

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Сотников Виктор Георгиевич

**ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ
В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Сафин Р.Г.

Казань – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ.....	12
1.1 Растительные отходы, их классификация и направления их переработки.....	12
1.2 Основные сведения об активированном угле.....	16
1.3 Способы получения активированного угля.....	19
1.4 Аппаратурное оформление процесса получения активированного угля.....	26
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ.....	37
2.1 Физическая картина процесса получения активированного угля из растительных отходов.....	37
2.2 Формализация термохимического процесса разложения растительных отходов.....	38
2.3 Математическое описание процесса переработки растительных отходов в активированный уголь.....	39
2.3.1 Математическое описание процесса конвективной сушки отходов....	40
2.3.2 Математическое описание процесса медленного пиролиза отходов... 42	
2.3.3 Математическое описание процесса паровой активации угля.....	45
2.3.4 Математическое описание процесса конвективного охлаждения активированного угля.....	49
2.3.5 Математическое описание процесса вакуумной сушки активированного угля.....	51
2.4 Алгоритм расчета процесса получения активированного угля.....	53

ГЛАВА 3	МОДЕЛИРОВАНИЕ	ПРОЦЕССА	ПОЛУЧЕНИЯ	
АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ.....				56
3.1	Описание экспериментального оборудования для исследования процесса получения активированного угля.....			56
3.2	Методики проведения экспериментов и обработка экспериментальных данных.....			60
3.3	Анализ результатов исследований физического и аналитического моделирования.....			66
3.3.1	Анализ результатов исследований конвективной сушки растительных отходов.....			66
3.3.2	Анализ результатов исследований по пиролизу растительных отходов			68
3.3.3	Анализ результатов по паровой активации угля.....			71
3.3.4	Анализ результатов исследований конвективного охлаждения активированного угля.....			77
3.3.5	Анализ результатов исследований вакуумной сушки активированного угля.....			79
ГЛАВА 4	ПРОМЫШЛЕННАЯ	РЕАЛИЗАЦИЯ	РЕЗУЛЬТАТОВ	
ИССЛЕДОВАНИЯ	ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ		ПЕРЕРАБОТКИ	
РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ.....				80
4.1	Описание установки для производства активированного угля.....			80
4.2	Методика расчета установки производства активированного угля.....			83
4.2.1	Методика расчета узла подготовки растительных отходов.....			83
4.2.2	Методика расчета шахтного аппарата.....			85
4.2.3	Методика расчета узла медленного пиролиза со встроенным пароперегревателем.....			89
4.2.4	Методика расчета системы эжекционной конденсации пиролизных газов.....			92
4.2.5	Методика расчета узла подготовки перегретого пара.....			99

4.2.6 Методика расчета системы очистки топочных газов.....	103
4.3 Алгоритм расчета установки производства активированного угля.....	106
4.4 Анализ результатов моделирования установки получения активированного угля.....	108
4.5 Технико-экономическое обоснование термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	141
Приложение А. Программа расчета температурных полей сыпучего слоя измельченного твердого сырья в условиях его термического разложения при кондуктивном подводе теплоносителя.....	142
Приложение Б. Программа расчета процесса сушки измельченных коллоидных капиллярно - пористых тел в условии конвективного подвода теплоносителя.....	145
Приложение В. Программа решения нелинейной задачи теплопроводности для неподвижного слоя твердых частиц органического сырья при условии кондуктивного подвода теплоносителя.....	149
Приложение Г. Акт принятия к внедрению	152
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	153
Приложение Е. Свидетельство о государственной регистрации базы данных	154
Приложение Ж. Патент на изобретение.....	155
Приложение З. Дипломы.....	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Проблемами агропромышленного комплекса в настоящее время являются низкая эффективность использования вторичного растительного сырья, высокие затраты на его переработку, связанные с отсутствием высокоэффективного оборудования и методик его расчёта. В настоящее время в России перерабатывается не более 40 % отходов агропромышленного комплекса (АПК). Это приводит к снижению эффективности АПК. Существует большое количество направлений переработки растительного сырья, одним из них является термохимическая переработка растительных отходов в активированный уголь

В связи с большим объемом вредных выбросов, образующихся на предприятиях, задача по созданию новых ресурсо- и энергосберегающих технологий получения активированного угля является крайне актуальной.

Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с основными положениями таких государственных программ, как:

1. Национальные цели и стратегические задачи развития Российской Федерации на период до 2024 года по направлению «Экология».
2. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года.
3. Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (в редакции от 28.11.2015).

Работа выполнялась в рамках следующих грантов и конкурсов:

1. Грант РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» на тему «Научные основы технологии термической переработки растительных отходов» (соглашение № 23-26-00036 от 27.01.2023 г.).
2. Грант ФСИ «Студенческий стартап» по теме «Разработка технологии термической переработки твердых бытовых отходов в сорбенты» (договор № 32ГССС15-L/78484 от 04.08.2022 г.).

3. Конкурс научно-исследовательских проектов «ТехноСтарт» на тему «Разработка энергосберегающего способа пирогаenetической переработки твердых органических отходов в активированный уголь» (договор № 17-22 от 01.02.2021 г.).

4. Научно- исследовательская работа по теме «Разработка технологии термической переработки твердых бытовых отходов в сорбенты» (договор № 86-23 от 01.06.2023 г.).

Степень разработанности темы. Методам проектирования технологий пиролизической переработки сельскохозяйственных отходов посвящены работы В. М. Зайченко [11, 12], Р.Г. Сафина [76, 163]. Вопросами переработки отходов агропромышленного комплекса занимались А.Ю. Брюханов [6, 7], Н.Л. Воропаева [126], В.Н. Клушин [124].

Вопросам термической переработки растительных отходов посвящены работы В.М. Мухина [43, 44], В.Н. Пиялкина [66, 68], F. Berruti [156], С. Briens [170], M.J. Antal [143], M. Gronli [150]. Изучению характеристик адсорбентов, полученных из лигниноцеллюлозных материалов, посвящены работы Н.И. Богдановича [4, 5], Ю.Л. Юрьева [141, 142], В.В. Самонина [70], Л.Г. Пьяновой [64], В.Ю. Морозовой [125].

Вопросы изучения механизмов термического разложения растительных материалов изложены в работах А. Broido [146], С.А. Koufopoulos [159]. Физическим и математическим моделированием тепло- и массообменных процессов разложения растительного сырья занимались W.C. Park [161], Di Blasi [147-149].

Однако все вышеописанные исследования направлены, в основном, на термохимическую переработку древесных материалов, и не позволяют в полной мере оценить переработку отходов растительного сырья в активированный уголь. Поэтому разработка технологии и аппаратного оформления термохимической переработки отходов агропромышленного комплекса в активированный уголь может стать решением проблемы накопления растительных отходов на предприятиях агропромышленного комплекса.

Цель работы: разработка технологии и аппаратурного оформления термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь и обоснование ее режимных и конструкционных параметров.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния вопроса термохимической переработки растительных отходов.
2. Разработка технологической схемы и изготовление экспериментальной установки термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.
3. Разработка математической модели процесса получения активированного угля из растительных отходов.
4. Проведение теоретических и экспериментальных исследований по получению активированного угля из растительных отходов в лабораторных условиях.
5. Разработка методики расчёта аппаратурного оформления технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.
6. Оценка экономической эффективности технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.

Объект исследований: термохимическая переработка растительных отходов.

Предметом исследований является поиск рациональных режимных и конструкционных параметров процесса термохимической переработки растительных отходов, влияющих на технико-экономические показатели активированного угля.

Научная новизна.

Работа содержит технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности получения активированного угля из растительных отходов.

1. Разработана математическая модель термохимического процесса

получения активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса, отличающаяся тем, что:

- описывает непрерывный процесс получения активированного угля термохимическим методом, что позволяет проектировать энергосберегающие установки непрерывного действия;
- на стадии моделирования водопаровой активации учитывается изменение плотности пара и плотности образующихся газов активации, что позволяет контролировать степень выгорания активированного угля с целью достижения требуемой адсорбционной способности.

2. Получены новые данные:

- по адсорбционной активности активированного угля из лузги семян подсолнечника, костры масличного льна, скорлупы грецкого ореха по йоду в зависимости от продолжительности активации, формы дисперсности частиц, температуры активирующего агента;
- по удельному выходу активированного угля в зависимости от температуры активирующего агента, формы дисперсности частиц, температуры пиролиза, скорости прогрева сырья, типа сырья;
- по динамике изменения равновесной активности по толуолу гранул активированного угля различной плотности в зависимости от степени выгорания;
- по плотности дробленого угля, по высоте камеры активации для многосекционного шахтного аппарата;
- по плотностям пара и газов активации в камере активации в зависимости от толщины слоя угля.

Полученные данные позволяют установить рациональные технологические параметры активированного угля, полученного из отходов агропромышленного комплекса методом термохимической переработки.

3. Доказана возможность эффективной термохимической переработки растительных отходов агропромышленного комплекса – лузги семян подсолнечника, костры масличного льна, скорлупы грецкого ореха в

активированный уголь различного назначения, соответствующего маркам ОУ-А ГОСТ 4453-74, AP-A ГОСТ 8703-74, БАУ-А ГОСТ 6217-74.

4. Разработан эффективный энергосберегающий способ получения активированного угля (патент на изобретение № 2789699).

Теоретическая значимость.

1. Раскрыто влияние свойств растительного сырья на технологические режимы ведения термохимических процессов активации угля.
2. Изложены теоретические и экспериментальные закономерности, позволяющие разработать энергосберегающую технологию термохимической переработки растительного сырья в активированный уголь.
3. Доказана возможность эффективной термохимической переработки растительных отходов агропромышленного комплекса в активированный уголь.

Практическая значимость.

1. Разработана методика расчёта аппаратного оформления процесса термохимической переработки растительных отходов.
2. Разработана энергосберегающая установка получения активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса.
3. Полученные результаты исследований приняты к внедрению в АО «ИВКАЗ» (г. Казань) и внедрены в учебный процесс по дисциплине «Современные технологии переработки растительного сырья» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Методология и методы исследований.

В теоретических исследованиях использованы методы математического моделирования с применением ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на основе ГОСТов и регрессионного анализа полученных данных с применением программ EXCEL, Mathcad и языка программирования Pascal.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением адекватной математической модели, экспериментальными исследованиями на сертифицированном оборудовании. Отклонение расчётных данных от экспериментальных значений не превышает 18 %.

Личный вклад автора состоит в разработке технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь, решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, разработке математической модели, создании экспериментальной установки, проведении математического моделирования и анализе полученных результатов. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве. Все исследования выполнены автором лично.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты исследований, выносимые на защиту, относятся к пункту 10 «Методы, технологии и технические средства обеспечения экологической безопасности, переработки и утилизации отходов сельскохозяйственного производства, эколого-реабилитационные процессы и технологии» паспорта специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса переработки растительных отходов в активированный уголь.
2. Результаты моделирования по обоснованию эффективности технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.
3. Технологическая схема установки термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.
4. Режимные параметры и методика расчёта установки термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: V Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации и молодежь – два вектора развития отечественной нефтехимии» (Нижекамск, 2021), Всероссийская научно-практическая конференция «Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика» (Воронеж, 2021), Всероссийская научно-техническая конференция «Эколого-

ресурсосберегающие технологии в науке и технике» (Воронеж, 2021), XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 2022), Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов (Воронеж, 2022), Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023), XIV международная научно-техническая конференция (Екатеринбург, 2023), Международная научная конференция «Эколого-биологическое благополучие флоры и фауны» (EBWFF, 2023) (Благовещенск, 2023), Восьмая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии: сушка, тепловые и массообменные процессы» (Москва, 2023).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 20 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и 8 статей индексируемых RSCI, Scopus, WOS, 1 монография, 1 патент на изобретение № 2789699, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619183, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621311.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, включающих 75 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список включает 170 наименований цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ

По данным счетной палаты в 2022 году в РФ было образовано около 80 млн. тонн твердых отходов. Более 30 % от этой цифры приходится на отходы агропромышленного и лесопромышленного комплексов. Их объединяет родственный химический состав [37, 75]. Данное объединение отходов можно определить как растительные отходы. Наиболее предпочтительным методом обращения с ними служит их переработка, но, ввиду отсутствия современных технологических процессов, переработке подвергаются не более 20% данной группы отходов [87]. Остальная часть утилизируется посредством сжигания или подвергается захоронению. Это наносит вред окружающей среде и экономике. Термохимическая переработка растительных отходов позволит получить адсорбенты и источники энергии в жидком и газообразном видах [35, 47].

1.1 Растительные отходы, их классификация и направления их переработки

Растительные отходы – это группа отходов, основой состава которой является лигнинууглеводный комплекс целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина. Таблица основных видов растительных отходов с их химическим составом представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Компонентный состав растительных отходов, %

Растительное сырье	Структурные компоненты, %			Минеральные и экстрактивные вещества, %	Зольный остаток, %
	целлюлоза	гемицеллюлоза	лигнин		
Древесные отходы	44	22,4	29	4,15	0,45
Лузга семян подсолнечника	22,6	30,7	29,1	16,4	1.2
Скорлупа грецкого ореха	29,55	29,28	37,14	3,5	0,53
Костра льна	71,2	18,6	2,2	7.4	0.6

В свою очередь, лигнинуоуглеводный комплекс данных отходов образован такими химическими элементами, как углерод С (до 49,5%), кислород О (до 44,1%), водород Н (до 6,3%) и азот N (~0,12%). Данный химический состав столь малоценных продуктов открывает широкие возможности для их переработки [4, 10, 18, 21, 35].

Принадлежность отходов к растительной группе определяется ее химическим составом, но в целом, учитывая схожесть состава, классификацию отходов можно упростить, и принять ее, как показано на схеме рис. 1.1. Так к группе растительных отходов можно целиком отнести отходы лесоперерабатывающего комплекса, отходы текстиля от натуральных тканей, а также пищевые отходы различных плодовоовощных и ягодных сельскохозяйственных культур [75].

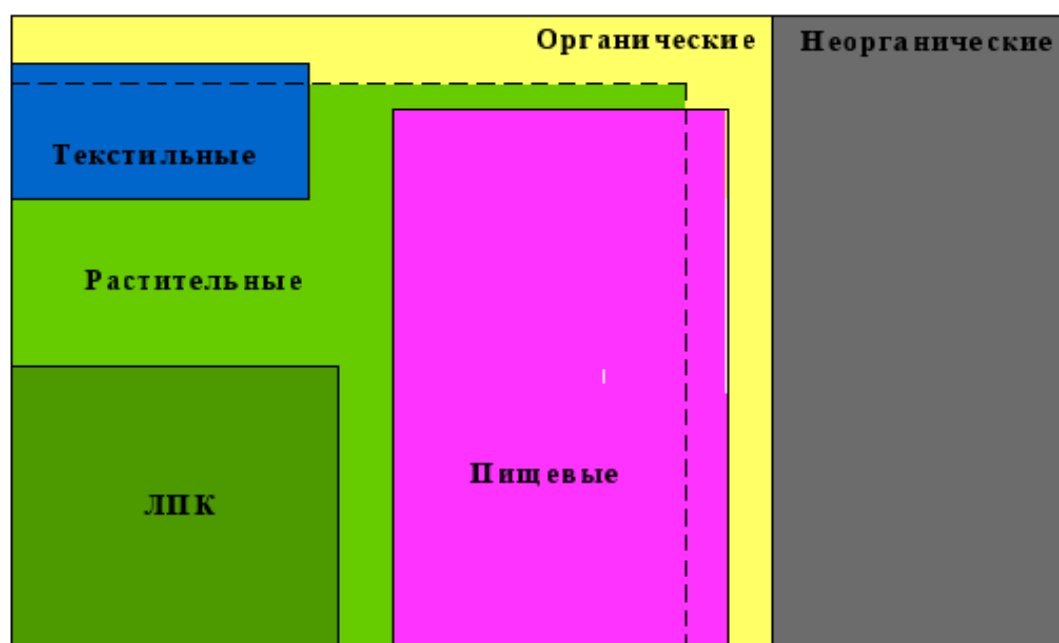


Рисунок 1.1 – Схема классификации растительных отходов

В различных литературных источниках описаны многочисленные способы получения активированного угля из сырья растительного происхождения [4, 5, 9, 12, 35].

Эффективным способом переработки растительных отходов является пиролиз. Пирогенетическому разложению может быть подвергнуто любое

органическое сырье. В соответствии с технологией сырья, при необходимости, предварительно измельчают, перемешивают, сушат. Пиролиз проводят в герметичных камерах с подводом тепла от стенок или других конструктивных элементов конструкции аппаратного оформления. Для удаления тяжёлых вредных примесей производят активацию водяным паром высокой температуры [104].

Термическое разложение растительного сырья имеет большое количество сложных реакций, затрудняющих моделирование процесса. Ввиду этого, модели термического разложения строятся на законах формальной химической кинетики. Для более ясного понимания и дальнейшей формализации процесса термохимического разложения растительного сырья необходимо детально разобрать каждый химический компонент, из которых состоят растительные отходы [10]. По таблице 1.1. видно, что основными компонентами являются целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин.

Целлюлоза $(C_6H_{10}O_5)_n$ – это линейный полимер-полисахарид, структурная формула молекулы которой представлена на рис. 1.2.

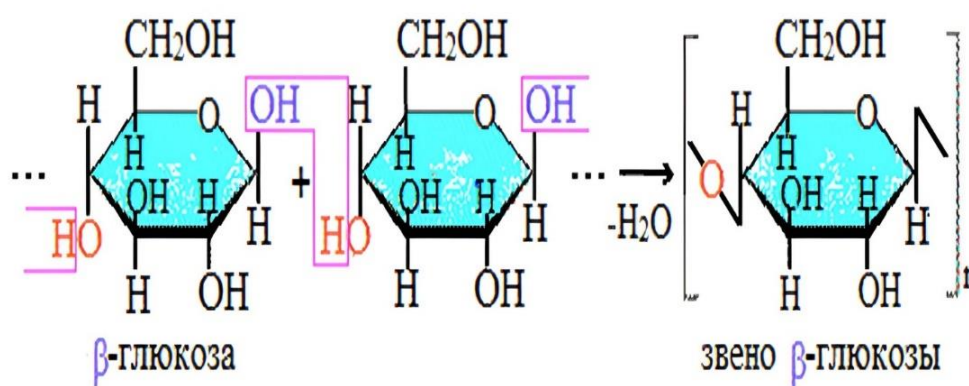


Рисунок 1.2 – Структурная формула молекулы целлюлозы

Целлюлоза – химически стабильное вещество, температура разложения находится в пределах 260 – 270 °С [154]. Целлюлоза является главной составной частью клеточных оболочек у высших растений.

Гемицеллюлозы (полиозы) – растительные гомо- и гетерополисахариды, состоящие из пяти нейтральных сахаров: глюкозы, маннозы, галактозы, ксилозы,

арабинозы [23]. Структурная формула молекулы гемицеллюлозы представлена на рис. 1.3.

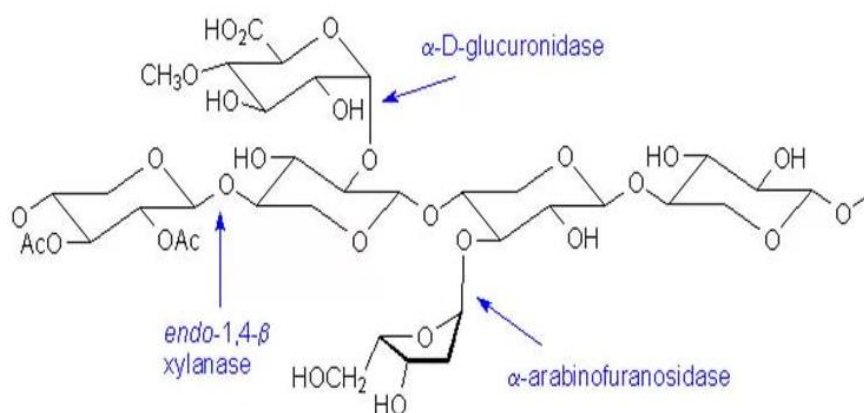


Рисунок 1.3 – Структурная формула молекулы гемицеллюлозы

Механизм высокотемпературного разложения гемицеллюлозы схож с механизмом разложения целлюлозы [24].

Лигнин – природный биополимер ароматической природы. Лигнин является наиболее термостабильным из всех трех основных компонентов растительного сырья. У лигнина отсутствует определенная структурная формула, так как характерна нерегулярность строения.

В растительном сырье помимо трех вышеназванных компонентов также содержатся вещества, называемые посторонними. В зависимости от вида сырья, содержание этих веществ колеблется в пределах от 0 до 20 %. Несмотря на довольно низкий процент содержания в сырье, эти вещества оказывают большое влияние на термическое разложение растительного сырья [24]. Посторонними для клеточных стенок являются различные соли, спирты, фенолы, альдегиды, эфиры, алифатические и ароматические углеводы, терпены, кетоны и хиноны и многие другие.

Полный компонентный состав растительного сырья приведен на рис. 1.4 [10]. Высшие молекулярные соединения, представленные легниноуглеводным комплексом, составляют основу растительного сырья, образуя клеточную стенку. Посторонние вещества заполняют межстеночное пространство.

Пирогенетическое разложение растительных отходов приводит к тому, что из клеточной стенки уносятся все посторонние вещества, оставляя в виде твердого остатка углерод и примеси. Органическая часть полностью отделяется от твердого остатка, образуя газ, частично конденсируясь в смесь в виде дистиллята. Из-за отсутствия доступа кислорода окисление неорганической части не происходит [60].

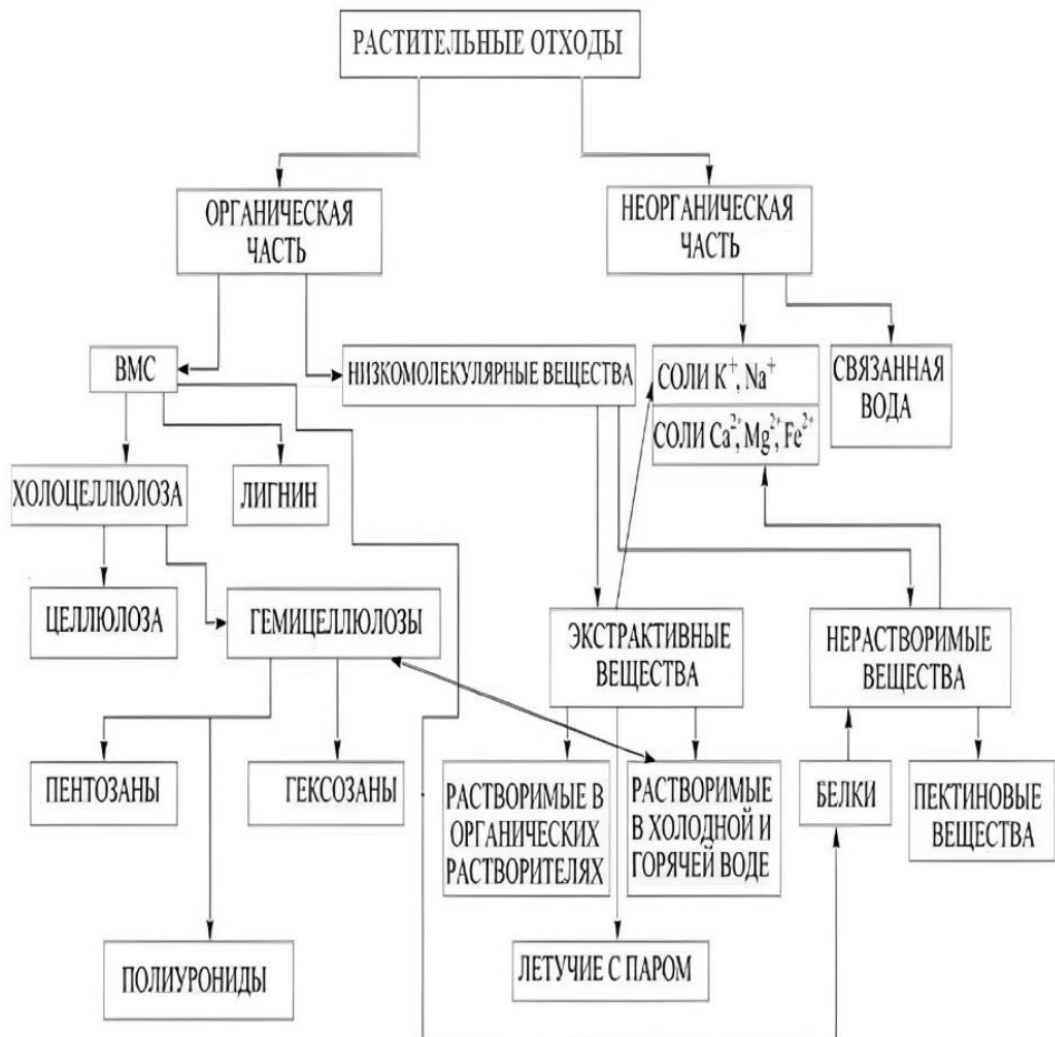


Рисунок 1.4 – Схема компонентного состава растительного сырья

1.2 Основные сведения об активированном угле

Активированный (или активный) уголь (от лат. carbo activatus) это адсорбент – вещество с высокоразвитой пористой структурой, которое получают

из различных углеродсодержащих материалов органического происхождения [2].

Активированный уголь с точки зрения химии – это одна из форм углерода с несовершенной структурой, практически не содержащая примесей. Активированный уголь на 87 – 97 % по массе состоит из углерода, также может содержать водород, кислород, азот, серу и другие вещества. Активный уголь имеет огромное количество пор и поэтому обладает очень большой поверхностью, вследствие чего обладает высокой адсорбцией (1 г активного угля, в зависимости от технологии изготовления, имеет площадь поверхности от 500 до 1500 м²). Именно высокий уровень пористости делает активированный уголь «активированным». Увеличение пористости активного угля происходит во время специальной обработки – активации, которая значительно увеличивает адсорбирующую поверхность [9].

В активированных углях различают макро-, мезо- и микропоры [19]. В зависимости от размеров молекул, которые нужно удержать на поверхности угля, должен изготавливаться уголь с разными соотношениями размеров пор. Поры в активном угле классифицируют по их линейным размерам X – полуширина – для щелевидной модели пор, радиус – для цилиндрической или сферической: $X \leq 0,6 - 0,7$ нм – микропоры; $0,6 - 0,7 < X < 1,5 - 1,6$ нм – супер-микропоры; $1,5 - 1,6 < X < 100 - 200$ нм – мезопоры; $X > 100 - 200$ нм – макропоры [19, 24].

В порах активированного угля существует межмолекулярное притяжение, которое приводит к возникновению адсорбционных сил (Ван-дер-Вальсовы силы), которые по своей природе сродни силе гравитации с той лишь разницей, что действуют они на молекулярном, а не на астрономическом уровне. Эти силы вызывают реакцию, подобную реакции осаждения, при которой адсорбируемые вещества могут быть удалены из водных или газовых потоков [25].

Ранее активированный уголь получали из нефтяного кокса и угля, которые являются невозобновляемыми. Кроме того, условия получения являются жесткими, так как температура обработки для получения активированного угля

была выше 1000 °С [31].

В последние несколько лет активизировались исследования в направлении использования сельскохозяйственных и коммунальных отходов для получения активированного угля. С точки зрения охраны окружающей среды сельскохозяйственные и муниципальные отходы со временем разлагаются, но большинство из них разлагается медленно, создавая при этом различные виды загрязнения. Лучший способ решить эти проблемы – использовать их в качестве ценного ресурсного сырья для получения активированного угля [35, 36].

Как правило, активированный уголь получают путем смешивания обезвоживающих или окисляющих агентов, таких как KOH, ZnCl₂ и H₃PO₄ или химически активных газовых смесей, например CO₂ и пар, которые вступают в реакцию с поверхностью угля, развивая его пористую структуру [56, 58].

Свойства, проявляемые активированным углем, включают высокую удельную площадь поверхности, регулируемый размер и структуру пор. Активированный уголь, полученный из растительного сырья, имеет различную морфологию пористой структуры: от иерархической пористой структуры активированного угля, полученного из древесины, до трехмерной сыроподобной nanoархитектуры активированного угля, полученного из отходов початков кукурузы [10, 35, 59].

Активированный уголь классифицируется по форме частицы. Порошковый активированный уголь имеет частицы размером менее 0,1 мм. Порошковый уголь используется для промышленной очистки жидкостей, включая очистку хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод. [13] Гранулированный активированный уголь размером от 0,1 до 5 мм используется для очистки воды. Для очистки жидкостей активированный уголь помещается в фильтры или адсорберы. Формованный активированный уголь – это активированный уголь в форме различных геометрических фигур, в зависимости от области применения (цилиндры, таблетки, брикеты и т. д.) используется для очистки различных газов и воздуха в фильтрах. Цилиндрический уголь используют для пропитки

различными катализаторами [14].

Основными параметрами для активированного угля являются: гранулометрический размер, насыпная плотность, твердость, влажность, зольность, рН водной вытяжки. Защитное действие активированного угля определяется измерением времени адсорбции углем определенного газа до начала пропускания минимальных концентраций газа слоем активированного угля. Адсорбционная активность активированного угля тестируется по бензолу, четыреххлористому углероду, йодному индексу (адсорбция йода, йодное число), метиленовому голубому, мелассе (мелассовое число или индекс, показатель по мелассе) [3].

1.3 Способы получения активированного угля

Получение активированного угля возможно из всех видов углеродосодержащего сырья. На рис. 1.5. показана схема переработки углеродосодержащего сырья в активированный уголь.

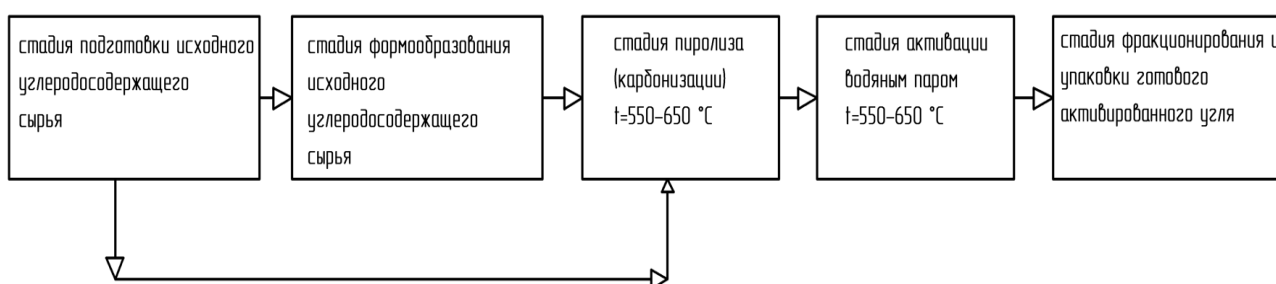


Рисунок 1.5 – Схема переработки углеродосодержащего сырья в активированный уголь

Стадия подготовки исходного сырья представляет собой удаление посторонних примесей, не подлежащих переработке. Затем следует стадия формообразования или измельчения, необходимая для ускорения процесса. Эта стадия может быть пропущена ввиду начальной мелкой дисперсности частиц перерабатываемого сырья, как, например, у лузги подсолнечника. Стадия пиролиза – карбонизации для твердых растительных отходов проходит при температуре 450 – 550°C. Отходы подвергаются термической обработке без

доступа воздуха для предотвращения окисления легколетучих компонентов, выделяющихся при разложении. На выходе получается углерод с небольшим остатком тяжелых примесей, порядка 1 – 5 % от общей удельной массы углерода [38, 53, 65].

После пиролиза углеродистый продукт подвергают обработке перегретым водяным паром в результате чего развивается микропористая структура, и карбонизаты приобретают адсорбционные свойства, характерные для активированного угля. Горячий активированный уголь охлаждают отстаиванием или различными хладогентами, затем отобранная партия готового продукта проходит окончательный контроль на соответствие требуемым ГОСТам и ТУ [13-17]. Активированный уголь упаковывают в герметичные пакеты.

Сырье с высоким содержанием лигнина используется в основном для производства углеродистого остатка. Несмотря на то, что лигнин является потенциальным источником получения энергии, технологии его переработки существенно менее развиты по сравнению с технологиями переработки целлюлозы и гемицеллюлозы [145, 151].

Несмотря на перспективность пиролиза, как метода термохимической конверсии биомассы, сложность его повсеместного внедрения заключается в большом количестве взаимозависимых химических реакций процесса. Кроме того, на его протекание оказывают влияние характеристики исходного перерабатываемого сырья (размер, состав органической и минеральной частей), а также условия процесса (скорость нагрева, температура, давление и др.) [159].

Существуют различные кинетические модели реакций термического разложения [150, 152]. Одностадийный механизм термического разложения, представленный на рис. 1.6, предполагает, что разложение сырья на уголь и парогазовую смесь происходит одновременно, при этом не учитываются условия нагрева и свойства сырья [146]. Данная модель не может описать реальную ситуацию, происходящую внутри камеры, и на практике используется довольно редко.

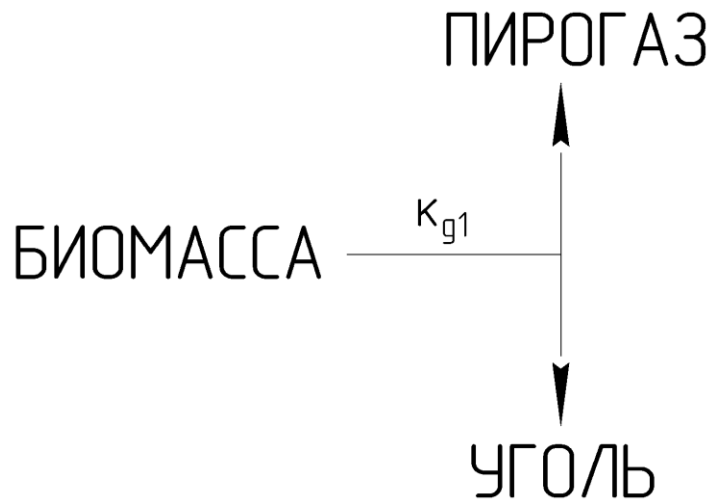


Рисунок 1.6 – Одностадийный механизм термического разложения

Модель конкурирующих реакций Тернера (рис. 1.7) дает описание первичных и вторичных реакций разложения в одностадийном процессе, посредством трех конкурирующих реакций в узком температурном диапазоне. Данная модель позволяет отследить выход продуктов пиролиза в зависимости от его условий [156]. Недостаток в том, что учесть качественные изменения данная модель не позволяет.

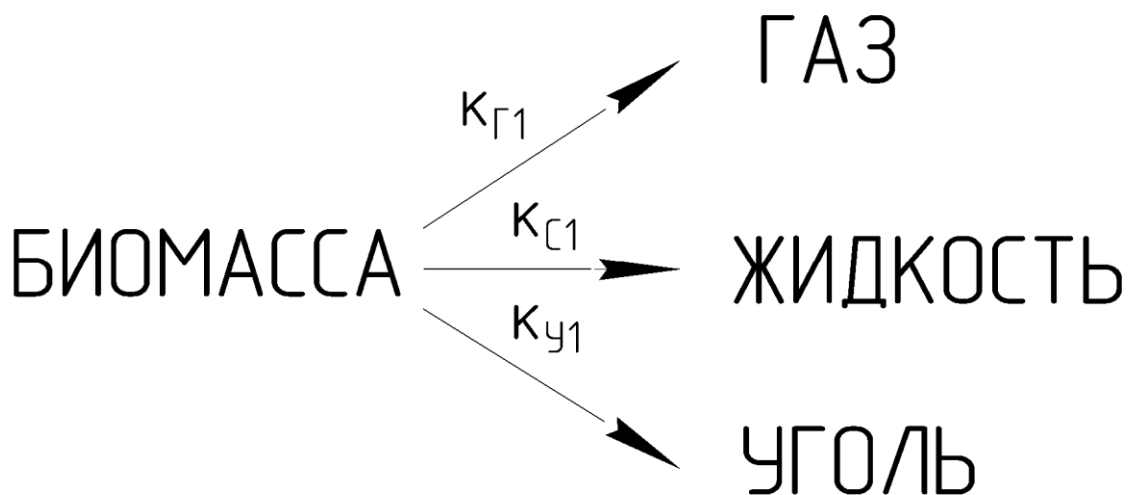


Рисунок 1.7 – Механизм термического разложения с конкурирующими реакциями

Качественную картину получаемых продуктов разложения позволяют получить двухстадийные модели. Одной из них является двухстадийная модель конкурирующих реакций Тернера (рис. 1.8).

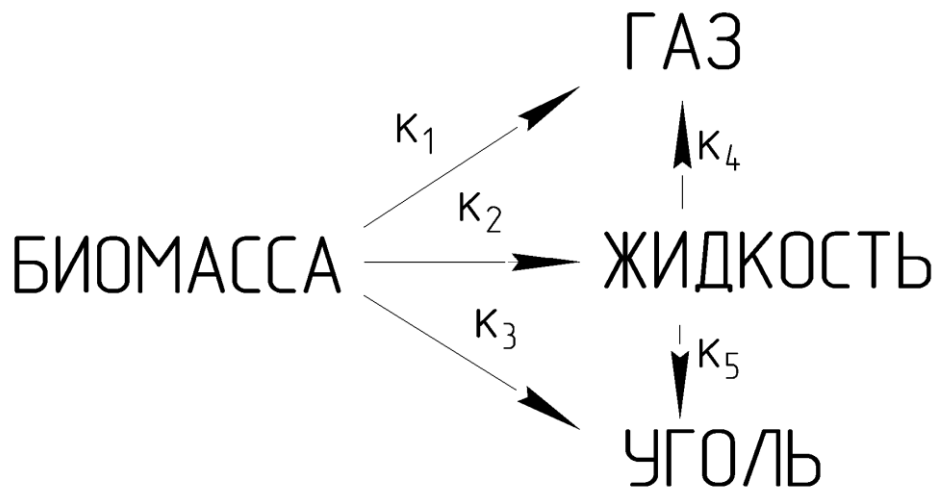


Рисунок 1.8 – Двухстадийный механизм термического разложения с конкурирующими реакциями

Данная модель предполагает, что смолообразные соединения парогазовой смеси при определенном термическом воздействии могут дополнительно разлагаться на легкие газы или могут полимеризоваться в твердый остаток. Вторичные реакции происходят только в парогазовой фазе внутри пор углеродистого остатка.

Существует механизм Бройдо-Шафизаде, представленный на рис. 1.9 [162]. Согласно схеме, биомасса разлагается на газообразные, жидкие и твердые продукты, которые, взаимодействуя между собой, приводят к образованию вторичных продуктов разложения.

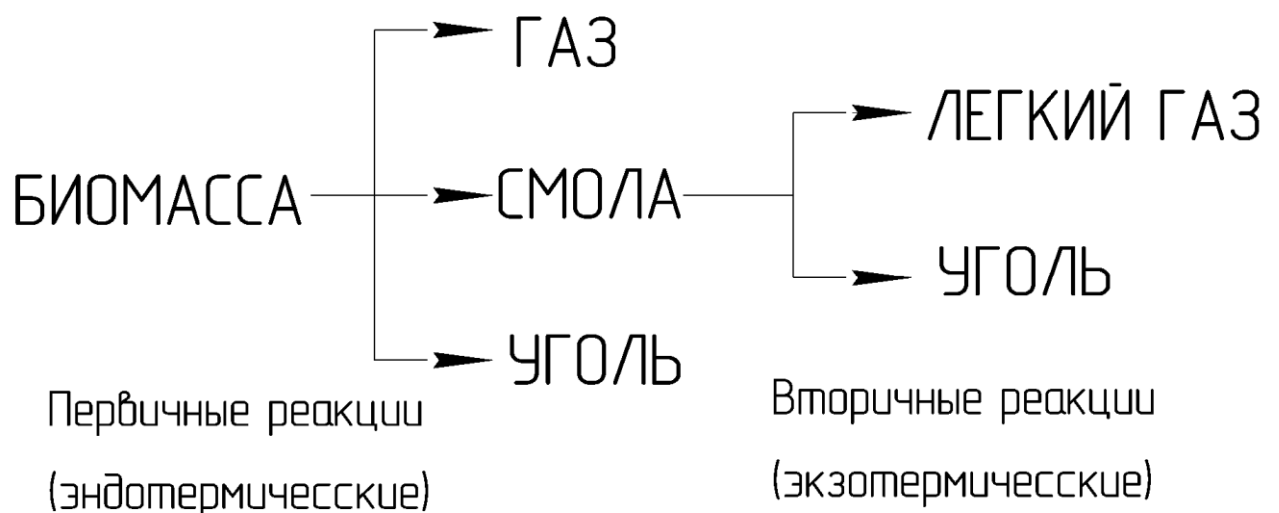


Рисунок 1.9 – Механизм Бройдо-Шафизаде

Отличием механизма Бройдо-Шафизаде от описанных выше, является учет вторичных экзотермических реакций разложения смолистых соединений биомассы.

Выход угля при проведении пиролиза зависит от скорости прогрева сырья и температуры разложения. В таблице 1.2 представлены режимы пиролиза.

