010. – №11. – С. 20–21.

28. Брагинец, Н. В. Курсовое и дипломное проектирование по механизации животноводства / Н. В. Брагинец, Д. А. Палишкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 191 с.

29. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах: физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Ленинград: Химия, 1984. – 336 с.

30. Броунштейн, Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах / Б. И. Броунштейн, Г. А. Фишбейн. – Ленинград: Химия, 1977. – 280 с.

31. Бурга, Г. Биогаз на основе возобновляемого сырья: сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / Г. Бурга, Р. Криста, В. Петер. – Германия: Спец. агентство возобновляемых ресурсов (FNR), 2010. – 118 с. – URL: <http://www.twirpx.com/file/443824/> (дата обращения 10.05.2019).

32. Валеев, И. А. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды / И. А. Валеев, Р. Р. Сафин, Р. Г. Сафин // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной Вестник. – 2005. – №2. – С. 168–174. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-protssessa-piroliza-drevesiny-pri-regulirovanii-davleniya-sredy> (дата обращения 25.07.2021).

33. Варламов, Т. П. Механизация удаления и использования навоза / Т. П. Варламов. – Москва: Колос, 1969. – 68 с.

34. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки данных / Г. В. Веденяпин. – Москва: Колос, 1973. – 199 с.

35. Виестур, У. Э. Системы ферментации / У. Э. Виестур, А. М. Кузнецов, В. В. Савенков. – Рига: Зинатне, 1986. – 174 с.

36. Вильдфлуш, И. Р. Агрохимия: учебник / И. Р. Вильдфлуш, С. П. Кукреш, В. А. Ионас. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск: Ураджай, 2001 – 488 с.

37. Анализ факторов, влияющих на организацию и особенности сжигания твердого топлива в промышленных условиях / Ю.Ю. Власова, Л. Н. Козина, А. М. Дзюбан, П. П. Каськаев // Вестник НГИЭИ. – 2015. – №6 (49). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyaschih-na-organizatsiyu-i-osobennosti-szhiganiya-tverdogo-topliva-v-promyshlennyh-usloviyah> (дата обращения: 25.01.2021).

38. Влияние различных способов предобработки навоза КРС на интенсивность его метанового сбраживания / С. С. Зацепин, В. И. Скляр, С. В. Калужный [и др.] // Биогаз-87 : тез. докл. совещания по техн. биоэнергетике. – Рига, 1987. – С. 47.

39. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Москва: Статистика, 1974. – 192 с.

40. Волеваха, Н. М. Нетрадиционные источники энергии / Н. М. Волеваха, В. А. Волеваха. – Москва: МЭИ, 1983. – 289 с.

41. Герасимов, И. П. Охрана природы Севера Сибири / И. П. Герасимов // Известия Академии наук СССР. Серия География. – 1979. – № 1. – С. 42–52.

42. Глушков, В. А. Разработка и исследование автоматизированной установки пиролиза растительного сырья с целью повышения выхода топливного газа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / В.А. Глушков. – Ижевск; ИжГТУ, 2006. – 113 с.

43. Технологические режимы получения энергоносителей путем переработки биомассы / В. А. Глушков, В. П. Тарануха, А. Ю. Печенкин, И. Г. Русяк; Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. – Ижевск, 2011. – 112 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28285441> (дата обращения 25.07.2019).

44. Глушков, В. А. Математическая модель установки пиролиза растительного сырья с возвратом пиролизных смол / В. А. Глушков, П. А. Ушаков; Ижевский гос. техн. ун-т. – Ижевск, 2006. – 19 с.

45. Глушков, В. А. Анализ способов получения энергии из растительного сырья / В. А. Глушков, П. А. Ушаков // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 14 апреля 2006 г.). – Пенза, 2006. – С. 75–78.

46. Горбунов, А. В. Центровывоз животноводческой продукции в агропромышленном комплексе / А. В. Горбунов. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 110 с.

47. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талай. – Москва: Металлургия, 1978. – 112 с.

