Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи

ТУРЧИН СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ МАЛОТОННАЖНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОТХОДОВ

2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Заворин Александр Сергеевич

Томск – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

С.

Введение……..4
Глава 1. Технологии термической утилизации
жидких углеводородных отходов……....17
1.1 Тенденции использования жидких углеводородных
отходов в качестве топливного сырья…….17
1.2 Способы термической переработки отходов……19
1.3 Огневая утилизация жидких углеводородных отходов……...26
1.4 Конструктивные типы горелочных устройств……..33
1.5 Материалы, используемые для пористых элементов
в устройствах беспламенного горения……....48
1.6 Постановка задач исследования……....53
Глава 2. Методические положения исследований…….57
2.1 Описание объекта исследования……57
2.2 Выбор наполнителя фильтрационного слоя…….61
2.3 Основные этапы исследований……..63
2.4 Испытательный стенд…….65
2.5 Методика физических экспериментов……...66
2.6 Определение теплотехнических и теплофизических
характеристик криптолового слоя……...70
Глава 3. Теплофизические исследования криптолового слоя……...80
3.1 Свойства криптола применительно к рабочим условиям модуля
фильтрационного горения……80
3.2 Результаты теплофизических испытаний криптолового слоя……83
3.3 Результаты теплофизических испытаний ячейки
фильтрационного слоя……..95
3.4 Результаты аэродинамических испытаний криптолового слоя……..97
3.5 Обсуждение результатов……98

Глава 4. Технические решения модуля фильтрационного горения
и теплогенератора……101
4.1 Результаты, определившие конструктивные решения модуля
фильтрационного горения……..101
4.2 Конструкция и работа модуля……..107
4.3 Компоновочное решение теплогенератора
с модулем горения……...114
4.4 Схема компоновки реактора пиролиза отходов
с модулем горения……...118
Заключение……...121
Список использованных источников…….124
Список используемых обозначений и сокращений……137
Приложение А. Протоколы измерения температур криптолового слоя……...138
Приложение Б. Балансовые испытания ячейки фильтрационного слоя
(опорной модели)……156
Приложение В. Методика оценки погрешности прямых измерений…….157
Приложение Г. Патенты на полезные модели и изобретения…….162
Приложение Д. Расчет элементов топливо –и воздухоподачи……...166
Приложение Ж. Материалы по использованию результатов работы……168

ВВЕДЕНИЕ

Одним из результатов аналитического мониторинга, положенного в основу Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года, является соответствие большей части ее положений фактическому состоянию дел в энергетической отрасли России даже в условиях существенного изменения экономической политики страны в посткризисный период [1].

Главной идеей Энергетической стратегии [2] обозначен переход от ресурсно-сырьевого развития ТЭК к развитию ресурсно-инновационному. Таким образом, ролью ТЭК в экономике государства будет являться переход от экономической модели «локомотива развития» к модели «стимулирующей инфраструктуры», направленной на создание и обеспечение условий стимулирования развития экономики страны, включая рост технологического уровня и диверсификацию экономики, сведения к минимуму инфраструктурных ограничений.

В этих условиях даже применение современных технологий производств не может исключить негативное воздействие отраслей промышленности на окружающую среду, что является неизбежным следствием. Каждый год в мире и в нашей стране миллиарды тонн жидких, твердых, газообразных, пастообразных отходов проникают в биосферу, тем самым нанося колоссальный урон окружающей среде [3–7]. В масштабах глобализации антропогенного воздействия на окружающую среду непрерывно идут изменения, связанные с образованием балластовых газов, нарушая тем самым газовый баланс атмосферы; наличие твердых и жидких отходов нарушает естественный для природы круговорот воды и тем самым наносит ущерб не только сельхозугодиям, но и в целом флоре и фауне [8–10]. В результате своей же жизнедеятельности население обратным образом страдает от негативного экологического воздействия. Стимулируемые таким положением многочисленные исследования, направленные на решение достаточно давних и повсеместно распространенных проблем, связанных с разработкой и совершенствованием экологичных производственных технологий, а также сбором и утилизацией антропогенных отходов, не теряют своей актуальности и по настоящее время.