Таблица 1.2 – Технологические режимы процесса пирогагенетического разложения отходов

Процесс	Температурный режим, °С	Временной режим, с	Продукты, % мас		
			Дистиллят	Уголь	Газ
Быстрый пиролиз	450 – 500	2	75	12	13
Медленный пиролиз	350 – 650	1800 – 3600	50	35	15
Высокотемпературный пиролиз	700 – 1000	1200	5	10	85

Быстрый пиролиз осуществляется при высокой скорости нагрева частиц до 1000 °С/с при малом времени продуктов пиролиза в реакторе. Продукты пиролиза представляют собой дистиллят, безводная часть которого представляет собой смесь высокоокислённых углеводородов. Для получения карбонизированного остатка данная технология малоприменяема [144].

Высокотемпературный пиролиз применяют для получения горючего газа. Процесс происходит при температуре 700 – 1000 °С, что приводит к газификации биомассы. Также в качестве побочных продуктов получают высокотемпературные смолы [147].

Медленный пиролиз протекает при небольшой скорости нагрева сырья – примерно 0,1 °С/с при атмосферном давлении. Медленный пиролиз в большей степени позволяет получать твердый карбонизированный продукт. Этот метод применяют для получения древесного, а затем и активированного угля [47].

Процесс активации угля представляет собой его прокалывание в атмосфере окисляющихся газов или водяного пара. Основные факторы процесса активации – это температура процесса и свойства активатора. Во время пиролиза в

углеродистом остатке образуются макропоры. Процесс активации проводится для очищения поверхности пор в угле, при этом образуются также и микропоры [126].

Основной целью процесса активации является увеличение удельной поверхности, причем увеличение количества пор и улучшение структуры пор активированного угля. Как упоминалось ранее, на первой стадии процесса активации активирующие агенты образуют микропористую структуру. На более поздней стадии активации имеющиеся поры расширяются за счет образования крупных пор в результате выжигания стенки между мелкими порами. Это приводит к ухудшению микропористости в активированном угле с возможным уменьшением поверхности микропор. Следовательно, здесь стоит упомянуть о том, что степень сжигания (выгорания) углеродного материала или, другими словами, степень активации является решающим параметром для производства высококачественного активированного угля [156].

Существуют химический и физический способы активации сырья. При химической активации сырье обрабатывают химическим агентом, например, хлоридом цинка или серной кислотой [164]. Метод используется для получения карбонизированного продукта из неподготовленного сырья – торфа, кокса и др. Данный метод применим при больших объемах производства. Химическая активация сопровождается большим количеством сточных вод. Применение химической активации совместно с медленным пиролизом нецелесообразно.

При физической активации уголь обрабатывают газом или водяным паром [79]. Температурный режим процесса определен в достаточной мере и составляет 800 – 900 °С. Время активации, в целом, зависит от геометрии камеры, в которой проводят активацию, но, как правило, не превышает 10 – 30 минут при постоянной температуре водяного пара. Метод применяют после пиролиза. В ходе паровой активации из активированного угля удаляются тяжелые примеси, не удаленные после пиролиза. Активированный уголь после паровой активации не загрязнен вредными примесями в отличие от химической активации [80].

Кислород, присутствующий в активаторах, используется для сжигания

продуктов смолы, которые задерживаются в порах и остаются во время пиролиза. Это приводит к открытию пор. Степень образования пористости зависит от природы используемого газа и температуры активации. Свойства активированного угля сильно зависят от прекурсора, выбора активирующего агента, температуры и степени активации. Эти свойства определяют пористую структуру активированного угля с высокой до умеренной пористости. Как правило, чем выше температура и время активации, тем больше будет образовано пор. Однако развитие высокой пористости приводит к расширению размеров пор [122].

Площадь поверхности, объем пор и средний размер пор активированного угля увеличиваются со временем активации и могут контролироваться изменением режимов активации [19].

В настоящее время проводятся исследования новых методов активации углеродистых остатков, например, самоактивации, гидротермальной карбонизации и активации, микроволновой активации.

Самоактивация – это процесс, при котором газы, выделяющиеся при пиролизе биомассы, используются для активации. Такой подход обеспечивает экологически чистый способ получения активированного угля без участия посторонних химических веществ [143]. Этот процесс имеет дополнительное преимущество, заключающееся в экологичности при низкой себестоимости производства за счет экономии затрат на активирующие агенты. Однако характеристики активированного угля получаются ниже, чем при классических способах активации угля, описанных выше.

Гидротермальная карбонизация – это термохимический метод преобразования, при котором используется вода для преобразования биомассы в углеродистые материалы путем фракционирования. Температура карбонизации зависит от типа исходных материалов и температуры их разложения. В этом процессе вода выполняет несколько функций, выступая катализатором и растворителем, способствующим гидролизу. Высокая константа ионизации воды при высокой температуре приводит к гидролизу биомассы, которая

катализируется с использованием различных кислот и оснований. Гидротермальная карбонизация также генерирует различные органические кислоты, такие как уксусная, муравьиная и молочная, которые снижают pH угля. Эти кислоты способствуют разложению олигомеров и мономеров на более мелкие фрагменты. Следовательно, гидротермальный процесс способствует гидролизу и обезвоживанию биомасс и производит гидроуголь с высоким функциональным содержанием кислорода [116].

Микроволновый нагрев имеет преимущество перед обычным. Тепловым процессам требуется время для достижения желаемого уровня активации. Кроме того, поверхностный нагрев не может создать равномерную температуру внутри образца. В микроволновом нагреве энергия напрямую обеспечивается вращением диполя и ионной проводимостью внутри частиц. Время активации при микроволновом нагреве оказывает заметное влияние на площадь поверхности и пористость активированного угля [35].

1.4 Аппаратурное оформление процесса получения активированного угля

Существует технология производства древесного угля с рециркуляционным теплоносителем. Реторта Lambiotte CISR, разработанная в Бельгии, способна перерабатывать 7000 тонн сухой древесины в год, производя ~2500 тонн древесного угля [168]. В Европе работает несколько установок карбонизации CISR. Аналогичная концепция была использована компанией Лурги при строительстве завода по производству древесного угля, который является частью кремниевого металлургического комплекса в Банбери, Западная Австралия. Около 27 000 тонн древесного угля ежегодно производится из местной древесины лиственных пород в двух ретортах. Принципиальная схема установки показана на рис. 1.10.

Реторта разделена на верхнюю зону карбонизации и нижнюю зону нагрева, каждая из которых имеет свой собственный поток рециркуляции газа. Поток газа из зоны карбонизации распределяется по середине реторты и поднимается вверх.

Пиролизные пары покидают реторту сверху и подаются в блок сгорания для поэтапного сжигания. На первом этапе ретортный газ сжигается в условиях, близких к стехиометрическим. На втором этапе добавляется больше воздуха, чтобы обеспечить полное сгорание до того, как выхлопные газы выйдут в атмосферу. Около трети дымовых газов отбирается и кондиционируется, чтобы служить продуваемым газом для карбонизации. Избыток дымовых газов второй ступени транспортируется через дымовую трубу в атмосферу. Контур циркуляции газа в нижней зоне реторты предназначен для достаточного противоточного охлаждения угля, спускающегося из верхней зоны, и протекания противотока к древесному углю. Горячий охлаждающий газ повторно охлаждается непосредственно путем впрыска воды в скруббер, прежде чем он попадет в реторту в нижней части.

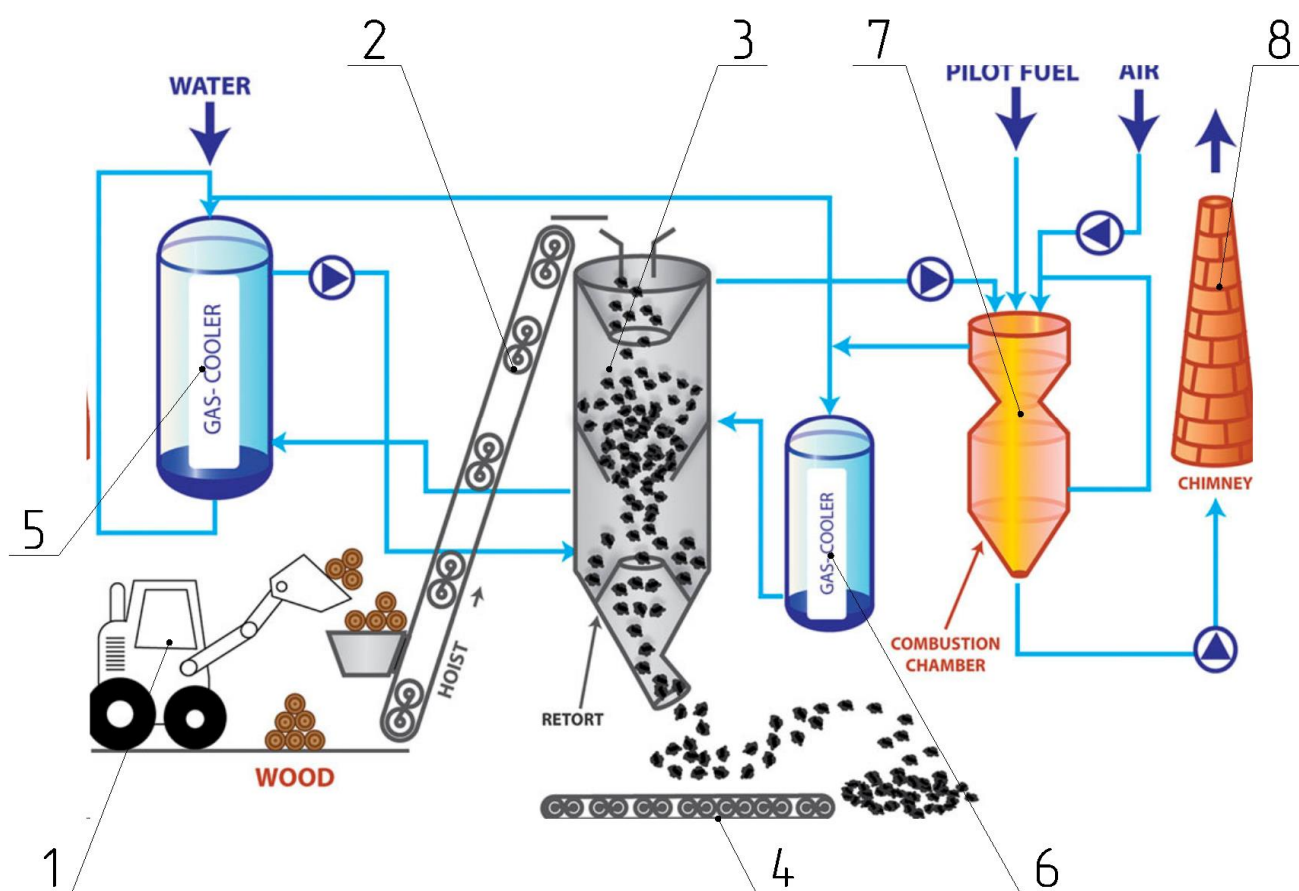


Рисунок 1.10 – Установка переработки отходов: 1 – погрузчик; 2 – устройство подачи сырья; 3 – совмещенный реактор пиролиза и активации; 4 – устройство выгрузки активированного угля; 5 – конденсатор первой ступени; 6 – конденсатор второй ступени; 7 – устройство сжигания; 8 – дымовая труба

В Сенегале ежегодно для отопления домашних хозяйств потребляется около 360 000 тонн древесного угля, что требует более 2 миллионов тонн древесины в качестве сырья. Частная маслобойня «НОВАСЕН» в 1999 году разработала проект по замене кускового древесного угля переработкой арахиса с использованием скорлупы арахиса в качестве сырья для получения брикетов древесного угля [168]. Процесс осуществляется в трех ретортах с нисходящей тягой (рис. 1.11).

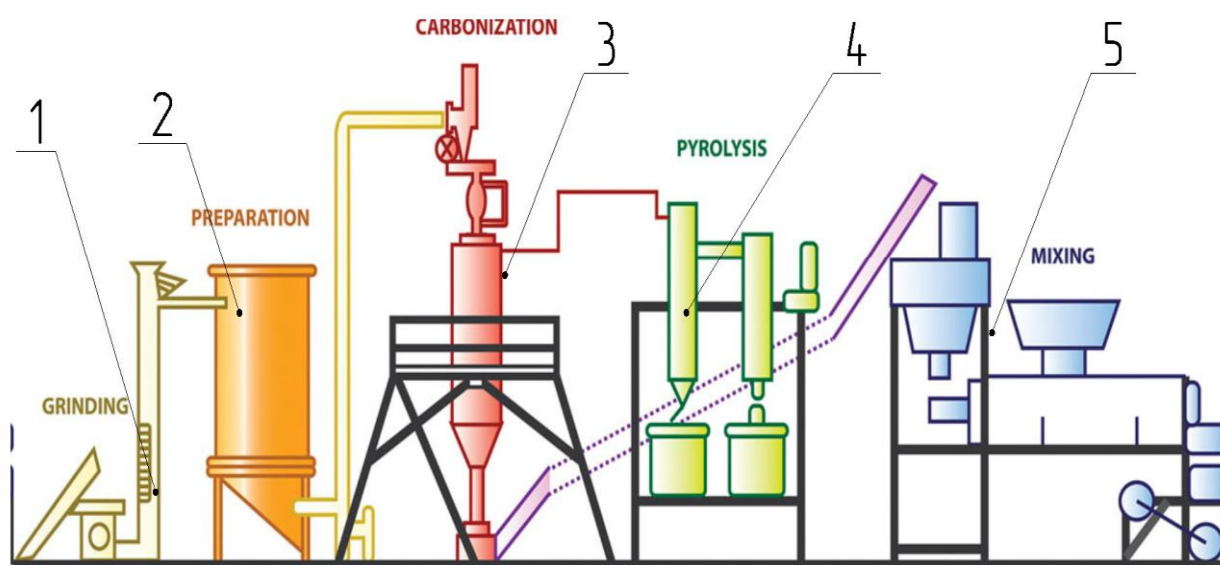


Рисунок 1.11 – Установка переработки отходов: 1 – узел измельчения; 2 – узел сушки; 3 – узел пиролиза сырья; 4 – узел повторного пиролиза биомасла; 5 – узел сортировки

Отходящие газы обеспечивают достаточное количество электроэнергии, заправляя два электрогенератора мощностью 850 кВт, в то время как пиролизное масло из реторт сжигается в тепловом котле установки. Предварительное технико - экономическое обоснование показывает, что завод может достичь энергетической автономии с 15 000 тонн скорлупы арахиса в год, производя при этом 4200 тонн брикетов из биоугля. В Сенегале, как и везде в Западной Африке, производство арахисового масла потребляет огромное количество энергии. Если бы производство «биоугля» из скорлупы арахиса было внедрено на всех маслобойнях Сенегала, примерно 12 000 га леса не вырубались бы каждый год, а страна могла бы покрыть около 25 % своих потребностей в древесном угле [168].

Известен способ получения активированного угля RU2355633 [52] для переработки низкосортной древесины в активированный уголь. Схема установки представлена на рис 1.12.

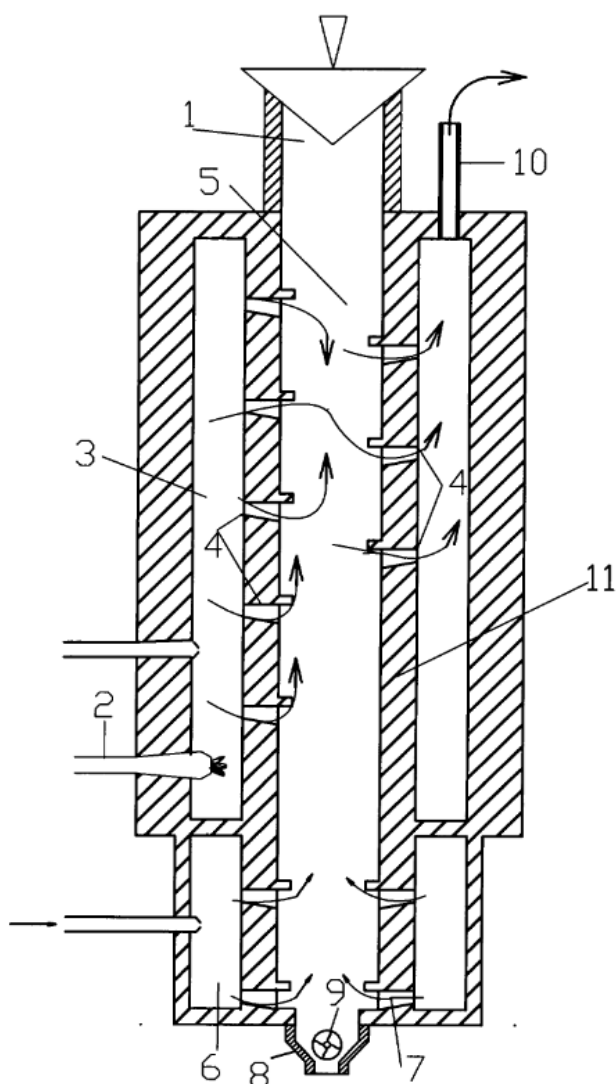


Рисунок 1.12 – Установка для получения активированного угля: 1 – бункер; 2 – горелка; 3 – нагревательная камера; 4 – отверстия; 5 – полость реактора; 6 – камера; 7 – отверстия; 8 – выводное устройство; 9 – затвор; 10 – газоотводная труба

Данный способ реализуют следующим образом. Углеродсодержащий материал, в частности древесный уголь, подают в бункер 1. В горелку 2 подают природный газ и воздух, продукты сгорания которых поступают в нагревательную камеру 3, проходят через нее и через отверстия 4 подаются в полость реактора 5. При этом продукты сгорания проходят через находящийся в реакторе 5 древесный уголь, нагревают его до температуры 800 – 850°С, активируя тем самым древесный уголь. От источника подачи поступает

насыщенный водяной пар с температурой около 105 °С в камеру 6. Водяной пар через отверстия 7 проходит в реактор 5 и охлаждает уголь в его нижней части перед выгрузкой. Активированный уголь выводят через устройство 8 для выгрузки с затвором 9. Продукты реакции удаляются через газоотводную трубу 10.

Известен способ RU2257344C1 [51] термической переработки твердых углеродсодержащих материалов с целью получения активных углей рис.1.13.

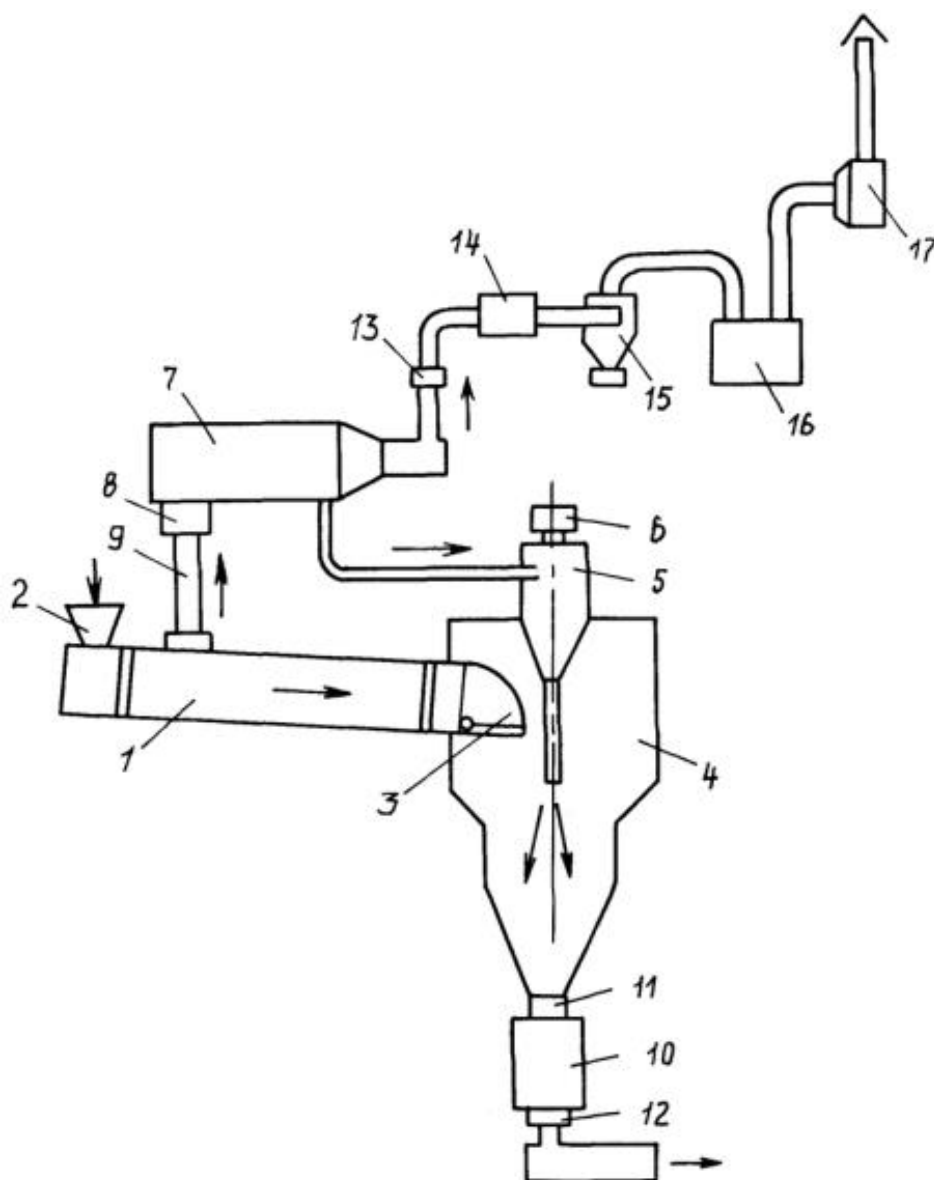


Рисунок 1.13 – Установка для получения адсорбента: 1 – печь карбонизации; 2 – узел ввода сухого материала; 3 – дозирующее устройство; 4 – вертикальная печь активации; 5 – камера сгорания; 6 – горелочное устройство; 7 – котел-утилизатор; 8 – горелка; 9 – контур для парогазовой смеси; 10 – охладитель готового продукта; 11 – узел загрузки; 12 – узел выгрузки; 13 – каталитический дожигатель; 14 – теплообменник; 15 – циклон; 16 – скруббер; 17 – дымосос

Способ включает процесс нагрева и карбонизации сырья в горизонтальной вращающейся печи в непрерывном режиме в течение 1 – 3-х часов при температуре 650 – 850 °С со скоростью нагрева материала до конечной температуры не более 10 °С/мин. Подача образовавшегося угля без охлаждения в виде порций осуществляется в вертикальную печь активации. Активацию каждой порции проводят при температуре 750 – 950°С в режиме слоя, взвешенного «острой» струей газообразного активирующего агента.

Также известен способ RU 2147926 С1 (рис. 1.14) [51]. Он относится к области получения сорбентов из твердых топлив. Установка обеспечивает эффективный тепло- и массообмен и позволяет получать высококачественный сорбент.

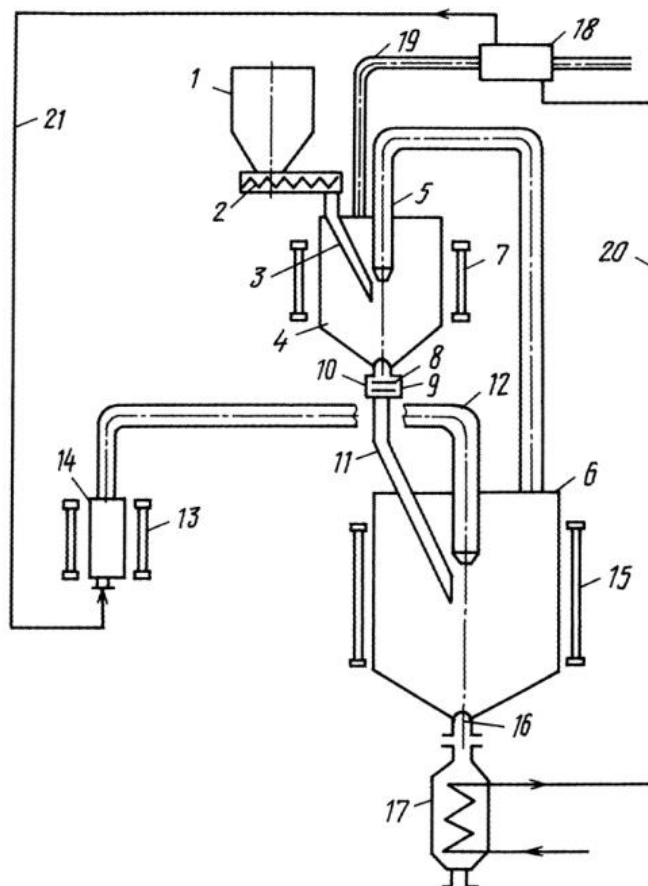


Рисунок 1.14 – Установка для производства углеродного сорбента: 1 – бункер; 2 – шнековый питатель; 3 – загрузочная труба; 4 – камера карбонизации; 5 – срез сопла трубы; 6 – камера активации; 7 – селитовые стержни; 8 – клапан; 9 – бункер дозатор; 10 – клапан; 11 – труба; 12 – срез трубы; 13 – селитовые стержни; 14 – паронагреватель; 15 – селитовые стержни; 16 – клапан; 17 – холодильник; 18 – дожигатель; 19 – трубопровод; 20 – трубопровод; 21 – трубопровод

Исходное сырье (твердое топливо) из бункера 1 шнековым питателем 2 по загрузочной трубе 3 камеры карбонизации 4 подается к срезу сопла трубы 5, по которому парогазовая смесь подается из камеры активации 6. Поддерживаемая в камере карбонизации температура 550 – 600 °С в результате подачи по трубе 5 газов с температурой 750 – 950 °С и дополнительного нагрева корпуса камеры карбонизации 4 за счет электронагрева селитовыми стержнями 7 позволяет проводить пиролиз исходного сырья.

Полученный в камере карбонизации 4 полукокс выгружается через клапан 8 в промежуточный бункер-дозатор 9. После заполнения дозатора 9 полукоксом закрывается клапан 8 и открывается клапан 10. Полукокс подается по трубе 11 под наклоном с возможностью изменения угла от 0 до 90° к срезу трубы 12, по которой подается перегретый за счет нагрева селитовыми стержнями в камеру активации 6 пар из паронагревателя 14, снабженного также селитовыми стержнями 13. Нижний срез трубы 12 расположен от нижнего сечения конического днища камеры активации 6 с возможностью изменения при необходимости расстояния от 5 до 10 диаметров трубы 12. Активация полукокса производится при температуре 750 – 900 °С, которая достигается путем электронагрева корпуса камеры активации 6 селитовыми стержнями 15.

Готовый углеродный сорбент выгружается через клапан 16 в холодильник 17, где охлаждается до нормальной температуры.

Пиролизные газы из камеры карбонизации 4 подаются в дожигатель 18 через трубопровод 19, где сгорая, испаряют воду, прошедшую холодильник 17 и трубопровод 20, а образовавшийся пар подается в паронагреватель 14 через трубопровод 21.

В настоящее время помимо строительства стационарных заводов по термической переработке отходов создаются и внедряются новые мобильные системы, которые можно устанавливать в непосредственной близости от источника сырья [168]. В Канаде компанией ABRI-Tech была разработана

технология для производства биомасла методом быстрого пиролиза. Технология имеет реализацию как в стационарном исполнении рис. 1.15, так и в мобильном рис. 1.16.



Рисунок 1.15 – Установка компании ABRI-Tech в стационарном исполнении (производительность 50 тонн в сутки)

Мобильная версия установки ABRI-Tech расположена на прицепе фуры, имеет высокую скорость разворачивания и может быть применена для утилизации органических отходов малых предприятий.



Рисунок 1.16 – Установка компании ABRI-Tech в мобильном исполнении

Существуют реакторы пиролиза еще более малых размеров. Компанией Agri-Therm создан реактор быстрого пиролиза на псевдоожиженном слое, представленный на рис 1.17.



Рисунок 1.17 – Мобильная установка пиролиза

Предполагается, что данная установка будет перерабатывать органические отходы в черте городов.

В Иркутской области на «Шелеховском» деревообрабатывающем заводе реализована технология переработки древесных опилок в угольные брикеты. На первом этапе происходит процесс брикетирования опилок, после чего полученные брикеты подвергаются медленному пиролизу. При этом процесс пиролиза протекает за счет экзотермического выделения газа при разложении брикета, который сжигается и используется для сушки исходного сырья [169].

Одним из лидеров в Российской Федерации по производству пиролизных установок является компания «ТТ ГРУПП» [33], производящая установки «Фортан», представленные на рис. 1.18.



Рисунок 1.18 – Пиролизная установка «Фортан»

Установка пиролиза ФОРТАН комплектуется двумя ретортами, изготовленными из жаростойкой нержавеющей стали. Модуль пиролиза футерован высокотемпературной теплоизоляцией на основе керамического волокна и огнеупорным бетоном. Во время работы температура наружной стенки модуля безопасна для обслуживающего персонала. Крышка реторты изготавливается с затвором специальной конструкции, который обеспечивает полную герметизацию пространства внутри реторты и исключает вероятность дымления [33].

Рабочие температуры 450 – 600 °С. Парогазовая смесь выходит из реторты по трубопроводу, охлаждается, затем поступает в резервуар для хранения и далее в конденсаторы для отделения газов от брызг жидкости. Жидкость собирается в накопительном баке. Газ частично или полностью используется для поддержки процесса пиролиза, сжигается или используется для отопления теплиц, офисов и т.д. По окончании процесса пиролиза реторту с углеродным остатком выгружают из печи и помещают в нее другую реторту с сырьем.

Компания ПТК «Пиролиз-Экопром» производит установки периодического действия «Т-ПУ-1» [34], работающие по методу низкотемпературного пиролиза (рис. 1.19).



Рисунок 1.19 – Пиролизная установка «Т-ПУ-1»

Установка «Т-ПУ-1» представляет собой реторту с топочной камерой, позволяющей разжигать печь, твердым топливом. Также возможна установка жидкотопливной горелки. Установки могут быть расположены параллельно. В таком случае нагрев последующей реторты будет осуществлен за счет сжигания газов в предыдущей реторте. Основным продуктом является технический углерод [34].

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что термохимическая переработка растительных отходов агропромышленного комплекса в активированный уголь является актуальной задачей. Процесс получения активированного угля из легниноцеллюлозной биомассы включает две основные стадии, а именно пиролиз биомассы и последующая активация карбонизатов.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ

2.1 Физическая картина процесса получения активированного угля из растительных отходов

Термохимический процесс переработки отходов растительного происхождения в активированный уголь включает в себя совокупность последовательно протекающих процессов: сушки растительных отходов, пиролиза сухих растительных отходов, водопаровой активации угля, охлаждения и сушки активированного угля. Параллельно с ними протекают процессы, связанные с фазовыми изменениями в парогазовой смеси: сепарация пиролизных газов и рекуперация тепла. Физическая картина разрабатываемого процесса показана на рис. 2.1 и имеет зоны подготовки отходов 1, конвективной сушки 2, пиролиза 3, паровой активации 4, конвективного охлаждения 5, вакуумной сушки 6, конденсации пиролизных газов 7, газоочистки 8.

Отходы подают в зону подготовки 1, где при необходимости измельчаются до размеров частиц 5 – 15 мм, затем непрерывно подаются в зону конвективной сушки 2, где подвергаются конвективному прогреву топочными газами при температуре 140 – 180 °С в режиме перекрестного движения. Сухие отходы подают в зону пиролиза 3, где они под действием температуры 400 – 650 °С разлагаются на уголь и пиролизные газы, которые направляют в зону конденсации пиролизных газов 7. Уголь подают в зону водопаровой активации 4 и обдувают перегретым паром с температурой 800 – 900 °С. По мере продвижения угля в зоне активации у него открываются микропоры и происходит выделение газов активации, которые также направляются в зону конденсации пиролизных газов 7. Далее активированный уголь подают в зону конвективного охлаждения 5, где нижний слой активированного угля орошается водой и остужается до температуры 90 – 100 °С, в то время как верхний слой

охлаждается паром, образовавшимся при охлаждении нижнего слоя активированного угля. Пар из зоны конвективного охлаждения уносится в рубашку пиролизной зоны, внутри которой расположен змеевиковый теплообменник. Активированный уголь подают в зону вакуумной сушики 6, в которой уголь охлаждается до температуры 20 °С и сушится до остаточного влагосодержания 5 – 8 % и затем подается на укупорку. Непригодные в использовании газы попадают в зону газоочистки 8, пройдя через которую выбрасываются в атмосферу.

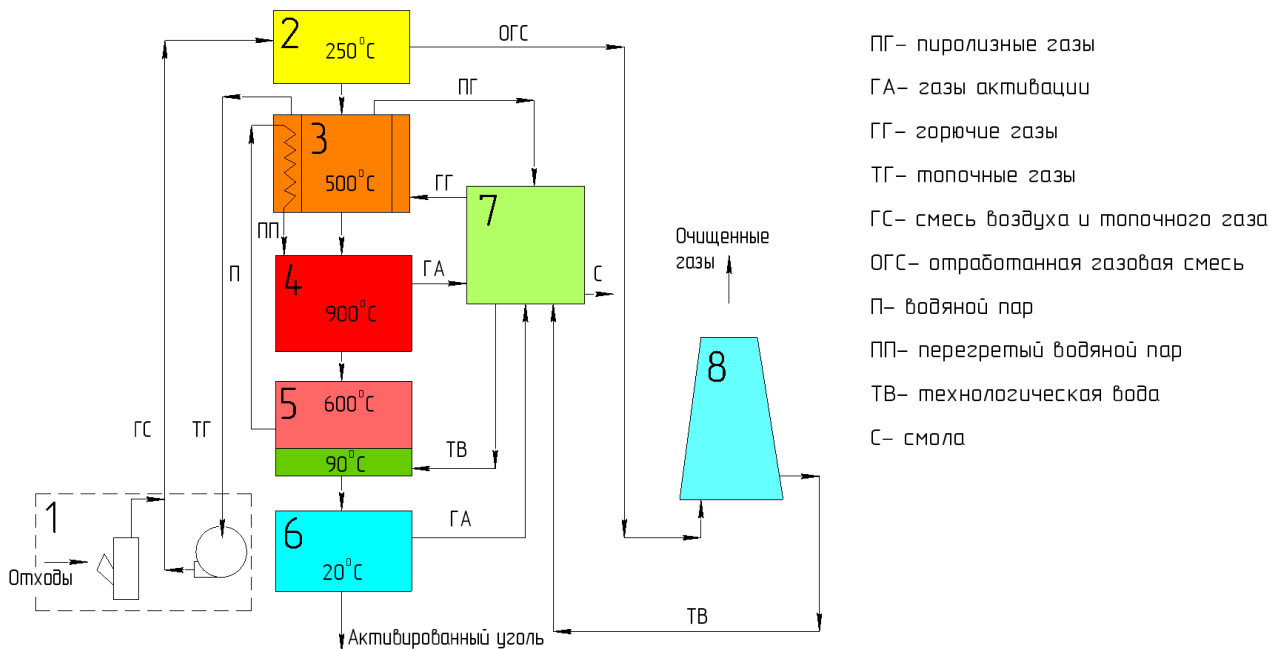


Рисунок 2.1 – Блок схема физической картины процесса получения активированного угля из растительных отходов: 1 – зона подготовки отходов; 2 – зона конвективной сушки; 3 – зона пиролиза; 4 – зона активации; 5 – зона конвективного охлаждения; 6 – зона вакуумной сушики; 7 – зона сепарации пиролизных газов; 8 – зона очистки газов

2.2 Формализация термохимического процесса разложения растительных отходов

Физическая картина процесса переработки растительных отходов крайне сложна. Для получения математического описания процесса их термохимического разложения приближенного к физической картине, необходимо сделать некоторые допущения.

Термохимическое разложение представляет собой комплекс

тепломассообменных процессов, осложненных химическими реакциями и превращениями, поэтому на этапе формализации механизма разложения растительного сырья вводим следующие допущения:

1. Рассматриваемые отходы имеют частицы, близкие по форме к пластине, поэтому рассматриваем одномерную симметричную задачу для бесконечной пластины.
2. Начальная температура и влажность растительных отходов одинакова по всему объему перерабатываемого сырья.
3. Процессы, описанные в физической картине разложения растительных отходов, осуществляются непрерывно.
4. Порозность слоя материала в зонах сушки и пиролиза остается постоянной.
5. Газовая фаза в любой момент времени и в любой расчетной точке идеально перемешана и находится в термодинамическом равновесии с твердой фазой.
6. Парогазовая смесь подчиняется закону идеального газа.
7. Скорость движения парогазовой смеси и перерабатываемого материала постоянна.

2.3 Математическое описание процесса переработки растительных отходов в активированный уголь

Все процессы, рассматриваемые в физической картине, связаны друг с другом, поэтому их необходимо рассматривать вместе. Математическое моделирование процесса производства активированного угля можно представить совокупностью взаимосвязанных стадий:

- математическое описание процесса конвективной сушки;
- математическое описание процесса пиролиза;
- математическое описание процесса паровой активации;
- математическое описание процесса конвективного охлаждения;
- математическое описание процесса вакуумной сушки.

Разделение процесса производства активированного угля на этапы значительно упрощает объем вычислений и позволяет адекватно описать

математически столь сложный физико-химический процесс.

2.3.1 Математическое описание процесса конвективной сушки отходов

Схема процесса конвективной сушки представлена на рис. 2.2. Измельченные отходы с начальной температурой T_{m0} и начальной влажностью U_0 через транспортный трубопровод поступают в накопитель. Затем через барабанный питатель непрерывно поступают в сушильную камеру шахтного типа, где отходы подвергают прогреву сушильным агентом при температуре 100 – 150 °С. Сушильным агентом является топочный газ, который поступает в сушильную камеру через коллектор подвода топочного газа. Равномерное омывание частиц отходов топочным газом происходит благодаря расположенным в шахматном порядке коробам подвода и отвода теплоносителя. Отработанный сушильный агент выводится через коллектор. Высушенные отходы через барабанный питатель попадают в зону пиролиза [87].

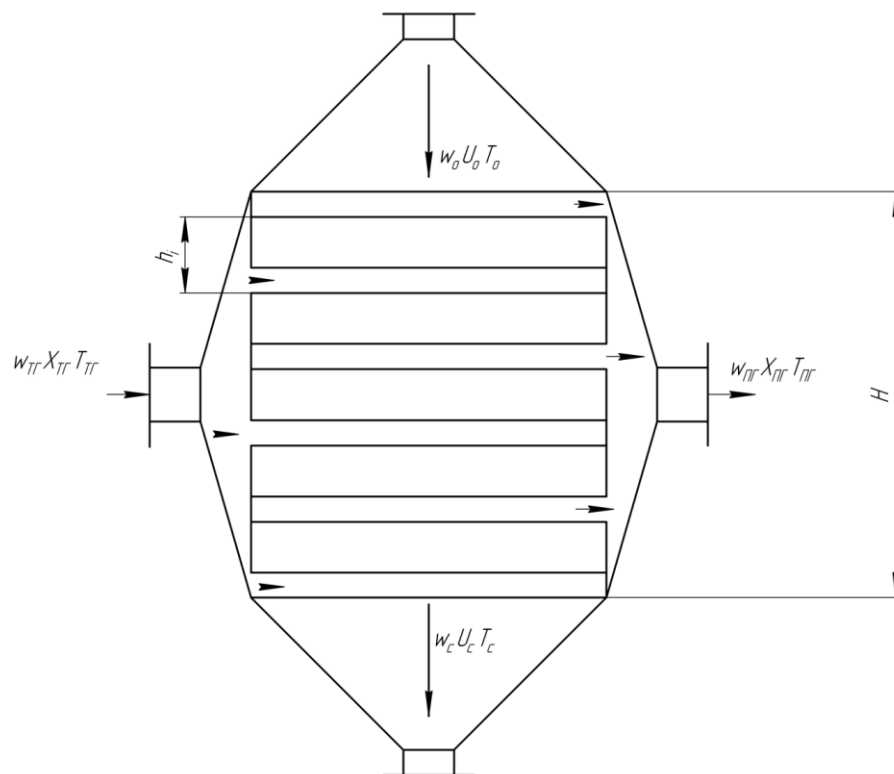


Рисунок 2.2 – Схема процесса конвекционной сушки дисперсных материалов

Для расчета процесса конвективной сушки растительных отходов

исходными данными являются: заданная производительность установки по сухому продукту B , м³/ч; начальная влажность отходов U_0 , %; начальная температура отходов, T_0 , С°; температура сушильного агента на входе T_c , С°; начальное влагосодержание сушильного агента $X_{г0}$.

Перед определением конструктивных размеров камеры сушки необходимо задать параметры данного процесса и тип дисперсных частиц, подвергаемых высушиванию.

Выбранное конструктивное оформление зоны сушки позволяет применить модель идеального смешения и рассмотреть процесс высушивания слоя как сушку одной частицы, применив систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса Лыкова А.В., которые записаны для бесконечной пластины [86]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} ; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r \varepsilon}{c_m} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} . \quad (2.2)$$

Схема краевых условий для решения системы уравнений (2.1), (2.2) приведена на рис. 2.3.