48. ГОСТ 481-80. Паронит и прокладки из него. Технические условия. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/23118/> (дата обращения: 21.10.2020).

49. ГОСТ 1779-83. Шнуры асбестовые. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – Введ. 1985-01-01. – URL: <http://cert.obninsk.ru/gost/719/719.html> (дата обращения 21.10.2020).

50. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – Введ. 1988-01-01. – Постановлением Госстандарта СССР от 16.0.1987 г. № 36.
51. ГОСТ 26074-84 (СТ СЭВ 2705-80). Навоз жидкий. Ветеринарно-санитарные требования к обработке, транспортированию и использованию. – Введ. 1984-07-01. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200024986> (дата обращения 21.10.2020).
52. Добровольский, И. П. Перспективные методы очистки пиролизного газа от низкопроцентных токсичных примесей / И. П. Добровольский, О. В. Васильев // Технические науки. Челябинский государственный университет. – 2012. – № 5 (5). – С. 77–80.
53. Докучаев, Н. А. Удаление и использование навоза / Н. А. Докучаев, Л. А. Стома, В. М. Гогин. – Москва: Россельхозиздат, 1976. – 53 с.
54. Математическое моделирование пиролиза пропан-бутановой фракции с учетом накопления кокса / И. М. Долганов, А. А. Бунаев, И. О. Долганова, Н. А. Чиркина // Деловой журнал *neftegaz.ru*. – 2020. – №3 (99). – С. 30–36.
55. Долгов, В. С. Гигиена уборки и утилизации навоза / В. С. Долгов – Москва: Россельхозиздат, 1984. – 175 с.
56. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований / Б. А. Доспехов. – Москва: Агропромиздат, 1983. – 351 с.
57. Дрейпер, Н. Г. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – В 2 т. Т. 2. – Москва: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.
58. 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.
59. 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. – Т. 9. Вып. 3. – Одесса, 2012. – С. 89–92.

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

61. Друзьянова, В. П. Математическое моделирование скорости всплывания газового пузырька в метантенке биогазовой установки / В.П. Друзьянова, Л.А. Дарбасова // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: сб. науч. тр. IV-ой Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечествен. войне и 100-летию со дня рожд. А. А. Ежевского (27–29 мая 2015 г.). – В 2 ч. Ч. 1. – Иркутск, 2015. – С. 152–155.

62. Друзьянова, В. П. Обоснование методики расчета испытательного ездового цикла / В. П. Друзьянова, Л. Б. Ларионов // 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. 139–144.

63. 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 ч. Ч. 2. – Новосибирск, 2012. – С. 45–52.

64. Друзьянова, В. П. Получение удобрения из птичьего помета в условиях Якутии / В. П. Друзьянова, А. К. Аммосова, // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. – 2010. – №1. – С. 64–66.

65. Друзьянова, В. П. Технология анаэробного сбраживания бесподстилочного навоза крупнорогатого скота / В. П. Друзьянова, Ю. А. Сергеев // Аграрная наука. – 2015. – № 5. – С. 24–25.

66. Друзьянова, В. П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупнорогатого скота: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. П. Друзьянова. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2017. – 281 с.

67. Дубровский, В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов /В. С. Дубровский, У. Э. Виестур. – Рига: Зинатне, 1988. – 204 с.

68. Евтеев, В. К. Имитационное моделирование энергоснабжения при анаэробном сбраживании птичьего помета / В. К. Евтеев, В. Ю. Просвирнин // Пути повышения эффективности электротепловых процессов в сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири: сб. науч. тр. – Иркутск, 1989. – С. 40–48.

69. Евтеев, В. К. Особенности механизации животноводства в Республике Саха (Якутия) / В. К. Евтеев, В. П. Друзянова // Актуальные проблемы АПК: материалы регион. науч.-практ. конф. – Ч. 3. Механизация сельскохозяйственного производства. – Иркутск, 2001. – С. 14–15.

70. Евтеев, В. К. Оценка биогаза как топлива / В. К. Евтеев // Пути повышения эффективности электротепловых процессов в сельскохозяйственном производстве Восточной Сибири: сб. науч. тр. – Иркутск, 1989. – С. 36–40.