Отходами принято называть продукты деятельности человека в быту и в различных отраслях промышленности, которые не используются в местах непосредственного образования. Производственными отходами являются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, возникших в процессе технологического цикла при изготовлении продукции, которые частично или полностью утратили свои полезные физические свойства [11]. Производственными отходами также считаются продукты, образование которых стало результатом добычи и переработки полезных ископаемых, физико-химической переработки первичного сырья и образование которых не является желаемым конечным продуктом производства. Однако они могут быть использованы как потенциальное сырье в других различных производственных отраслях [12]. В зависимости от пригодности и доступности последующего использования отходы подразделяют на утилизируемые и не утилизируемые. В первом случае имеются технологии переработки и вовлечения в сферу экономики, в другом случае таковые отсутствуют либо не доведены до необходимого уровня освоенности.

По европейским статистическим данным [13], в различных странах образуются токсичные производственные отходы в количествах, представленных в табл. 1. По данным [14] за 2017 год, в России общее количество образованных отходов производства и потребления составило 6221 миллионов тонн, не использованных и не обезвреженных отходов – 2956 миллионов тонн. Федеральная служба государственной статистики [15] сообщала: население страны в 2017 году составило 146,9 млн. человек. Таким образом, на одного человека приходилось 20,12 тонн накопленных отходов в год. Учитывая уровень использования технологий вторичной переработки отходов, количество наличествующих отходов, приходящихся на одного россиянина, значительно превышает относящееся к жителю любой другой европейской страны (табл. 1).

В современных условиях общественное воспроизводство требует вовлечения в хозяйственный оборот больших объемов сырья и энергии. Например, в период Советского Союза по приблизительным данным на каждый рубль валового национального дохода расходовалась 1 тонна вещества природного

Таблица 1 – Образование техногенных отходов в различных европейских странах по годам (в кг на душу населения) [13]

Страна / Год	1995	2000	2004	2008	2011	2017
Бельгия	455	471	485	479	456	409
Болгария	694	612	599	599	508	416
Чешская Республика	302	335	279	306	320	344
Дания	521	610	620	741	781	781
Германия	623	642	587	589	614	633
Эстония	371	453	445	392	301	390
Ирландия	512	599	737	718	617	:
Греция	:	412	436	458	503	:
Испания	510	658	600	551	485	462
Франция	475	514	519	541	538	513
Хорватия	:	262	304	415	384	416
Италия	454	509	540	552	529	489
Кипр	595	628	684	728	683	637
Латвия	264	271	318	345	350	438
Литва	426	365	373	428	442	455
Люксембург	587	654	679	697	666	607
Венгрия	460	446	454	454	382	385
Мальта	395	546	623	674	589	604
Нидерланды	539	598	599	600	568	513
Австрия	437	580	574	600	573	570
Польша	285	320	256	320	319	315
Португалия	352	457	445	518	490	487
Румыния	342	355	349	411	259	272
Словения	596	513	485	542	415	471
Словакия	295	254	261	313	311	378
Финляндия	413	502	469	521	505	510
Швеция	386	428	460	483	449	452
Великобритания	498	577	602	541	491	:
Исландия	426	462	503	495	320	:
Норвегия	624	613	414	487	485	748
Швейцария	600	656	660	736	689	706
Македония	:	:	:	:	524	344
Сербия	:	:	:	347	375	306
Турция	441	465	440	400	416	425
Босния и Герцеговина	:	:	:	:	340	352

происхождения (минеральное сырье, вода, топливо, атмосферный кислород, биомассы). Масса готовой продукции от массы вещества, поступившего на переработку, составляла при этом 1-1,5 % [16].

«Малая» и «средняя» энергетика в России остаются монозависимыми от основных и приоритетных энергоносителей, таких как газ, нефть, уголь [17, 18]. Подтверждением этого является Указ Президента [19], в котором обозначена стратегическая роль освоения Арктической зоны РФ (АЗРФ) в развитии экономики страны. При этом приоритетной задачей остается поддержание на ее территории нормальной экологической обстановки путем локализации и ликвидации накопленных отходов.