Начальные условия для решения уравнений (2.1), (2.2) имеют вид:

$$U(x,0) = U_0 , \quad (2.3)$$

$$T(x,0) = T_0 . \quad (2.4)$$

Для оценки температуры на поверхности частиц задаем граничное условие 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha (T_{\Gamma} - T_{\Pi}) . \quad (2.5)$$

Примем, что влагосодержание на поверхности частиц определяется влагосодержанием топочного газа φ в соответствии с уравнением Фрейндлиха [90]:

$$U(b,\tau) = a_{\varphi} \varphi^n . \quad (2.6)$$

Система уравнений (2.1) – (2.2) при краевых условиях (2.3) – (2.6) описывает процесс тепломассообмена в сушильной камере с перекрестным

движением фаз.

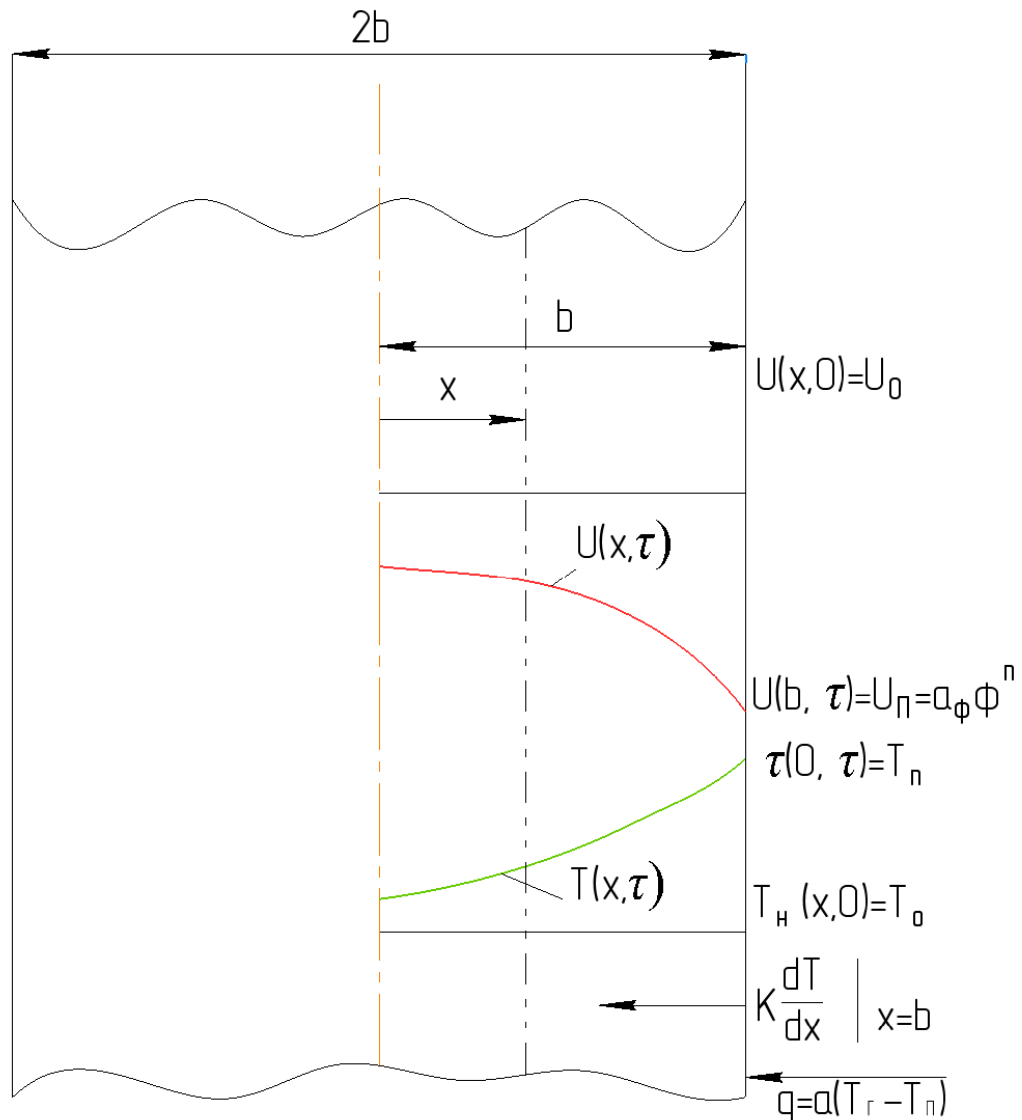


Рисунок 2.3 – Схема крайних условий процесса сушки симметричной пластины

2.3.2 Математическое описание процесса медленного пиролиза отходов

Высушенные отходы подают в камеру пиролиза с кондуктивным подводом тепла от выгорающих газов. По мере движения по пиролизной камере отходы термически разлагаются на карбонизат и пиролизные газы. Схема зоны пиролиза представлена на рис. 2.4 [75].

Исходными данными для расчета процесса медленного пиролиза являются температура процесса пиролиза (T_n , °C), заданная массовая производительность по сухим отходам (B , кг/ч) и вид отходов.

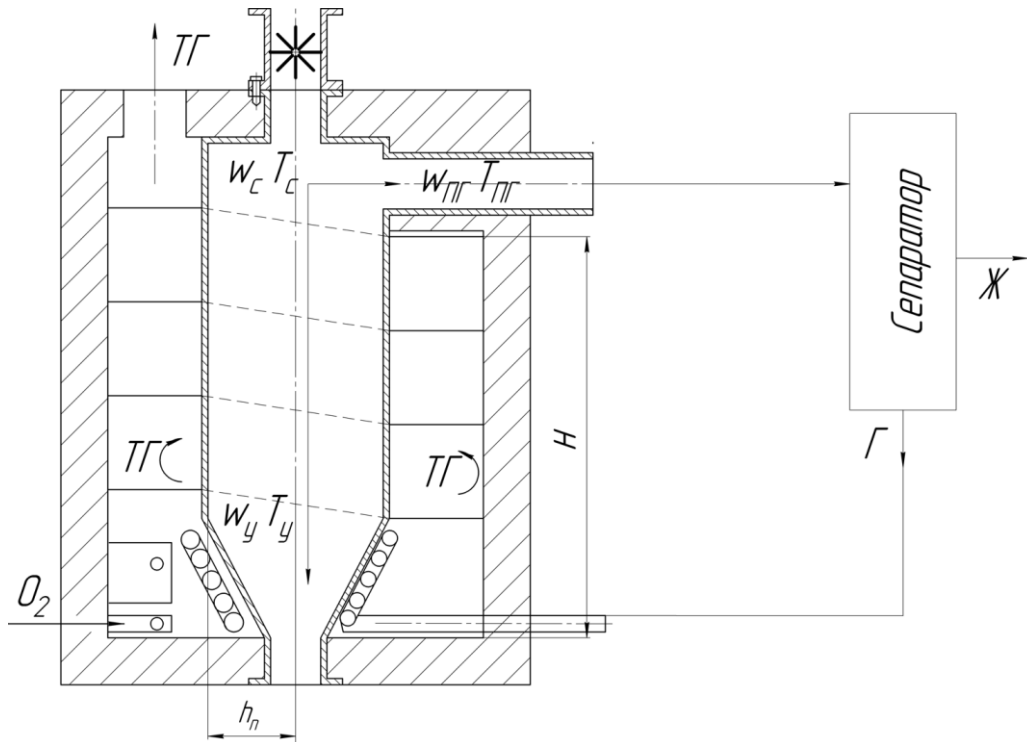


Рисунок 2.4 – Узел пиролиза растительных отходов

Перенос тепла в насыпном слое, представленном в виде бесконечной пластины, движущейся с постоянной скоростью W_M , описывается дифференциальным уравнением Фурье 2-го порядка:

$$W_M \cdot \rho_{сл} \cdot c_M \frac{\partial T_{сл}}{\partial h} = \frac{\partial T_{сл}}{\partial l} \cdot \left(\lambda_{сл} \cdot \frac{\partial T_{сл}}{\partial l} \right) + q_{xp}, \quad (2.7)$$

где h – текущая координата высоты насыпного слоя отходов в камере пиролиза, м; $\rho_{пл}$ – насыпная плотность частиц, кг/м³; c_M – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); $T_{сл}$ – температура слоя, С°; l – текущая координата расстояния от прилегающей стенки камеры пиролиза, м; $\lambda_{сл}$ – эффективный коэффициент теплопроводности слоя материала, Вт/(м·К) (зависит от порозности слоя, температуры, скорости движения биомассы в зоне пиролиза, его значение определяется экспериментальным путем); W_M – скорость движения отходов по пиролизной зоне, м/с; $q_{x.p}$ – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м²·с).

Сток (приток) тепла рассчитывается по выражению:

$$q_{x.p} = \sum_{i=1}^n q_i (-k_i \rho_i), \quad (2.8)$$

где q_i – удельная теплота превращения i компонента, Дж/кг; k_i – константа скорости i химической реакции, Дж/кг.

Уравнение 2.7 получено заменой продолжительности пиролиза частицы $\tau_{\text{п}}$ на текущую высоту насыпного слоя, поделенную на скорость движения частиц по камере пиролиза через соотношение:

$$\tau_{\text{п}} = h_{\text{п}} / W_{\text{М}} . \quad (2.9)$$

Схема краевых условий для решения уравнения (2.7) представлена на рис. 2.5.

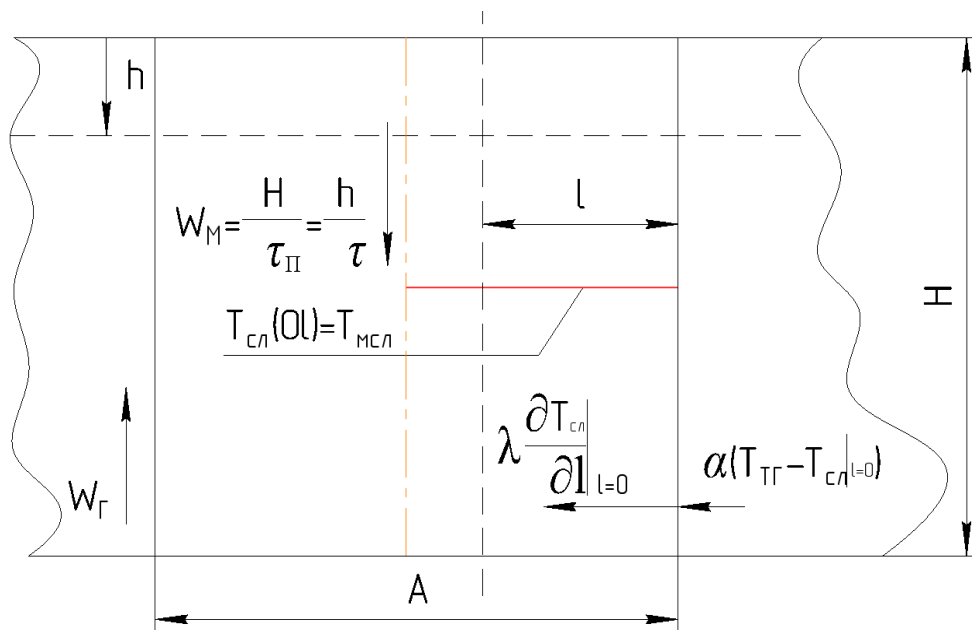


Рисунок 2.5 – Схема краевых условий уравнения Фурье

Начальная температура слоя измельченных органических отходов на входе в камеру пиролиза $T_{\text{сл}}(0,1)$ определяется конечной температурой материала после сушки $T_{\text{м.с}}$ соотношением:

$$T_{\text{сл.м}} = T_{\text{сл}}(0,1) = T_{\text{м.с}} . \quad (2.10)$$

Температура слоя материала, соприкасающегося с теплоподводящей поверхностью, определяется граничным условием третьего рода:

$$-\lambda_{\text{сл}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \Big|_{l=0} = \alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{сл}}|_{l=0}), \quad (2.11)$$

где, T_{Γ} – температура топочного газа, $^{\circ}\text{C}$.

Условие симметрии запишется соотношением:

$$\left. \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \right|_{l=\frac{A}{2}} = 0. \quad (2.12)$$

При разложении растительной биомассы образуются уголь и пиролизные газы. Массоперенос по сечению частицы можно записать отдельно для сырья, угля и пиролизных газов:

– для сырья:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial \tau} = -k_c \rho_c; \quad (2.13)$$

– для угля:

$$\frac{\partial \rho_y}{\partial \tau} = \varphi k_c \rho_y; \quad (2.14)$$

– для пиролизных газов:

$$\frac{\partial \rho_{\text{ПГ}}}{\partial \tau} = (1 - \varphi) k_c \rho_{\text{ПГ}}, \quad (2.15)$$

где ρ – удельная масса компонента, кг/м³ (с – сырья, у – угля, ПГ – пиролизных газов); φ – доля угля в одной частице, $\varphi = m_y/m_{\text{др}}$; k_c – константа скорости химических реакций разложения растительной биомассы.

Начальные условия для уравнений (2.13) – (2.15) имеют вид:

$$\rho_c = \rho_{c0}; \quad (2.16)$$

$$\rho_{\text{ПГ}} = 0; \quad (2.17)$$

$$\rho_y = 0. \quad (2.18)$$

2.3.3 Математическое описание процесса паровой активации угля

В установке производства активированного угля в камере активации происходит химический процесс, при котором уголь обрабатывается перегретым водяным паром с температурой 800 – 900 °С, при этом образуются микропоры. Схема камеры активации представлена на рис. 2.6 [85].

Камера активации – это шахтный аппарат. Подача пара в камеру происходит через коллектор подачи. Данная конструкция камеры позволит эффективно

обработать весь объем угля V_y перегретым паром. Размеры камеры активации определяются скоростью тепломассообменных процессов, осложненных химическими реакциями активации.

Активация проводится перегретым паром, полученным в результате охлаждения конечного продукта и отработанных топочных газов. Это позволяет сократить энергозатраты. При пиролизе происходит интенсивный массообмен, отходы теряют до двух третей массы, но объем сырья практически не уменьшается, поэтому можно сделать допущение, что:

$$V_y = k_y V_o, \quad (2.19)$$

где k_y – коэффициент усадки насыпного слоя угля после пиролиза (0,7 – 0,8).

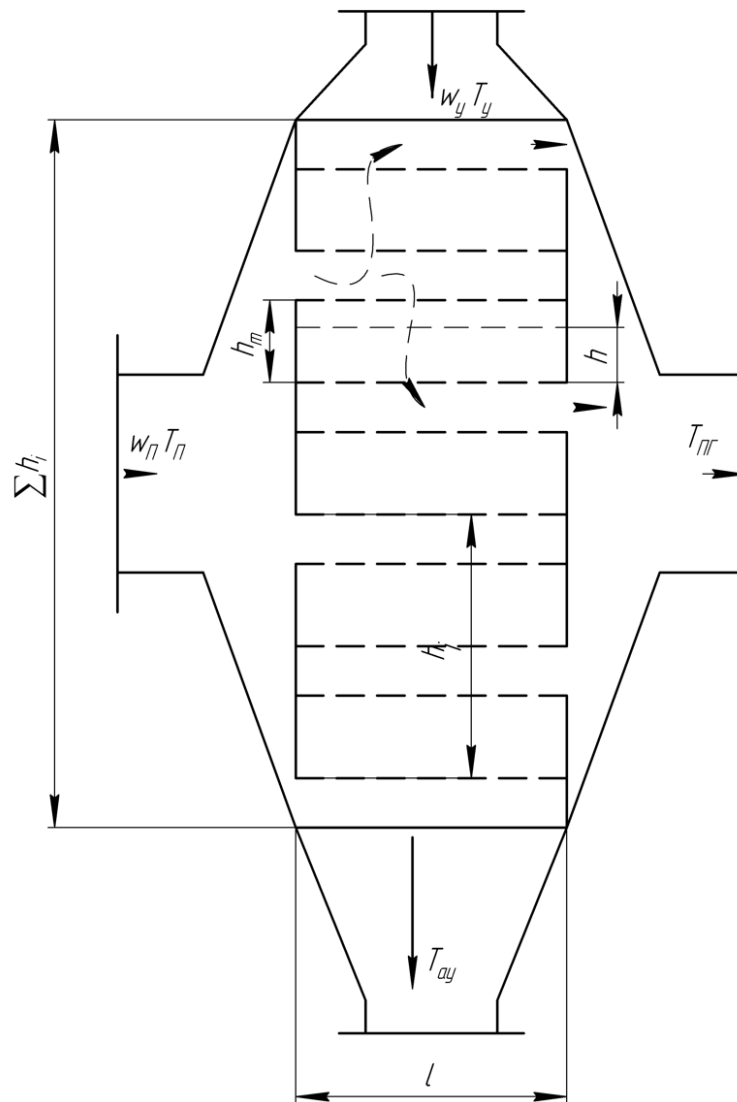


Рисунок 2.6 – Камера активации угля перегретым водяным паром

В аппаратах шахтного типа взаимодействие угля и пара происходит в перекрестном режиме, как показано на рис. 2.7.

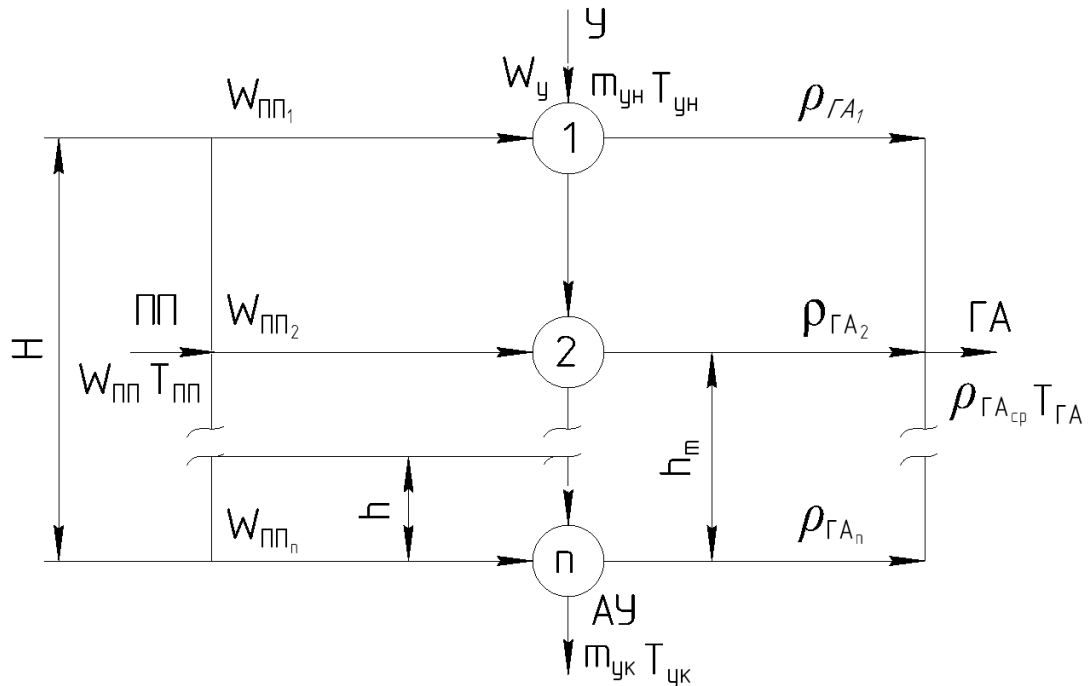


Рисунок 2.7 – Схема взаимодействия потоков угля и перегретого пара в аппарате шахтного типа

Плотность газов активации $\rho_{га}$ — это сумма потоков газов активации $\rho_{ган}$, деленная на их число:

$$\rho_{GA} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{GA}^i}{n}. \quad (2.20)$$

Рабочую высоту шахтного аппарата H можно определить суммой всех одномерных слоев угля h_m в шахтном аппарате:

$$H = n \cdot h_m. \quad (2.21)$$

Продолжительность процесса активации τ_A определяется решением системы дифференциальных уравнений теплопереноса в угле и перегретом паре. Для одномерного слоя систему уравнений можно записать соотношениями:

$$w_y \rho_y c_y \frac{\partial T_y}{\partial h} = \frac{\partial T_y}{\partial h} \left(\lambda_y \frac{\partial T_y}{\partial h} \right) + q_{xp} + \alpha (T_{II} - T_y), \quad (2.22)$$

$$w_{II} \rho_{II} c_{II} \frac{dT_{II}}{dh} = -\alpha (T_{II} - T_y), \quad (2.23)$$

где m_y — масса угля, кг; c_y — теплоемкость угля, Дж/(кг·К); λ_y — эффективный

коэффициент теплопроводности слоя угля, Вт/(м·К) (зависит от порозности слоя, температуры, скорости движения биомассы в зоне пиролиза, его значение определяется экспериментальным путем); ρ_y – насыпная плотность слоя угля, кг/м³; q_{xp} – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м²·с).

Насыпная плотность определяется из выражения:

$$\rho_y = m_y / V_y;$$

сток (приток) тепла определяется:

$$q_{xp} = q_0(-k_a \rho_y).$$

Изменение плотности угля и газов активации можно записать соотношениями:

$$w_y \frac{\partial \rho_y}{\partial h} = -k_a \rho_y, \quad (2.24)$$

$$w_{II} \frac{\partial \rho_{II}}{\partial h} = -k_a \rho_{II}, \quad (2.25)$$

$$w_{ГА} \frac{\partial \rho_{ГА}}{\partial h} = k_a \rho_{ГА}, \quad (2.26)$$

где k_a – константа скорости химических реакций активации угля.

Решение дифференциальных уравнений (2.22 – 2.26) происходит при крайних условиях, записанных в соответствии со схемой взаимодействия потоков угля и перегретого пара (рис. 2.7). Температура и плотность угля на входе в зону активации соответствуют параметрам ранее протекающего пиролиза:

$$T_y \Big|_{h=H} = T_{yH}, \quad (2.27)$$

$$\rho_y \Big|_{h=H} = \rho_{yH}, \quad (2.28)$$

Начальная температура перегретого пара задается в пределах 600 – 950 °С:

$$T_{II} \Big|_{h=0} = T_{TH}. \quad (2.29)$$

2.3.4 Математическое описание процесса конвективного охлаждения активированного угля

Зона охлаждения имеет две ступени. Первая ступень – камера конвективного и испарительного охлаждения. Охлаждение угля происходит технологической водой, образующейся при производстве активированного угля. Камера конвективного охлаждения активированного угля представлена на рис. 2.8. В камере испарительного охлаждения, в нижней части, на высоте $h_{и}$, м находится коллектор, через который подается вода для охлаждения угля до температуры $90 - 100^{\circ}\text{C}$. В зоне конвективного охлаждения (высотой – $h_{к}$, м) уголь охлаждается образовавшимся водяным паром. Пар, в свою очередь, перегревается до температуры $T_{ПК},^{\circ}\text{C}$ [82].

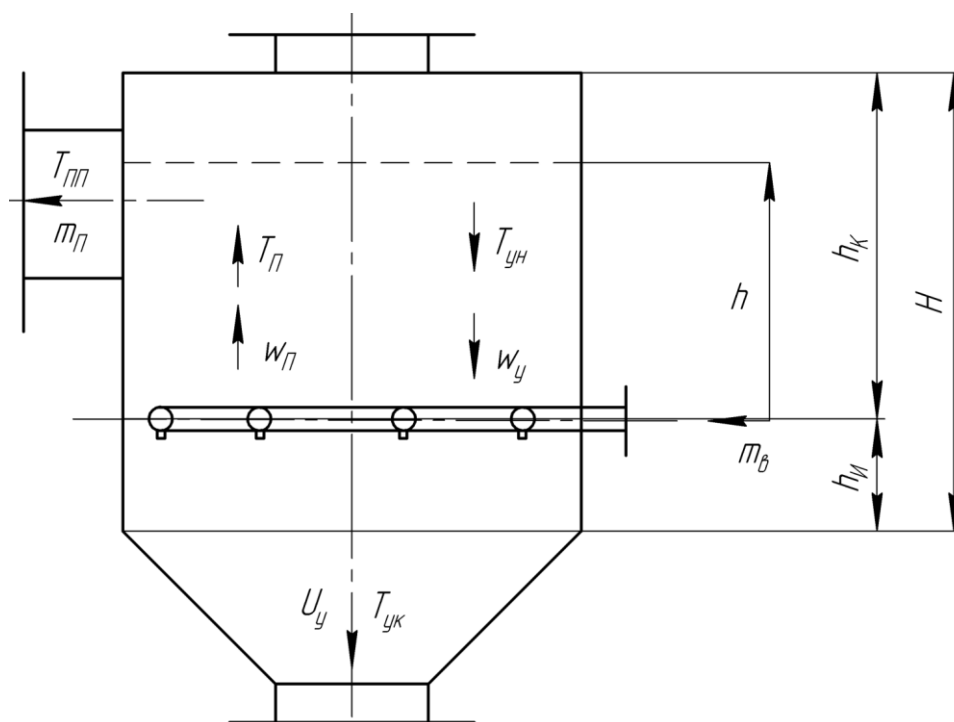


Рисунок 2.8 – Камера конвективного охлаждения

При активации уголь теряет значительную часть своей массы, но практически сохраняя первоначальный объем. Поэтому можно сделать допущение, что:

$$V_y = k_y V_o, \quad (2.30)$$

где κ_y – коэффициент усадки насыпного слоя угля в результате активации ($\kappa_y = 0,9$).

Масса воды, необходимой для обеспечения работы зоны испарительного охлаждения, рассчитывается по соотношению:

$$m_B = m_{II} + u_y \cdot m_y, \quad (2.31)$$

где m_B – масса воды, необходимая для обеспечения работы зоны испарительного охлаждения, кг; m_{II} – масса пара, образовавшегося в результате охлаждения угля, кг; u_y – влажность увлажненного угля, кг/кг.

При охлаждении уголь выделяет тепловую энергию, которая расходуется на нагрев воды до состояния кипения и на ее испарение:

$$m_y \cdot c_y \cdot \Delta T_y = m_B \cdot c_B (\Delta T_B) + m_{II} \cdot r. \quad (2.32)$$

Из совместных уравнений (2.31) и (2.32) можно определить массу пара, образующегося при орошении угля водой:

$$m_{II} = \frac{m_y \cdot c_y \cdot \Delta T_y - u_y m_y c_B (\Delta T_B)}{c_B \Delta T_B + r}, \quad (2.33)$$

где m_{II} – масса пара, образовавшегося в ходе контакта угля с водой.

Объемная производительность по пару:

$$Q_{II} = m_{II} \cdot (\rho_{II} / \tau). \quad (2.34)$$

Уравнение теплового баланса для зоны конвективного охлаждения угля и перегрева образовавшегося пара запишется соотношением:

$$m_{II} \cdot c_{II} \cdot \Delta T_{II} = m_y \cdot c_y \cdot \Delta T_y. \quad (2.35)$$

Температура перегретого пара определяется по соотношению:

$$T_{IIк} = \frac{m_y \cdot c_y \cdot \Delta T_y}{m_{II} \cdot c_{II}} + T_{IIм}. \quad (2.36)$$

Изменение температуры угля в процессе конвективного охлаждения:

$$\Delta T_y = T_{yH} - T_{yK}. \quad (2.37)$$

Процесс конвективного охлаждения одномерной частицы угля описывается дифференциальным уравнением Фурье:

$$w_y \frac{\partial T_y}{\partial h} = a_{TY} \frac{\partial^2 T_y}{\partial x^2}. \quad (2.38)$$

Решение уравнения 2.38 происходит при следующих краевых условиях:

$$T_{y|h \rightarrow h_k} = T_{yH}, \quad (2.39)$$

$$\lambda \frac{\partial T_y}{\partial x} \Big|_{x=R} = \alpha (T_{II} - T_y), \quad (2.40)$$

где T_{yH} – температура угля после зоны активации, °С; T_{II} – температура водяного пара, °С; λ – теплопроводность угля, Вт/(м·К); h – высота одномерного слоя активированного угля, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К (определяется из критериального уравнения для ламинарного движения газа); w_y – скорость угля, м/с.

Теплоперенос в перегретом паре определяется соотношением:

$$w_{II} \frac{dT_{II}}{dh} = \frac{\alpha}{c_{II} \cdot \rho_{II}} (T_y - T_{II}), \quad (2.41)$$

где w_{II} – скорость пара, м/с; ρ_{II} – плотность пара, кг/м³; T_y – температура угля, °С.

Решение уравнения 2.41 проводится при начальном условии:

$$T_{II|h=0} = T_{II}, \quad (2.42)$$

где T_{II} – температура пара на входе в зону конвективного охлаждения, °С.

2.3.5 Математическое описание процесса вакуумной сушки активированного угля

Сушка и окончательное охлаждение активированного угля происходят в вакуумной камере, в которой уголь охлаждается до 20 °С и сушится до остаточного влагосодержания 5 – 10 %. Узел вакуумной сушки активированного угля представлен на рис. 2.9 [92].

Для крупнодисперсного угля процессы сушки и охлаждения описываются уравнениями тепломассопереноса:

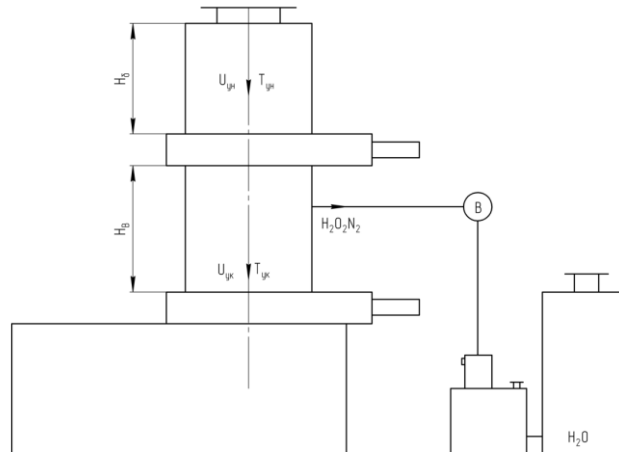


Рисунок 2.9 – Узел вакуумной сушки активированного угля

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T_y}{\partial x^2}, \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial T_y}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{r}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau}. \quad (2.44)$$

Начальные условия для уравнения (2.43) – (2.44) определяются влажностью и температурой после зоны испарительного охлаждения:

$$U(x,0) = U_{yn}, \quad (2.45)$$

$$T_y(x,0) = T_{yn}. \quad (2.46)$$

Граничные условия определяются из уравнений Антуана и Фрейндлиха:

$$T_y(R\tau) = \frac{B}{A - \ln p}, \quad (2.47)$$

$$U(R\tau) = a \left(\frac{P}{P_H} \right)^c. \quad (2.48)$$

При сушке мелкодисперсного активированного угля дифференциальные уравнения (2.43) – (2.44) сводятся к уравнению:

$$cdT = rdU. \quad (2.49)$$

Теплоемкость влажного угля определяется соотношением:

$$c = c_y + c_g U. \quad (2.50)$$

Скрытая теплота парообразования в зависимости от температуры определяется из выражения:

$$r = r_0 + (c_{II} - c_e). \quad (2.51)$$

2.4 Алгоритм расчета процесса получения активированного угля

Задачей алгоритма расчета является совместное решение уравнений, описывающих процесс термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь с целью определения внутренних параметров процесса при заданной совокупности внешних факторов.

Блок-схема алгоритма расчета процесса получения активированного угля из отходов растительного происхождения, включающая пять стадий процесса, представлена на рис. 2.10. Алгоритм разбит на блоки, каждый из которых соответствует определенной стадии процесса.

В первом блоке осуществляется ввод теплофизических параметров растительного сырья и парогазовых теплоносителей, физико-механических характеристик насыпного слоя частиц измельченных растительных отходов. Вводятся начальные и граничные условия процесса получения активированного угля.

Во втором блоке моделируется процесс конвективной сушки растительных отходов, протекающий в камере шахтного типа. В результате расчета определяются: температура и влажность насыпного слоя отходов; количество топочного газа, необходимое для высушивания отходов; скорость сушки.

В третьем блоке ведется расчет процесса пирогенетического разложения растительного сырья. В результате расчета определяется динамика температурного поля и конечное содержание углерода в насыпном слое. Завершение расчета происходит при условии полного превращения растительного сырья в углерод.

В четвертом блоке моделируется процесс активации угля водяным перегретым паром, когда происходят эндотермические процессы окисления тяжелых смолистых примесей, оставшихся после пиролиза, а также углерода водяным перегретым паром.

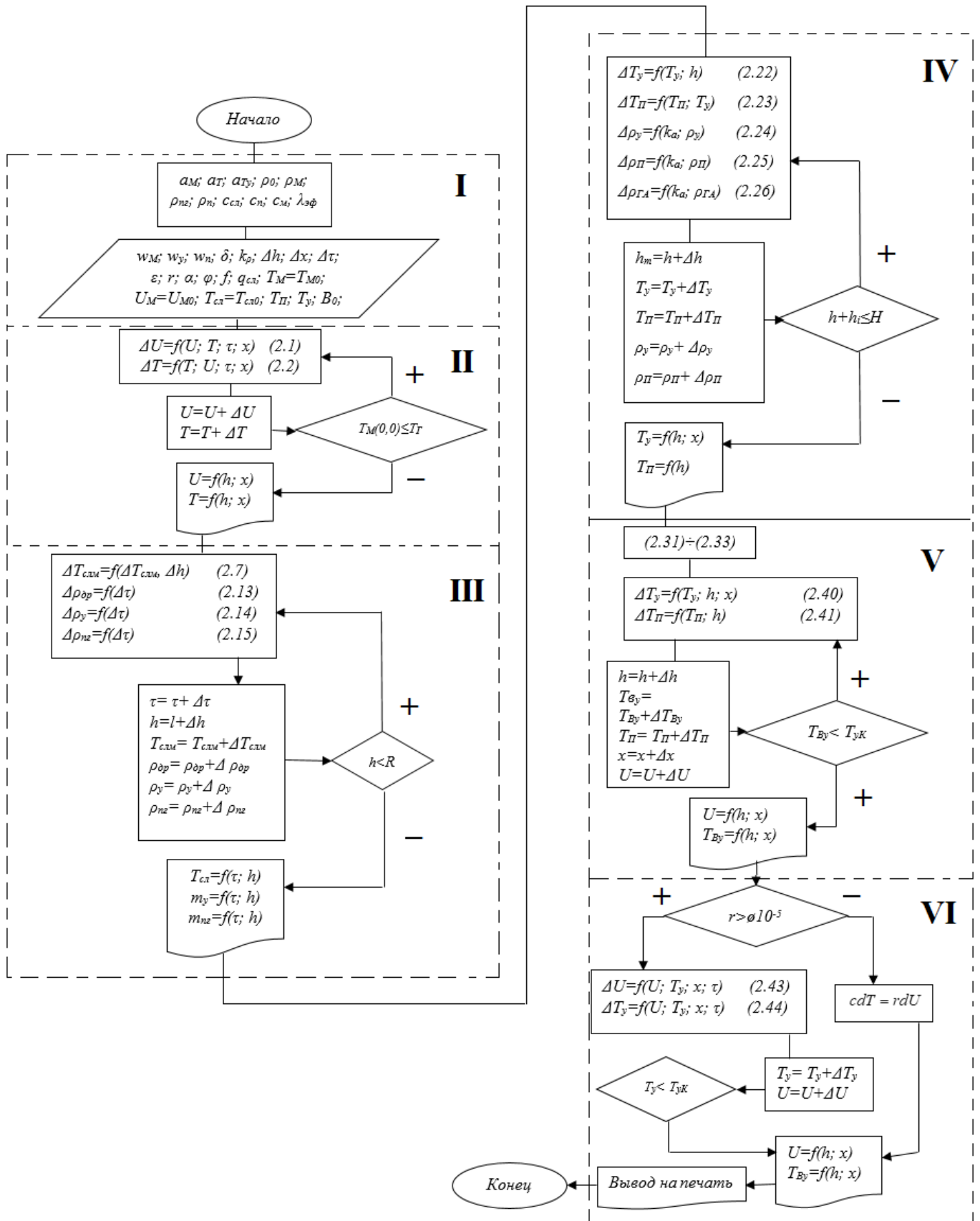


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритма расчета процесса получения активированного угля из растительных отходов

Время активации определяется из априорной информации. В результате расчета определяется количество пара, необходимого для активации угля, полученного после пиролиза. Рассчитывается скорость выхода газов активации из углеродистого остатка. Определяется температура активированного угля и пара по слоям.

В пятом блоке рассчитывается процесс конвективного охлаждения активированного угля водяным паром и процесс испарительного охлаждения технологической водой. Определяются температура активированного угля и количество воды, необходимое для охлаждения слоя активированного угля до требуемой температуры.

В шестом блоке происходит моделирование сушки и охлаждения активированного угля понижением давления среды. Определяются конечная температура и влажность активированного угля.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что термохимическая переработка растительных отходов агропромышленного комплекса в активированный уголь является актуальной задачей. Процесс получения активированного угля из легниноцеллюлозной биомассы включает две основные стадии, а именно пиролиз биомассы и последующая активация карбонизатов.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

Каждая стадия процесса получения активированного угля чрезвычайно сложна и зависит от многих факторов. Для полного понимания кинетики и технологических параметров данного процесса требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований, необходимых для разработки технологичного аппаратурного оформления, а также определения оптимальных параметров эксплуатации оборудования.

Целью экспериментальных исследований являются проверка достоверности принятых ранее теоретических представлений о механизме процесса, установление адекватности разработанного математического описания изучаемого процесса получения активированного угля, а также получение априорной информации для проектирования установки по производству угля.

В данной главе дано описание экспериментального оборудования и приведены результаты исследований по определению кинетических параметров процесса переработки растительных отходов агропромышленного комплекса в активированный уголь.

3.1 Описание экспериментального оборудования для исследования процесса получения активированного угля

Для проверки математической модели на достоверность физической картине процесса и физического моделирования различных этапов термохимического процесса получения активированного угля спроектирована и собрана экспериментальная установка.

Схема и внешний вид экспериментальной установки представлены на рис. 3.1. Внешний вид отдельных узлов стенда представлен на рис. 3.2, 3.3.

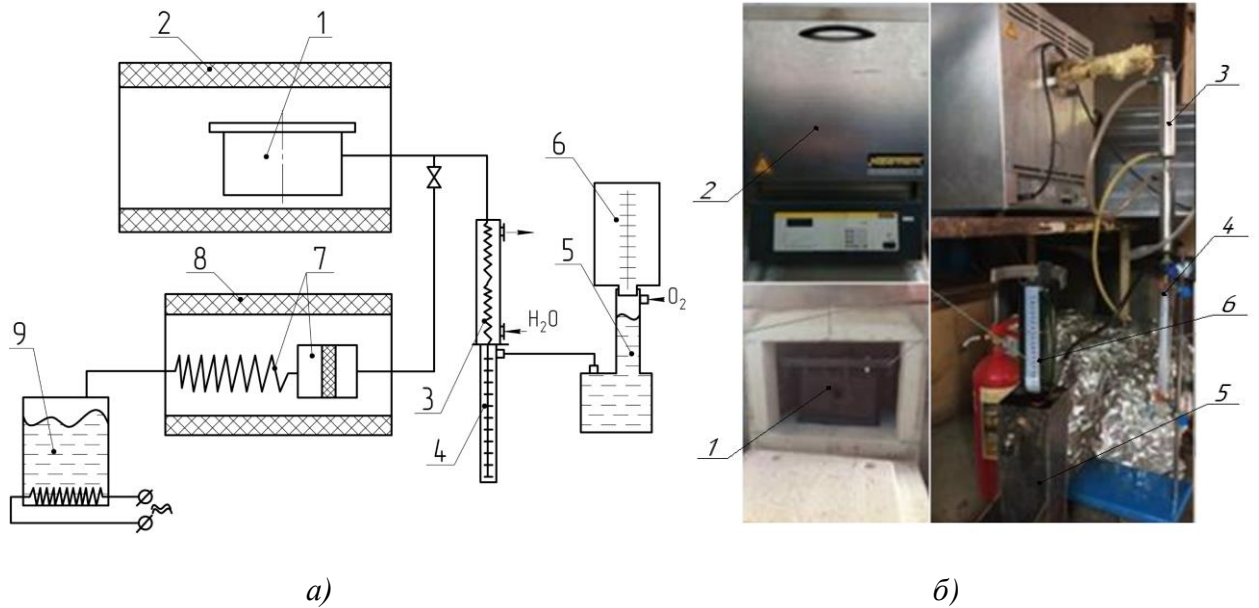


Рисунок 3.1 – Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки для получения активированного угля из растительных отходов: 1 – камера пиролиза; 2 – муфельная печь; 3 – сепаратор; 4 – мерник дистиллята; 5 – гидрозатвор; 6 – сборник газа; 7 – сборный узел активации; 8 – муфельная печь; 9 – генератор пара.