71. Земсков, В. И. Проектирование ресурсосберегающих технологий и технических систем в животноводстве: учебное пособие / В. И. Земсков. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. 384с

72. Ибрагимов, Ч. Ш. Адсорбционная очистка пиролизного газа от сероводорода // Наука, техника и образование. – 2017. – №5 (35). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adsorbtsionnaya-ochistka-piroliznogo-gaza-ot-serovodoroda> (дата обращения: 25.03.2021).

73. Иванец, В. Н. Методы интенсификации гидромеханических процессов: учебное пособие / В. Н. Иванец, Б. А. Лобасенко; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – 2003. – 84 с.

74. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Москва: Химия, 1971. – 784 с.

75. Касимов, А. М. Совершенствование технологии и оборудования термохимической переработки древесных отходов в высококалорийный генераторный газ: дис. ... канд. техн. наук / А. М. Касимов. – Казань, КНИТУ, 2017. – 199 с.

76. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – Москва, 1984. – 592 с.

77. Кигель, Е. М. Эксплуатация канализационных очистных сооружений / Е. М. Кигель. – Киев: Будивельник, 1978. – 144 с.

78. Кобякова, Е. Н. Органические отходы животноводства как источники питательных веществ для сельскохозяйственных животных / Е. Н. Кобякова, С. А. Петрова // Материалы IV международной НПК «Теоретические и практические аспекты развития современной науки» (3–4 июля 2012 г.). – Москва, – С. 89–93.

79. Ковалев, Н. Г. Проектирование систем утилизации навоза на комплексах / Н. Г. Ковалев, И. К. Глазков. – Москва: Агропромиздат, 1989. – 160 с.

80. Ковалев, А. А. Производство газообразного топлива из отходов животноводства / А. А. Ковалев // Ресурсы возобновляемых источников энергии и опыт их использования в России. – 2004. – №1. – С. 62–67.

81. Коваленко, В. П. Механизация обработки бесподстилочного навоза / В. П. Коваленко. – Москва: Колос, 1984. – 159 с.

82. Коврина, О. Е. Пути энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве / О. Е. Коврина // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (Ненза, 14 апреля 2006 г.) – Пенза, 2006. – С. 223–225.

83. Козулин, Н. А. Примеры и задачи по курсу заводов химической промышленности / Н. А. Козулин, В. Н. Соколов, А. Я. Шапиро. – Москва; Ленинград: Машиностроение, 1966. – 491 с.

84. Конотопов, М. В. Химическая промышленность России до XVIII в. / М. В. Конотопов, К.Е. Чернов // Инновации и инвестиции. ИЭ РАН. – 2015. – №5. – С. 72 – 74. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/himicheskaya-promyshlennost-rossii-do-xviii-v> (дата обращения: 25.09.2020).

85. Корякин, В. И. Термическое разложение древесины / В. И. Корякин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Гослесбумиздат, 1962. – 294 с.

86. Корякин, В. И. Термическая переработка древесины: основные закономерности процессов в аппаратах с внутренним обогревом и переработкой парогазовой смеси / В. И. Корякин. – Москва; Ленинград: Гос. Лесотехническое изд-во, 1948. –163 с.

87. Копытов, В. В. Пиролиз и перспективы газификации твердых топлив // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. – 2011. – №3 (8). – 158 с. – URL: https://aqua-therm.ru/articles/articles_199.html (дата обращения 15.07.2020).