Проблемы утилизации жидких углеводородных отходов остаются. Их бóльшая часть представлена нефтепродуктами [20], с образованием которых катастрофичным образом нарушаются естественные процессы в водоемах и в почве, что губительно влияет на их использование в сельском хозяйстве и как среды обитания для животных и растений. Из-за логистической удаленности мест образования отходов, например, на опорных базах нефтегазодобывающих предприятий АЗРФ и крайнего Севера, их централизованный вывоз становится задачей весьма затратной. В исследовании [21] отмечают основной фактор, усложняющий работу системы обращения с отходами АЗРФ, – невысокую плотность населения, что приводит к малотоннажным образованиям отходов. Таким образом, с учетом стоимости оплаты труда, проекты по их переработке становятся нерентабельными.

По некоторым оценкам, в АЗРФ насчитывается до 12 млн металлических бочек с остатками ГСМ и до 4 млн т промышленных отходов [22]. Ввиду того, что выбор способа переработки зависит от состава отходов (доли углеводородов, механических примесей, воды и фазового состояния), этот факт значительно затрудняет выбор способа их переработки. В этой связи технология переработки отходов пиролизом с последующей утилизацией вторичных продуктов может стать оптимальным для этого решением.

С каждым десятилетием встает вопрос о масштабном использовании некондиционных топлив и другого требующего утилизации горючего органического сырья (отходов) в качестве энергоносителей. Положение усугубляет отсутствие или недостаточное развитие эффективных способов, позволяющих сжигать подобные вещества.

Разработанные нормативно-правовая, социально- экономическая, налоговая и др. базы в области развития федеральных и местных энергетических программ способствуют общей консолидации ТЭК регионов и страны в целом. На этом фоне приоритетными направлениями устойчивого развития энергетики становятся [1, 23, 24]:

– повышение эффективности использования энергоресурсов и энергосбережения;

– вовлечение местных энергоресурсов в производство тепловой и электроэнергии.

К осложняющим аспектам, связанным с огневой утилизацией ЖУО, можно отнести:

– возможность образования супертоксинов: фуранов, диоксинов, бенз-а-пиренов при неполном окислении ароматических углеводородов;

– наличие в таком топливе примесей минерального состава в виде мелких дисперсных включений (солевые отложения, ржавчина из трубопроводов, резервуаров и металлических бочек, песок), парафиновые образования и т. д.;

– неоднородность структуры топливной смеси вследствие расслоения при хранении в резервуарах;

– газоконденсатные включения, попадающие при неполадках в газопроводах и в дренажных линиях конденсата.

Такого рода особенности ЖУО хотя и не носят систематический характер, но могут оказывать абразивное и коррозионное изнашивающие воздействия на элементы факельных горелочных устройств. Кроме того они могут быть причиной шламовых отложений в каналах подачи, сечениях истечения и распыления топлива, что влечет за собой частичное или полное перекрытие

проходимости топливного тракта сжигающих установок. Наряду с моральным и физическим износом используемого оборудования, несовершенства конструктивных решений могут привести к нестабильному, пульсирующему горению, вплоть до погасания факела и/или возникновению аварийных ситуаций, сопровождающихся взрывом топливовоздушной смеси в камерах сгорания энергетических установок.

Следствием этого является то, что при использовании жидких и газообразных топлив различного качества и нестабильного углеводородного состава приоритетным становится обеспечение надежности топливосжигающих систем. Применительно к этому большое значение имеет объем реакционной зоны горения. Так, при увеличении объема активной зоны смесь, динамически не способную к самопроизвольному воспламенению, можно привести к состоянию взрыва, как и наоборот, уменьшение реакционного объема способно подавить самовоспламенение [25, 26]. Эта закономерность позволяет рассматривать использование пористых и фракционных структур в качестве образующей основы – зоны активного окисления в топливосжигающих системах. Внутренняя пористая поверхность таких структур не способствует созданию критических взрывных концентраций газов, паров жидких углеводородов, ограничивая объем горения размерами пустот, образованных засыпкой неметаллического материала [25]. В качестве материала, формирующего объем реакционной зоны, могут быть любые аморфные вещества, обладающие сочетанием необходимых свойств, а именно: доступностью сырьевых материалов, включая низкую энергоемкость их производства; развитой удельной поверхностью и газопроницаемостью; устойчивостью к термическому, в том числе радиационному воздействию; наличием или малозатратным созданием экологически безопасных технологий их получения. Возможность изменения свойств активной зоны в топливоиспользующих системах за счет взаимозаменяемости гранулометрического вещества делает выгодным использование неметаллических материалов в качестве пористого тела [27].