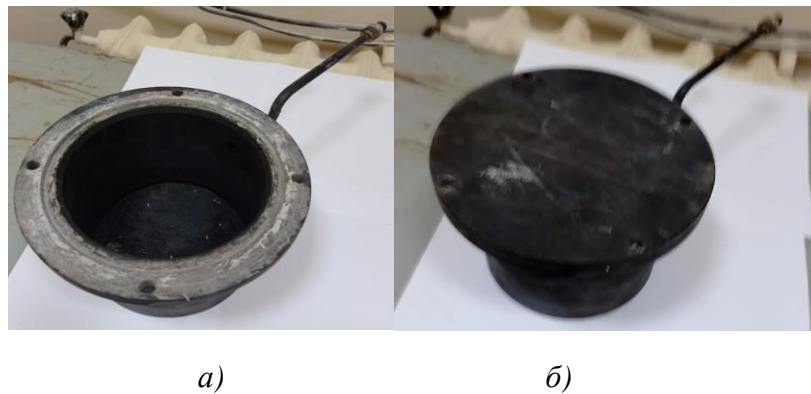


Рисунок 3.2 – Внешний вид камеры пиролиза: а – без крышки; б – с крышкой

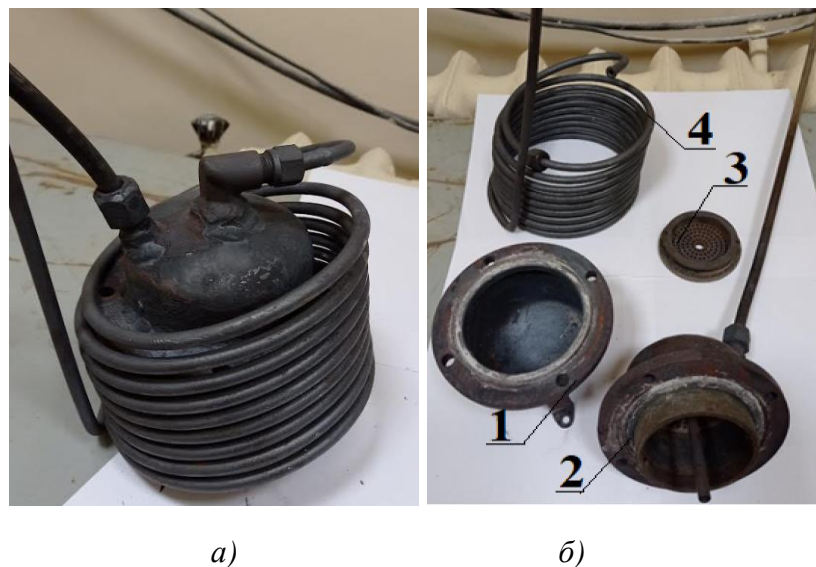


Рисунок 3.3 – Внешний вид узла активации, а – в собранном виде; б – в разобранном виде: 1 – нижняя часть; 2 – верхняя часть; 3 – съемная перфорированная крышка; 4 – змеевик

Экспериментальный стенд для получения активированного угля из растительных отходов состоит из камеры пиролиза 1, муфельной печи 2, сепаратора 3, мерника дистиллята 4, гидрозатвора 5, сборника газа 6, сборного узла активации 7 (состоит из нижней части 1, верхней части 2 со съемной перфорированной крышкой 3 и змеевика 4), муфельной печи 8, генератора пара 9.

Исследования адекватности математической модели сушки растительного сырья проводились в лабораторном сушильном шкафу, представленном на рис. 3.4. Дробление отходов скорлупы грецкого ореха производилось в роторно-ножевом измельчителе (см. рис. 3.5). Диспергирование лузги подсолнечника для последующей грануляции производилось в дефибраторе, представленном на рис. 3.6. Грануляция лузги подсолнечника производилась в лабораторном экструдере WL 15, представленном на рис. 3.7. Определение теплопроводности осуществлялось на приборе ИТП-МГ4 250, изображенном на рис. 3.8.



Рисунок 3.4 – Лабораторный сушильный шкаф



Рисунок 3.5 – Роторно-ножевой измельчитель



Рисунок 3.6 – Дефибратор



Рисунок 3.7 – Лабораторный экструдер WL 15



Рисунок 3.8 – Прибор ИТП- МГ4 (250)

3.2 Методики проведения экспериментов и обработка экспериментальных данных

В качестве лабораторных образцов для получения активированного угля использовались лузга семян подсолнечника (регион сбора Ростовская область), скорлупа грецкого ореха (сорт Идеал, регион сбора Татарстан), костра масличного льна (регион сбора Томская область), которые представлены на рис. 3.9. Структурный состав исследуемых отходов представлен в таблице 1.1.



а)

б)

в)

Рисунок 3.9 – Исследуемые растительные отходы: а – лузга семян подсолнечника; б – скорлупа грецкого ореха; в – костра масличного льна

Дополнительно были подготовлены образцы дробленной скорлупы грецкого ореха фракцией 4 – 10 мм, толщиной 2 мм и угольные гранулы, полученные путем пиролиза лузги семян подсолнечника с последующим диспергированием карбонизатов в частицы 1 – 2 мм и экструдированием гранул длиной 4 – 6 мм,

диаметром $2,8 \pm 0,3$ мм. Подготовленные образцы представлены на рис. 3.10.

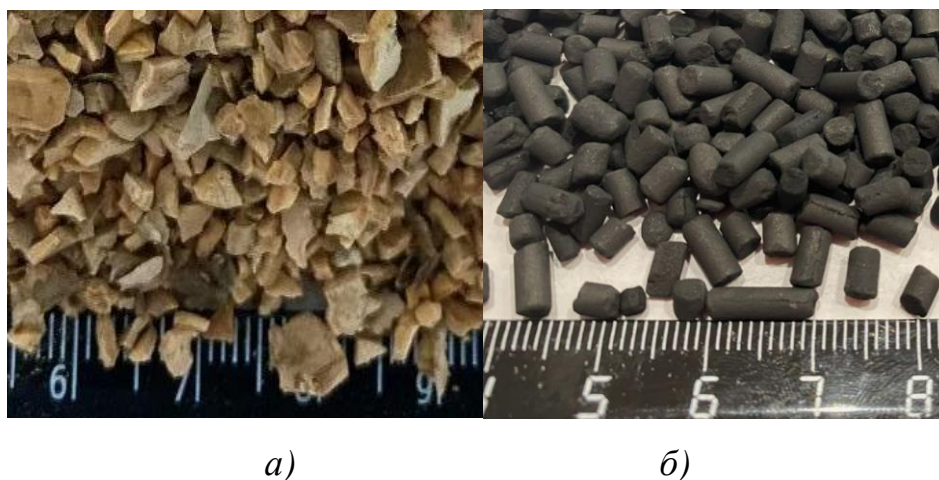


Рисунок 3.10 – Образцы дробленой скорлупы грецкого ореха (а) и угольных гранул из лузги семян подсолнечника (б)

Гранулы угля имели плотность 600, 900, 1200 кг/м³. Определение плотности гранул осуществлялось методом вытесненного объема.

В качестве эталона для сравнения полученных активированных углей из исследуемых растительных отходов были приняты: уголь активный древесный дробленый БАУ-А ГОСТ 6217-74, уголь активный осветляющий древесный порошкообразный ОУ-А ГОСТ 4453-74, уголь активированный рекуперационный АР-А ГОСТ 8703-74. На рис. 3.11 представлен внешний вид эталонов.

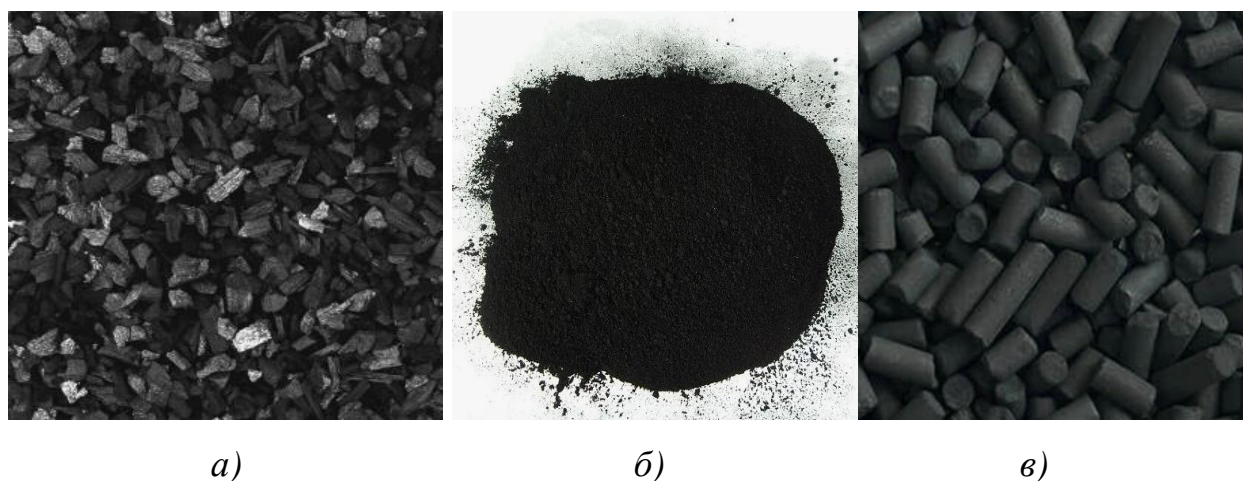


Рисунок 3.11 – Эталоны активированных углей: а – БАУ-А ГОСТ 6217-74; б – ОУ-А ГОСТ 4453-74; в – АР-А ГОСТ 8703-74

Сушка исследуемых отходов проводилась в сушильном шкафу (рис. 3.4). Слой отходов высотой 50 ± 5 мм и диаметром 70 мм был высушен до достижения воздушно сухого состояния при поддерживаемой температуре в сушильном шкафу $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Масса сухого слоя отходов была измерена на электронных весах.

Серия экспериментов по конвективной сушке проводилась при помощи регулируемых сит и промышленного фена, которые изображены на рис. 3.12. Было подготовлено следующее сырье: лузга семян подсолнечника, тип частицы – пластина со средним размером 8×4 мм и толщиной 1 мм; костра масличного льна, тип частицы – пластина с размером, определенным ситовым анализом $8 \pm 2 \times 2$ мм и толщиной 0,5 мм; скорлупа грецкого ореха дробленая (рис. 3.10 а). Влажность слоя отходов $50 \pm 10\%$. Продолжительность процесса сушки определялась из данных математического моделирования процесса конвективной сушки исследуемых растительных отходов. Физическим экспериментом проверялась адекватность решения математической модели.



Рисунок 3.12 – Оборудование для проведения экспериментов по конвективной сушке слоя растительных отходов

Из представленного выше оборудования (рис. 3.12) была собрана установка по конвективной сушке дисперсного слоя отходов, схема которой представлена на рис. 3.13.

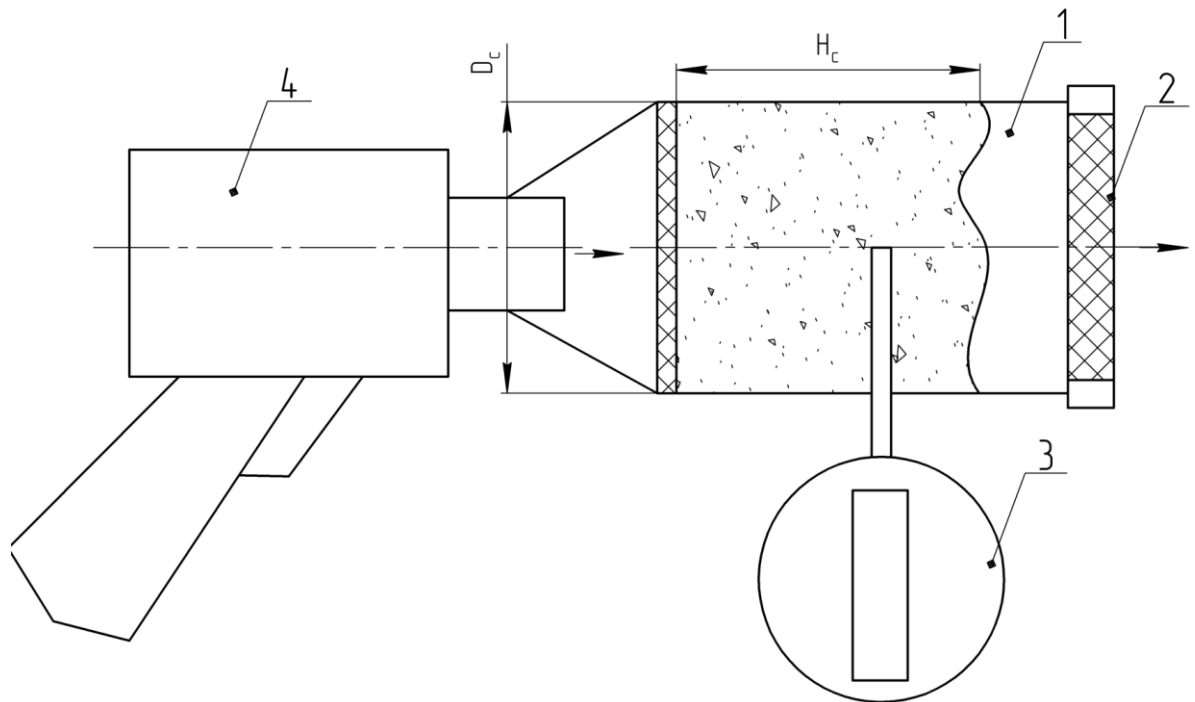


Рисунок 3.13 – Схема установки конвективной сушки дисперсных растительных отходов: 1 – емкость; 2 – перфорированная стенка; 3 – термонара; 4 – фен строительный

Продолжительность процесса сушки дисперсных отходов в установке (рис. 3.13) определялась исходя из решения математической модели конвективной сушки (см. раздел 2.3.2). Затем слой отходов взвешивался на электронных весах. Разница в удельной массе между влажными и сухими отходами определялась как степень удаления влаги из растительного сырья.

Определение коэффициента теплопроводности осуществлялось на приборе ИТП - МГ4 250 по следующей методике. Образец высушенного насыпного материала помещался в прямоугольную емкость, дно и крышка которой изготовлены из тонкого листового материала. Длина и ширина емкости должны быть равны соответствующим размерам рабочих поверхностей плит прибора, глубина – толщине испытуемого образца. Толщина образца насыпного материала должна быть как минимум в 10 раз больше среднего размера гранул, зерен и чешуек, из которых состоит данный материал. Пробу насыпного материала делят на четыре равные части, которые поочередно насыпают в ящик, уплотняя каждую часть так, чтобы она заняла соответствующую ей часть внутреннего объема ящика, не досыпая до его краев 2 – 3 мм. Ящик закрывают

крышкой так, чтобы она легла на испытуемый материал и взвешивают ящик с образцом насыпного материала. По измеренному значению массы емкости с образцом и предварительно измеренным значениям внутреннего объема и массы пустой емкости вычисляют плотность образца насыпного материала. Погрешность измерения массы и размера образцов не должна быть более $\pm 0,5$ %.

Экспериментальные исследования по пирогенетическому разложению растительного сырья проводились на установке (рис. 3.1), позволяющей определить удельные массы и скорости образования углерода, пиролизного дистиллята, несконденсированного газа в зависимости от режимов процесса пиролиза. Скорлупа грецкого ореха дробилась до толщины частицы 2 мм. Частицы взвешивались на аналитических весах и закладывались в пиролизную камеру 1. Прогрев камеры осуществлялся в муфельной печи 2 до 450 – 650 °С. В процессе пиролиза выделялись пиролизные газы, которые направлялись в сепаратор 3, где разделялись на дистиллят и горючий газ. Дистиллят собирался в мернике дистиллята 4, газ переходил в гидрозатвор 5, из гидрозатвора газ переходил в газосборник – мерник газа. Твердый остаток после завершения процесса вынимали из камеры и взвешивали на аналитических весах. Дистиллят взвешивали с учетом веса колбы. Объем газа считывали с показаний мерника газа.

Исследование процесса активации проводилось в следующем порядке. Определенная часть углеродистого остатка загружалась в верхнюю часть узла активации 1 и закрывалась перфорированной крышкой. Узел собирался согласно рисунка 3.4а и помещался в муфельную печь 2. Муфельная печь разогревалась до температуры 900 °С. Подача пара осуществлялась из парогенератора 3 в змеевик, который прогревался паром. Через перфорированную крышку пар орошал уголь, в результате чего из него выделялись газы активации, которые вместе с водяным паром разделялись на несконденсированный газ, воду и тяжелые примеси, не удалившиеся из углерода при пиролизе.

Исследование конвективного охлаждения крупнодисперсного

активированного угля происходило в установке, изображенной на рис. 3.14.

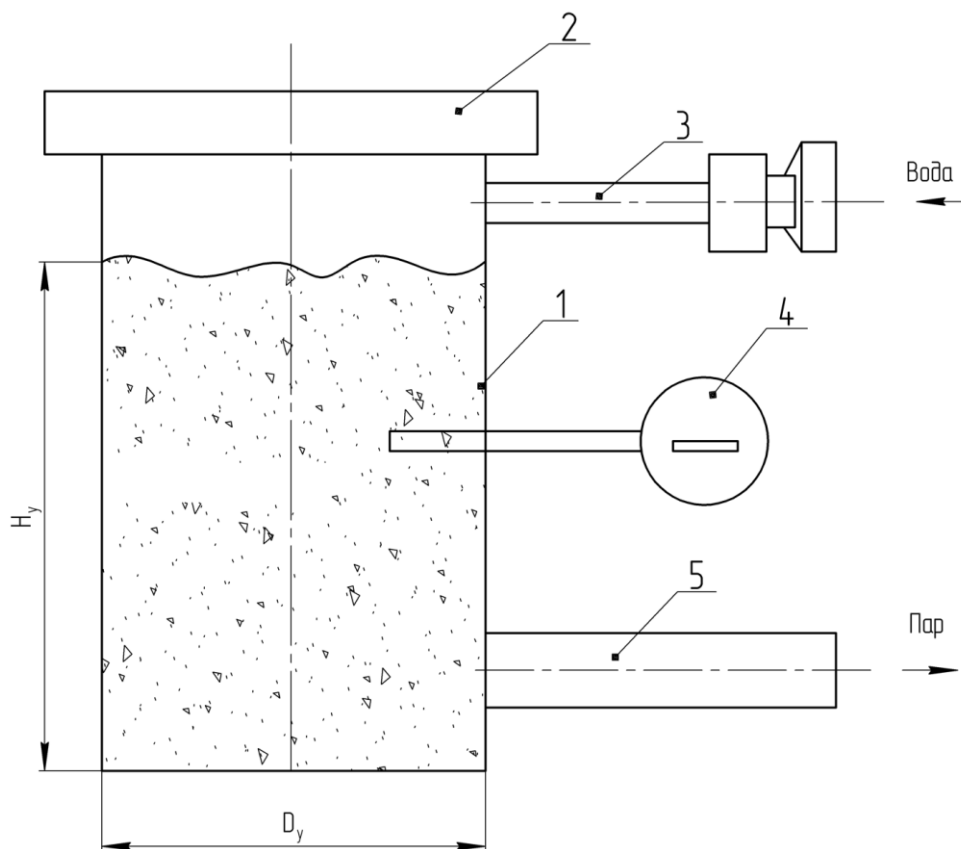


Рисунок 3.14 – Установка конвективного охлаждения активированного угля: 1 – емкость; 2 – крышка; 3 – патрубок подачи воды; 4 – термопара; 5 – патрубок отвода пара

Слой активированного угля высотой 40 ± 5 мм помещали в емкость 1, диаметр которой составлял 40 мм. Емкость 1 герметизировали крышкой 2 болтовым соединением. Собранную установку помещали в муфельную печь и разогревали до температуры 850 ± 50 °С. Затем муфельную печь выключали и открывали, к патрубку подачи воды 3 подавали воду для охлаждения активированного угля. Водяной пар, образующийся при контакте с углем выходил через патрубок отвода пара 5. Температура слоя активированного угля фиксировалась термопарой с головкой датчика преобразователя ТТРСС-22 тип R ТПП от 0 до 1600 °С. Изменение цифровых показателей головки фиксировалось на секундомере. Охлаждение угля происходило до температуры 100 ± 5 °С.

Вакуумную сушку активированного угля проводили в вакуумной камере с насосом (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Вакуумная камера с насосом VK Glass

Активированный уголь с температурой 100 ± 5 °С засыпали в вакуумную камеру. Согласно аналитическим данным, полученным при решении математической модели, откачивали воздух, тем самым сушили и охлаждали активированный уголь до температуры 20 °С.

Активированный уголь после охлаждения взвешивали на аналитических весах. Зольность определялась методом сжигания образца в муфельной печи. Равновесная активность по толуолу определялась согласно ГОСТа 8703-74. Адсорбционная активность по йоду определялась согласно ГОСТа 6217-74. Прочность на истирание определялась по ГОСТ 16188-70. Адсорбционная активность по метиленовому голубому или метиленовому синему, метиленовому оранжевому, мелассе определялись согласно ГОСТ 4453-74.

3.3 Анализ результатов исследований физического и аналитического моделирования

В данном разделе представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований по получению активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса.

3.3.1 Анализ результатов исследований конвективной сушки растительных отходов

В результате исследований теплопроводности растительных отходов были получены зависимости изменения коэффициентов теплопроводности слоя

частиц: костры льна, лузги семян подсолнечника и дробленой скорлупы грецкого ореха с различными значениями температуры, которые представлены на рис. 3.16.

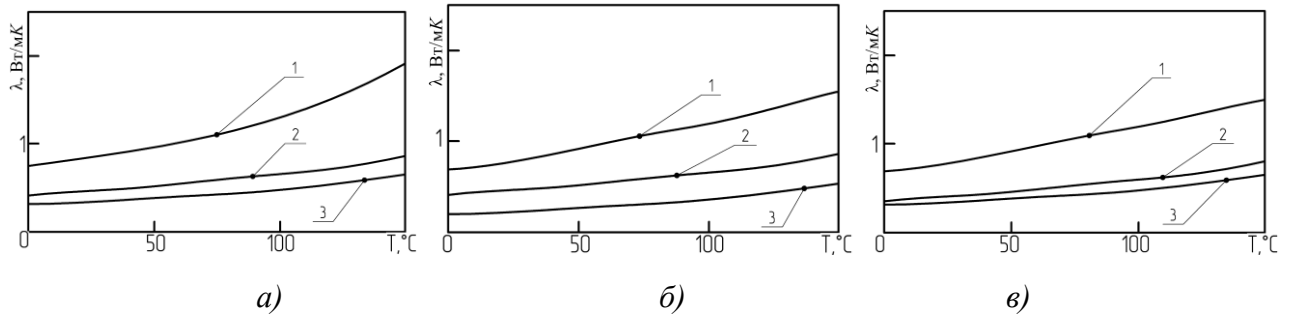


Рисунок 3.16 – Зависимость теплопроводности от температуры: а – костры льна; б – скорлупы грецкого ореха; в – лузги семян подсолнечника при различной влажности (1 – 50 %, 2 – 10 %, 3 – 0 %)

На рисунке 3.17 представлено распределение влагосодержания в различных временных слоях по сечению сыпучего слоя костры льна толщиной 50 мм, с начальной влажностью 50 %, с температурой сушильного агента 150 °С. Как видно по распределению, влага с поверхности удаляется довольно быстро, однако для полного высушивания сыпучего слоя потребуется длительное время.

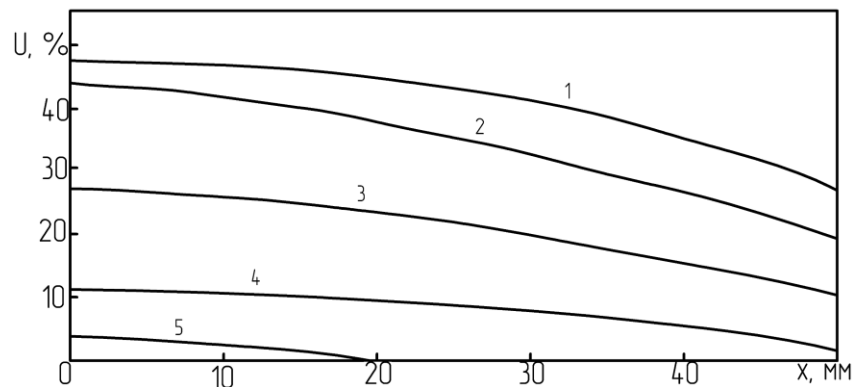


Рисунок 3.17 – Распределение влагосодержания по сечению слоя в различных временных слоях: 1 – $\tau=2$ мин; 2 – $\tau=4$ мин; 3 – $\tau=8$ мин; 4 – $\tau=18$ мин; 5 – $\tau=57$ мин

На рис. 3.18 представлены расчетные и экспериментальные зависимости изменения влажности сыпучего слоя: дробленой скорлупы грецкого ореха, лузги семян подсолнечника и костры масличного льна, полученные путем аппроксимации аналитических данных из распределения влагосодержания рис. 3.16 [90].

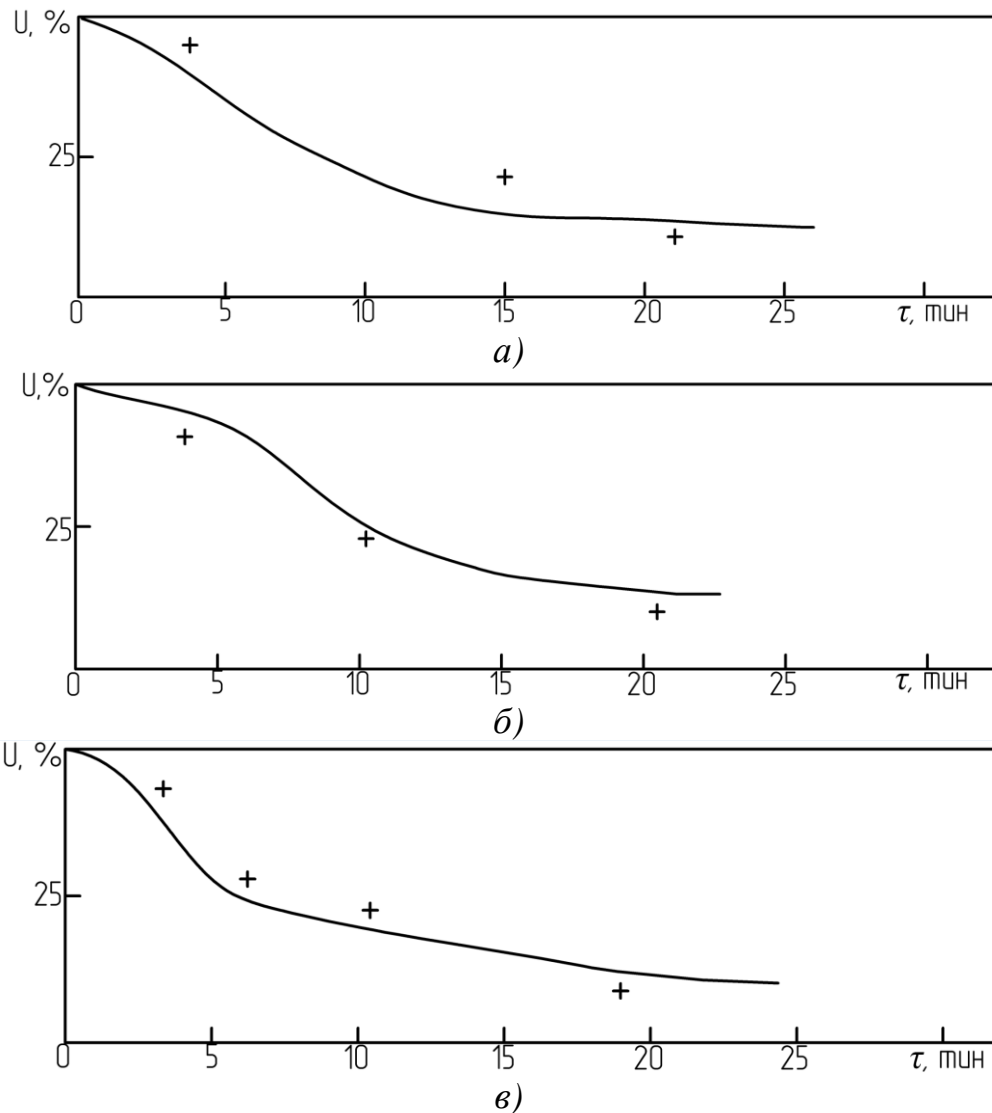


Рисунок 3.18 – Кинетическая зависимость изменения влажности слоя: а – лузги семян подсолнечника; б – скорлупы грецкого ореха; в – костры масличного льна

Линиями на рис. 3.18 показаны расчетные кривые, точками показаны экспериментальные данные. Расхождение расчётных и экспериментальных данных составило не более 12 %. Как видно по кривым, исследуемое сырье имеет различную кинетику при удалении влаги на начальных этапах сушки.

3.3.2 Анализ результатов исследований по пиролизу растительных отходов

Были проведены исследования термического разложения отходов агропромышленного комплекса – льняной костры, скорлупы грецкого ореха. На рис. 3.19 представлены результаты исследования продолжительности термического разложения от влажности исходного сырья.

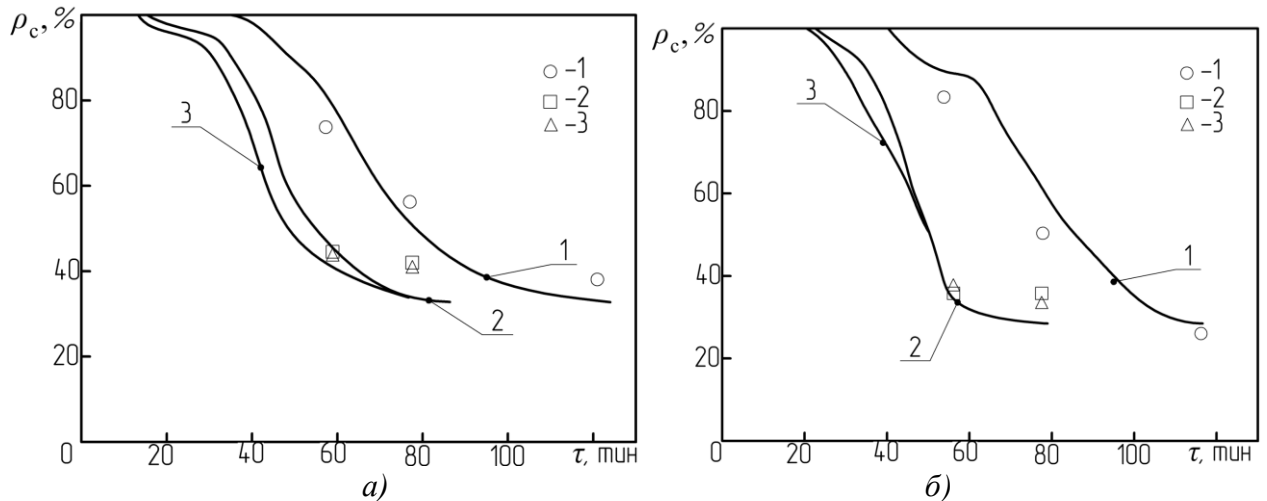


Рисунок 3.19 – Кинетическая зависимость термического разложения сырья: а – скорлупа грецкого ореха; б – костра масличного льна при различной влажности исходного сырья (1 – 40 %, 2 – 10 %, 3 – 5 %)

Линиями показаны аналитические кривые, полученные при математическом моделировании кондуктивного пиролиза. Точками показаны экспериментальные данные. Расхождение аналитических и экспериментальных данных составило не более 11 %. Удельная масса твердого остатка при пиролизе костры составила 33 %, при пиролизе скорлупы грецкого ореха 41 %, что соответствует литературным данным [101]. На удельный выход твердого остатка высокая влажность влияния не оказывает, однако влажность значительно влияет на продолжительность термического разложения. Как видно по кривым, значение влажности 10 % и менее оказывает несущественное влияние на продолжительность термического разложения, так же дает значительно меньшую погрешность аналитических данных от экспериментальных. Исходя из результатов исследований и известной априорной информации [145, 157] можно сделать вывод, что наиболее рационально перед пиролизом отходы высушивать до влажности 7 – 10 %, дальнейшее уменьшение влажности не приводит к какому-либо существенному влиянию на процесс термического разложения.

На рис. 3.20 представлены результаты выхода карбонизированного остатка, полученного методом пиролиза из костры льна, лузги семян подсолнечника и скорлупы грецкого ореха, зависящие от температуры пиролиза и скорости прогрева сырья.

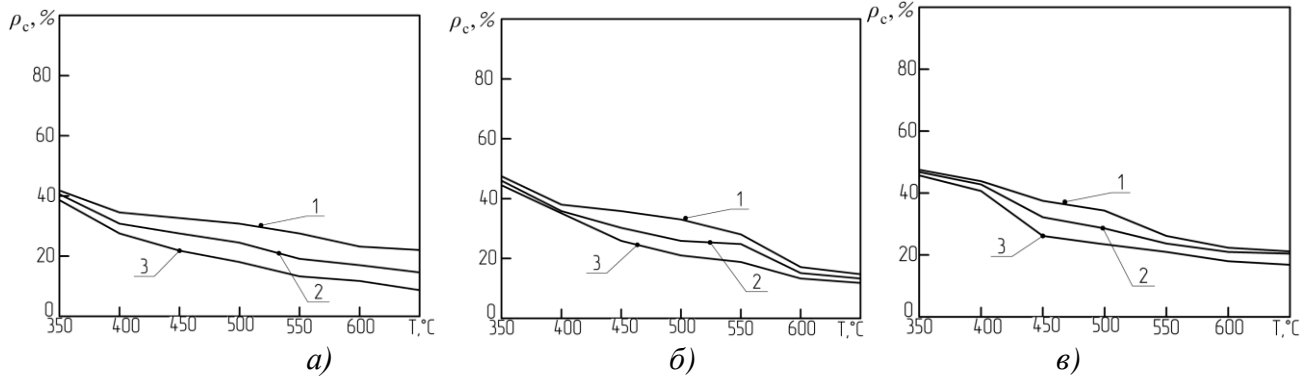


Рисунок 3.20 – Температурная зависимость удельного выхода карбонизированного остатка; а – лузга семян подсолнечника; б – скорлупа грецкого ореха; в – костра льна, при различных скоростях прогрева (1 – 5 °C/мин, 2 – 10 °C/мин, 3 – 15 °C/мин)

По полученным экспериментальным данным видно, что кинетика процесса пиролиза различается для исследуемых видов растительного сырья. Скорость прогрева сырья в значительной степени влияет на удельный выход твердого остатка для всех исследуемых растительных предшественников.

В таблице 3.1 представлены данные по содержанию углерода у карбонизатов по рис. 3.20.

Таблица 3.1– Содержание углерода у карбонизатов, полученных при различных температурных режимах пиролиза

Т, °С	Содержание углерода в карбонизатах, полученных из растительных предшественников, % при 5 °С/мин		
	Костра	Лузга	Скорлупа
400	69.00	62.00	59.00
450	77.00	76.00	64.00
500	75.00	81.00	71.00
550	74.00	78.00	79.00
600	71.00	79.00	78.00

Соотнеся данные рис. 3.20 и таблицы 3.1 можно определить рациональные температурные режимы пиролиза исследуемого сырья. Костру масличного льна наиболее целесообразно пиролизировать при температуре 450 °С, лузгу семян подсолнечника при 500 °С, скорлупу грецкого ореха при 550 °С. Анализ приведенных данных показывает, что для максимального выхода твердого остатка прогревать сырье следует в режиме 5 °С/мин.

Зольность образцов от удельной массы пиролизуемых остатков

представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Содержание золы в углях, полученных из растительных отходов

Т, °С	Зола, %		
	Костра	Лузга	Скорлупа
450	4.12	4.67	2.12
500	4.17	5.89	3.45
550	4.21	5.93	4.78

3.3.3 Анализ результатов по паровой активации угля

На адсорбционные характеристики активированного угля, получаемого путем паровой активации, влияют вид исходного сырья и тип частицы, подвергаемой активации, активирующий агент и скорость подачи активирующего агента.

На рис. 3.21 представлены результаты исследований по получению активированного угля из костры льна, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха. Режимы активации были следующими: температура камеры 850 °С, активирующий агент – водяной пар, соотношение карбонизата и активирующего агента 1:1. Выход активированного угля рассчитывался от массы сырья. Углеродистый остаток, из каждого растительного предшественника был получен при рациональных режимах, обоснованных в предыдущих разделах.

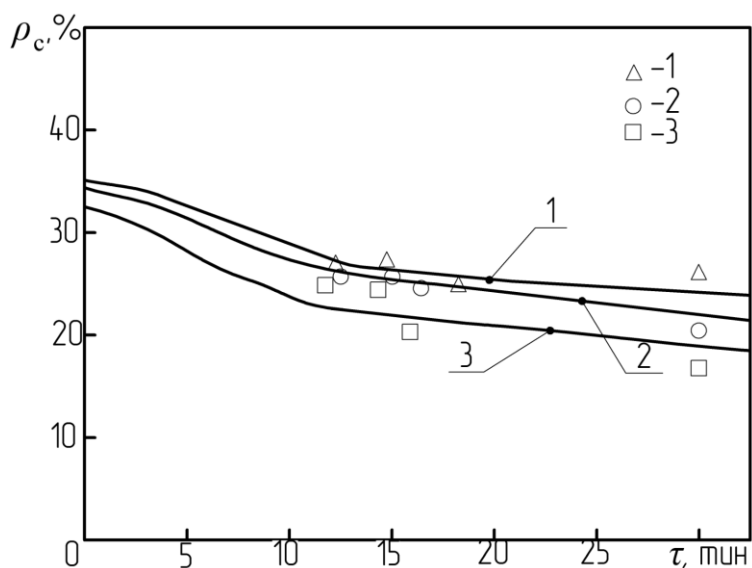


Рисунок 3.21 – Кинетическая зависимость удельного выхода активированного угля: 1 – лузга семян подсолнечника; 2 – скорлупа грецкого ореха; 3 – костра льна

Отклонение расчётных данных от экспериментальных составило не более 6 %. Из рисунка видно, что несмотря на преобладание углеродистой структуры, у всех исследуемых образцов выход активированного угля различен. Очевидно, что исходное сырье оказывает существенное влияние на удельный выход активированного угля.

Были проведены исследования удельного выхода активированного угля в зависимости от температуры активирующего агента. Результаты представлены на рис. 3.22. Активация проводилась в течении 15 минут.

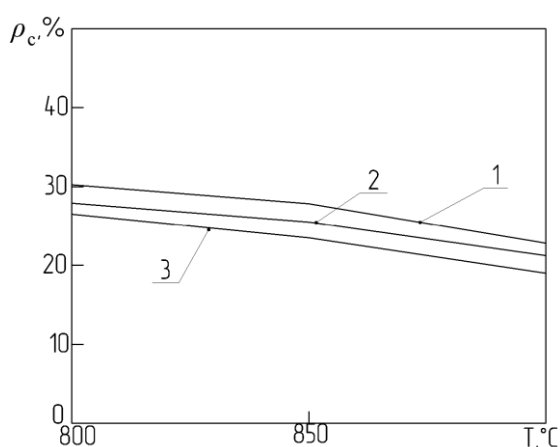


Рисунок 3.22 – Зависимость удельного выхода активированного угля от температуры активирующего агента: 1 – лузга семян подсолнечника; 2 – скорлупа грецкого ореха; 3 – костра льна

Влияние температуры активирующего агента на выход активированного угля является очевидным. Однако, ключевым фактором являются адсорбционные способности активированного угля, полученного при данных режимах. В таблице 3.3 представлены адсорбционные возможности полученных активированных углей.

Таблица 3.3 – Адсорбционные характеристики активированного угля, полученного из растительных отходов

Т, °С	Адсорбционная активность по йоду, %, ГОСТ 6217-74 БАУ-А, не менее 60 %		
	костра масличного льна	лузга семян подсолнечника	скорлупа без дробления
800	68.00	75.00	65.00
850	69.00	76.00	79.00
900	66.00	74.00	77.00

Как видно из таблицы все исследуемые образцы соответствуют по своим адсорбционным характеристикам ГОСТ 6217-74 [15]. Соответственно, для костры и лузги наиболее рациональна температура активирующего агента 800 °С. Температура активирующего агента в 900 °С, избыточна для активации исследуемых карбонизатов. Для скорлупы грецкого ореха наиболее предпочтителен режим в 850 °С.

Для скорлупы грецкого ореха были проведены исследования по активации частиц различной дисперсности с эквивалентным диаметром частицы 1 мм, 5 мм, 10 мм при температуре активирующего агента 850 °С. Результаты представлены на рис. 3.23.

Удельный выход активированного угля различается. Это объясняется тем, что взаимодействие пара с мелкими частицами сильнее, и пар более полно обдувает частицы. В таблице 3.4 представлены адсорбционные характеристики этих образцов.