88. Кораблев, А. Д. Экономия энергоресурсов в сельском хозяйстве / А. Д. Кораблев. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 208 с.
89. Производство водорода из органического сырья / С. В. Коробцев, М. Ф. Кротов, В. Н. Фатеев [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – №6 (36). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-vodoroda-iz-organicheskogo-syr'ya-2> (дата обращения: 05.09.2020).
90. Корякин, В. И. Термическое разложение древесины: учеб. пособие / В. И. Корякин. – Москва; Ленинград: Гослесбумиздат, 1962. – 305 с.
91. Косивцев, Ю. Ю. Низкотемпературный каталитический пиролиз органического сырья: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.04 / Ю. Ю. Косивцев. – Москва: РХТУ, 2011. – 415 с.
92. Краткая история пиролиза. Пирлиз ЭКО. – URL: <http://pirolizeco.ru/kratkaya-istoriya-piroliza> (дата обращения 21.05.2020).
93. Лер, Р. Переработка и использование сельскохозяйственных отходов / Р. Лер; пер. с англ. В. В. Новикова; под ред. и с предисл. А. Н. Шимко. – Москва: Колос, 1979. – 415 с.
94. Лукьяненок, И. И. Перспективные системы утилизации навоза (в хозяйствах Нечерноземья) / И. И. Лукьяненок. – Москва: Россельхозиздат, 1985. – 176 с.
95. Лычагин, А. А. О развитии возобновляемой энергетики / А. А. Лычагин, Д. С. Стребков // Малая энергетика. – 2008. – №3 (8). – С. 61–66.
96. Малыхин, В. В. Математическое моделирование: учеб. пособие / В. В. Малыхин. – Москва: Изд-во УРАО, 1998. – 160 с.
97. Мамедов, З. А. Оптимизация безрециркуляционного процесса пиролиза этана с бутан-изобутиленовой фракцией в промышленной печи / З. А. Мамедов // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2018. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-bezretsirkulyatsionnogo-protsessa-piroliza-etana-s-butan-izobutilenovoy-fraktsiei-v-promyshlennoy-pechi> (дата обращения: 25.09.2020).
98. Матвеев, А. Н. Механика и теория относительности: учеб. для студентов вузов / А. Н. Матвеев. – М.: ОНИКС 21 век, 2003. – 432 с.

99. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Колос, 1980. – 168 с.

100. Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета / разраб.: Н. Г. Ковалев, Н. С. Максимовский, И. К. Глазков [и др.]; утв. М-вом сель. хоз. СССР 28 сент. 1981 г. и ВАСХНИЛ 19 августа 1981 г.

101. Методические указания по оценке технологического уровня и качества промышленного продукта. РД 50-149-79; утв. Постановлением Госстандарта – 1979-04-17. – Москва: Изд-во стандартов, 1979.

102. Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета / разраб.: Н. Г. Ковалев, Н. С. Максимовский, И. К. Глазков [и др.]; утв. М-вом сель. хоз. СССР 28 сент. 1981 г. и ВАСХНИЛ 19 августа 1981 г.

103. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу от животноводческих комплексов и звероферм (по величинам удельных показателей). Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха (НИИ Атмосфера). – Санкт-Петербург: Интеграл, 1999. – 32 с.

104. Методические указания к лабораторной работе для студентов специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды» по дисциплине «Гидравлика и теплотехника». Определение вязкости жидкости методом Стокса / сост.: С. С. Никулин, А. С. Чех. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 12 с.

105. Механизация и технология производства продукции животноводства: учеб. пособ. / В. Г. Коба, Н. В. Брагинец, Д. Н. Мурусидзе [и др.]. – Москва: Колос, 2000 – 528 с.

106. Механизация уборки и утилизации навоза / В. М. Новиков, В. В. Игнатова, Ф. Ф. Костанди [и др.]. – Москва: Колос, 1982. – 285 с.

107. Минеев, В. Г. Агрохимия: учебник / В. Г. Минеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ; КолосС, 2004. – 720 с.

108. Технологические направления по переработке органических отходов / С. Ю. Миронов, М. В. Протасова, Е. П. Проценко

[и др.] // Auditorium. – 2017. – №1 (13). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-napravleniya-popererabotke-organicheskikh-otvodov> (дата обращения: 25.07.2020).

109. Морева, Н. П. Разработка процесса очистки природного газа от сернистых соединений на модифицированном клиноптилолите: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01 / Наталья Павловна Морева. – Москва, 2001. – 151 с.