К пористым телам относятся твердые тела, внутри которых имеются поры, обусловливающие наличие внутренней межфазной поверхности. Поры могут быть заполнены газом или жидкостью. Согласно классификации дисперсных систем по агрегатному состоянию фаз пористые тела относятся к твердым дисперсным средам с газообразной или жидкой дисперсными фазами [28].

Применение пористых неметаллических материалов в области теплотехники осуществляется в основном в двух направлениях. Первым является их использование для тепловой изоляции. Второе направление использования – в качестве элемента горелочных устройств – определяется такими свойствами материала как пористость и газопроницаемость, сорбционная способность, удельная поверхность и т.п. Отчасти перечисленные свойства данных материалов используют в горелках беспламенного горения, которые явились предтечей развития горелочных устройств инфракрасного излучения. В этих классах горелок материалы с пористой структурой обычно используются в виде специальных насадок из керамики, обладающей высокими жаростойкостью и теплоемкостью каркасной основы, что создает условия для инициирования и поддержания стабильного горения [28, 29]. Совершенствование процессов подготовки и сжигания топлив в горелочных устройствах с пористым наполнением может определяться перспективой использования для этого углеродистых систем, с обеспечением процесса подготовки топливовоздушной смеси и горения внутри такой структуры.

Большинство устройств для огневой утилизации отходов создаются на основе обобщения эмпирических данных о работе существующих аналогов, нередко с применением физического эксперимента и математического моделирования. Следование традиционным путем привело к преобладанию конструктивных типов котлов и теплогенераторов с соответствующими горелочными устройствами, в совокупности реализующих факельный способ сжигания топлива. Такого рода классический подход в случае сжигания многокомпонентных горючих смесей потребует значительного объема топочного пространства для развития факела и конструктивно приведет к увеличению

габаритов устройства. Следовательно, актуальным становится создание такого устройства, которое удовлетворяло бы определенным требованиям: было мобильным, компактным, простым в эксплуатации и эффективным при сжигании жидких углеводородных отходов различного состава и качества.

Для обеспечения комплекса требований к утилизации ЖУО подходящим прототипом служит горелка инфракрасного излучения [30].

Работа выполнена при использовании финансирования по гранту РФФИ №14-38-50287/14.

Целью диссертации является обоснование по результатам экспериментальных исследований конструкции устройства для эффективной утилизации малотоннажных жидких углеводородных отходов, с возможностью полезного применения вырабатываемой теплоты.

Для достижения цели решались задачи:

1. Обоснование выбора материала для формирования фильтрационного слоя как аналога горелочного устройства инфракрасного излучения и беспламенного горения.

2. Разработка методической базы и проведение серии экспериментов, направленных на определение основных характеристик фильтрационного слоя.

3. Обоснование возможности реализации процесса фильтрационного горения посредством физического эксперимента.

4. Создание огневого модуля, оснащенного фильтрационным слоем, с обоснованием конструктивных характеристик его элементов, совместимого с компактным теплогенератором.

Научная и техническая новизна работы:

1. По результатам проведенных экспериментов обоснована возможность организации процесса горения в беспламенном режиме при температурах 900–1300 °С. Основным принципом такого технологического решения является окисление топливной смеси непосредственно в криптоловом слое, обеспечивающее экзотермический процесс с интенсивным инфракрасным излучением. Принцип действия разработанного по результатам анализа

выполненных экспериментов устройства подобен горелке инфракрасного излучения, а конструктивное исполнение и функциональные особенности защищены патентами на полезную модель и патентами на изобретения.

2. Впервые для криптолового слоя с фракциями 2–5 мм, 5–10 мм и 10–20 мм получены данные о теплофизических свойствах и минеральном составе, особенностях распределения температурного поля в слое в зависимости от положения источника теплоты, и об аэродинамическом сопротивлении слоя.

3. Экспериментально исследовано фильтрационное горение в модуле, совместимом с компактным теплогенератором.