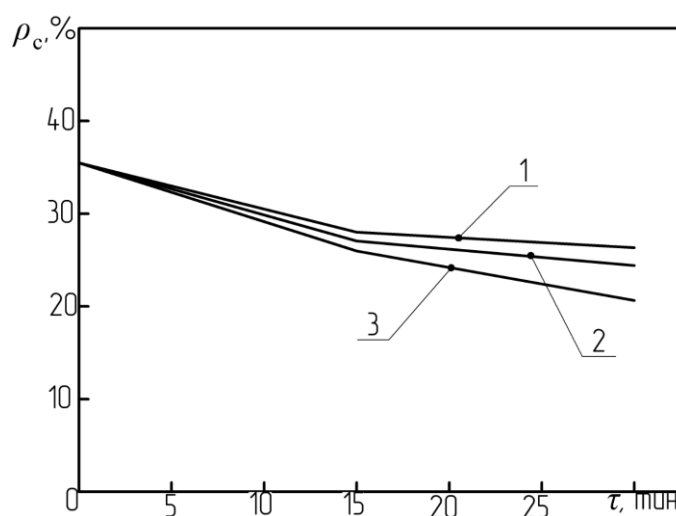


Рис. 3.23 – Кинетическая зависимость удельного выхода активированного угля полученного из скорлупы грецкого ореха: 1 – 10 мм, 2 – 5 мм, 3 – 1 мм

Таблица 3.4 – Адсорбционные характеристики активированного угля из скорлупы грецкого ореха

Продолжительность активации, мин	Размер частицы, мм	Адсорбционная активность по йоду, %, ГОСТ 6217-74 БАУ-А, не менее 60 %		
		10	5	1
15		79.00	84.00	87.00
30		86.00	87.00	92.00

Более высокие значения адсорбционной активности по йоду у мелкодисперсных углей получены благодаря лучшему взаимодействию частицы с паром.

Полученные образцы активированного угля из костры льна имеют хрупкие мелкодисперсные частицы неопределенной формы, соответственно по физико-механическим характеристикам могут быть сертифицированы по ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный» [13]. В таблицу 3.5 сведены основные характеристики образцов активированных углей, полученных из костры льна.

Таблица 3.5 – Характеристики активированного угля, полученного из костры льна

Параметр по ГОСТу 4453-74, марка ОУ-А	Полученный образец
Внешний вид: тонкодисперсный порошок черного цвета, не содержащий посторонних включений	
Адсорбционная активность по метиленовому голубому или метиленовому синему, не менее 225 мг/г	243
Адсорбционная активность по метиленовому оранжевому, не менее 210 мг/г	221
Адсорбционная активность по мелассе, %, не менее 100 %	112
Массовая доля золы, не более 10 %	8
Массовая доля влаги, не более 10 %	6
Степень измельчения, остаток на сетке 0,1 К, не более 5 %	2

Активированный уголь, полученный из лузги семян подсолнечника, имеет высокую зольность – более 12 % (см. таблицу 3.2), в связи с этим целесообразно из лузги семян подсолнечника получить угольные гранулы, соответствующие ГОСТу 8703-74 «Уголь активированный рекуперационный» (зольность не регламентируется) [14]. В связи с этим были проведены исследования по получению образцов цилиндрических гранул активированного угля из лузги семян подсолнечника. Гранулы были сформированы из карбонизатов лузги подсолнечника плотностью 600, 900 и 1200 кг/м³. Была проведена водопаровая активация полученных гранул результаты представлены на рис. 3.24.

Были проведены три контрольных эксперимента для каждого образца. Со степенью выгорания 28 – 31 %, 45 – 48 %, 69 – 71 %. Как видно из зависимости,

сырье высокой плотности имеет большую поглотительную способность при равной степени выгорания образцов. Эффективная степень выгорания для достижения значений ГОСТ 8703-74 составляет в 32 – 38 %, при плотности гранул 900 кг/м^3 . В таблице 3.6 представлены характеристики полученных образцов.

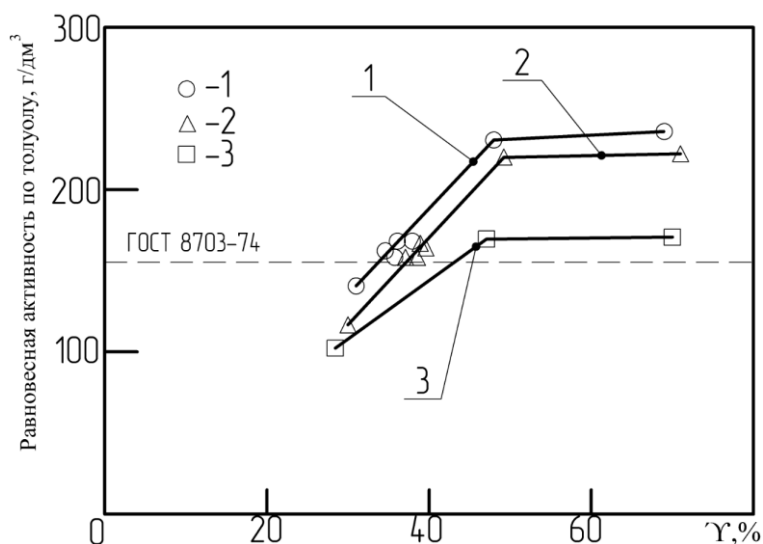


Рисунок 3.24 – Динамика изменения равновесной активности по толуолу гранул активированного угля, полученных из лузги подсолнечника, от степени выгорания, плотностью: 1 – 1200 кг/м^3 , 2 – 900 кг/м^3 , 3 – 600 кг/м^3

Полученный активированный уголь может быть использован для улавливания паров растворителей с температурой кипения выше $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (толуол, ксилол, амилацетат и др.).

Таблица 3.6 – Характеристики активированного угля, полученного из лузги семян подсолнечника

Параметр по ГОСТ 8703-74 Марка АР-А	Полученный образец
Внешний вид: гранулы цилиндрической формы темно-серого или черного цвета без механических примесей	Гранулы цилиндрической формы $D=2,8 \text{ мм}$, $L=4 - 7 \text{ мм}$, черного цвета
Прочность гранул на истирание, не менее 68 %	73
Насыпная плотность, не более 550 г/дм^3	515
Равновесная активность по толуолу, не менее 145 г/дм^3	157
Массовая доля влаги, не более 10 %	8
Степень измельчения, остаток на сетке 0,1 К, не более 5 %	2

На рис. 3.25 представлена аналитическая кривая плотности дробленого угля по высоте камеры активации. По зависимости видно, что при продвижении угля по зоне активации его плотность падает более чем на треть. Это связано с химическими реакциями активации. Наиболее интенсивно реакции протекают в средней секции. В угле, который проходит через нижнюю секцию, плотность меняется незначительно.

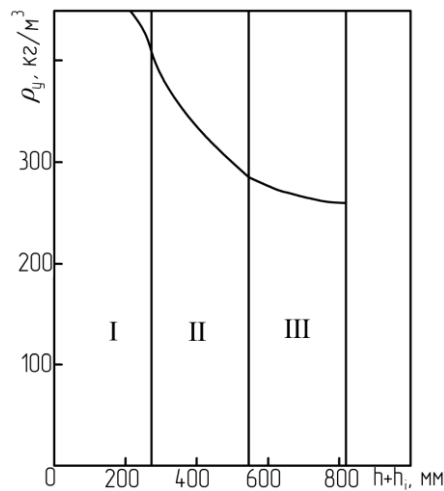


Рисунок 3.25 – Зависимость плотности дробленого угля по высоте камеры активации (верхняя секция – I; средняя секция – II; нижняя секция – III)

На рис 3.26 показаны кривые плотности пара и газов активации в сечениях 3-х секций камеры активации в зависимости от толщины слоя угля.

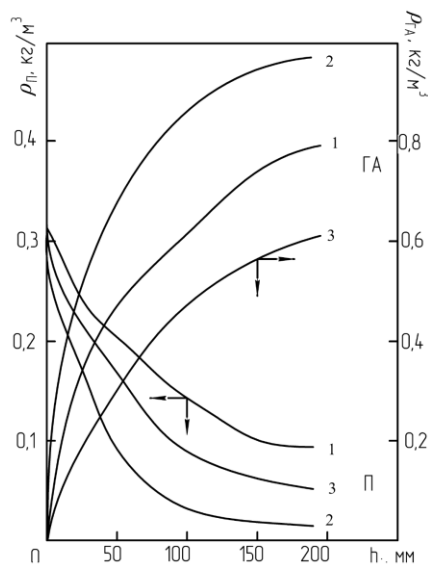


Рисунок 3.26 – Зависимость плотностей пара и газов активации в камере активации от толщины слоя угля: 1 – верхняя секция; 2 – средняя секция; 3 – нижняя секция

Кривые рис. 3.26 показывают, что в верхней секции идет прогрев угля. Поэтому скорость реакции активации невысокая. Это отмечается высокой плотностью пара и низкой плотностью газов активации на выходе из верхней секции. В средней секции уголь достаточно прогрет, а концентрация веществ, удаляемых из микропор угля – максимальная. Это отмечается низкой концентрацией паров и высокой концентрацией газов активации. В нижней секции микропоры угля открываются удаляются оставшиеся части реагирующих компонентов, поэтому на выходе из третьей секции количество газов активации меньше, а плотность пара увеличивается в сравнении со средней секцией.

Из анализа представленных соотношений и зависимостей видно, что конструктивные размеры камеры активации сильно зависят от производительности по углю в пиролизной зоне, в то время как сам процесс активации зависит от толщины слоя в ярусах и температуры процесса активации.

3.3.4 Анализ результатов исследований конвективного охлаждения активированного угля

Были проведены исследования конвективного охлаждения слоя крупнодисперсного активированного угля, результаты представлены на рис. 3.27.

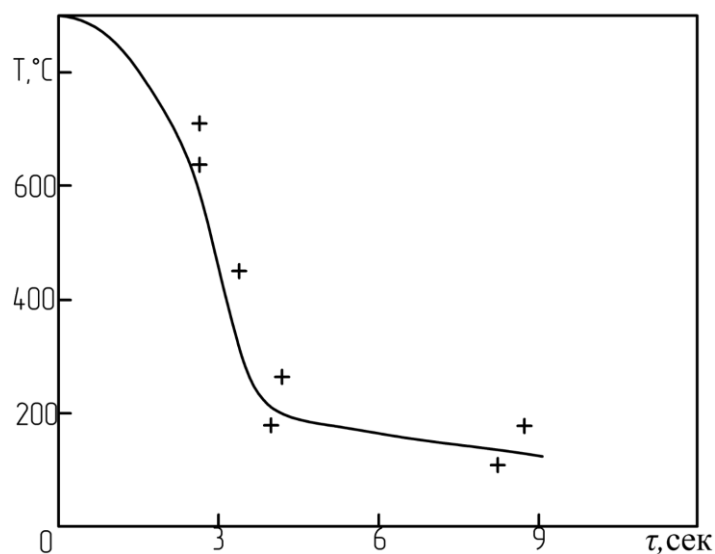


Рисунок 3.27 – Кинетическая кривая охлаждения слоя крупнодисперсного активированного угля

Расхождение расчетных данных от экспериментальных составило менее 14 %.

В ходе исследований получены расчетные зависимости температуры угля на поверхности (рис. 3.28) и температуры пара по высоте слоя (рис. 3.29) для зоны конвективного и испарительного охлаждения.

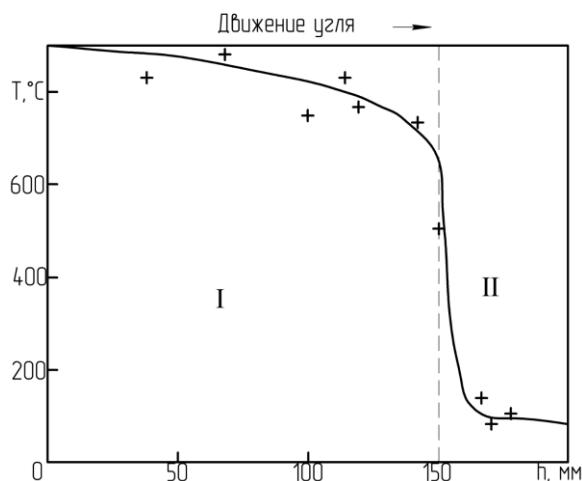


Рисунок 3.28 – Зависимость температуры угля в центре частицы по высоте слоя (1 – зона конвективного охлаждения паром; 2 – зона испарительного охлаждения водой)

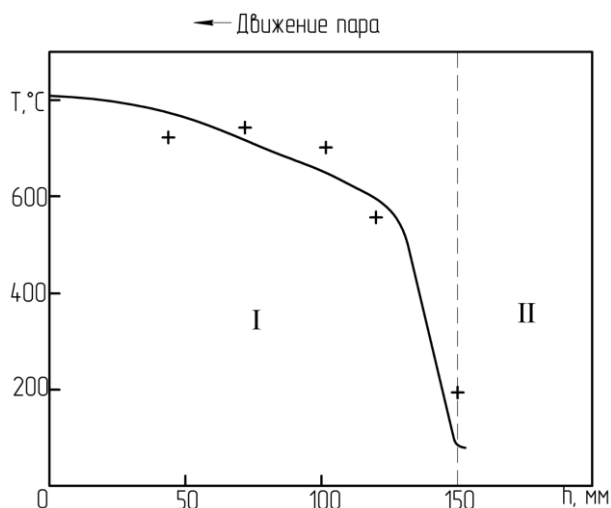


Рисунок 3.29 – Зависимость температуры пара по высоте слоя (1 – зона конвективного охлаждения паром; 2 – зона испарительного охлаждения водой)

Анализ зависимостей показывает, что в зоне орошения водой на высоте слоя 150 мм температура поверхности угля резко падает с 650 °C до 100 °C и образуется пар с температурой 102 °C. В зоне конвективного охлаждения пар, соприкасаясь с горячим углем, интенсивно нагревается со 102 °C до 800 °C.

3.3.5 Анализ результатов исследований вакуумной сушки активированного угля

Из камеры вакуумного охлаждения воздух откачивается насосом, уменьшение давления и температуры происходит по кинетическим зависимостям рис. 3.30.

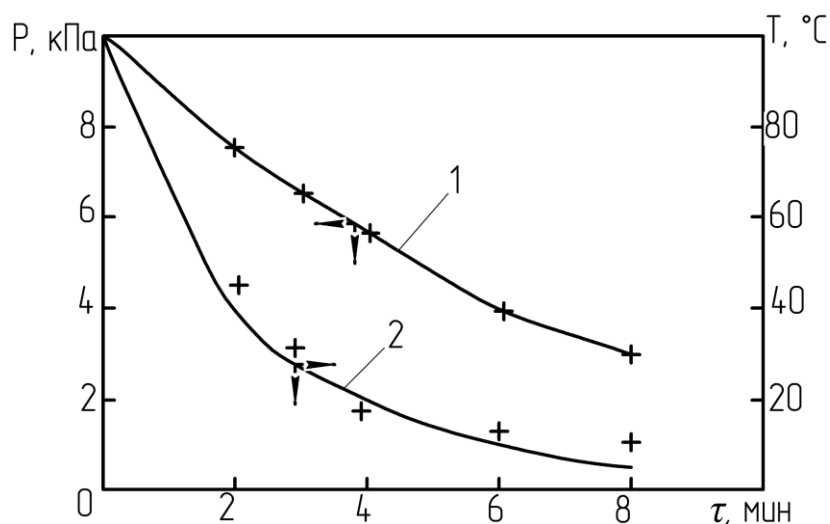


Рисунок 3.30 – Кинетические зависимости (1 – давления; 2 – температуры активированного угля) в вакуумной камере

По зависимости видно, что для охлаждения угля до 20 °C требуется понизить остаточное давление в вакуумной камере до 5,8 кПа.

Таким образом решением предложенной математической модели установлены рациональные режимные технологические параметры получения активированного угля из растительных отходов. На основе полученных результатов исследований стало возможно создание промышленной установки получения активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса.

ГЛАВА 4 ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ

Анализ результатов исследований показал, что длительность и энергоемкость процессов, протекающих при производстве активированного угля, могут быть сокращены без снижения качества конечного продукта. Это дает возможность эффективно использовать технологию получения активированного угля для переработки многих видов растительных отходов агропромышленного комплекса.

В настоящей главе приведена инженерная методика расчета промышленной установки, результаты моделирования аппаратного оформления процесса получения активированного угля из отходов растительной группы и представлено технико-экономическое обоснование термической переработки растительных отходов методом медленного пиролиза.

4.1 Описание установки для производства активированного угля

На основе проведенных исследований была разработана установка переработки растительных отходов в активированный уголь. Установка получения активированного угля включает измельчитель растительных отходов 1, газодувку 2, пневмопровод 3, камеру конвективной сушки 4, узел пиролиза 5, коллектор подачи горючего газа 6, змеевиковый пароперегреватель 7, узел активации 8, камеру конвективного охлаждения 9, коллектор подачи воды 10, камеру вакуумного охлаждения 11, вакуумные клапана 12 и 13, шнековые транспортеры 14а и 14б, шлюзовые питатели 15а и 15б, водокольцевой вакуумный насос 16, упаковочный узел 17, конденсатор пиролизных газов 18, кожухотрубный теплообменник 19, газодувку 20, абсорбер 21, канал вывода отработанных топочных газов 22, канал отвода пиролизных газов 23, совмещенный с каналом отвода газов активации 24, канал подвода перегретого

пара 25, канал отвода сепарированной воды 26, канал подвода технологической воды 27, канал отвода водяного пара 28, канал подвода топочных газов 29, канал подвода горючих газов 30.

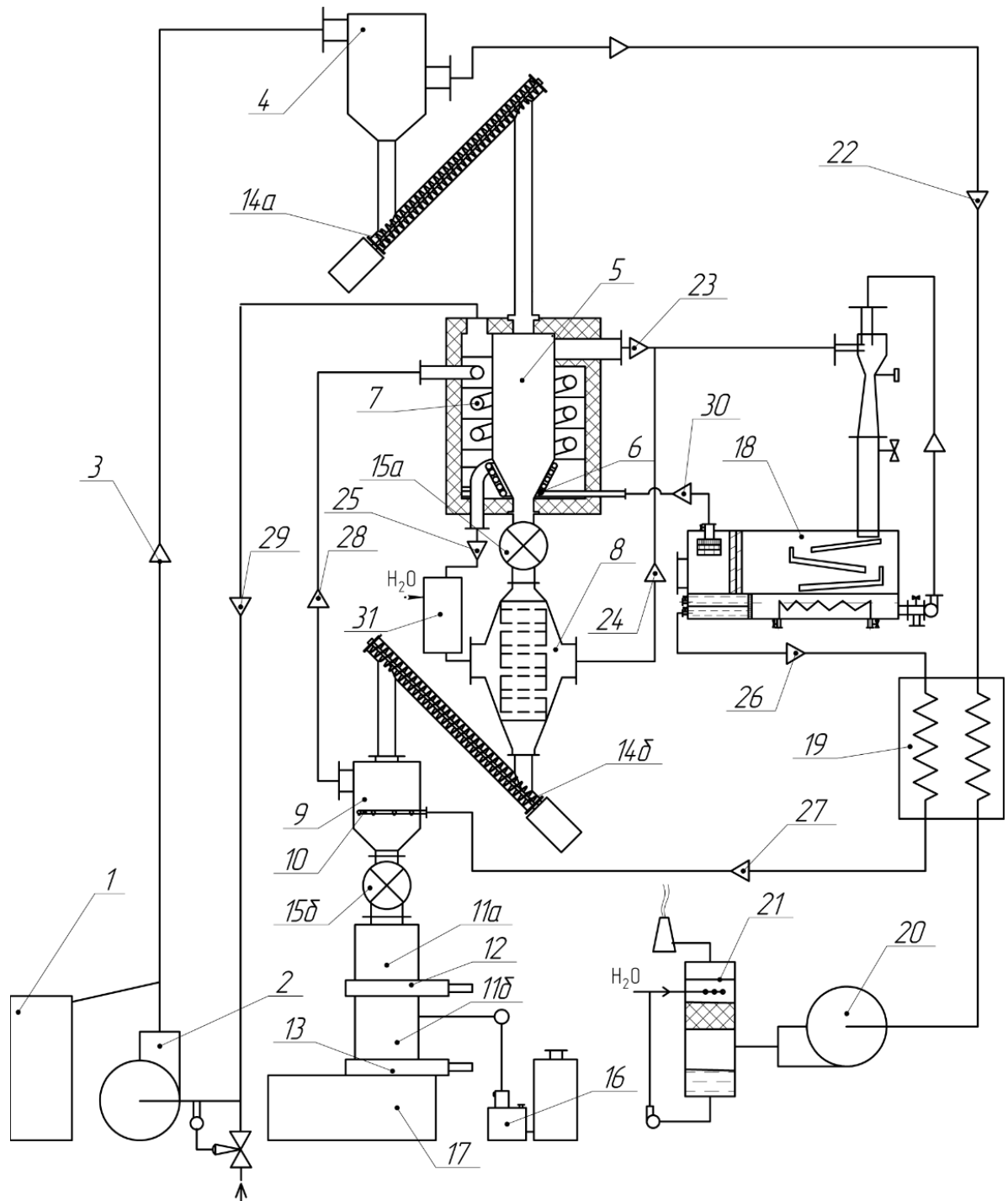


Рисунок 4.1 – Установка получения активированного угля: 1 – аппарат измельчения; 2 – газодувка; 3 – пневмопровод; 4 – камера конвективной сушки; 5 – узел пиролиза; 6 – газовый коллектор; 7 – пароперегреватель; 8 – узел активации; 9 – камера конвективного охлаждения; 10 – коллектор подачи воды; 11 (а, б) – вакуумные камеры; 12 – клапан; 13 – клапан; 14 (а, б) – шнековые транспортеры; 15 (а, б) – барабанные питатели; 16 – насос; 17 – упаковочный узел; 18 – конденсатор; 19 – теплообменник; 20 – газодувка; 21 – абсорбер; 22 – 30 – каналы; 31 – пароперегреватель

Принцип работы описанной выше установки заключается в следующем. Крупные отходы растительного происхождения, например, скорлупа грецкого ореха диспергируются до размеров частиц 2 – 5 мм в аппарате 1. Газодувка 2 создает избыточное давление, вдувая топочные газы, поступающие из канала 29. Топочные газы перемешиваются с воздухом и имеют температуру 100 °С. Частицы отходов совместно с топочными газами перемещают в камеру сушки по пневмопроводу 3. В камере конвективной сушки слой отходов высушивается топочными газами. Высушенные отходы через шнековый транспортер 14а подают в узел пиролиза 5. Растительные отходы за счет кондуктивного подвода тепла от стенок пиролизной камеры по мере их продвижения вниз превращаются в уголь с выделением пиролизных газов. Уголь через барабанный питатель 15а подают в узел активации 8, где уголь обрабатывают водяным перегретым паром с температурой 800 – 850 °С с выделением горючих газов. Далее активированный уголь через шнековый транспортер 14б подают в камеру конвективного охлаждения 9, где в нижней части на высоте 15 % от общей высоты насыпного слоя активированного угля находится коллектор 10, через который подают воду для орошения активированного угля. Нижний слой охлаждается до температуры 90 – 100 °С, а верхний слой угля охлаждают образовавшимся водяным паром, который перегревается до температуры 700 °С. Активированный уголь через шлюзовый питатель 15б направляют в камеру 11а. При заполнении накопителя открывается клапан 12 и сбрасывает все содержимое емкости в вакуумную камеру 11б. Затем клапан 12 закрывают, а из камеры 11б откачивают воздух при помощи насоса 16. При достижении остаточного давления 3 – 6 кПа открывается клапан 13. Сухой и охлажденный активированный уголь подают в упаковочный узел 17. Клапан 13 закрывается, а клапан 12 открывается для загрузки новой порции влажного активированного угля. Отвод газов активации осуществляется через канал 24. В канале 23 они перемешиваются с пиролизными газами и поступают в конденсатор 18, где происходит разделение газовой смеси на воду, несконденсированные горючие газы и пиролизный дистиллят, который поступает в сборник дистиллята. Несконденсированные горючие газы по каналу

30 подают в коллектор 6, где сжигаются. Вода из конденсатора 18 через канал 26 подается в теплообменник 19, в котором вода подогревается до температуры 95 – 99 °С. Подогрев воды в теплообменнике осуществляется отработанными топочными газами, которые подают в теплообменник по каналу 22 из камеры сушки. Подогретая вода по каналу 27 подается в коллектор 10, орошает активированный уголь, вследствие чего превращается в водяной пар, который уносится из камеры конвективного охлаждения по каналу 28 в змеевиковый пароперегреватель 7, который расположен внутри рубашки пиролизной зоны. Подогрев пара осуществляется топочными газами в противоточном режиме. Из пароперегревателя 7 перегретый пар подают в камеру активации по каналу 25. Топочные газы уносятся из рубашки пиролизной зоны по каналу 29, перемешиваются с воздухом и служат теплоносителем для конвективной сушки измельченных растительных отходов. Отработанные топочные газы через газодувку 20 подают из теплообменника на очистку в абсорбере 21. Очищенные в абсорбере газы выбрасывают в атмосферу. Перегрев пара осуществляется в пароперегревателе 31.

4.2 Методика расчета установки производства активированного угля

Аппаратурное оформление основных узлов – сушки, пиролиза, активации и охлаждения представляет собой сварные камеры, перемещение угля в которых происходит роторными и шнековыми транспортерами.

Циркуляция паров и газов в установке происходит через систему трубных каналов. Давление в установке создается двумя газодувками.

4.2.1 Методика расчета узла подготовки растительных отходов

Под подготовкой отходов к переработке подразумевается их измельчение и дальнейшая транспортировка в камеру сушки. Узел подготовки отходов представлен на рис. 4.1. позициями 1 – 3.

Мощность рубительной машины определяется массовой

производительностью всей установки по перерабатываемым отходам и типом отходов.

В вертикальном трубопроводе скорость потока частиц при установившемся движении аэросмеси рассчитывается соотношением:

$$w_T = w - w_B, \quad (4.1)$$

где w_T – скорость транспортируемых частиц, м/с; w – скорость движения газа, м/с; w_B – скорость витания частиц, м/с.

Скорость витания зависит от насыпной плотности и толщины частиц: с уменьшением толщины эта зависимость выражается слабее. Для частиц толщиной от 0,4 мм и более можно пользоваться формулой С.Н. Святкова при определении скорости витания:

$$w_B = 0.14 \sqrt{\frac{\rho}{(0,02 + \frac{\phi}{h}) * p_B}}, \quad (4.2)$$

где w_B – скорость витания щепы, м/с; ρ – насыпная плотность частиц, кг/м³; ρ_B – плотность воздуха (газа), кг/м³; h – толщина частицы, мм; ϕ – коэффициент формы частицы [14].

Диаметр трубопровода рассчитывается по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_V}{\pi w}}, \quad (4.3)$$

где Q_V – расход газа на транспортирование, м³/с.

Расход газа Q_V определяется по соотношению:

$$Q_V = \frac{Q_m}{p X_m}, \quad (4.4)$$

где Q_m – массовый расход частиц, кг/ч; p – давление воздуха, кПа; X_m – массовая концентрация аэросмеси, кг/кг.

Для нахождения расхода газа необходимо знать его вид, а также температуру и плотность, с которыми он поступает в трубопровод.

После нахождения расчетного диаметра выбирается его стандартное значение по ГОСТу. Действительное значение скорости газа w_d определяется стандартным сечением трубопровода S :

$$w_D = Q_v/S . \quad (4.5)$$

Действительная скорость газа должна совпадать с расчетной или превышать ее не более, чем на 8 % [13]:

$$\frac{w}{w_D} = 1 \text{ или не менее } 0,92\% . \quad (4.6)$$

Перед подбором газодувки нужно знать высоту, на которую транспортируются частицы L_T (м).

После расчета скорости транспортирования и диаметра трубопровода производится подбор воздуходувки. Основными параметрами, которыми стоит руководствоваться при выборе воздуходувки, является производительность Q_v , которая не должна быть ниже расхода газа на транспортирование частицы, и создаваемое им избыточное давление P , не превышающее 0.11 МПа.

Найдем время транспортирования $\tau_{тр}$ по соотношению:

$$\tau_{тр} = L_T / w_T . \quad (4.7)$$

Выбор аппаратного оформления зоны подготовки отходов состоит в выборе измельчительного оборудования и воздуходувки.

Ключевыми параметрами для выбора измельчительного аппарата являются размеры частицы ($a \cdot b \cdot h$, мм) и объемный расход отходов, подаваемый на сушку $Q_m = V/\tau$. Зная эти параметры, можно выбрать оборудование для изменения формы частицы растительных отходов. Для того, чтобы не было простоев установки при выборе измельчительной машины должно выдерживаться условие $Q_m < Q$. После измельчения отходов их подают в транспортный трубопровод и перемещают в камеру сушки.

Газодувка постоянно работает при высоких температурных режимах, поскольку нагнетается не воздух, а смесь топочного газа и воздуха. Это также следует учитывать при выборе конкретной модели газодувки.

4.2.2 Методика расчета шахтного аппарата

Схема шахтного аппарата представлена на рис. 2.2, на рис. 4.1 представлена позицией 8. Камера данного типа подходит для проведения конвективной сушки

и паровой активации. Для расчета сушильной камеры исходными данными являются заданная производительность установки по сухому продукту V ($\text{м}^3/\text{ч}$), начальная влажность отходов U_0 (%), начальная температура отходов T_0 , ($^\circ\text{C}$), температура сушильного агента на входе T_c ($^\circ\text{C}$), начальное влагосодержание сушильного агента ($X_{г0}$).

Короба шахтных сушильных камер имеют конструкцию разной сложности, но у всех них треугольный профиль, который крепится к стенкам сушильной камеры. Короба служат для подвода и отвода агента сушки в сушильной камере. Расстояния между коробами h_1 выбираются больше диаметра загрузочного отверстия камеры сушки h для предотвращения образования свода.

Конструктивный расчет сушильной зоны начинают с определения её производительности V_0 ($\text{кг}/\text{с}$), по выражению:

$$V_0 = V(1 + U_0), \quad (4.8)$$

где U_0 – начальная влажность частиц, $\text{кг}/\text{кг}$; V – заданная производительность установки по сухому продукту, $\text{кг}/\text{с}$.

Масса высушиваемого материала m_n (кг):

$$m_n = V_0 \cdot \tau_c, \quad (4.9)$$

где τ_c – время сушки, сек (определяется решением системы уравнений тепломассопереноса (2.1),(2.2)).

Объем отходов, подаваемых на сушку V_n (м^3):

$$V_n = \frac{m_n}{\rho_n}, \quad (4.10)$$

где ρ_n – насыпная плотность частиц отходов, подаваемых на сушку, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Массовая производительность шахтной сушилки по испаренной влаге V_x , ($\text{кг}/\text{с}$), рассчитывается по соотношению:

$$V_x = V_0[(U_0 - U_k)/(100 - U_k)]. \quad (4.11)$$

Массовая производительность шахтной сушилки по сушильному агенту $V_{тг}$, ($\text{кг}/\text{с}$), определяется соотношением:

$$V_{тг} = V_x/(X_k - X_0), \quad (4.12)$$

где X – влагосодержание топочного газа, кг/кг.

Объемная производительность шахтной установки по сушильному агенту $V_{тгV}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) определяется плотностью теплоносителя $\rho_{тг}$ ($\text{м}^3/\text{кг}$):

$$V_{тгV} = \frac{B_{тг}}{\rho_{тг}}. \quad (4.13)$$

Скорость теплоносителя $w_{тг}$ должна быть меньше скорости витания частиц $w_{в}$, ($\text{м}/\text{с}$). Для частиц толщиной от 0,4 мм и более можно пользоваться при определении скорости витания соотношением:

$$w_{в} = 0.14 \sqrt{\frac{p_{н}}{(0,02 + \frac{\phi}{h}) * \rho_{тг}}}, \quad (4.14)$$

где h – толщина частицы, м; ϕ – коэффициент формы частицы (определен как 1.1) [16].

Скорость движения топочных газов находится по формуле:

$$w_{тг} = k_w w_{в}, \quad (4.15)$$

где k_w – коэффициент скорости газа (0.8 – 0.9).

Определение диаметра загрузочного отверстия h (м) камеры сушки заключается в экспериментальном нахождении диаметра сводообразования $D_{св}$ (м) с учетом коэффициента отражающего способность материала к сводообразованию ($k_{св}$ 1.1 – 1.3):

$$h = D_{св} k_{св}. \quad (4.16)$$

Для сушильного аппарата шахтного типа определяется живое сечение всех коробов $\sum F_c$, (м^2), по которым подводится и отводится теплоноситель:

$$\sum F_c = (V_{тгV}) / w_{тг}. \quad (4.17)$$

Короб теплоносителя имеет треугольную форму. Его высота (b_2 , м), определяется по формуле:

$$b_2 = 1/2 b_1 \text{ctg} \alpha, \quad (4.18)$$

где b_1 – заданная ширина короба теплоносителя, м; α – угол естественного откоса короба, град (определяется экспериментально).

Сечение короба теплоносителя F_c (м^2) определяется соотношением:

$$F_c = 1/2 b_1 b_2 = 1/2 b_1^2 \text{ctg} \alpha. \quad (4.19)$$

Число подводящих коробов n определяется как:

$$n = \sum F_c / F_c . \quad (4.20)$$

Для равномерного распределения топочного газа по камере сушки сумма живых сечений коробов подвода теплоносителя $\sum F_c$ должны быть меньше сечения патрубка подвода теплоносителя F (m^2), т. е. должно выполняться условие:

$$F = \sum_i^n F_c k_n, \quad (4.21)$$

где k_n – коэффициент избыточного давления в коробе подвода теплоносителя (1.1-1.2).

Расстояние между коробами в одном ряду h_1 (м) определяется суммой диаметра загрузочного отверстия h и ширины короба b_1 :

$$h_1 = h + b_1 . \quad (4.22)$$

Сопротивление слоя частиц $\Delta\rho_{сл}$, (Па), определяется уравнением Эргана:

$$\Delta\rho_{сл} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_y)^2}{\varepsilon_y^3} \cdot \frac{w_y \mu_{III}}{d_y^2} \cdot h_m + 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon_y}{\varepsilon_y^3} \cdot \frac{w_{III}^2 \rho_{III}}{d_y} h_m . \quad (4.23)$$

Расстояние между рядами коробов h_2 (м) находится по формуле:

$$h_2 = \frac{\Delta\rho_{сл}}{\rho_{H_2O}} . \quad (4.24)$$

Шахтные сушильные аппараты имеют квадратное, либо прямоугольное сечение. Выберем квадратное сечение. Тогда зная ширину сушильной камеры как сумму расстояний между коробами h_1 , длину короба теплоносителя l (м) приравняем к ширине $\sum h_1$:

$$l = \sum h_1 . \quad (4.25)$$

Сечение рабочей зоны камеры сушки S (m^2) определяется произведением суммы расстояний между коробами h_1 и длины короба l :

$$S = l \sum h_1 . \quad (4.26)$$

Объем всех коробов подвода и отвода теплоносителя $\sum_i^n V_k$ (m^3) находится по соотношению:

$$\sum_i^n V_k = \sum_i^n F_k l k_e, \quad (4.27)$$

где $\sum_i^n F_k$ – сумма сечений коробов подвода и отвода теплоносителя, м³; k_e – коэффициент запаса.

Рабочий объем камеры сушки V_o (м³) есть сумма объема всех коробов теплоносителя $\sum_i^n V_k$ (м³) и объема отходов V_n :

$$V_o = \sum_i^n V_k + V_n. \quad (4.28)$$

По известному объему камеры сушки V_o и ее сечению S найдем рабочую высоту камеры сушки H (м):

$$H = V_o / S. \quad (4.29)$$

Число рядов коробов z округляется до ближайшего четного значения:

$$z = H/h_2. \quad (4.30)$$

Расчет камеры активации осуществляется по описанной выше методике с введением начальных условий для карбонизаторов, полученных после пиролиза.

4.2.3 Методика расчета узла медленного пиролиза со встроенным пароперегревателем

Узел пиролиза представлен позицией 5 на рис. 4.1. Исходными данными для расчета узла пиролиза являются температура процесса пиролиза $T_{п}$ (°C) заданная массовая производительность по сухим отходам B (кг/ч) и вид отходов.

Объем сухих отходов, подвергаемых пиролизу V_o (м³):

$$V_o = (B / p_{сл}) \tau_{п}. \quad (4.31)$$

Рабочий объем камеры пиролиза $V_{п}$ (м³) равен объему сухих отходов, подвергаемых пиролизу V_o (м³):

$$V_{п} = V_o. \quad (4.32)$$

Массовая производительность по пиролизным газам $B_{п.г}$ (кг/с) определяется соотношением:

$$B_{п.г} = B - B_y. \quad (4.33)$$

Тогда объем пиролизных газов $V_{п.г}$ (м^3):

$$V_{п.г} = (B_{п.г} / \rho_{п.г}) t_n, \quad (4.34)$$

где $\rho_{п.г}$ – плотность пиролизных газов, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Размер сечения патрубка для отвода пиролизных газов $F_{п.г}$ (м^2) зависит от объема выделяемых газов при пиролизе $V_{п.г}$ и времени пиролиза $\tau_{п.г}$.

После вывода пиролизных газов из камеры пиролиза через патрубок для отвода пиролизных газов $F_{п.г}$, они попадают в сепаратор. Пиролизные газы разделяются на неконденсирующиеся газы и жидкую фракцию. Сухие газы необходимы для бесперебойной работы пиролизной зоны, следовательно, нужно знать их массовую производительность $B_{г}$ ($\text{кг}/\text{с}$), которая находится по соотношению:

$$B_{г} = B_{п.г} - B_{ж}, \quad (4.35)$$

где $B_{ж}$ – массовая производительность по жидкой фракции при сепарации пиролизных газов, $\text{кг}/\text{с}$.

При недостаточной производительности по сухому газу $B_{г}$ для достижения необходимой температуры процесса пиролиза $T_{п}$ необходимы дополнительные источники энергии.

Сечение патрубка для подвода горючих газов $F_{г}$ определяется мощностью печи.

Горючие газы выгорают в печи, поднимаются по газоходу, тем самым прогревают камеру пиролиза.

Зная объем и сечение камеры пиролиза, можно найти рабочую высоту пиролизной зоны H (м):

$$H = V_{п} / F. \quad (4.36)$$

Высота скоса пиролизной камеры $h_{ск}$ (м) рассчитывается по формулам:

$$h_{скA} = A / 2 \text{ctg} \alpha, \quad (4.37)$$

$$h_{скB} = B / 2 \text{ctg} \alpha, \quad (4.38)$$

где α – угол естественного скоса активированного угля, град (определяется экспериментальным путем).

Высота коллектора h_k (м) выбирается исходя из размера сечения патрубка для отвода пиролизных газов $F_{п.г.}$.

Общая высота пиролизной камеры $h_{общ}$ (м):

$$h_{общ} = H + h_k + h_{ск}. \quad (4.39)$$

Высота дымохода h_d (м):

$$h_d = H + h_k. \quad (4.40)$$

Минимальную ширину топки b_T (м) примем равным половине ширины камеры пиролиза:

$$b_T = 0,5 \cdot A. \quad (4.41)$$

Сечение дымохода образуется направляющими, т.е. образует прямоугольник. При проектировании данного типа сечения с целью создания завихрений в прямых углах соотношение сторон следует выбирать 1,5:1. С увеличением турбулентности потока увеличится и коэффициент теплоотдачи [56].

Ширину сечения дымохода B_d (м) можно принять равной половине минимальной ширины топки b_T :

$$B_d = b_T, \quad (4.42)$$

тогда высота сечения дымохода A_d (м):

$$A_d = 3B_d. \quad (4.43)$$

Число колец дымохода, огибающих пиролизную камеру n_d округляется до ближайшего целого числа корректировкой высоты сечения дымохода A_d :

$$n_d = h_d / A_d. \quad (4.44)$$

Сечение патрубка отвода топочных газов $F_{т.г.}$ (м²) рассчитывается с учетом коэффициента создания тяги на выходе из дымохода k_d (0,8 – 0,9):

$$F_{т.г.} = k_d F_d. \quad (4.45)$$

Для определения сечения загрузочного отверстия h необходимо

экспериментально определить диаметр сводообразования $D_{св}$ (м) и умножить на коэффициент, отражающий способность материала к сводообразованию $K_{св}$ (1.1 – 1.2):

$$h = D_{св} \cdot K_{св} . \quad (4.46)$$

Производительность шлюзового питателя $Q_{п}$ (кг/ч) рассчитывается из соотношения:

$$Q_{п} = V / \rho_{сл} . \quad (4.47)$$

Определение толщины стенок s (м) камеры пиролиза ведется по уравнению [22]:

$$s = A \sqrt{\frac{k \cdot B \cdot H}{2 \cdot [\sigma]} + kc} , \quad (4.48)$$

где σ – допускаемое напряжение, Н/м²; kc – прибавка на коррозию; k – коэффициент запаса (0,15 – 0,3).

Наружная стенка пиролизной зоны должна удерживать энергию, выделяемую при сжигании газа внутри. Конструктивно теплостенку можно выполнить из огнеупорного кирпича.

Габаритные размеры пиролизной зоны:

-длина пиролизной зоны a (м):

$$a = B + 2s + 2B_{д} + 2s_k , \quad (4.49)$$

где s_k – толщина теплостенки пиролизной зоны, м;

-ширина пиролизной зоны b (м):

$$b = A + 2s + 2B_{д} + 2s_k ; \quad (4.50)$$

-высота пиролизной зоны c (м):

$$c = h_{общ} + 2s + 2s_k . \quad (4.51)$$

4.2.4 Методика расчета системы эжекционной конденсации пиролизных газов

Пиролизные газы образуются при пирогенетическом разложении отходов и

составляют более 60 % от общей массы перерабатываемого растительного сырья. Пиролизные газы разделяются на дистиллят и несконденсированные горючие газы.