110. Назарова, А. В. Разработка кинетической модели пиролиза пропан-бутановой фракции / А. В. Назарова, Е. С. Воробьев, Ф. И. Воробьева // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №22. – С. 353–354. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-kineticheskoy-modeli-piroлиза-propan-butanovoy-fraktsii> (дата обращения 07.06.2021).

111. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – Москва: Наука, 1971. – 207 с.

112. О состоянии агропромышленного комплекса Республики Саха (Якутия) за 1990–1999 гг.: стат. сб. / Госкомстат Респ. Саха (Якутия). – Якутск, 2000. – 105 с.

113. Обратный клапан. Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Обратный_клапан (дата обращения 12.12.2020).

114. Отчет Департамента животноводства и племенного дела МСХ РС (Я) «Состояние и анализ животноводства за 2008–2012 гг. (прогноз на 2014 год)» от 11.01.2013 г.

115. Пиролиз. Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пиролиз> (дата обращения 12.12.2019).

116. Пиролиз древесины II Химия. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. И.Л. Кнунянц. – 2-е изд. – Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. - С. 442.

117. Письменный, Д. Т. Конспект лекций по высшей математике / Д. Т. Письменный. – Ч. 1. – Москва: АЙРИС ПРЕСС, 2004. – 288 с.

118. Плановский, А. Н., Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: уч. для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Химия, 1987. – 496 с.

119. Получение биогаза из навоза // Биореакторы и газольдеры. – URL: <http://vologda.doski.ru/poluchenie-biogaza-iz-navoza-bioreactory-i-gazgoldery-msg1105663.htm> (дата обращения 30.03.2019).

120. Почвоведение: теория и практика лабораторных работ: учеб. пособ. / О. З. Еремченко, Р. В. Кайгородов, И. Е. Шестаков, Л. А. Чудинова; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2014. – 95 с.

121. Пургин, С. А. Проблемы и мероприятия по рациональному энерго- и ресурсосбережению / С. А. Пургин // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 14 апреля 2006 г.). – Пенза, 2006. – С. 277–280.

122. Успехи и проблемы производства альтернативных источников топлива и химического сырья. Пиролиз биомассы / Д. Л. Рахманкулов, Ф. Ш. Вильданов, С. В. Николаева, С. В. Денисов // Баш. хим. журнал. – 2008. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uspehi-i-problemy-proizvodstva-alternativnyh-istochnikov-topлива-i-himicheskogo-syr-ya-piroliz-biomassy> (дата обращения: 25.05.2021).

123. РД-АПК 1.10.15.02-08. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. – Москва, 2008. – 94 с.

124. Российская Академия наук. Сибирское отделение. Якутский институт биологии: отч. к договору на проведение работы «Разработка технологии получения биогаза в сельских улусах Республики Саха» (1995–1996 год).

125. Сельское хозяйство Республики Саха (Якутия): стат. справ. / Госкомстат Респ. Саха (Якутия). – Якутск, 2013. – 27 с.

126. Смольянинов, С. И. Термическое разложение лигнино-целлюлозного комплекса торфа / С. И. Смольянинов, Я. А. Белихмаер, В. М. Икрин // Известия ТПУ. – 1973. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termicheskoe-razlozhenie-lignino-tsellyuloznogo-kompleksa-torfa> (дата обращения: 25.09.2019).

127. Собкалов, А. В. Математическое моделирование окислительного пиролиза автошин в барабанных печах / А. В. Собкалов, М. А. Пименова, Г. К. Ивахнюк // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2013. – №4. – С. 49–58. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-okislitelnogo-piroliza-avtoshin-v-barabannyh-pechah> (дата обращения 25.02.2021).

128. Спиридонова, А. В. Исследование технологии получения пеллетов / А. В. Спиридонова, М. К. Охлопкова / Научно-технический вестник Поволжья. – Казань. – 2020. – №12. – С. 85–87.

129. Спиридонова, А. В. Обеспечение экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве / А. В. Спиридонова, В. П. Друзьянова, М. Я. Рожина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №11. – С. 84–88.

130. Спиридонова, А. В. Оборудование для переработки вторичного сырья / А. В. Спиридонова, В. П. Друзьянова, М. Я. Рожина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №11. – С. 88–91.