4. На уровне изобретений предложена конструктивная схема компактного теплогенератора, особенностью которого является использование теплоты, генерируемой при утилизации отходов.

Практическая значимость работы:

1. Проблема накопленных ЖУО в сложных климатических и логистических условиях Арктики и Крайнего Севера может быть эффективно решена с помощью модулей фильтрационного горения (МФГ). Модули, применяемые в составе теплогенераторов или реакторов пиролиза отходов, позволяют утилизировать ЖУО и продукты пиролиза (жидкие, твердые, газообразные), улучшая таким образом экологическую обстановку региона локализации отходов. Особенно ценно их применение в компактных, мобильных пиролизных реакторах.

2. Интеграцию традиционных тепловых энергоустановок с инфракрасными беспламенными горелками реализует теплогенератор с МФГ. Такой принцип приводит к сокращению объема тепловой энергоустановки в 2 и более раз (в сравнении с установками «факельного» типа), снижению металлоемкости и повышению ресурсной эффективности, что способствует формированию компактных, экономически выгодных устройств.

3. Умеренная температура горения (900–1300 °C) активной зоны модуля ведет к значительному снижению образования термических оксидов азота (около 22 ppm, что подтверждено результатами испытаний), поэтому такой режим является более предпочтительным по сравнению с использованием «факельных»

горелочных устройств (утилизаторов), минимизируя свое негативное экологическое воздействие.

4. Производителем комплексов переработки отходов ООО «Завод Аэроэнергопром» документально подтверждена заинтересованность в использовании результатов работы.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на IV Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские Чтения» (г. Томск, 2024 г.); XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2024 г.); XV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2022 г.); II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Барнаул, 2018 г.); IV Российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (г. Томск, 2016 г.); XIII Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса» (г. Саратов, 2016 г.); III Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии» (г. Томск, 2016 г.); II Всероссийской с международным участием молодежной научно-практической конференции (г. Кемерово, 2016 г.); XIX и XXI Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2013 и 2015 гг.); III и IV Всероссийских научно-практических конференциях «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2012 и 2013 гг.); Всероссийской молодежной конференции «Горение твердого топлива» (г. Томск, 2012 г.); XII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2006 г.).

Личное участие автора. Автором созданы экспериментальные стенды и получены экспериментальные данные, характеризующие процессы тепломассопереноса внутри криптолового слоя. Разработаны основные принципы

работы теплогенератора с модулем фильтрационного горения, положенные в основе эффективной утилизации жидких горючих отходов. Детально проработана конструкция элементов модуля фильтрационного горения теплогенератора.

Постановка задач исследований, подготовка публикаций и анализ полученных результатов выполнены с участием научного руководителя – доктора технических наук, профессора Заворина Александра Сергеевича.

Публикации по диссертационной работе

Опубликованы: шесть статей в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых две публикации индексируемые Scopus; три публикации Web of Science; четырнадцать докладов в сборниках международных и всероссийских конференций; получены два патента на изобретения и два патента на полезную модель.

На защиту выносятся положения

1. Обоснование принципа утилизации углеводородных отходов в режиме фильтрационного горения.

2. Результаты исследований фильтрационного слоя и экспериментов по огневой утилизации в нём жидких углеводородов.

3. Конструкция теплогенератора с камерой сгорания, адаптированная для совместной работы с МФГ, с возможностью ее использования в качестве утилизатора жидких углеводородных отходов внутри углеродистого слоя, с генерацией полезной теплоты.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника» в части пункта 6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту в системах и установках», в части пункта 8 – «Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками.

Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем», в части пункта 10 – «Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа содержит 169 страниц, 6 таблиц и 60 иллюстраций; состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (134 наименования) и 6 приложений (в том числе подтверждающих техническое использование устройства).

В первой главе приведены сведения о технологиях термической утилизации углеводородных отходов, показаны тенденции использования жидких углеводородных отходов в качестве топлив, а также изложен опыт эксплуатации горелочных устройств инфракрасного излучения, рассмотрены существующие аналоги. Произведен анализ опыта эксплуатации схем сжигания жидких и газообразных топлив, по результатам которого отмечены их достоинства и недостатки. На этой основе обозначены направления и принципы разработки мобильной компактной установки для утилизации жидких отходов в качестве задач исследования применительно к цели работы.