В качестве основы для проектирования была взята стандартная модель двухфазного нефтегазового сепаратора [58, 59]. Данный тип сепаратора может быть в вертикальном и горизонтальном исполнении. Неконденсирующиеся горючие газы служат топливом для топки пиролизной камеры в установке производства активированного угля, поэтому главным критерием работы сепаратора будет степень очистки горючего газа. Учитывая непрерывность действия установки производства активированного угля, сепаратор также должен быть высокопроизводительным. В связи с этим сепаратор лучше спроектировать в горизонтальном положении, так как по сравнению с аналогичным объемом вертикального исполнения их производительность выше в 2 раза [59].

На рис. 4.2. изображена схема сепаратора для разделения пиролизных газов, разработанная для зоны пиролиза.

Принцип работы сепаратора аналогичен работе стандартного сепаратора, но на входном патрубке сепаратора установлен эжектор 12, где эжектируемым потоком служит парогазовая смесь из камеры пиролиза, а эжектирующим – уже отделенный и охлажденный дистиллят. Смешиваясь, смесь на высокой скорости входит во входной патрубок 1, тем самым не засоряя сепаратор. Напор для холодного дистиллята создается насосом 9, прикрепленным к патрубку выхода жидкости 5. Смесь попадает на наклонные ступенчатые желоба-дефлекторы 6, ударяясь о них молекулы газа отделяются от жидкости, тем самым увеличивая степень дегазации. Далее жидкость охлаждается водой, циркулирующей по змеевику конденсатору 10. Очистка газа происходит через систему пластинчатых каплеотбойников 13 и туманоуловителей 2. Выход неконденсирующихся газов происходит через патрубок выхода газа 3. Корпус сепаратора – сварная емкость с люком - лазом 8 и приваренными стойками 11. Уровень жидкости в сепараторе контролируется уровнемером 14.

Перфорированная решетка 4 способствует ламинарному движению дистиллята в сепараторе. Жидкость, прошедшая через решетку, движется в ламинарном потоке и разделяется на легкую и тяжелую фракции. Слив этих жидкостей осуществляется через патрубки 15 и 16. Несконденсировавшиеся газы из конденсатора отправляются в топку пиролизной зоны 17 для поддержания процесса пиролиза [82].

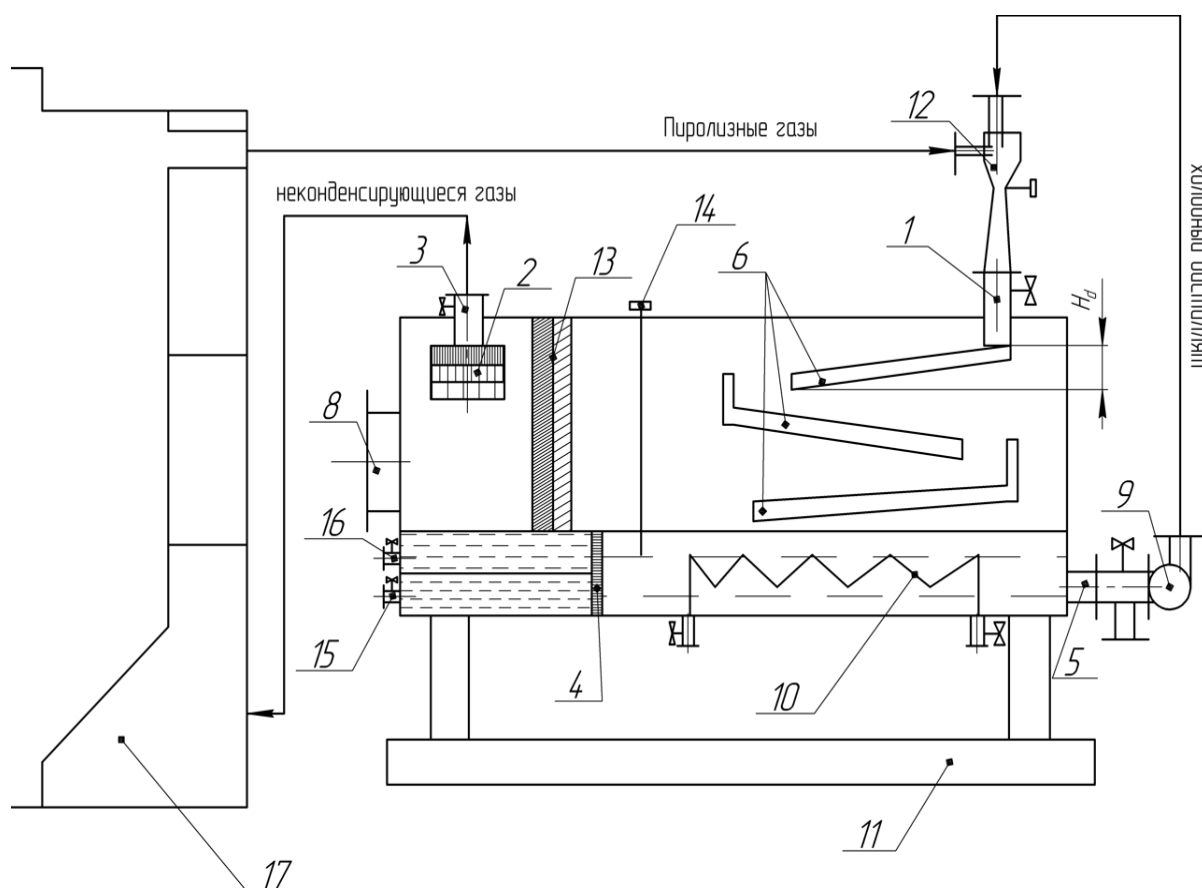


Рисунок 4.2 – Схема сепаратора для разделения пиролизных газов: 1 – входной патрубок; 2 – туманоуловители; 3 – патрубок выхода газа; 4 – решетка перфорированная; 5 – патрубок выхода жидкости; 6 – ступенчатые желоба-дефлекторы; 8 – люк-лаз; 9 – насос; 10 – змеевик-конденсатор; 11 – стойки; 12 – эжектор; 13 – каплеотбойники; 14 – перфорированная решетка; 15 – патрубок; 16 – патрубок; 17 – топка пиролизной зоны

Расчет геометрических параметров сепаратора производится с учетом материального баланса, где исходными данными являются массовый расход парогазовой смеси G (кг/ч), а также процентное содержание газовой g (%) и жидкой j (%) фаз, определяемое из априорной информации.

Раздельное количество расходов жидкости G_j (кг/ч) и газа G_g (кг/ч)

определяется соотношениями:

$$G_j = j \cdot G, \quad (4.52)$$

$$G_g = g \cdot G. \quad (4.53)$$

Зная плотность газа ρ_g (кг/м³) и жидкости ρ_j (кг/м³) можно перейти к объемным производительностям:

$$V_g = G_g / \rho_g, \quad (4.54)$$

$$V_j = G_j / \rho_j. \quad (4.55)$$

Используя данные материального баланса, задаются размеры сечения (ширина A и высота B , м), по соотношениям:

$$A = 1,5 \cdot \sum H_d, \quad (4.56)$$

где H_d – высота вмонтированного дефлектора с учетом угла наклона;

$$B = B_d + \Delta B, \quad (4.57)$$

где B_d – ширина конденсатора охладителя; ΔB – зазор.

Длина емкости бака сепаратора L (м):

$$L = \frac{V_g \cdot k_p + V_j}{A \cdot B}, \quad (4.58)$$

где k_p – безразмерный коэффициент сжатия газа (0,6 – 0,85) (коэффициент учитывает давление в сепараторе и способность газа к сжатию).

Изготовить корпус и сборочные элементы установки сепарации для разделения пиролизных газов и газов активации необходимо из стали Х18Н12Т с высокой сопротивляемостью к окислению и температурой эксплуатации до 600 °С.

Для улучшения работы сепаратора к входному патрубку сепаратора прикреплен газожидкостный эжектор. Режим работы эжекторных устройств зависит от количества эжектирующей жидкотекучей среды, то есть от коэффициента эжекции β , величина которого может меняться в значительных пределах (0,1 – 0,9).

Учитывая, что выход газа постоянен, изменение коэффициента эжекции происходит за счет уменьшения или увеличения расхода жидкости. С

уменьшением коэффициента эжекции скорость потока жидкой смеси вырастет, что уменьшит налипание на стенки трубопровода пиролизной жижи. Конструкция газожидкостного эжектора представлена на рис. 4.3.

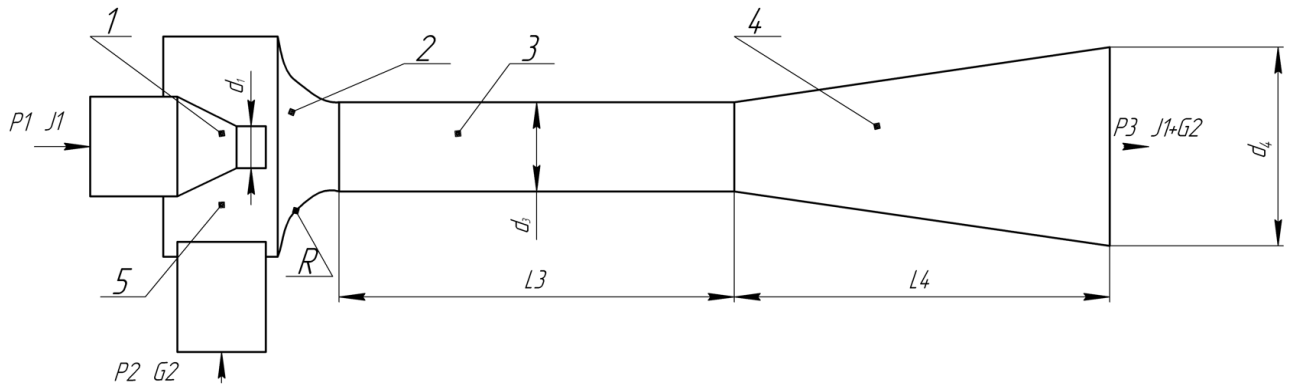


Рисунок 4.3 – Газожидкостный эжектор: 1 – сопло; 2 – входной участок; 3 – камера смешения; 4 – диффузор; 5 – приемная камера

Расчет эжектора начинается с определения его выводного сечения рабочего сопла f_{p1} (m^2) по формуле [10]:

$$f_{p1} = \frac{J1}{\varphi} \cdot \sqrt{\frac{v_p}{2\Delta P_{ex}}} \quad (4.59)$$

где φ – коэффициент скорости, (0,95); v_p – удельный объем эжектирующей жидкости, m^3/kg , вычисляемой по формуле:

$$v_p = 1/\rho_j \quad (4.60)$$

Определение удельных долей газа осуществляют из уравнений материального и теплового баланса. На рис. 4.4 представлена схема материальных и тепловых потоков в конденсаторе пиролизных газов.

При заданных значениях расходов жижи и неконденсирующегося газа температура эжектирующей жидкости T_k ($^{\circ}C$) определяется из соотношения:

$$T_k = \frac{(c_j G_j + c_q G_q) T_{np} + G_j r - c_x G_x \Delta T_x}{c_q G_q + c_j G_j} = f(G_x \Delta T_x), \quad (4.61)$$

где T_{np} – температура смеси пиролизных газов на входе в эжектор, $^{\circ}C$; r – скрытая теплота парообразования смеси пиролизных газов, $Dж/kg$; ΔT – температурный напор хладагента, разность температуры хладагента на входе и выходе, $^{\circ}C$; c_j , c_q , c_x – теплоемкость, соответственно жижи, газа,

хладогента, Дж/°С; G_x – расход хладогента, кг/с.

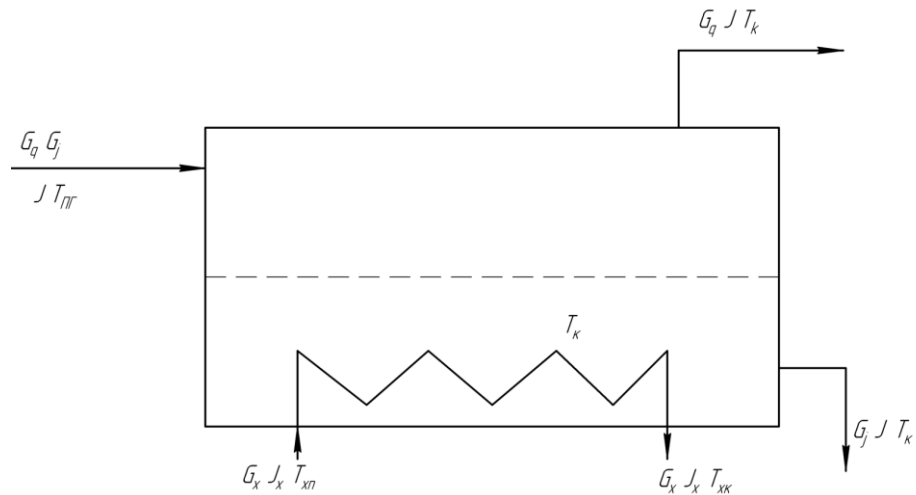


Рисунок 4.4 – Схема материальных и тепловых потоков в конденсаторе

Далее находим диаметр выводного сечения рабочего сопла:

$$d_1 = 2\sqrt{\frac{f_{p1}}{\pi}}. \quad (4.62)$$

Площадь торцевого сечения камеры смешения рассчитывается по уравнению:

$$f_3 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \cdot f_{p1}, \quad (4.63)$$

где $a = 0,95$;

$$c = 1,19 \cdot (1 + \beta)^2, \quad (4.64)$$

$$b = -(0,975 + c - 0,78 \cdot \beta^2). \quad (4.65)$$

Диаметр камеры смешения определяется соотношением:

$$d_3 = 2\sqrt{\frac{f_3}{\pi}}. \quad (4.66)$$

Радиус входного участка рассчитывается по формуле:

$$R = 0,8 \cdot d_3. \quad (4.67)$$

Угол конусности диффузора при его вершине γ равен $7 - 10^\circ$. Диаметр и длина диффузора рассчитываются по соотношениям:

$$d_4 = 4\sqrt{\frac{f_3}{\pi}}, \quad (4.68)$$

$$L_4 = \operatorname{tg} \gamma \cdot \left(\frac{d_4}{2} - \frac{d_3}{2}\right). \quad (4.69)$$

Длина камеры смешения зависит от диаметра камеры смешения:

$$L_3 = 8 \cdot d_3. \quad (4.70)$$

Корпус конденсатора — это сварная емкость, внутри которой размещены различные уловители тяжелых элементов пиролизных газов. После эжекции дистиллят протекает по наклонным желобам- дефлекторам (рис. 4.5).

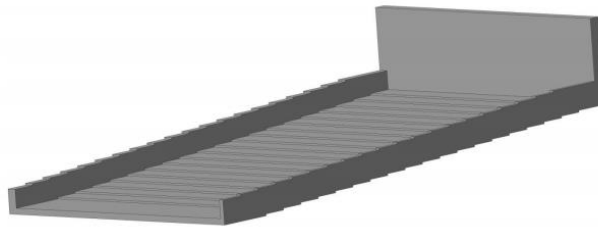


Рисунок 4.5 – Наклонный ступенчатый желоб дефлектор

Затем отделившиеся молекулы газа проходят через систему каплеотбойников (рис. 4.6) для удаления влаги из молекул газа.

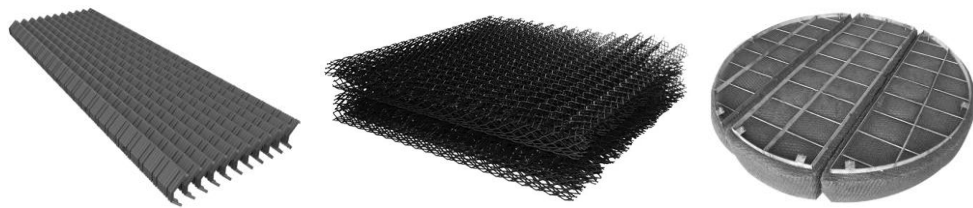


Рисунок 4.6 – Каплеотбойники и туманоуловители

Конечное отделение жидкости от газов происходит в туманоуловителях проходя через которые несконденсированный горючий газ попадает в топку пиролизной зоны. Созданию ламинарного движения жидкости в сепараторе способствует перфорированная решетка. Данная решетка отделяет турбулентный и ламинарный поток. В ламинарном потоке жидкость разделяется на воду и пиролизное масло.

4.2.5 Методика расчета узла подготовки перегретого пара

Процесс активации угля происходит водяным перегретым паром, образовавшимся в камере охлаждения и имеющим температуру 600 °С. Прогрев пара до 900 °С осуществляется во встроенном в рубашку пиролизной зоны змеевиковом пароперегревателе.

При заданных значениях массы пара m_{Π} (кг), для активации угля и известном времени процесса активации τ_A (с) можно найти объемный расход перегретого пара G_{Π} (м³/с):

$$G_{\Pi} = \frac{m_{\Pi}}{\tau_A \cdot \rho_{\Pi}}, \quad (4.71)$$

где ρ_{Π} – плотность пара, кг/м³.

Число трубок n находится из уравнения:

$$n = \frac{4 \cdot G_{\Pi}}{\pi \cdot d_f^2 \cdot w_{\Pi}}, \quad (4.72)$$

где w_{Π} – средняя скорость пара, км/с.

Диаметр трубки d_f соответствует стандартному значению исходя из производительности пароперегревателя.

Коэффициент теплоотдачи для пара рассчитывается по выражению:

$$\alpha_{\Pi} = \frac{0,018 \cdot \left(\frac{w_{\Pi} \cdot d_{\text{внут}}}{\nu_{\Pi}} \right)^{0,8} \cdot \lambda_{\Pi}}{d_{\text{внут}}}, \quad (4.73)$$

где λ_{Π} – теплопроводность пара, Вт/(м·°С); ν_{Π} – кинематическая вязкость пара м²/с.

Внутренний диаметр трубки определяется соотношением:

$$d_{\text{внут}} = d_f - 2\delta, \quad (4.74)$$

где d_f – диаметр трубки, м; δ – толщина стенки трубки, м.

Межтрубные расстояния S_1 и S_2 (м) выбираются из условия:

$$S_1 = S_2 = (2 \div 3) \cdot d_f, \quad (4.75)$$

Для пароперегревателей, в которых в качестве теплоносителей

используются топочные газы, наиболее оптимальной конструкцией сечения межтрубного пространства f (м²) будет квадрат или прямоугольник. Внутреннее сечение кожуха f_c пароперегревателя можно определить из соотношения:

$$f_c = (S_1 \cdot (z_i + 1)) \cdot (S_2 \cdot (z_j + 1)) \quad (4.76)$$

где z_i , z_j – соответственно число трубок пароперегревателям в рядах: вертикальном и горизонтальном.

При квадратном сечении:

$$z_i = z_j = \sqrt{n}. \quad (4.77)$$

Живое сечение межтрубного пространства f определяется из соотношения:

$$f = f_c - (0,785 \cdot d_f^2) \cdot n. \quad (4.78)$$

Эквивалентный диаметр прямоугольного канала, по которому циркулирует топочный газ $d_э$ (м) определяется соотношением:

$$d_э = 2 \sqrt{\frac{S_1 \cdot S_2}{\pi}}. \quad (4.79)$$

Количество теплоты, необходимое для подогрева пара Q_{Π} (Дж), определяется выражением:

$$Q_{\Pi} = m_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot (t_{\Pi}^{вх} - t_{\Pi}^{вых}), \quad (4.80)$$

где c_{Π} – теплоемкость пара, Дж/(кг·°С); $t_{\Pi}^{вх}$ – температура пара на входе в пароперегреватель, °С; $t_{\Pi}^{вых}$ – температура пара на выходе из пароперегревателя, °С.

Потери теплоты в окружающую среду, отнимаемой от теплоты топочного газа, определяется соотношением:

$$Q_{потерь} = (0,05 - 0,1) \cdot Q_{Г}, \quad (4.81)$$

Количество теплоты, отдаваемое топочными газами для подогрева пара $Q_{ТГ}$ (Дж), определяется выражением:

$$Q_{ТГ} = Q_{\Pi} + Q_{потерь}, \quad (4.82)$$

где c_{Π} – теплоемкость пара, Дж/(кг·°С); $t_{\Pi}^{вх}$ – температура на входе в пароперегреватель, °С; $t_{\Pi}^{вых}$ – температура на выходе из пароперегревателя, °С.

При известном количестве теплоты, которую топочные газы передают водяному пару, можно найти массу топочных газов $m_{ТГ}$ (кг), необходимых для перегрева пара:

$$m_{ТГ} = \frac{Q_{ТГ}}{c_{ТГ} \cdot (t_{ТГ}^{вх} - t_{ТГ}^{вых})}, \quad (4.83)$$

где $c_{ТГ}$ – теплоемкость пара, Дж/(кг·°С); $t^{вх}$ – температура топочного газа на входе в пароперегреватель, °С; $t^{вых}$ – температура топочного газа на выходе из пароперегревателя, °С.

Объемный расход топочного газа $G_{ТГ}$ (м³/с) рассчитывается по соотношению:

$$G_{ТГ} = \frac{m_{ТГ}}{\tau_A \cdot \rho_{ТГ}}, \quad (4.84)$$

где $\rho_{ТГ}$ – плотность топочных газов (кг/м³); $m_{ТГ}$ – масса топочных газов, кг.

Скорость топочных газов $w_{ТГ}$, м/с, можно найти по выражению:

$$w_{ТГ} = G_{ТГ} / f. \quad (4.85)$$

Коэффициент теплоотдачи для топочного газа рассчитывается по уравнению:

$$\alpha_{ТГ} = \frac{0,018 \cdot \left(\frac{w_{ТГ} \cdot d_{\text{э}}}{\nu_{ТГ}} \right)^{0,8} \cdot \lambda_{ТГ}}{d_{\text{э}}}, \quad (4.86)$$

где $\lambda_{ТГ}$ – теплопроводность топочных газов, Вт/(м·°С); $\nu_{ТГ}$ – кинематическая вязкость топочных газов, м²/с.

Коэффициент теплопередачи определяется из уравнения:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{П}} + \frac{1}{\alpha_{ТГ}} + \frac{\delta}{\lambda_c}}, \quad (4.87)$$

где λ_c – теплопроводность материала стенки, Вт/м·°С.

Температурный напор Δt (°С) для противоточного движения пара и топочного газа определяется выражением:

$$\Delta t = \frac{(t_{ТГ}^{ex} - t_{П}^{ex}) - (t_{ТГ}^{вх} - t_{П}^{вх})}{\ln \frac{(t_{ТГ}^{ex} - t_{П}^{ex})}{(t_{ТГ}^{вх} - t_{П}^{вх})}}. \quad (4.88)$$

Поверхность теплообмена F (m^2) определяется уравнением:

$$F = \frac{Q_{ТГ}}{k \cdot \Delta t \cdot \tau_A}. \quad (4.89)$$

Зная поверхность теплообмена, количество и диаметр трубок, можно найти их длину L (м):

$$L = \frac{F}{\pi \cdot (d_{внут} + \delta) \cdot n}. \quad (4.90)$$

На рис. 4.7 изображена схема пароперегревателя.

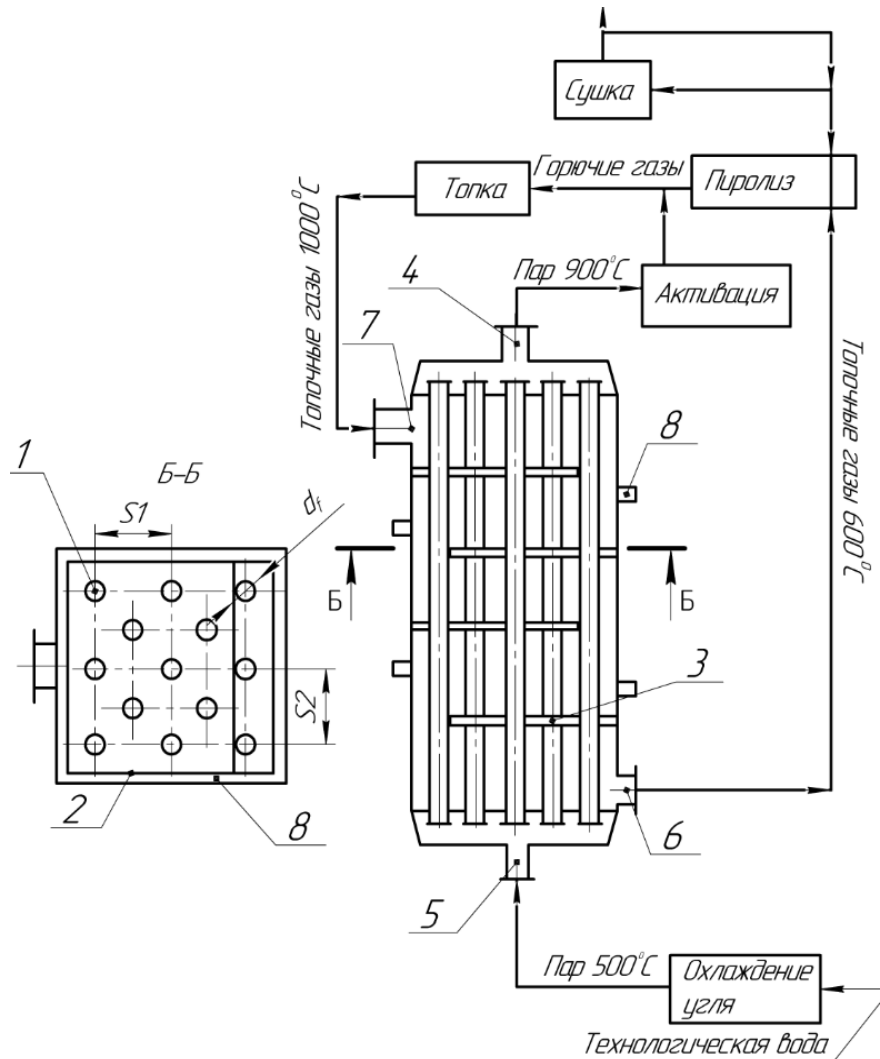


Рисунок 4.7 – Схема теплообмена водяного пара и топочных газов в установке производства активированного угля: 1 – трубки; 2 – кожух; 3 – перегородки; 4 – патрубок; 5 – патрубок; 6 – патрубок; 7 – патрубок; 8 – температурные компенсаторы

Конструктивно пароперегреватель представляет собой герметичную сварную емкость – стальной кожух 2 с температурными компенсаторами 8, внутри которого расположены трубки 1 подогреваемого водяного пара. Подогревающий теплоноситель (топочные газы) подается в патрубок 7, циркулирует по межтрубному пространству и удаляется через патрубок 6. Перегретый пар поступает через патрубок 5 и удаляется через патрубок 4. Перегородки 3 усиливают теплообмен [84].

4.2.6 Методика расчета системы очистки топочных газов

Топочные газы – это отработанная газовая смесь H_2 , CO , CH_4 , SO_4 . Задача очистки топочных газов состоит в удалении сернистого газа SO_4 из парогазовой смеси. Для очистки топочного газа используют абсорберы, в качестве абсорбата используется технологическая вода. Схема аппарата очистки топочных газов приведена на рис. 4.8.

В установке для очистки газов отработанный топочный газ по патрубку 1 поступает в абсорбер. Абсорбент (вода) поступает через патрубок 3 и распыляется через коллектор 2. Отработанный топочный газ и вода движутся навстречу через насадку 4. Топочный газ пройдя через насадку и фильтр 6 очищается и покидает абсорбер через патрубок 9. Движение газа и создание избыточного давления в абсорбере осуществляется газодувкой 11. Вода, очистив газ, проходит через фильтр 5. Через патрубок слива абсорбента 7 вода сливается из абсорбера к зоне охлаждения. Избыток воды сливается через патрубок 8 в канализацию. Напор воды для подачи в коллектор 3 и в зону охлаждения создает насос 10 [92].

Основная характеристика абсорбера – массовая производительность по абсорбируемым вредным примесям G (кг/с) определяется выражением:

$$G = \frac{V \cdot y_H \cdot M \cdot \alpha}{k}, \quad (4.91)$$

где V – объемный расход абсорбируемого газа, m^3/c ; y_H – начальная концентрация

вредных веществ в газовой смеси, выраженная в мольных долях; M – молекулярная масса абсорбируемого газа; k – объем, занимаемый 1 кмоль газа, m^3 ; α – коэффициент извлечения вредного газа, определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{y_{pH} - y_{pK}}{y_{pH}}, \quad (4.92)$$

где y_{pH} , y_{pK} – начальная и конечная концентрация вредных веществ в газовой смеси, соответственно, %.

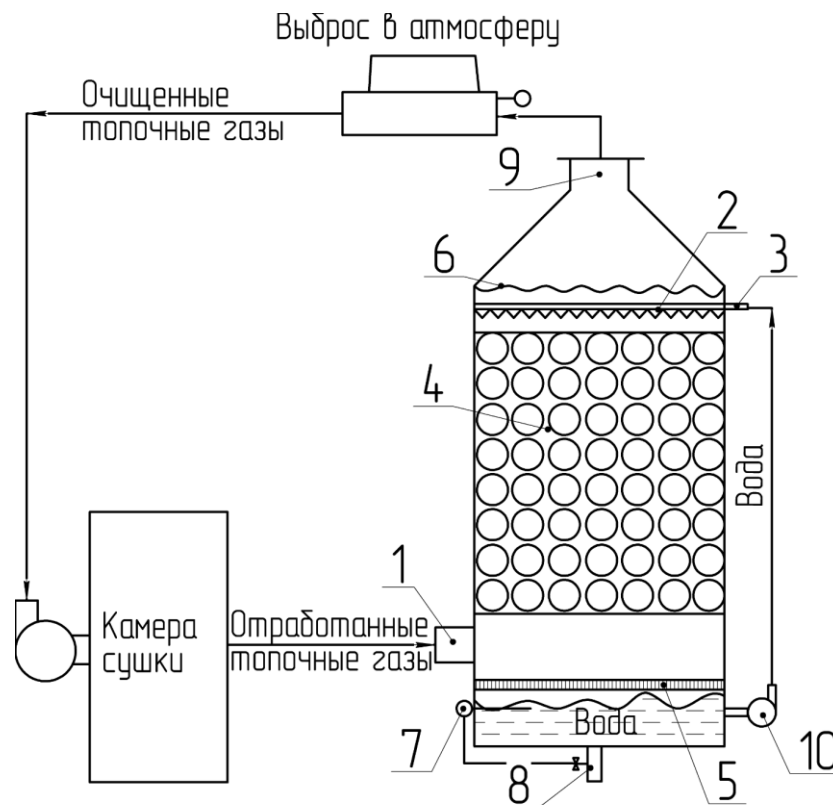


Рисунок 4.8 – Схема аппарата очистки топочных газов: 1 – патрубок; 2 – коллектор; 3 – патрубок; 4 – насадка; 5 – фильтр; 6 – фильтр; 7 – патрубок слива адсорбента; 8 – патрубок слива; 9 – патрубок; 10 – насос; 11 – газодувка

Расход абсорбента для очистки газа L (кг/с) рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{G \cdot \varepsilon}{X_{pK} - X_{pH}}, \quad (4.93)$$

где ε – избыток абсорбента, %; X_{pH} , X_{pK} – начальная и конечная концентрации вредного газа в абсорбенте, соответственно, кг/кг.

Для определения диаметра абсорбера необходимо выбрать тип насадки и материал. Абсорбер работает в агрессивной среде, поэтому в качестве насадки

оптимальным выбором будут керамические кольца Рашига.

Эквивалентный диаметр кольца Рашига $d_э$ (м):

$$d_э = \frac{4V_{св}}{\sigma}, \quad (4.94)$$

где $V_{св}$ – относительная величина объема емкости насадки абсорбера к общему объему емкости абсорбера, $\text{м}^3/\text{м}^3$; σ – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Скорость газа в абсорбере w (м/с) определяется соотношением:

$$w = \frac{\text{Re}_{св} \cdot \mu_y}{d_э \cdot \rho_y}, \quad (4.95)$$

где μ_y – вязкость газовой смеси при рабочих условиях, Па·с; ρ_y – средняя плотность газовой фазы при рабочих условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\text{Re}_{св}$ – число Рейнольдса для газовой фазы.

Диаметр адсорбера D (м) определяется по расходу топочного газа Q ($\text{м}^3/\text{с}$) и его скорости в абсорбере:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot w}}. \quad (4.96)$$

Высота абсорбера складывается из высоты насадки H_n (м) верхней части $h_в$, где расположен ороситель и фильтр газа, и нижней части, где находится емкость воды и фильтр для ее очистки.

Высота насадочной зоны определяется с учетом движущей силы в колонне. В свою очередь, движущая сила внизу колонны ΔP_H определяется разностью парциальных давлений газа на входе в абсорбер и равновесном с жидкостью, вытекающей из абсорбера, а движущая сила вверху колонны ΔP_B определяется разностью равновесного с водой парциального давления и давления очищенного газа, выходящего из трубы абсорбера. Средняя движущая сила абсорбции $\Delta P_{ср}$ определяется по формуле:

$$\Delta P_{ср} = \frac{\Delta P_H - \Delta P_B}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta P_H}{\Delta P_B}}. \quad (4.97)$$

Высота насадной колонны определяется выражением:

$$H_H = \frac{G}{M \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \sigma \cdot K_{\Delta P} \cdot \Delta P_{cp}}, \quad (4.98)$$

где $K_{\Delta P}$ – коэффициент массопередачи при абсорбции.

Для определения мощности газодувки необходимо знать гидравлическое сопротивление колонны с насадкой Δp , складываемое из гидравлического сопротивления орошаемой насадки и общих потерь давления на преодоление местных сопротивлений в колонне. Общее давление, развиваемое газодувкой, Па:

$$P = (k_p + k_{pc}) \cdot (P - P_{\text{атм}} + \Delta p), \quad (4.99)$$

где k_p – коэффициент, учитывающий потери давления в подводящих газопроводах (1,05 – 1,1); k_{pc} – коэффициент, учитывающий потери давления при переходах от камеры к абсорберу (1,5 – 3), применяется при удаленном расположении газодувки от абсорбера; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; P – давление абсорбции.

Мощность газодувки, Вт:

$$N_{\Gamma} = (V \cdot P) / \eta. \quad (4.100)$$

Мощность насоса рассчитывается исходя из затрат на создание требуемого напора потока в трубопроводе $\Delta p_{\text{ж}}$ по формуле:

$$N_H = (V_A \cdot \Delta p_{\text{ж}}) / \eta, \quad (4.101)$$

где V_A – объемный расход абсорбента м³/с.

4.3 Алгоритм расчета установки производства активированного угля

Блок-схема алгоритма расчета процесса установки производства активированного угля из отходов растительного происхождения, включающая девять стадий процесса, представлена на рис. 4.9. Алгоритм разбит на блоки, каждый из которых соответствует определенной стадии процесса.

Задачей алгоритма расчета является определение основных параметров установки при заданной совокупности внешних факторов.

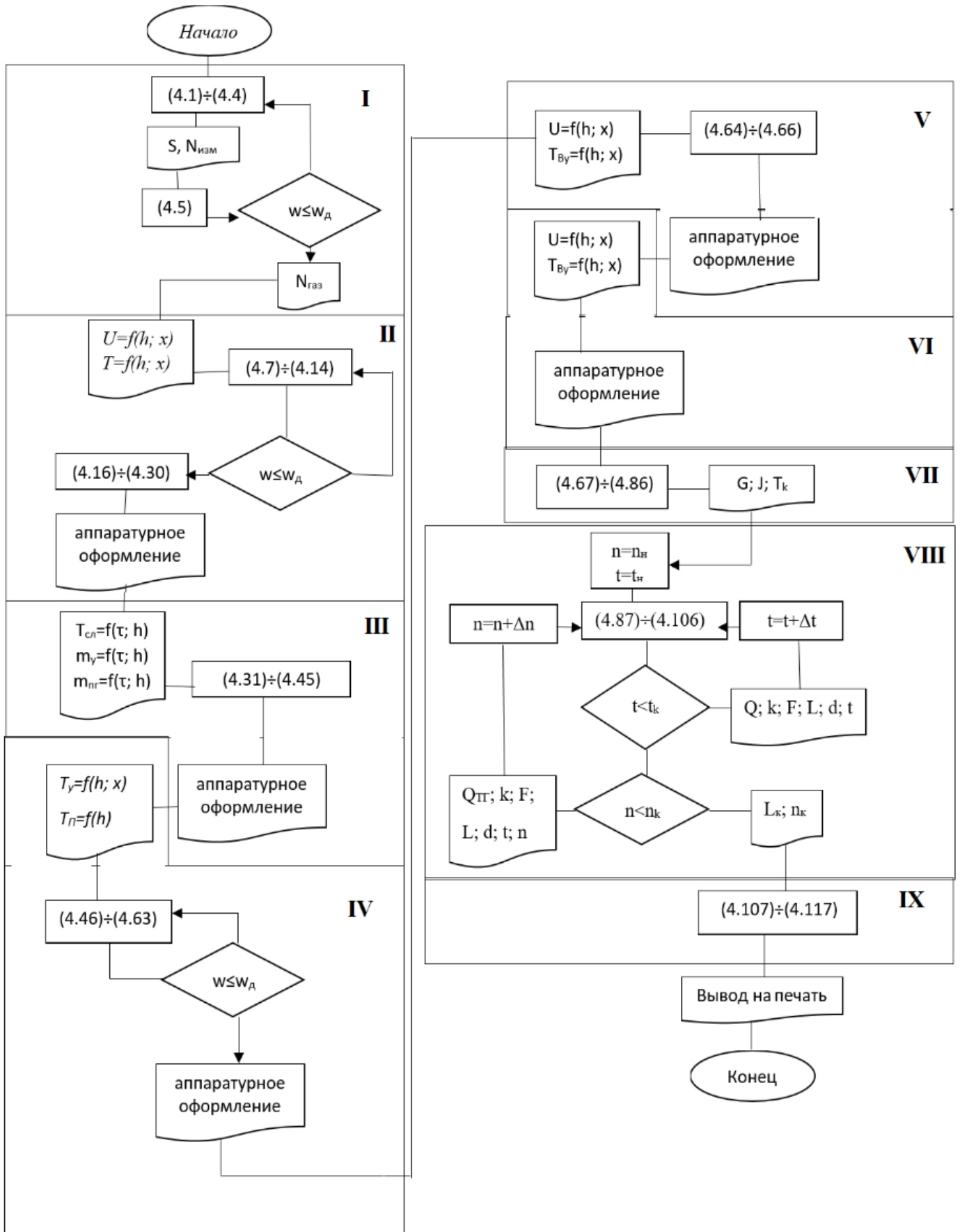


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма расчета установки производства активированного угля из растительных отходов

В первом блоке представлен расчет узла пневмотранспортирования измельченных частиц отходов в среде топочных газов, определяется скорость транспортирования различных типов частиц. Во втором блоке ведется расчет геометрических параметров узла конвективной сушки. В третьем блоке рассчитывается узел пиролиза. В четвертом блоке производится расчет шахтного аппарата для активации угля. В пятом блоке рассчитывается зона конвективного охлаждения. В шестом блоке производится расчёт геометрических параметров оборудования для вакуумной сушки активированного угля. В седьмом блоке моделируется процесс сепарации пиролизных газов, смешанных с газами активации на горючий газ и пиролизный дистиллят. Определяются дольные составляющие горючего газа и дистиллята. Рассчитываются геометрические характеристики эжектора. В восьмом блоке ведется расчет теплообмена между охлаждаемым топочным газом и подогреваемым водяным паром. Результатом расчета является подбор рациональных характеристик теплообменного аппарата. В десятом блоке моделируется процесс абсорбции отработанных топочных газов технологической водой. Определяются геометрические характеристики аппарата и количество технологической воды, необходимой для абсорбции топочных газов.

Разработанный алгоритм расчета позволяет определить производительность установки в зависимости от типа перерабатываемого сырья, констант скоростей химической реакции растительных компонентов, коэффициента теплопроводности насыпного слоя.

4.4 Анализ результатов моделирования установки получения активированного угля

На основании методики расчёта аппаратного оформления процесса получения активированного угля были определены рациональные параметры для проектирования ресурсо- и энергосберегающего оборудования по получению активированного угля из растительных отходов.

Результатом моделирования скорости витания частицы w_b от насыпной

плотности ρ стало построение в пакете Mathcad зависимости $w_B = f(\rho)$, изображенной на рис. 4.10. Данная зависимость показывает, что при относительно высоких значениях толщины частицы требуется более высокая скорость витания при одной и той же насыпной плотности.

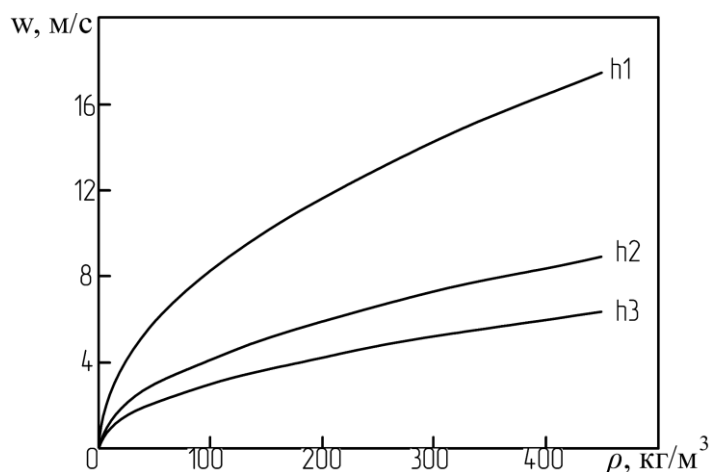


Рисунок 4.10 – Зависимость скорости витания от насыпной плотности частиц $h1=5$ мм; $h2=1$ мм; $h3=0,5$ мм

Была создана зависимость диаметра трубопровода от объемного расхода газа (рис. 4.11). Геометрия частиц учитывается при расчете оборудования.