131. Спиридонова, А. В. Пиролизная технология в животноводстве / А. В. Спиридонова, В. П. Друзьянова // Дальневосточный аграрный вестник. – 2021. – №2 (58). – С. 152–159.

132. Применение пиролизной установки ГВА-1 в лаборатории Северо-Восточного федерального университета / А. В. Спиридонова, В. П. Друзьянова, В. П. Тарануха, В. А. Глушков // Приборостроение в XXI веке – 2015 / Интеграция науки, образования и производства: сборник материалов XI международной научно-технической конференции. – 2016. – С. 76–82.

133. Справочник. Водород, свойства, получение, хранение, транспортирование, применение / под ред. Д. Ю. Гамбург, П. Ф. Дубовкина. – Москва: Химия, 1989. – 672 с.

134. Статистическое моделирование и прогнозирование: учеб. пособие / Г. М. Гамбаров, Н. М. Журавель, Ю. Г. Королев [и др.]; под ред. А. Н. Гранберга. – Москва: Финансы и статистика, 1990. – 383 с.

135. Тархаев, П. О. Организационно-технологические и технические основы механизации процессов приготовления и раздачи кормов на фермах крупнорогатого скота Якутии: автореф. дис. ... канд. техн. наук / П. О. Тархаев. – Новосибирск: РПО СО РАСХН, 1983. – 32 с.

136. Теплотехника: учеб. для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.] под ред. В. Н. Луканина. – 3-е изд., испр. – Москва: Высш. шк., 2002. – 671 с.

137. Теплотехника: учеб. для вузов / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт [и др.]; под ред. А. П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

138. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б. Х. Драганов [и др.]. – Москва: Агропромиздат, 1990. – 463 с.

139. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия). – URL: <https://sakha.gks.ru> (дата обращения: 01.02.2021).

140. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 №7-ФЗ Статья 51 п.2 «Требования в области охраны окружающей среды при обращении с отходами производства и потребления». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823 (дата обращения: 21.10.2020).

141. Фёрстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа: руководство для экономистов / Э. Фёрстер, Б. Рёнци; пер. с нем. и предисл. В. М. Ивановой. – Москва: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.

142. Характеристики древесной биомассы, применяемой в топливных целях. – URL: <http://www.unikc.ru/wood.htm> (дата обращения: 28.09.2020).

143. Хафизов, И. Ф. Современные тенденции развития процесса пиролиза / И. Ф. Хафизов, Р. Р. Мусин // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-protssessa-piroliza> (дата обращения: 01.03.2021).

144. Численные методы / Н. И. Данилина, Н. С. Дубровская, О. П. Кваша [и др.]. – Москва: Высшая школа, 1976. – 368 с.

145. Оптимальный позонный подвод топливного газа к змеевику этановой пиролизной печи // Т. Н. Шахтактинский, А. М. Алиев, А. З. Таиров [и др.] / Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44. №6. – С. 698–704.

146. Юсубов, Ф. В. Оптимизация процесса адсорбции газовых смесей / Ф. В. Юсубов // European science. – 2017. – №9 (31). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-protssessa-adsorbtsii-gazovyh-smesey> (дата обращения: 25.09.2020).

147. Ягодин, Б. А. Агрохимия / Б. А. Ягодин, Ю. П. Жуков, В. И. Кобзаренко; под ред. Б. А. Ягодина. – М.: Колос, 2002. – 584 с.

Научное электронное издание

Алексеева Анастасия Валериевна
Савватеева Ирина Аркадьевна
Друзьянова Варвара Петровна

**АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО
ИЗ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА**

Монография

Чебоксары, 2025 г.

Компьютерная верстка *Е. В. Кузнецова*

Подписано к использованию 23.06.2025 г.

Объем 4,33 Мб. Тираж 20 экз.

Уч. изд. л. 3.8.

Издательский дом «Среда»
428023, Чебоксары, Гражданская, 75, офис 12
+7 (8352) 655-731
info@phsreda.com
<https://phsreda.com>