Во второй главе описаны методические положения исследований и разработанные экспериментальные стенды. Выбран материал (криптол), формирующий фильтрационный слой, и представлены методики исследований теплофизических и теплотехнических характеристик криптола и топлива. Предложена структура организации исследований фильтрационного слоя. Обоснована конструкция ячейки фильтрационного слоя (горелки) для исследования.

В третьей главе показаны результаты исследований теплообмена в фильтрационном криптоловом слое. Теплофизические свойства криптола представлены кривыми дифференциально-термического анализа в средах воздуха

и гелия, значениями истиной теплоемкости, теплопроводности, а также эффективной температуропроводности криптола. Результаты представлены в зависимости от времени и при разной взаимной направленности потоков топлива и воздуха для различных групп фракций наполнителя слоя (2-5 мм, 5-10 мм, 10-20 мм). Показано изменение температуры слоя криптоловой засыпки из фракций 5-10мм, 10-20мм при продувке через него воздуха с расходом 25-45 л/мин. Выполнен анализ зависимостей коэффициента теплоотдачи от температуры. Получены результаты аэродинамических испытаний криптолового слоя, сформированного из фракций: 2-5мм, 5-10мм, 10-20мм.

В четвертой главе предложена концепция модуля фильтрационного горения и теплогенератора для малотоннажной утилизации жидких углеводородных отходов, а также сведения рекомендательного характера по его конструированию и инжиниринговому обслуживанию.

По результатам диссертационной работы приведены основные выводы.

Приложениями представлены: протоколы измерений распределения температур в слое криптола и при продувке воздухом, ведомость балансовых испытаний ячейки фильтрационного слоя, методика оценки случайной погрешности, копии патентов на изобретение и полезные модели разработанных устройств, а также материалы об использовании результатов диссертационной работы.

Глава 1. Технологии термической утилизации жидких углеводородных отходов

1.1 Тенденции использования жидких углеводородных отходов в качестве топливного сырья

Жидкие отходы, составляющие наиболее крупную долю от всех горючих отходов, представляют собой, как правило, остатки или продукты от использованных в технологическом цикле материалов, имеющие, как следствие, ухудшенные потребительские свойства. Они обычно обладают физико-химическими свойствами, позволяющими им сгорать самостоятельно или в смеси с дополнительным топливом. Валовая доля отдельных разновидностей ЖУО и их составы различаются, но наибольшая часть представлена производными от нефтепродуктов, количество которых еще в конце XIX века от российских промышленных и транспортных предприятий превышало 200 тыс. т. [29].

Из-за отмены ограничений на добычу жидких углеводородов в рамках международной группы «ОПЕК+» мировая добыча сырой нефти в 2025 году прогнозировалась $4{,}82 \cdot 10^6$ тонн в сутки [31]. В 2026 году ожидалось сохранение динамики роста мировой добычи нефти. Следствием этого закономерно полагать утерю части готового нефтепродукта на пути от мест переработки и хранения и переход ее в категорию транспортных потерь (проливы, утечки, аварийные сбросы, испарения, обводнения, неполнословы и т.п.). Такие отходы не то что утилизировать, их даже учесть крайне сложно. Однако их все-таки подразделяют на две основные группы – нефтяные отходы (НО) переработки и НО потребления. К первой из них относят выбросы и отходы отработанных нефтепродуктов, которые использованы либо потеряны в ходе эксплуатации производственных машин, агрегатов и др., в связи с чем их называют эксплуатационными. Вторую группу составляют смазки, масла, топлива и растворители в виде механических отходов, подвергаемых механической рекуперации и в разных сочетаниях добавляемых к некоторым видам продукции в технологических циклах. Если сравнивать массы эксплуатационных, механических и транспортных отходов в США, то соотношение будет равно 15:1:1 [32]. Можно предположить, что и

средний балансовый показатель НО среди других стран мира может мало чем отличаться от этого соотношения.