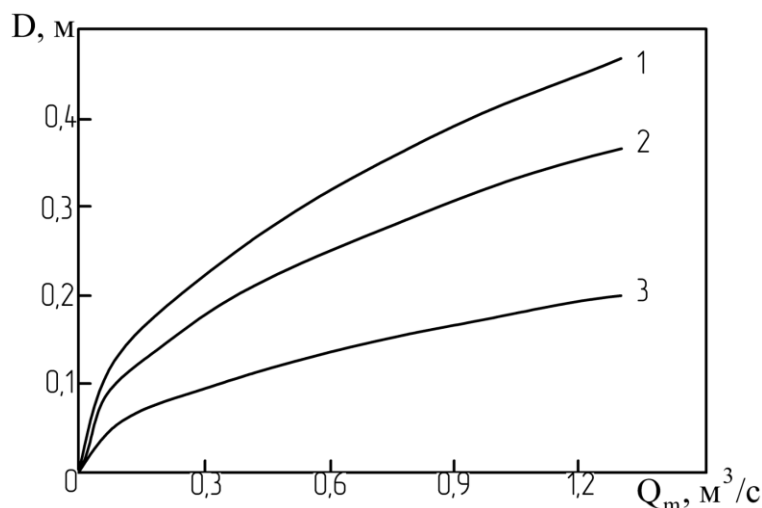


Рисунок 4.11 – Зависимость диаметра трубопровода от объемного расхода сырья на транспортировку: 1– луэга семян подсолнечника; 2– коэтра масличного льна; 3 – дробленая скорлупа грецкого ореха

На рис. 4.12 приведены результаты моделирования по расчету объема камеры сушки в зависимости от исходного влагосодержания для различных видов органических отходов.

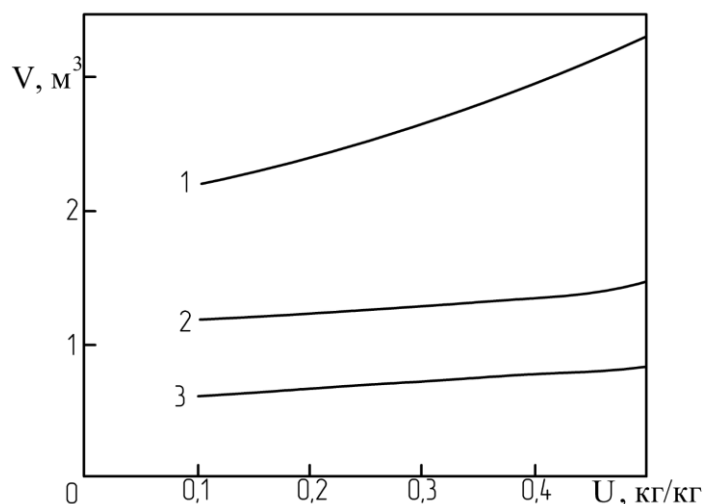


Рисунок 4.12 – Зависимость объема камеры сушки от влагосодержания и типа высушиваемых отходов: 1 – для дробленой скорлупы грецкого ореха; 2 – для лузги семян подсолнечника; 3 – для костры масличного льна

Анализ зависимостей показывает, что объем сушильной камеры при сушке скорлупы грецкого ореха почти в 3 раза превышает объем сушильной камеры для сушки костры льна, и в 2,5 раза для лузги подсолнечника. Обусловлено это длительностью процесса сушки крупнодисперсных частиц.

На рис. 4.13. приведены расчетные кривые сечения патрубка подвода теплоносителя сушильной камеры от начального влагосодержания и типа отходов.

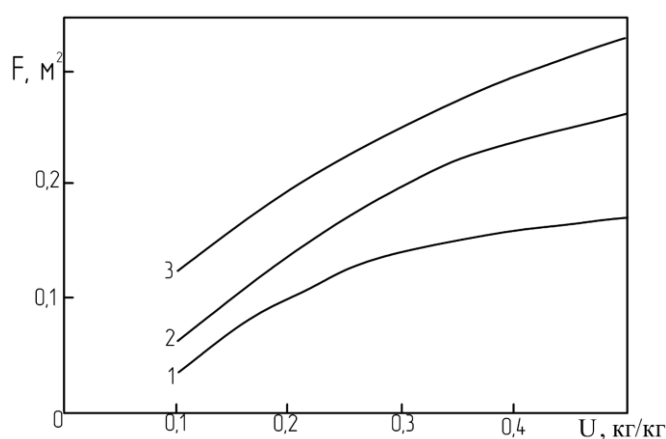


Рисунок 4.13 – Зависимость требуемого сечения патрубка подвода теплоносителя сушильной камеры от начального влагосодержания и типа отходов: 1 – для костры масличного льна; 2 – для лузги семян подсолнечника; 3 – для дробленой скорлупы грецкого ореха

Из анализа представленных зависимостей видно, что конструктивные размеры камеры сушки сильно зависят от начального влагосодержания сырья и

сырья, подлежащего сушке.

Анализ зависимостей показал, что конструктивные размеры узла сушки в установке производства активированного угля определяются также производительностью по требуемому сырью.

На рис. 4.14 приведена расчетная зависимость времени нагрева слоя частиц отходов до 500 °С от толщины слоя частиц в камере пиролиза. Эта зависимость позволяет определить рациональные размеры пиролизной зоны для разных видов отходов.

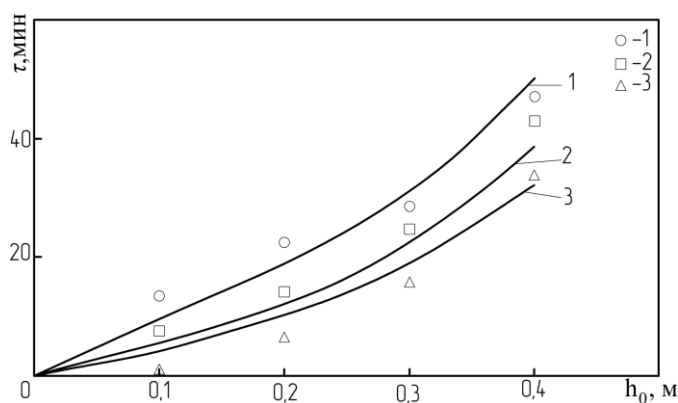


Рисунок 4.14 – Расчетные и экспериментальные зависимости времени нагрева слоя частиц: 1 – для дробленой скорлупы грецкого ореха; 2 – для лузги семян подсолнечника; 3 – для костры масличного льна

В соответствии с методикой расчета смоделирована зависимость отводимой теплоты топочного газа от времени активации и количества трубок теплоносителя рис. 4.15.

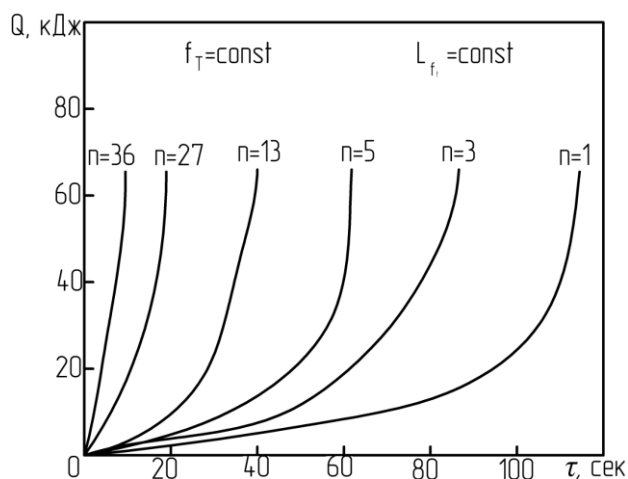


Рисунок 4.15 – Зависимость отводимой теплоты топочного газа от времени активации и количества трубок теплоносителя

По расчетам модели можно выбрать оптимальное число трубок при известном времени активации и длине газохода для топочных газов.

На рис. 4.16 приведены расчетные значения изменения суммарной длины трубок от их диаметра при различных расходах теплоносителя от расхода пара.

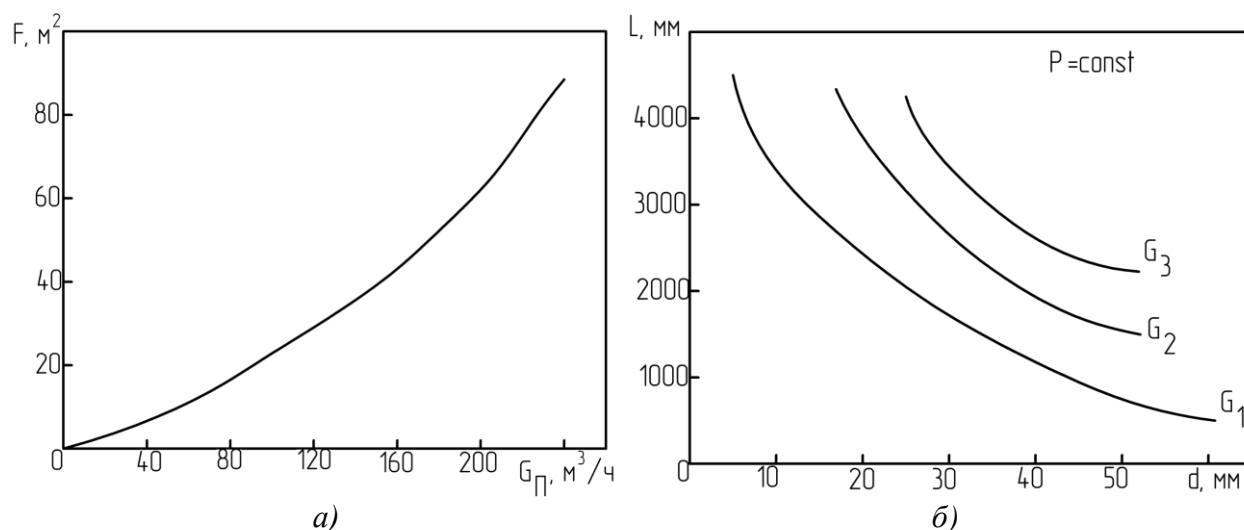


Рисунок 4.16 – Геометрические параметры теплообменной поверхности (а – зависимость теплообменной поверхности от расхода пара; б – соотношение длин трубок от их диаметра при различных производительностях по пару; $G_1=0,02 m^3/c$; $G_2=0,014 m^3/c$; $G_3=0,009 m^3/c$)

4.5 Технико-экономическое обоснование термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь

Для оценки конкурентоспособности разрабатываемого оборудования необходимо определить себестоимость производства активированного угля. Технико-экономические показатели зависят от стоимости сырья.

Срок окупаемости оборудования оценивался исходя из производительности оборудования и стоимости сырья. Поскольку сырьевая база для переработки очень широка, в качестве единицы расчета бралась усредненная цена отходов за тонну.

Расчет затрат на изготовление установки

Конструктивно установка представляет собой вертикальную реторту из сварных камер и стандартных изделий, таких как питатели, газодувки, насосы и др., также установка закреплена в стальной каркас, который необходим для ее нормального функционирования в цеху.

В стоимость изготовления установки входят: материалы, стандартные изделия, изготовление деталей, сборка и накладные расходы. Затраты на сборку одной установки производительностью 100 кг/ч по сухим отходам представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Затраты на комплектующие для сборки установки получения активированного угля

Наименование изделия	Наименование материала, узла/ покупное изделие	Ед. измерения	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма руб.
Пневмопровод	Труба D-160x5 мм Сталь 09Г2с	м	15	12000	180000
Газодувка	Покупное изделие	шт.	1	350000	350000
Камера сушки	Лист 5x1000x2000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	3	170000	510000
	Патрубок с фланцем 300x200 Сталь 12X18Н10Т	шт.	2	10000	20000
	Лист 1x1000x1000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	1	30000	30000
	Гофра термостойкая D-200	м	0,2	2000	2000
Камера пиролиза	Лист 5x1000x2000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	3	170000	510000
	Патрубок с фланцем 300x600 Сталь 12X18Н10Т	шт.	1	23000	23000
	Гофра термостойкая D-200	м	0,2	2000	2000
Коллектор подвода горючего газа	Покупное изделие	шт.	1	300000	300000
Теплоизоляционный корпус пиролизной зоны	Лист 2x1000x2000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	5	80000	400000
	Камень термостойкий для облицовки печей	-	-	200000	200000
	Дверца поддува	шт.	1	20000	20000
	Дверца топки	шт.	1	20000	20000
Камера активации	Лист 5x1000x2000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	3	170000	510000
	Патрубок с фланцем 300x200 Сталь 12X18Н10Т	шт.	2	10000	20000
	Лист 1x1000x1000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	1	30000	30000
	Гофра термостойкая D-200	м	0,2	2000	2000
Камера конвективного охлаждения	Лист 5x1000x2000 Сталь 12X18Н10Т	шт.	2	170000	510000
	Патрубок с фланцем 300x200 Сталь 12X18Н10Т	шт.	1	10000	10000
	Гофра термостойкая D-200	м	0,2	2000	2000

Продолжение таблицы 4.1

Коллектор подвода воды	Труба D-8 Сталь 12X18H10T	м	20	5000	100000
Накопительная емкость	Труба D-400 Сталь 12X18H10T	м	0,4	40000	40000
	Фланец трубный Сталь 12X18H10T	шт.	2	40000	80000
Вакуумная камера D-400	Труба D-400 Сталь 12X18H10T	м	0,4	40000	40000
	Фланец трубный Сталь 12X18H10T	шт.	2	40000	80000
Автоматизированный упаковочный аппарат	покупное изделие	шт.	1	120000	120000
Водокольцевой вакуумный насос	покупное изделие	шт.	1	80000	80000
Шнековый транспортер жаропрочный	покупное изделие	шт.	2	400000	800000
Шлюзовый питатель жаропрочный	покупное изделие	шт.	2	200000	400000
Вакуумный затвор D-400	покупное изделие	шт.	2	150000	150000
Пароперегреватель	Труба D-8 Сталь 12X18H10T	м	100	5000	500000
	Фланец трубный Сталь 12X18H10T	шт.	2	40000	80000
Кожухотрубный теплообменник	покупное изделие	шт.	1	300000	300000
Конденсатор пиролизных газов	Лист 5x1000x2000 Сталь 12X18H10T	шт.	6	170000	1020000
	Труба D-1000 Сталь 12X18H10T	м	0,2	10000	10000
	Патрубок с фланцем 300x200 Сталь 12X18H10T	шт.	6	10000	60000
	Каплеуловители	шт.	2	20000	40000
	Каплеотбойники	шт.	2	30000	60000
	Пеногасители	шт.	2	10000	20000
	Эжектор	шт.	1	120000	120000
	Перфорированная стенка	шт.	1	20000	20000
Абсорбер	покупное изделие	шт.	1	800000	800000
Дымосос	покупное изделие	шт.	1	1200000	1200000
Центробежный насос	покупное изделие	шт.	1	60000	60000
Трубопроводы	Труба D-300 Сталь 12X18H10T	м	30	10000	300000
Стандартные изделия				800000	800000
Датчики для контроля за процессом получения активированного угля				1000000	1000000
Всего Σ_M				13387000	

Транспортно-заготовительные расходы берутся в размере 2 – 3 % от стоимости материалов и покупных изделий:

$$Z_{\text{тр}}=0,02 \cdot Z_{\text{м}}= 1338700 \cdot 0,02=267740 \text{ руб.}$$

В таблице 4.2 представлены основные работы на изготовление и сборку установки получения активированного угля производительностью 100 кг/час.

Таблица 4.2 Затраты на изготовление установки получения активированного угля

Наименование узла	Вид работы	Трудоемкость н/ч	Сумма, руб.
Установка производства активированного угля	Сварочная	Сдельная	4000000
	Слесарная	Сдельная	600000
	Слесарно- сборочная	Сдельная	200000
	Пусконаладочные	Сдельная	400000
Каркас установки производства активированного угля	Сварочная	Сдельная	6000000
	Слесарно- сборочная	Сдельная	100000
БАПС	Монтажные	Сдельная	2000000
	Пусконаладочные	Сдельная	350000
Всего $Z_{\text{и}}$			16000000

Затраты на окончательную сборку установки производства активированного угля в сварном каркасе и внедренной БАПС определяют, как процент от суммы затрат на материалы, покупные изделия и полуфабрикаты. Среднеотраслевой процент затрат на сборку и монтаж установки составляет 60 %:

$$Z_{\text{сб}}=0,06 \cdot Z_{\text{м}}=1338700 \cdot 0,06=803000 \text{ руб.}$$

Накладные расходы

Накладные расходы составляют 60 % от суммы на изготовление и сборку установки:

$$Z_{\text{н}}=0,6 \cdot (Z_{\text{сб}} + Z_{\text{и}})=0,6 \cdot (1600000+803000)=2081800 \text{ руб.}$$

Общие затраты на изготовление установки

$$Z_{\text{о}}= Z_{\text{м}} + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{и}} + Z_{\text{сб}} + Z_{\text{н}}=4643870 \text{ руб.}$$

Затраты на производство активированного угля из растительных отходов

включают в себя затраты на основные и вспомогательные материалы, энергозатраты, амортизационные отчисления по оборудованию, заработную плату, общепроизводственные расходы.

После запуска установка производства активированного угля эксплуатируется непрерывно, и ее производственный цикл рассчитывается исходя из того, что установка работает 324 дня в году 24 часа в сутки. Влажность отходов берем 30 %. Исходя из этого найдем годовой расход сырья в тоннах:

$$P_c = B \cdot U \cdot 24 \cdot 324 = 0,1 \cdot 1,3 \cdot 24 \cdot 324 = 1011 \text{ тонн/год.}$$

Для производства активированного угля в установке могут использоваться различные виды отходов без ее технологической перенастройки, поэтому в качестве ценового показателя сырья берется усредненная цена по видам используемых отходов. Ценовые показатели отходов представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Затраты на сырье

№	Наименование материала	Единица измерения	Цена за единицу измерения, руб.
1	Мусорная древесина	тонна	400
2	Лузга подсолнечника	тонна	220
3	Косточки плодовых годных	тонна	250
4	Скорлупа грецкого ореха	тонна	400
5	Хлопковые отходы	тонна	700
6	Костра льна	тонна	600
Средняя цена C_c			430

Расходы на сырье в годовом выражении составят:

$$Z_c = C_c \cdot P_c = 498423 \text{ руб.}$$

При определении теоретической потребляемой мощности учитывают установленную мощность электрического оборудования и время, необходимое для производства активированного угля за смену. Теоретический расход электроэнергии установки производства активированного угля при полной комплектации представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 Затраты энергии на работу установки получения активированного угля

Наименование оборудования	Мощность, кВт	Количество, шт	Рабочая смена, ч	Потребляемая электроэнергия, кВт·ч
Дисковая рубительная машина	5	1	24	120
Газодувка мощная	4	1	24	96
Автоматизированный упаковочный аппарат	6	1	24	144
Водокольцевой вакуумный насос	3,2	1	24	76,8
Шнековый транспортер жаропрочный	2,1	2	24	100,8
Шлюзовый питатель жаропрочный	1,2	2	24	57,6
Вакуумный затвор D-400	0,4	2	24	19,2
Дымосос	11	1	24	264
Центробежный насос	2,5	2	24	120
Всего $\mathcal{E}_{\text{теор}}$				998,4

Фактический расход электроэнергии рассчитывается с учетом коэффициента использования мощности ($K_U=0,7$):

$$\mathcal{E}_{\text{факт}} = \mathcal{E}_{\text{теор}} \cdot K_U = 998,4 \cdot 0,7 = 699 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Суточная стоимость электроэнергии определяется умножением фактического потребления электроэнергии на стоимость одного киловатта:

$$Z_{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_{\text{факт}} \cdot C_{\mathcal{E}} = 699 \cdot 5,5 = 3844,5 \text{ руб.}$$

С учетом годового фонда рабочего времени (324 дня), годовые затраты электроэнергии для одной установки производительностью в 100 кг/ч по сухим отходам составят 776822 рубля. Данные затраты могут быть значительно сокращены путем установки дизельных двигателей на оборудование. Энергия будет поступать от несконденсированных горючих газов, полученных при сепарации пиролизных газов.

Сумма амортизационных отчислений рассчитывается на основании стоимости оборудования установки и годовых норм амортизации, которая составляет 14 %. Для установки производства активированного угля сумма амортизации составит 650142 рубля.

Процесс производства активированного угля в разрабатываемой установке автоматизирован и необходимости в большом штате работников нет. Затраты на зарплатный фонд представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Фонд заработной платы

Штат	Списочная численность работников	Оклад, руб./мес.	З/п общая, руб./мес.	Годовой фонд з/п, руб.
Оператор установки	4	60000	240000	2880000
Инженер-технолог	2	80000	160000	1920000
Всего З _{зп}				4800000

Таблицу 4.6 Расчет технико-экономических показателей установки получения активированного угля

Наименование параметра	Установка получения активированного угля
Стоимость оборудования, млн. руб.	13,9
Амортизация, 5 лет	6,4
Зарплата с отчислениями по ЕСН в год, млн. руб.	4,8
Общие затраты на изготовление установки, млн. руб.	30,3
Электроэнергия, млн. руб.	3,844
Годовой выпуск активированного угля, кг.	720000
Себестоимость кг, активированного угля, руб.	76
Цена кг оптовая активированного угля, руб.	100
Средняя прибыль с 1 кг. продукции, руб.	24
Годовая прибыль, млн. руб.	11,2
Рентабельность, %	26 %
Срок окупаемости, год	2,7

Себестоимость активированного угля, полученного путем переработки растительных отходов, включает в себя затраты на сырье и вспомогательные материалы, электроэнергию, заработную плату, общепроизводственные расходы, амортизационные отчисления. Таким образом, при оптовой цене реализации активированного угля по 100 рублей за килограмм чистая прибыль от реализации активированного угля, полученного на предложенной установке, с годовой производительностью 72 тонны составит 17280000 рублей. Срок окупаемости внедрения данной установки в производство составит 2 года 7 месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель процесса получения активированного угля из различных растительных отходов агропромышленного комплекса, таких как лузга семян подсолнечника, костра масличного льна, скорлупа грецкого ореха в непрерывно действующем аппарате.
2. В ходе проведения аналитических и экспериментальных исследовательских работ установлены рациональные технологические режимы (влажность сырья, температура пиролиза, скорость прогрева сырья, температура активации, степень выгорания угля, степень уплотнения активированного угля, форма частицы активированного угля) получения активированного угля термохимическим методом для таких растительных отходов, как лузга семян подсолнечника, костра масличного льна, скорлупа грецкого ореха. Установлены рациональные режимы получения осветляющего порошкового активированного угля по ГОСТ 4453-74 из костры масличного льна. Установлены рациональные режимы получения активированного угля по ГОСТ 6217-74 из скорлупы грецкого ореха. Так, из лузги семян подсолнечника при температуре активации 850 °С с плотностью гранул 900 кг/м³ степень выгорания для достижения равновесной активности по толуолу по ГОСТ 8703-74 составляет 37 %.
3. Разработан способ термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь, новизна технического решения защищена патентом на изобретение № 2789699.
4. Разработаны аппаратное оформление и инженерная методика расчёта промышленной установки с узлами подготовки отходов, сушки, пиролиза, активации, охлаждения активированного угля, рекуперации тепловой энергии, сепарации пиролизных газов, позволяющей использовать неконденсируемые пиролизные газы и горючую фракцию дистиллята в качестве топлива.
5. На основе теоретических расчётов обоснованы основные конструктивно-технологические параметры непрерывно действующей установки производства активированного угля производительностью 100 кг/час по влажному сырью.

6. Технико-экономический анализ показал, что получение активированного угля термохимическим методом экономически оправдано и позволяет получить прибыль даже при небольшой производительности. Срок окупаемости установки составит 2 года 7 месяца. Годовая прибыль от одной установки составит 11,2 млн. рублей.

Результаты исследований позволяют внедрить способ термохимической переработки растительных отходов в реальный сектор экономики, что подтверждается актом о принятии к внедрению (Приложение Г).

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Дальнейшие исследования заключаются:

- в создании комплексной энергосберегающей технологии переработки смесей органического сырья с получением гранулированных адсорбентов, высокоэффективного биотоплива, а также пиролизической смолы, используемой в качестве связующего вещества для получения гранул;
- во внедрении опытно-промышленной установки получения активированного угля непрерывного действия.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

T – температура, $^{\circ}\text{C}$;

U – влажность, %;

X – влагосодержание сушильного агента, %;

h – текущая координата высоты насыпного слоя отходов в камере пиролиза, м;

ρ – насыпная плотность частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c_m – теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

l – текущая координата расстояния от прилегающей стенки камеры пиролиза, м;

λ – эффективный коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;

$q_{\text{x.p}}$ – сток (приток) тепла за счет химических реакций, $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$;

V – заданная производительность установки по сухому продукту, $\text{м}^3/\text{ч}$;

k – константа скорости химических реакций;

φ – доля угля;

H – рабочая высота шахтного аппарата, м;

τ – время, с;

m – масса, кг;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}$;

w – скорость, м/с;

r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;

ε – критерий парообразования.

Индексы:

сл – слой сырья;

с – сырье;

у – уголь;

ПГ – пиролизные газы;

П – пар;

ГА – газы активации;

А – активация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров В.И., Изучение процесса термолиза методом термогравиметрии // В.И. Азаров, Г.Н. Кононов // Науч. тр. Моск. гос. ун-та леса. 1995. – М 227. – С. 27-32.
2. Активные угли. Эластичные сорбенты, катализаторы, осушители и химические поглотители на их основе. Номенклатурный каталог / под ред. д.т.н. В.М. Мухина / М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2003. – 280 с.
3. Беляев Е.Ю. Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях // Химия растительного сырья. 2000. – №2.– С. 5-15.
4. Богданович Н.И. Пиролиз технических лигнинов с получением углеродных адсорбентов и регенерацией химикатов / Н.И. Богданович, С.А. Цаплина, Л.Н. Кузнецова // Лесохимия и органический синтез. Тез. докл. II Российского совещания. – Сыктывкар. – 1996. – С. 115.
5. Богданович Н.И. Термохимический синтез новых углеродных материалов на основе технических лигнинов / Н.И. Богданович, Г.В. Добеле, Л.Н. Кузнецова, Н.В. Орлова // Физикохимия лигнинов. Мат-лы междунар. конференции. – 2005. – С. 105.
6. Брюханов, А.Ю. Методы решения экологических проблем в сельскохозяйственном производстве / А.Ю. Брюханов, В.Д. Попов, Э.В. Васильев // Известия Международной академии аграрного образования. – 2023. – № 65. – С. 167-171.
7. Концепция управления экологической безопасностью агроэкосистем / А.Ю. Брюханов, В.Д. Попов, Э.В. Васильев, Э.А. Папушин // АгроЭкоИнженерия. – 2022. – № 4(113). – С. 4-18.
8. Вазов В. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных / В. Вазов, Д. Форсайт; пер. с англ. Б.М. Будака и Н.П. Жидкова. – М.: Иностранная литература, 1963. – 487 с.
9. Воскобойников И.В., Шевченко А.О., Щелоков В.М. Технология производства активированных углей из древесных отходов // Лесной вестник. – 2012. – №28. –

С. 56-58.

10. Вураско А.В. Химия растительного сырья / А.В. Вураско, А.Р. Минакова, А.К. Жвирблите, И.А. Блинова // учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. государственный. лесотехнический ун-т, 2013. – 90 с.
11. Зайченко В.М., Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. Направления развития энергетики // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5. – №. 3. – С. 53-61.
12. Зайченко В.М., Сычев Г.А., Шевченко А.Л. Экзотермические эффекты низкотемпературного пиролиза биомассы // Сборник статей по материалам научно– практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017». – С. 494-497.
13. ГОСТ 4453-74 Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный Технические условия ОКП 21 6236 введ. 1976-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 10 с.
14. ГОСТ 8703-74 Уголь активный рекуперационный Технические условия ОКП 216212; введ. 1976-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1998. – 10 с.
15. ГОСТ 6217-74 УГОЛЬ Активный древесный дробленый Технические условия ОКП 21 6239; введ. 1976-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1998. – 10 с.
16. ГОСТ 30268-95 Угли активные импрегнированные ОКС 71.060 ОКП 216200; введ. 1977-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1996. – 10 с.
17. ГОСТ 33614-2015 Угли, активированные МКС 75.160.10; введ. 2017-04-01. – М.: Издательство стандартов, 2019. – 10 с.
18. Долгих, В.Т. Антибактериальная и антимикотическая активность модифицированных углеродных сорбентов / В.Т. Долгих, Л.Г. Пьянова, Т.И. Долгих // Наука и инновации - современные концепции: Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 01 июля 2022 года. – Москва: Инфинити, 2022. – С. 74-80.
19. Дубинин М.М. Современное состояние теории объемного заполнения микропор / М.М. Дубинин // Изв. АН СССР. Серия химическая. – 1991. – №21. - С. 9-30.

20. Забродский, С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
21. Емец Л.В., Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях / Р.М. Левит, И.М. Струкова, Е.Я. Данилова, А.Т. Кынин Химические волокна. – 1996. – С. 20-31.
22. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации / В.П. Исаченко. М.: Энергия, 1977. – 239 с.
23. Исследование термовлагопроводности древесины сосны: отчет НИС МЛТИ. – 1977. – 71 с.
24. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М., 1984. – 512 с.
25. Кинле Х. Активные угли и их промышленное применение / Х. Кинле, Э. Бадер // Пер. с нем. Л.: Химия, 1984. – 216 с.
26. Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы А.Н. Кислицын. — М.: Лесная промышленность, 1990. – С.312.
27. Ковернинский И.Н. Комплексная химическая переработка древесины / И.Н. Ковернинский [и др.] // Учебник — Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2002. – 347 С.
28. Коган А.Б. Равновесие между жидкостью и паром: справочное пособие / А.Б. Коган В.М. Фридман, В.В. Кафаров — М.-Л.: / Наука, Ленингр.отд.,1966. – 1426 с.
29. Кожухов Н.И. Вопросы ресурсосбережения и использования кусковых отходов лесопиления / Н.И. Кожухов, Е.В. Сазанова Лесной журнал. – 2000. – №21. – С. 69-74.
30. Козлов В.Н. Технология пирогенетической переработки древесины / В.Н. Козлов, А.А. Нимвицкий. – М., 1954. – 620 С.
31. Кольшкин Д. А., Михайлова К. К. Активные угли: свойства и методы испытаний. – М.: Химия, 1972. – 56 с.
32. Клименко В.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В. Рост потенциала возобновляемых источников энергии в России в условиях глобального потепления // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. –

Т. 25. – №. 3. – С. 6-27.

33. Компания «ТТ GROUP» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ttgroupworld.com/ru/>.
34. Компания «ЭЛП Групп» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energolesprom.ru/tehnologiya/>.
35. Крапивницкая Т.О., Богдашов А.А., Денисенко А.Н., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю., Семенычева Л.Л., Ворожцов Д.Л. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза торфа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2019. – Т. 9. № 4. – С. 750-758.
36. Кудратов А.М. Разработка технологии получения новых видов адсорбентов на основе бурого угля ангренского месторождения. Геотехнология. –2006. – №225. – С. 35-40.
37. Кузнецов Б.Н. Актуальные направления химической переработки возобновляемой растительной биомассы // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – №19. – С. 77-85.
38. Кузьмина Р.И., Штыков С.Н., Панкин К.Е., Иванова Ю.В., Панина Т.Г. Пирогенетическая переработка некоторых древесных отходов и отходов лущения семян // Химия растительного сырья. – 2010. – №3. – С. 61-65.
39. Лыков А.В. Теория теплопроводности. / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа. – 1967. – 599 с.
40. Машкина С.В. Электрический нагрев неэлектропроводного дисперсного сырья при производстве активированного угля: дис. канд. техн. наук. – Алматы. – 2009. – 127 с.
41. Меламед Ц.Э., Ахмина Е.И., Васильев Н.И., Грицай М.В., Рябов Н.Б. Хим. перераб. древесины. СПб. – 1992. – С. 7-9.
42. Михеева Н.С. Исследование механизма сушки влажных материалов / Н.С. Михеева //Труды МТИПП. – 1956. - Вып. Б. – С. 64-77.
43. Мухин В.М. Производство и применение углеродных адсорбентов: учеб. пособие / В.М. Мухин, В.Н. Клушин // М.: Российский химико- технологический университет им. М.В. Менделеева, 2012. – 308 с.

44. Мухин В.М. Активные угли. Эластичные сорбенты, катализаторы, осушители и химические поглотители на их основе / Под общей ред. д.т.н. В.М. Мухина. – М.: Издательский дом «Руда и металлы». – 2003. – 278 с.
45. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины: учебник для вузов / В.Д. Никишов. – М.: Лесн. пром-сть, 1985. – 264 с.
46. Олонцев В.Ф. // Хим. пром. – 1998. – №21. – С. 8-12.
47. Оффан К.Б., Петров В.С., Ефремов А.А. Закономерности пиролиза скорлупы кедровых орехов с образованием древесного угля в интервале температур 200-500 °С // Химия растительного сырья. – 1999. – №2. – С. 61-64.
48. Патент 2456236 (РФ) С01В 31/08 Способ получения сорбента органических соединений / Жежера Н.И., Самойлов Н.Г. (РФ) 2011104769/05; заявлено 09.02.2011; опубл. 20.07.2012.
49. Патент NQ2352349 (РФ) А61к 36/185 Способ переработки коры березы / Левданский В.А., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н. - 2008102252/15; заявлено 21.02.2008, опубл. 20.04.2009.
50. Патент № 2147926 С1 Российская Федерация, МПК В01J 20/30, С01В 31/08. Установка для получения углеродного сорбента: № 99111838/12: заявл. 11.06.1999: опубл. 27.04.2000 / Д.С. Хуснутдинов, В.А. Хаймин, В.А. Владимиров [и др.].
51. Патент №2257344 С1 МПК С01В 31/08 Способ получения активного угля: заявл. 2004126113/15, 2004.08.30: опубл. 2005.07.27 / М.А. Передерий, Г.И. Двоскин, А.Д. Дмитриев.
52. Патент № 2355633 С1 Российская Федерация, МПК С01В 31/08. способ получения активированного угля: № 2007136971/15: заявл. 28.09.2007: опубл. 20.05.2009 / Ю.Д. Юдкевич, В.И. Коршиков; заявитель Закрытое акционерное общество "Лонас технология".
53. Патент Способ получения активированного угля / Щипко М.Л., Янголов О.В., Кузнецов Б.Н. - 93034069/26; опубл. 27.12.1995 Б.И. М36.
54. Патент N22111923 (РФ) В01J20/20 Способ получения активного угля из косточек плодов и скорлупы орехов / В.П. Голубев, В.М. Мухин, А.М. Тамамьян, И.Д.

- Зубова и др. (РФ). – 97110295/25; заявлено 24.06.1997; опубл. 27.05.98 г. Бюл. NQ15.
55. Патент N2:2362734 (РФ) C01B31/08 Способ получения активного угля / В.М. Мухин, В.С. Гостев, В.В. Чебыкин, С.Н. Соловьев, В.А. Карев, – 2008120177/15; заявлено 22.05.2008; опубл. Г.А. Нагорная (РФ). 27.07.2009.
56. Патент 1663009 А 1 (SU) C10B53/2 Способ получения угля из гидролизного лигнина / Давыдова Л.Н., Киселев В.П., Воропаев Ю.М., Щипко М.Л., Симкин Ю.Я., Кузнецов Б.Н., Иванченко А.В. – 4470134/26; заявлено 05.08.1988; опубл. 15.07.1991. 62. Пат. 5 538 932 США. зап Zhiquan Q., McSие John C., Tolles E.D. Опубл. 27.07. 96.
57. Патент 2225754 (РФ) B01J20/00 Сорбент для очистки нефтесодержащих промышленных стоков и способ его получения Биктимиров А.Ф., Сармин И.А. (РФ) - 2001112085/15; заявлено 03.05.2001; опубл. 20.03.2004.
58. Патент N22463107 (RU) C01B031/16 Активированный уголь, импрегнированный кислотой, способы его получения и применения. / Кузуб Р. (СА), Так Д. (СА), Джонсон Р. (СА) 2009110159/05; заявлено 23.08.2006, опубл. 23.09.2010.
59. Петров Е. В., Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях / Л.Н. Григорьев, А.Г. Черкашин, Т.П. Буренина // Изв. высших учеб. завед. Лесной журнал. 1996. – №1-2. – С. 86-93.
60. Першин, Е. А. Анализ состояния производства гранулированных активных углей Е.А. Першин, Е.А. Фарберова, Н.Б. Ходяшев // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. – Т. 4. – С. 124-128.
61. Петров В.С., Симкин Ю.Я., Крылова ОК. // Химия в интересах устойчивого развития. – 1996. – Т.4. – М 4-5. – С. 389-394.
62. Петров В.С., Поборончук Т.Н. // 3-й Междунар. симп.” Каталитические превращения угля”, посвящ. памяти Г.К. Борескова, Новосибирск. 10-13 июля. 1997: Сб. тр. ч. 2. Новосибирск, 1997. – С. 325-326.
63. Пижурин, А.А. Исследования процессов деревообработки А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. — М.: Лесная промышленность, 1984. – С. 231.
64. Научно-теоретические основы синтеза углерод-углеродных адсорбентов

- медицинского назначения / Л.Г. Пьянова, А.В. Лавренов, Н.Н. Леонтьева, А.В. Седанова // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35.– № 13. – С. 58-60.
65. Протоdjяконов И.О. Явления переноса в процессах химической технологии / И.О. Протоdjяконов, Н.А. Марцулевич, А.В. Марков – Л.: Химия, 1981. – 264 с.
66. Пиялкин В.Н. Интенсификация процесса пиролиза измельченной древесины при повышенной температуре Текст. / В.Н. Пиялкин // Лесохимия и подсочка. – 1975. – № 910. – С. 13-14.
67. Пиялкин В.Н. Методика расчета температурных критериев при ультрапиролизе древесного сырья Текст. / В.Н. Пиялкин, В.И. Ширшиков, В.В. Литвинов – Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2010. – 187 с.
68. Пиялкин В.Н. Роль температурно-временных факторов при ультрапиролизе древесного сырья Текст. / В.Н. Пиялкин, А.Я. Киповский, С.А. Прокопьев, И.И. Белоусов // Известия ВУЗов: Лесной журнал. – №24. Архангельск, 2004. – С. 85-92.
69. Пиялкин В.Н. Сырье и продукты пирогенетической переработки биомассы дерева Текст. / В.Н. Пиялкин, А.С. Иванов, С.А. Прокопьев, – Санкт-Петербург: СПбГЛТА. – 2007. – 208 с.
70. Получение активированных углей из гидролизного лигнина с использованием отходов стадии карбонизации / В.В. Самонин, Е.А. Спиридонова, М.Л. Подвязников [и др.] // Экология и промышленность России. – 2022. –№ 9. – С. 4-9.
71. Сафин Р.Г. Энергосберегающая установка переработки органических отходов в топливо и адсорбенты / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников // Российский химический журнал. – 2023. – Т. 67. – № 3. – С. 17-24.
72. Исследование кинетики термического разложения отходов текстильной промышленности растительного происхождения / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 3(405). – С. 209-216.
73. Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного

- резонанса / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Л.Ю. Грунин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 5(389). – С. 173-185.
74. Пирогенетическая переработка органических отходов текстильной промышленности в адсорбенты / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Д.Ф. Зиатдинова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 5(395). – С. 229-235.
75. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиатдинова Д.Ф. Термическая переработка твердых растительных отходов методом медленного кондуктивного пиролиза. Экология и промышленность России. 2023 – № 11. – С. 9-14.
76. Моделирование процесса паровой активации углеродсодержащего сырья в технологической линии производства активированного угля / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, В.Г. Сотников, Н.Ф. Тимербаев // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26, № 12. – С. 114-119.
77. Оптимизация конструкции каркаса установки для производства активированного угля / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин // Вестник машиностроения. – 2022. – № 6. – С. 10-13.
78. Моделирование процесса термохимического разложения растительных отходов в технологической линии производства активированного угля / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, В.Г. Сотников [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 6. – С. 50-56.
79. Исследование сепарирования пиролизных газов при различном влагосодержании растительного сырья / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, А.Н. Загиров // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3. – С. 155-160.
80. Методика расчета зоны активации в установке производства активированного угля / Р. Г. Сафин, Р. Р. Зиатдинов, В. Г. Сотников, Д. Г. Рябушкин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 4(212). – С. 43-50.
81. Моделирование процесса охлаждения в установке производства активированного угля / Р. Г. Сафин, Р. Р. Зиатдинов, Т. О. Степанова [и др.] //

- Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 78-86.
82. Конденсатор смешения для разделения пиролизных газов / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Д. Г. Рябушкин [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 4. – С. 84-91.
83. Методика расчета пиролизной зоны в установке производства активированного угля / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиятдинов, В.Г. Сотников [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 26-35.
84. Пароперегреватель для установки производства активированного угля / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, И.Р. Ильясов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 394-400.
85. Моделирование процесса измельчения и транспортирования органических отходов в установке производства активированного угля / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиятдинов, В.Г. Сотников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 2(50). – С. 152-157.
86. Моделирование процесса измельчения и транспортировки органических отходов для установки по производству активированного угля / В.Г. Сотников // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 3(51). – С. 92-97.
87. Моделирование процесса сушки древесных отходов в установке производства активированного угля / Р. Г. Сафин, Р. Р. Зиятдинов, В. Г. Сотников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 4(52). – С. 79-86.
88. Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля / Р. Г. Сафин, Т. О. Степанова, Р. Р. Зиятдинов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 45-55.
89. Переработка органических отходов в пиролизное топливо / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, А.Н. Загиров, Р.А. Мифтахов // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 4(56). – С. 116-125.
90. Моделирование процесса сушки вторичного сырья в технологической линии производства активированного угля / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, В.Г. Сотников [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 117-127.
91. Обзор существующих установок для производства пиролизного топлива /

- В.Г. Сотников, А.Н. Загиров, Д.А. Гурьянов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 3(59). – С. 117-122.
92. Пирогенетическая переработка растительных отходов в активированный уголь: монография / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. – 108 с.
93. Пирогенетическая переработка органических отходов: монография / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, В.Г. Сотников; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во Отечество. – 2022. – 104 с.
94. Переработка органических отходов в пиролизное топливо: монография / А.Н. Загиров, В.Г. Сотников, Р.Г. Сафин; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во Отечество. – 2022. – 92 с.
95. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619183 Российская Федерация. Программа расчета температурных полей сыпучего слоя измельченного твердого сырья в условиях его термического разложения при кондуктивном подводе теплоносителя: № 2022618108: заявл.05.05.2022: опубл. 19.05.2022 / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 10
96. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680510 Российская Федерация. Программа решения нелинейной задачи теплопроводности для неподвижного слоя твердых частиц органического сырья при условии кондуктивного подвода теплоносителя: № 2023680510 заявл.22.09.2023: опубл. 02.10.2023 / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 10
97. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680933 Российская Федерация. Программа расчета процесса сушки измельченных коллоидных капиллярно-пористых тел в условии конвективного подвода теплоносителя: № 2023680933 заявл. 22.09.2023: опубл. 06.10.2023 / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 10
98. Патент № 2780782 С1 Российская Федерация, МПК F23G 5/027, B09B 3/30, B09B 3/40. Способ переработки твёрдых бытовых отходов: № 2021138318: заявл.

- 22.12.2021: опубл. 30.09.2022 / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, И.Ф. Хайруллин [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 9
99. Патент № 2789699 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/324, С10В 53/00. Способ получения активированного угля: № 2021135547: заявл. 03.12.2021: опубл. 07.02.2023 / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, А.С. Родионов [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 9
100. Патент № 2783823 С1 Российская Федерация, МПК С10В 49/10, С10G 9/00, В01J 8/00. Установка для производства пиролизного топлива: № 2021138320: заявл. 22.12.2021: опубл. 18.11.2022 / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, А. Н. Загиров [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 8
101. Свидетельство о государственной регистрации Базы данных № 2023621311 Российская Федерация. База данных термической переработки отходов растительного происхождения и продукты их термической переработки: № 2023621311: заявл.07.04.2023: опубл. 24.04.2023 / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – С. 32
102. Термохимическая переработка растительного сырья Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Родионов А.С., Загиров А.Н. Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всероссийской научно практической конференции (24 – 28 апреля 2023 г.) / под ред. Ю.М. Казакова [и др.]; Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ – 2023. – С. 304-308.
103. Механизм термического разложения растительного сырья. Ланкин К.А., Сотников В.Г. Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всероссийской научно– практической конференции (24-28 апреля 2023 г.) / под ред. Ю.М. Казакова [и др.]; Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ. – 2023. – С. 329-332.
104. Исследование жидких продуктов медленного кондуктивного пиролиза. Гурьянов Д.А., Сотников В.Г. Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всероссийской научно– практической конференции (24-28 апреля 2023 г.) / под ред. Ю.М. Казакова [и др.];

Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ. – 2023. – С. 340-343.

105. Математическое моделирование водопаровой активации древесного угля. Сотников В.Г. Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всероссийской научно– практической конференции (24-28 апреля 2023 г.) / под ред. Ю.М. Казакова [и др.]; Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ. – 2023. – С. 357-359.
106. Исследование тепломассопереноса при термохимическом разложении растительных отходов. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Рябушкин Д.Г. Тезисы докладов и сообщений: дополнительный выпуск XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену XVI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum 16-19 мая 2022 г. Научное электронное издание. С. 230-233.
107. Особенности проектирования вертикальных реторт// Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Ланкин К.А., Мифтахов Р.А. с. 300-302. Машиностроение и техносфера XXI века //Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. С – 374.
108. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиатдинов Р.Р., Рябушкин Д.Г., Гумеров Д.Р. Аппаратурное оформление процесса переработки древесных отходов в активированный уголь. с. 508-511// Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ. – 2021. – С. 627.
109. Производство активированного угля из органических отходов / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Р.Р. Зиатдинов [и др.] // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2021: Сборник материалов, Казань, 21-24 сентября 2021 г. Часть 1. – Казань: ГБУ «НЦБЖД». – 2021. – С. 686-691.
110. Пирогенетическая переработка органических отходов / В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин // Инновации и молодежь - два вектора развития Отечественной нефтехимии: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Нижнекамск, 23-24 сентября 2021 года – Нижнекамск: Публичное акционерное общество "Нижнекамскнефтехим". – 2021. – С. 53.

111. Установка переработки древесных отходов в активированный уголь / Р.Г. Сафин, Д.Ф. Зиатдинова, В.Г. Сотников [и др.] // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 17 июня 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 324-328.
112. Ушаков Д.Е., Карелин Д.В., Бычков А.Л. Получение топливных брикетов из растительной биомассы // Химия твердого топлива. – 2017. – №. 4. – С. 46-50.
113. Уникальная установка получения бионефти из растительных отходов построена в Татарстане // ОРГНЕФТЕХИМ Холдинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.onh-holding.ru/news/unikalnaya-ustanovka-polucheniya-bionefti-iz-rastitelnykh-otkhodov-postroena-v-tatarstane/>.
114. Тепломассоперенос при производстве активированного угля / В. Г. Сотников, А.Р. Хабибуллина, Д.Г. Рябушкин, К.А. Ланкин // Перспективы развития и применения современных технологий: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 16 декабря 2021 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2021. – С. 24-28.
115. Энергосберегающая технология переработки древесных отходов / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, И.Р. Каримов [и др.] // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 19-20 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 192-196.
116. Узел вакуумного охлаждения активированного угля / Д.Р. Абдуллина, Р.Р. Фахрутдинов, В.Г. Сотников // Вакуумная техника и технология: Десятая Российская студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции, Казань, 12–15 апреля 2021 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 161-162.
117. Моделирование зоны вакуумного охлаждения активированного угля /

- Д.Р. Абдуллина, Р.Р. Фахрутдинов, В.Г. Сотников // Вакуумная техника и технология: Десятая Российская студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции, Казань, 12-15 апреля 2021 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 107.
118. Энергоресурсосберегающая технология переработки лигниноцеллюлозных отходов в сорбенты / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, К.А. Ланкин // Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 25 мая 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022.
119. Установка для переработки органических отходов в активированный уголь / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, К. А. Ланкин, Р. А. Мифтахов // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. Материалы XIV международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 08-09 февраля 2023 года. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет", 2023. – С. 524-531.
120. Установка термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты/ В.Г. Сотников// Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы): сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции (17-19 октября 2023 года). – М.: ООО «Мегаполис», 2023. – С. 209-212.
121. Математическое моделирование гидравлического сопротивления слоя измельченных отходов при их шнековым транспортировании в установке производства активированного угля / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, В.Г. Сотников [и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2024. – № 1(118). – С. 59-74.

122. Сафин, Р.Г. Перспективное оборудование для термохимической переработки древесной биомассы: учебное пособие для инженерно-технических работников, аспирантов и студентов / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, А.Р. Хабибуллина. Часть 1. – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа». 2023. – С. 79.
123. Сафин, Р.Г. Перспективное оборудование для термохимической переработки древесной биомассы: учебное пособие для инженерно-технических работников, аспирантов и студентов / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Д.А. Ахметова. Часть 2 – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2023. – С. 94.
124. Со, В.М. Поглощительные свойства активных углей, полученных из кожуры плодов тамаринда и скорлупы кокосовых орехов Мьянмы, при адсорбции паров летучих растворителей / В.М. Со, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Успехи в химии и химической технологии. – 2021.
125. Влияние диспергирования фуллерена на сорбционные свойства модифицированных фуллеренами активных углей / Е.А. Спиридонова, В.Ю. Морозова, М.Л. Подвязников, В.В. Самонин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64, № 10. – С. 125-131.
126. Активные угли, полученные методом термохимической активации соломы рапса / К.А. Хвиюзова, Н.И. Богданович, Н.Л. Воропаева, В.В. Карпачев // Химия растительного сырья. – 2020. – № 1. – С. 337-346.
127. Цыганов Е.А. Термическая переработка древесины и ее компонентов / Е.А. Цыганов [и др.]: Тез. докл. конф. 1-3 июня 1988. Красноярск. – 1988. – С. 65-66.
128. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А.Ф. Чудновский. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 456 с.
129. Влияние пористой структуры и свойств активированных углей на характеристики химического поглотителя аммиака и сероводорода / А.Н. Цуканова, Е.А. Фарберова, Е.А. Першин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2021. – № 3. – С. 33-46.

130. Шевченко Р.С. Формирование сорбционных и магнитных свойств ферромагнитных адсорбентов при пиролизе отходов переработки / Р.С. Шевченко, древесины в присутствии гидроксида железа (III) Н.М. Богданович, Л.Н. Кузнецова, Г.В. Добеле // Изв. высших учеб. завед. Лесной журнал. – 1999. – №22-3. – С. 142-150.
131. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 335 с.
132. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесная пром-сть, 1973. – 246 с.
133. Шумяцкий Ю.И., Афанасьев Ю.М. Адсорбция: процесс с неограниченными возможностями. – М.: Высшая школа, 1998. – 78 с.
134. Юдкевич, Ю. Д., Иванов А. С. // Изв. Санкт-Петербург. лесотехн. акад., 1995. – С. 112-117.
135. Юнусов, Л.Р. Исследование процессов конвективного теплообмена в условиях вакуумно-конвективных сушильных камер / Л.Р. Юнусов / автореф. дисс. на соиск. к.т.н., – 2008. – С. 16.
136. Юрьев, Ю.Л. Совершенствование производства углеродных материалов на основе березовой древесины / Ю.Л. Юрьев, Н.А. Ничков // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1991. – С. 10.
137. Юрьев, Ю.Л. Древесный уголь. Справочник / Ю.Л. Юрьев. Екатеринбург: Изд-во «Сократ». – 2007. – 184 с.
138. Юрьев Ю.Л. Статистические характеристики уровня качества древесного угля Ашинского завода / Ю.Л. Юрьев, В.С. Таланкин, М.Ю. Попкова, В.В. Лукьянов // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1992. – С. 26-27.
139. Юрьев Ю.Л. Направления использования некондиционного древесного угля / Ю.Л. Юрьев, Н.А. Ничков // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1992. – С.23
140. Юрьев Ю.Л. Проблемы аппаратурного оформления процессов переработки измельченной древесины в активные угли / Ю.Л. Юрьев, В.П. Орлов, С.А. Панюта, Т.В. Штеба // Лесной журнал. – 2000. – С. 52-57.

141. Юрьев Ю.Л. Термохимическая переработка древесины в условиях лесопромышленного предприятия / Ю.Л. Юрьев, А.В. Солдатов // Лесной журнал. -2005. – С. 113-118.
142. Юрьев Получение древесного угля из отходов деревообрабатывающей промышленности / Ю.Л. Юрьев, В.И. Матюхин, Ю.С. Жуков, А.Н. Созинов // «Экологические проблемы промышленных регионов». Тезисы докл. межд. выставки «Уралэкология. Техноген. Металлургия-2000», Екатер. – С. 74-75.
143. Antal, Michael Jerry and Morten Grønli. “The Art, Science, and Technology of Charcoal Production†.” *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42 (2003): P. 1619-1640.
144. Basch A. Influence of fine structure on the pyrolysis of cellulose. III. The influence of orientation / A. Basch, M. Lewin // *J. Polym.Sci.: Polym. Chem Ed.* 1974. -V.12. – №9. – P. 2053-2063.
145. Bamford C.H., J. Crank, and D.H. Malan. The combustion of wood. Part I. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1946, University of Cambridge, UK, P. 166-182.
146. Broido, Abraham. “A simple, sensitive graphical method of treating thermogravimetric analysis data.” *Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics* 7 (1969): P. 1761-1773.
147. Di Blasi Colombia, Heat transfer mechanisms and multi-step kinetics in the ablative pyrolysis of cellulose. 1996 V. 51. – №10. – P. 2211-2220.
148. Di Blasi, C, 1993. Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis. *Combustion Science Technology*, 90 P. 315-339.
149. Di Blasi, C. "Heat, momentum and mass transport through ashshrinking biomass particle exposed to thermal radiation." *Chemical Engineering Science.*– 1996.– 51(7). P. 1121-1132.
150. Gronli M.G. and Melaaen, M.C. (2000). "Mathematical model for wood pyrolysis - comparison of experimental measurements with model predictions. *Energy and Fuels* 14(4). – P. 791-800.

151. Kansa E.J., H.E. Perlee and R.F. Chaiken. Mathematical model of wood pyrolysis including internal forced convection. *Combust. Flame.* 1977. – V. 29. P – 311-324.
152. Kung H.C. A mathematical model of wood pyrolysis. *Combust. Flame.* 1972. – V.18. P. 185-195.
153. Lede J, et al. Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate// *Fuel.*1985. – V. 64. – P. 1514-1520.
154. Maa P. Influence of particle sizes and environmental conditions on high temperature pyrolysis of cellulosic material *Text. / P. Maa, R. Bailie // Combustion Science and Technology.* – 1973.– № Q7.– P. 257269.
155. Mika L., Antti K., Tapio R. Requirements for transportation of fast pyrolysis bio-oil in Finland // *International Journal of Sustainable Energy.* – 2016. – T. 35. – Vol. 10. – P. 933-943.
156. Nanda, S., Dalai, A.K., Berruti, F., & Kozinski, J.A. (2016). Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste and Biomass Valorization.* – №7. – 201-235.
157. Thurner F *Kinetic Investigation of Wood Pyrolysis Text. / F. Thurner, U. Mann // Industrial and Engineering Chemical Process Design and Development.* – 1981.– V. 20. – P. 482-488.
158. Kumar M., Gupta R.C. // *Energy Sources.* – 1998. – V. 20. – № 7. – P. 575-589
159. Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and heat transfer effects / C.A. Koufopoulos, N. Papayannakos, G. Maschio, A. Lucchesi // *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* – 1991. – V. 69. – P. 907-915.
160. Ponomarev D. A., Takhistov V. V. Thermochemistry of organic and elementoorganic species. Part III. The enthalpies of formation of the hydrides of main group elements // *Journal of molecular structure.* – 1999. – Vol. 477. – P. 91-103.
161. Park W. C., Atreya A., Baum H. R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis // *Combustion and flame.* – 2010. – T. 157. – №. 3. – C. 481-494.
162. Rosendahl L. Direct thermochemical liquefaction for energy applications. Part 1.1. Fast pyrolysis (Pattiya A.). Woodhead Publishing: 2017 – 380 p.

163. Safin R.G. A mathematical model of thermal decomposition of wood in conditions of fluidized bed/ Safin, R.G., Barcik, S., Tuntsev, D.V., Safin, R.R., Hismatov, R.G. //Acta Facultatis Xylogologiae, 58(2). – 2016. – P. 141-148.
164. Simulation of the process of grinding and transporting organic waste in an activated carbon production unit. R.G. Safin, V.G. Sotnikov. E3S Web Conf. 420 – P. 07005 (2023).
165. Method for calculating the pyrolysis zone in the production unit activated carbon. R.G. Safin, V. G. Sotnikov. E3S Web Conf. V. 420 – P. 09006 (2023)
166. Installation for the Processing of Plant Waste into Activated Carbon Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis link is disabled. – 2023. – P. 809-818.
167. Optimizing the Structure of a Production System for Activated Carbon. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G. Russian Engineering Researchthis link is disabled. – 2022. – V.42. – P. 867-870.
168. Vamvuka, D. Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes – An overview. Int. J. Energy Res. – № 35. – P. 835-862.
169. Wang, L., Barta-Rajnai, E., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Czégény, Zs., Jakab, E., Barta, Zs., Grønli, M. Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood, stump and bark. Appl. Energ. – 2018. – V. 227. – P. 137-148.
170. Xu Rui, Lorenzo Ferrante, Kristen Amanda Hall, Cedric Briens and Franco Berruti. “Thermal self-sustainability of biochar production by pyrolysis.” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 91. – (2011). – P. 55-66.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Программа расчета температурных полей сыпучего слоя измельченного
твердого сырья в условиях его термического разложения при
кондуктивном подводе теплоносителя**

```

uses crt;
const mf=500;
      eps=1e-5;
      R=8.31;
type
  vector=array[1..mf] of real;
var {раздел описания переменных, которые мы будем использовать в программе}
  i, j, N      : integer;
  T, Ts, Tn, alfa, beta  : vector;
  ai, bi, ci, fi, max    : real;
  lamda, ro, c, h, tau   : real;
  kapa, Te, q, k0, E     : real;
  T0, L, t_end, time     : real;
  f, g                : text;
begin
  clrscr;
  {с клавиатуры вводим все необходимые входные параметры}
  Writeln('Введите количество пространственных узлов, N');
  Readln(N);
  Writeln('Введите окончание по времени, t_end');
  Readln(t_end);
  Writeln('Введите толщину пластины, L');
  Readln(L);
  Writeln('Введите коэффициент теплопроводности материала пластины,
lamda');
  Readln(lamda);
  Writeln('Введите плотность материала пластины, ro');
  Readln(ro);
  Writeln('Введите теплоемкость материала пластины, c');
  Readln(c);
  Writeln('Введите коэффициент теплообмена с окружающей средой,
kapa');
  Readln(kapa);
  Writeln('Введите температуру окружающей среды, Te');
  Readln(Te);
  Writeln('Введите тепловой эффект химической реакции, q');
  Readln(q);
  Writeln('Введите предэкспонент, k0');
  Readln(k0);
  Writeln('Введите энергию активации химической реакции, E');
  Readln(E);
  Writeln('Введите начальную температуру, T0');
  Readln(T0);

```

```

{определяем расчетный шаг сетки по пространственной координате}
h:=L/(N-1);
{определяем расчетный шаг сетки по времени}
tau:=t_end/100.0;
{определяем поле температуры в начальный момент времени}
for i:= 1 to N do
  T[i]:=T0;
{проводим интегрирование нестационарного уравнения
теплопроводности}
time:=0;
while time<t_end do {используем цикл с предусловием}
  begin
{увеличиваем переменную времени на шаг ?}
  time:=time+tau;
{определяем начальные прогоночные коэффициенты на основе левого
граничного условия, используя соотношения (24)}
  alfa[1]:=2.0*tau*lamda/(2.0*tau*(lamda+kapa*h)+ro*c*sqr(h));
  beta[1]:=(ro*c*sqr(h)*T[1]+2.0*tau*kapa*h*Te)/(2.0*tau
    *(lamda+kapa*h)+ro*c*sqr(h));
{запоминаем поле температуры на предыдущем временном слое}
  for i:=1 to N do
    Tn[i]:=T[i];
{цикл с постусловием, позволяющий итерационно вычислять поле
температуры, вследствие наличия нелинейности в самом уравнении
теплопроводности (56)}
  repeat
{запоминаем поле температуры на предыдущей итерации}
  for i:=1 to N do
    Ts[i]:=T[i];
{цикл с параметром для определения прогоночных коэффициентов по
формуле (8)}
  for i:= 2 to N-1 do
    begin
{ai, bi, ci, fi – коэффициенты канонического представления системы
уравнений с трехдиагональной матрицей}
    ai:=lamda/sqr(h);
    bi:=2.0*lamda/sqr(h)+ro*c/tau;
    ci:=lamda/sqr(h);
    fi:=-ro*c*Tn[i]/tau-q*k0*ro*exp(-E/(R*T[i]));
{alfa[i], beta[i] – прогоночные коэффициенты}
    alfa[i]:=ai/(bi-ci*alfa[i-1]);
    beta[i]:=(ci*beta[i-1]-fi)/(bi-ci*alfa[i-1]);
    end;
{определяем значение температуры на правой границе на основе
правого граничного условия, используя соотношение (25)}
    T[N]:=(ro*c*sqr(h)*Tn[N]+2.0*tau*(lamda*beta[N-1]+kapa*h*Te))
      /(ro*c*sqr(h)+2.0*tau*(lamda*(1-alfa[N-1])+kapa*h));
{используя соотношение (7) определяем неизвестное поле
температуры}
    for i:= N-1 downto 1 do
      T[i]:=alfa[i]*T[i+1]+beta[i];
{определяем максимум модуля разности температур на данной и

```

```

предыдущей итерации}
  max:=abs(T[1]-Ts[1]);
  for i:=2 to N do
    if max < abs(T[i]-Ts[i]) then max:=abs(T[i]-Ts[i]);
  until max<=eps; {поле температуры на данном временном слое
определили}
  end; {цикл с предусловием окончен}
{вывод результатов в файл}
Assign(f,'res.txt');
Rewrite(f);
Writeln(f,'Толщина пластины L = ',L:6:4);
Writeln(f,'Число узлов по координате N = ',N);
Writeln(f,'Коэффициент теплопроводности материала пластины lamda =
',lamda:6:4);
Writeln(f,'Плотность материала пластины ro = ',ro:6:4);
Writeln(f,'Теплоемкость материала пластины c = ',c:6:4);
Writeln(f,'Начальная температура T0 = ',T0:6:4);
Writeln(f,'Коэффициент теплообмена кара = ',кара:6:4);
Writeln(f,'Температура внешней среды Te = ',Te:6:4);
Writeln(f,'Тепловой эффект химической реакции q = ',q:6:4);
Writeln(f,'Предэкспонент k0 = ',k0:6:4);
Writeln(f,'Энергия активации химической реакции E = ',E:6:4);
Writeln(f,'Результат получен с шагом по координате h = ',h:6:4);
Writeln(f,'Результат получен с шагом по времени tau = ',tau:6:4);
Writeln(f,'Температурное поле в момент времени t = ',t_end:6:4);
close(f);
Assign(g,'tempr.txt');
Rewrite(g);
for i:=1 to N do
  writeln(g,' ',h*(i-1):10:8,' ',(T[i]-273):8:5);
close(g);
end.

```


**Программа расчета процесса сушки измельченных коллоидных
капиллярно - пористых тел в условии конвективного подвода
теплоносителя**

```

1. program pr1;
2. const n=1000;
3. var rove,T0,S10,m,p,pz,Tz,rol,cl,rom,cm,lamdal,lamdam,L,D,xs,TOL,h,time:real ;
4. i,j,k,y,s:integer;
5. a,b,c,s1,s2,tau1,tau2,tkon:real;
6. tau,S1,Slp:array[0..n] of real;
7. ro,rop,T,Tr,aT,bT,cT,fT:array[0..n] of real;
8. f,alfa,beta:array[0..n] of real;
9. am,bm,fm:array[0..n] of real;
10. f1,f2,f3,f4,f5,f6:text;
11.
12. //температура сухой зоны
13. function Tcs(i1:integer):real;
14. begin
15. Tcs:=2+(h*h*rom*cm)/(lamdam*tau[i]);
16. end;
17.
18. function Tfs(i1:integer):real;
19. begin
20. Tfs:=(h*h*rom*cm)/(lamdam*tau[i])*Tr[i1];
21. end;
22. //-----
23. //плотность сухой зоны
24. function Rcs(i1:integer):real;
25. begin
26. Rcs:=2+(h*h)/(D*tau[i]);
27. end;
28.
29. function Rfs(i1:integer):real;
30. begin
31. Rfs:=(h*h)/(D*tau[i])*rop[i1];
32. end;
33. //-----
34.
35. function Tcv(i1:integer):real;
36. begin
37. Tcv:=2+(h*h*rom*cm)/(lamdam*tau[i]);
38. end;
39.
40. function Tfv(i1:integer):real;
41. begin
42. Tfv:=(h*h*rom*cm)/(lamdam*tau[i])*Tr[i1]-m*L*rol*h*h*(S1[i1]-Slp[i1])/lamdal;
43. end;

```

```

44.
45. begin
46. tkon:=100;
47. time:=0;
48. rove:=0;
49. T0:=20;
50. SI0:=0.05;
51. m:=0.5;
52. p:=100000;
53. pz:=110000;// 000000;
54. Tz:=957;
55. rol:=1000;
56. cl:=4200;
57. rom:=925;
58. cm:=1000;
59. lamdam:=0.15;
60. lamdal:=0.65;
61. L:=2260000;
62. D:=0.00003;
63. xs:=0;
64. TOL:=0.05;
65. h:=TOL/500; //0.0001;
66. SI[0]:=0;
67. Slp[0]:=0;
68. T[0]:=160;
69. Tp[0]:=160;
70. y:=trunc(TOL/h);
71. ro[0]:=0;
72. for j:=1 to y do
73. begin
74. Tp[j]:=20;
75. Slp[j]:=0.5;
76. rop[j]:=0.0001;
77. end;
78.
79. tau[1]:=0.0001;
80. i:=1;
81. time:=time+tau[i];
82. j:=1;
83. SI[j]:=Slp[j]+tau[i]*D*(1-Slp[j])*(rop[j+1]-rop[j])/((rol-rop[j])*h*h);
84. for j:=2 to y do begin
85. SI[j]:=Slp[j]+tau[i]*D*(1-Slp[j])*(rop[j+1]-2*rop[j]+rop[j-1])/((rol-rop[j])*h*h);
86. end;
87. j:=1;
88. alfa[1]:=1/ Tcv(j-1);
89. beta[1]:=Tfv(j-1)/Tcv(j-1);
90. for j:=2 to y do
91. begin
92. alfa[j]:=1/(Tcv(j-1)-alfa[j-1]);
93. beta[j]:= (beta[j-1]+Tfv(j-1))/(Tcv(j-1)-alfa[j-1]);
94. end;
95. j:=y;

```

```

96. T[j]:= (beta[j]+Tfv(j))/(Tcv(j)-alfa[j]);
97.
98. for j:=y-1 downto 1 do begin
99. T[j]:=alfa[j+1]*T[j+1]+beta[j+1];
100.   end;
101.
102.   for j:=1 to y do begin
103.     ro[j]:=0.018*pz/(8.31*T[j])*exp(-Tz/T[j]);
104.   end;
105.
106.   for j:=0 to y do
107.   begin
108.     Tp[j]:=T[j];
109.     rop[j]:=ro[j];
110.     Slp[j]:=Sl[j];
111.   end;
112.
113.   tau[2]:=tau[1];
114.   time:=time+tau[i];
115.
116.   i:=2;
117.   while time<tkon do begin
118.     j:=1;
119.     for j:=1 to i-1 do begin
120.       //Sl[j]:= 0;
121.       Sl[j]:=Slp[j]+tau[i]*D*(1-Slp[j])*(rop[j+1]-2*rop[j]+rop[j-1])/((rol-rop[j])*h*h);
122.     end;
123.     j:=1;
124.     alfa[1]:=1/ Tcs(j-1);
125.     beta[1]:=Tfv(j-1)/Tcs(j-1);
126.     for j:=2 to i-1 do
127.     begin
128.       alfa[j]:=1/(Tcs(j-1)-alfa[j-1]);
129.       beta[j]:= (beta[j-1]+Tfs(j-1))/(Tcs(j-1)-alfa[j-1]);
130.     end;
131.     j:=i-1;
132.     T[j]:= (beta[j]+Tfs(j))/(Tcs(j)-alfa[j]);
133.     for j:=i-2 downto 1 do begin
134.       T[j]:=alfa[j+1]*T[j+1]+beta[j+1];
135.     end;
136.     //***** ro -- papa
137.     j:=1;
138.     alfa[j]:=1/ Rcs(j-1);
139.     beta[j]:=Rfs(j-1)/Rcs(j-1);
140.     for j:=2 to i-1 do
141.     begin
142.       alfa[j]:=1/(Rcs(j-1)-alfa[j-1]);
143.       beta[j]:= (beta[j-1]+Rfs(j-1))/(Rcs(j-1)-alfa[j-1]);
144.     end;
145.     j:=i-1;
146.     ro[j]:= (Rfs(j)+ beta[j])/Rcs(j)-alfa[j]);
147.     for j:=i-2 downto 1 do begin

```

```

148.   ro[j]:=alfa[j+1]*ro[j+1]+beta[j+1];
149.   end;
150.
151.   // ***** ВЛАЖНАЯ ЗОНА *****
152.   SI[i]:= 0.25;
153.   for j:=i+1 to y do begin
154.     //SI[j]:= 0;
155.     SI[j]:=Slp[j]+tau[i]*D*(1-Slp[j])*(rop[j+1]-2*rop[j]+rop[j-1])/((rol-rop[j])*h*h);
156.   end;
157.   j:=i+1;
158.   alfa[1]:=1/ Tcv(j-1);
159.   beta[1]:=Tfv(j-1)/Tcv(j-1);
160.   for j:=i+2 to y do
161.     begin
162.       alfa[j]:=1/(Tcv(j-1)-alfa[j-1]);
163.       beta[j]:= (beta[j-1]+Tfv(j-1))/(Tcv(j-1)-alfa[j-1]);
164.     end;
165.   j:=y;
166.   T[j]:= (beta[j]+Tfv(j))/(Tcv(j)-alfa[j]);
167.   for j:=y-1 downto i+1 do begin
168.     T[j]:=alfa[j+1]*T[j+1]+beta[j+1];
169.   end;
170.   for j:=i to y do begin
171.     ro[j]:=0.018*pz/(8.31*T[j])*exp(-Tz/T[j]);
172.   end;
173.   for j:=0 to y do
174.     begin
175.       Tp[j]:=T[j];
176.       rop[j]:=ro[j];
177.       Slp[j]:=SI[j];
178.     end;
179.   begin
180.     tau1:=h*h*rol*SI[i]/(D*((ro[i-1]-ro[i-2])-(1-SI[i])*(ro[i+1]-ro[i]))));
181.
182.     tau2:=m*h*h*L*rol*SI[i]/(((1-m)*lamdam+m*lamdal*SI[i])*(T[i+1]-T[i])-(1-
183.       m)*lamdam*(T[i-1]-T[i-2]));
184.     tau[i+1]:= sqrt(abs(tau1*tau2));
185.   end;
186.   time:=time+tau[i+1];
187.   i:=i+1;
188. end;
189. write(time:6:2);
190. write(tau[i]:9:3);
191. end.

```

**Программа решения нелинейной задачи теплопроводности для
неподвижного слоя твердых частиц органического сырья при условии
кондуктивного подвода теплоносителя**

```

uses crt;
const mf=500;
eps=1e-5;
type
vector=array[1..mf] of real;
var
i, j, N, s : integer;
T, Ts, Tn, alfa, beta : vector;
ai, bi, ci, fi, max1, max2 : real;
ro, c, h, tau : real;
Th, T0, Tc, L, t_end, time : real;
f, g, f1, f2 : text;
function lamda(x:real):real;
begin
lamda:=5500/(560+x)+0.942*(1e-10)*x*sqr(x);
end;
begin
clrscr;
Writeln('Введите количество пространственных узлов, N');
Readln(N);
Writeln('Введите окончание по времени, t_end');
Readln(t_end);
Writeln('Введите толщину пластины, L');
Readln(L);
Writeln('Введите плотность материала пластины, ro');
Readln(ro);
Writeln('Введите теплоемкость материала пластины, c');
Readln(c);
Writeln('Введите начальную температуру в К, T0');
Readln(T0);
Writeln('Введите температуру в К на границе x=0, Th');
Readln(Th);
Writeln('Введите температуру в К на границе x=L, Tc');
Readln(Tc);
{определяем расчетный шаг сетки по пространственной координате}
h:=L/(N-1);
{определяем расчетный шаг сетки по времени}
tau:=t_end/100.0;
{определяем поле температуры в начальный момент времени}
for i:= 2 to N-1 do
T[i]:=T0;
{заводим файл содержащий количество итераций на каждом шаге по
времени}

```

```

Assign(f1,'iter.txt');
Rewrite(f1);
time:=0;
while time<t_end do begin
{увеличиваем переменную времени на шаг  $\tau$ }
time:=time+tau;
{запоминаем поле температуры на предыдущем временном слое}
for i:= 1 to N do
Tn[i]:=T[i];
s:=0; {будем считать число итераций}
{цикл с постусловием, позволяющий итерационно вычислять поле
температуры}
repeat
inc(s);
{запоминаем поле температуры на предыдущей итерации}
for i:= 1 to N do
Ts[i]:=T[i];
{определяем начальные прогоночные коэффициенты на основе левого
граничного условия}
alfa[1]:=0.0;
beta[1]:=Th;
{цикл с параметром для определения прогоночных коэффициентов по
формуле (8)}
for i:= 2 to N-1 do
begin
{ai, bi, ci, fi – коэффициенты канонического представления системы
уравнений с трехдиагональной матрицей}
ai:=0.5*(lamda(T[i])+lamda(T[i+1]))/sqr(h);
ci:=0.5*(lamda(T[i-1])+lamda(T[i]))/sqr(h);
bi:=ai+ci+ro*c/tau;
fi:=-ro*c*Tn[i]/tau;
{alfa[i], beta[i] – прогоночные коэффициенты}
alfa[i]:=ai/(bi-ci*alfa[i-1]);
beta[i]:=(ci*beta[i-1]-fi)/(bi-ci*alfa[i-1]);
end;
{определяем значение температуры на правой границе на основе
правого граничного условия}
T[N]:=Tc;
{используя соотношение (7) определяем неизвестное поле
температуры}
for i:= N-1 downto 1 do
T[i]:=alfa[i]*T[i+1]+beta[i];
{определяем максимум модуля разности температур на данной и
предыдущей итерации}
max1:=abs(T[1]-Ts[1]);
for i:= 2 to N do
if max1 < abs(T[i]-Ts[i]) then max1:=abs(T[i]-Ts[i]);
{определяем максимальное по модулю значение температуры на данной
итерации}
max2:=abs(T[1]);
for i:= 2 to N do
if max2 < abs(T[i]) then max2:=abs(T[i]);

```

```
until max1/max2<=eps; {цикл с постусловием окончен}
Writeln(f1,'В момент времени ',time:6:4,' проведено ',s,' итераций');
end; {цикл с предусловием окончен}
{выводим результат в файл}
Assign(f,'res.txt');
Rewrite(f);
Writeln(f,'Толщина пластины L = ',L:6:4);
Writeln(f,'Число узлов по координате N = ',N);
Writeln(f,'Плотность материала пластины  $\rho_0$  = ', $\rho_0$ :6:4);
Writeln(f,'Теплоемкость материала пластины c = ',c:6:4);
Writeln(f,'Начальная температура T0 = ',T0:6:4);
Writeln(f,'Температура на границе x = 0, Th = ',Th:6:4);
Writeln(f,'Температура на границе x = L, Tc = ',Tc:6:4);
Writeln(f,'Результат получен с шагом по координате h = ',h:6:4);
Writeln(f,'Результат получен с шагом по времени tau = ',tau:6:4);
Writeln(f,'Температурное поле в момент времени t = ',t_end:6:4);
close(f);
Assign(g,'tempr.txt');
Rewrite(g);
for i:=1 to N do
writeln(g,' ',h*(i-1):6:3,' ',T[i]-273:8:5);
close(g);
close(f1);
end.
```

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «ИВКАЗ»

Щельванов Е.Ю.

12 декабря 2023 г.

**АКТ ПРИНЯТИЯ К ВНЕДРЕНИЮ**

Технологического процесса термохимической переработки растительных отходов
в активированный уголь

Настоящим актом подтверждается, что 12 декабря 2023 г. в АО «ИВКАЗ» был принят к внедрению технологический процесс термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь, разработанный представителями ФГБОУ ВО «КНИТУ»: д.т.н., профессором Сафиним Р.Г., аспирантом Сотниковым В.Г.

Представитель
АО «ИВКАЗ»


Щельванов Е.Ю.

Представители
ФГБОУ ВО «КНИТУ»


Сафин Р.Г.

Сотников В.Г.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2022619183

**Программа расчета температурных полей сыпучего
слоя измельченного твердого сырья в условиях его
термического разложения при кондуктивном подводе
теплоносителя**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)* (RU)

Авторы: *Сафин Рушан Гареевич (RU), Сотников Виктор
Георгиевич (RU)*

Заявка № **2022618108**
Дата поступления **05 мая 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **19 мая 2022 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 68b3007b14c4992a94ed3d24145e5c7
Подпись: Зубов Ю.С. Сергей
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Свидетельство о государственной регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2023621311

**База данных термической переработки отходов
растительного происхождения и продукты их
термической переработки**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)* (RU)

Авторы: *Сафин Рушан Гареевич (RU), Сотников Виктор
Георгиевич (RU)*

Заявка № 2023620941

Дата поступления **07 апреля 2023 г.**Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **24 апреля 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68B6077614c1902694edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2789699

Способ получения активированного угля

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ") (RU)*

Авторы: *Сафин Рушан Гареевич (RU), Сотников Виктор Георгиевич (RU), Родионов Алексей Сергеевич (RU), Хайруллин Ильдар Фаритович (RU), Загиров Айдар Ниязович (RU)*

Заявка № 2021135547

Приоритет изобретения **03 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **07 февраля 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **03 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c29f0294ed824145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



Дипломы



ДИПЛОМ ПОБЕДИТЕЛЯ КОНКУРСА «ТЕХНОСТАРТ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

аспирант кафедры ПДМ

Виктор Сопшиков

Проект: "Разработка энергосберегающего способа
пирогенетической переработки твердых органических
отходов в активированный уголь"

Руководитель - Сафин Рушан Гарифуллович,
профессор, зав. кафедрой ПДМ

Врио ректора



2021 год

Казанский национальный исследовательский технологический университет

ДИПЛОМ

победителя конкурса «Студенческий стартап»

Сотников Виктор

Георгиевич

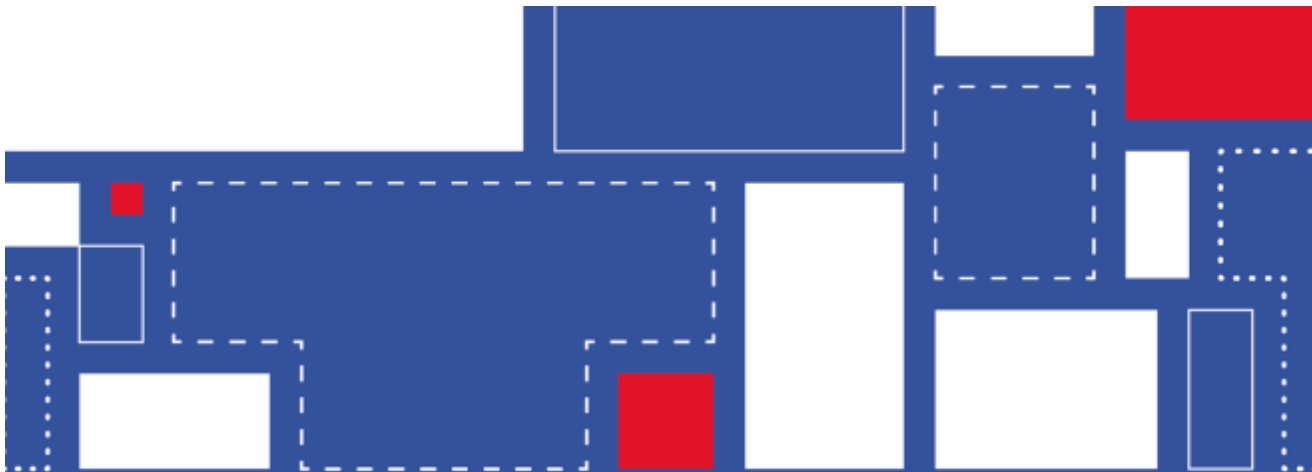
Договор № 32ГССС15-Ц/78484

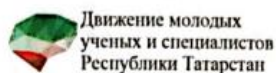


Генеральный директор С. Г. Поляков



2022





Ежегодный республиканский конкурс
Лучший молодой ученый
Республики Татарстан - 2023

ДИПЛОМ
за 1 место
награждается

Сотников Виктор Георгиевич

Казанский национальный исследовательский технологический университет

В НОМИНАЦИИ

"Лучший аспирант в области технических наук"

Министр по делам молодежи
Республики Татарстан



Р.Н. Садыков

Председатель Исполкома
Движения молодых ученых
и специалистов Республики Татарстан

Ю.П. Кареева



Казань
2024