В подавляющем большинстве НО представляют собой токсичные органические жидкостные и пастообразные среды с дисперсными минеральными и металлическими включениями, среди которых выделяют пять номенклатурных типов: автомобильные и энергетические топлива; смазочные и топливные присадки; смазочные и охлаждающие масла (СОМ); смазочные и охлаждающие жидкости (СОЖ); растворители и разжижители. Все пять типов по отношению к общему объему выпускаемой продукции нефтепереработки составляют порядка 10% [33]. Особых затруднений при их утилизации не возникает, т.к. заводы-изготовители принимают некоторые из НО на переработку. Однако масштабное развитие передовых технологий утилизации ограничивается проблемами, связанными со смешиванием различных видов НО. Необходимость решения этих проблем обусловила [33–35] введение классификации НО не только по разновидностям, но и по особенностям фазового состояния (табл. 1.1).

Активно развивается техника, технологии в части переработки отходов пиролизом (термолизом) с получением синтетического сырья, топлив для нужд энергогенерации [36, 37]. При отсутствии целесообразности использования подобных топлив углеводороды пиролиза автоматически попадают в разряд НО, которые требуют дальнейшей утилизации.

Для переработки простых из вышеназванных органических и топливных отходов существуют утилизационные технологии вплоть до индустриального уровня [33, 38]. Самые распространенные из них применительно к топливным отходам используют в тех случаях, когда отсутствует возможность какого либо непосредственного использования или регенерации с целью получения товарной продукции. При этом вариант огневой утилизации возможен, если содержание углеводородов в топливных отходах составляет не менее 10% [39].

Иногда для этого достаточно простого отстаивания отходов, а в некоторых случаях применяется центрифугирование как вариант наиболее интенсивного метода обезвоживания [40].

Таблица 1.1 – Классификационные группы нефтесодержащих и близких к ним отходов [33 – 35]

Укрупненные категории отходов	**Происхождение отходов и их разделение по группам**	**Фазовое состояние**
I – Отходы от безреагентной обработки нефтесодержащих сточных вод.	1. Нефтесодержащие осадки из очистных сооружений. 2. Жидкие отходы из очистных сооружений. 3. Шламы из прудов, шлаконакопителей нефтеперерабатывающих заводов. 4. Верхний слой из прудов-шламонакопителей нефтеперерабатывающих заводов. 5. Нефтесодержащие осадки из кустовых очистных сооружений и очистных сооружений.	Полужидкое, влажность 85 – 97%. Жидкое, влажность до 75%. Полужидкое, влажность до 75%. Жидкое, влажность 85,5 – 91%. Полужидкое, влажность 80 – 87,5%.
II – Отходы от реагентной обработки нефтесодержащих сточных вод.	6. Жидкие нефтеотходы из кустовых очистных сооружений и очистных сооружений крупных промпредприятий.	Жидкое, влажность до 75%.
III – Отходы легковоспламеняющихся жидкостей и продуктов на их основе.	7. Растворители и промывные жидкости (бензин-калоша, толуол и др.) 8. Отходы лаков, нитрокрасок, эмалей и пр.	Жидкое, содержание воды от 0 до 50%. До пастообразного, содержание пигментов до 20%.
IV – Отходы трудноразделяемых нефтесодержащих и др. органических жидкостей, паст.	9. Эмульсии, концентраты станочных эмульсий типа СП-3, ИПХ45-Э, ЭТ-2 и т.д. 10. Продукты обработки высоко-концентрированных растворов на основе «Лабомида» и другие синтетические поверхностно-активные вещества. 11. Флотоконцентраты, в т.ч. кустовых очистных сооружений.	Жидкое, содержание масел 140-460 г/л. Жидкое Пастообразное, содержание нефтепродуктов – 30%, воды – до 60%, механических примесей – до 10%.
V – Прочие жидкие, полужидкие нефтесодержащие отходы.	12. Не подлежащие регенерации масла, продукты зачистки нефтяных и мазутных резервуаров. 13. Жировые отходы, кубовые остатки и др. 14. Кислые гудроны и прочее.	Жидкое, полужидкое. Полужидкое (до пастообразного).

1.2 Способы термической переработки отходов

Основной целью переработки жидких горючих отходов является уменьшение их объемов и обезвреживание. Наряду с этим некоторые способы температурного воздействия позволяют получить из отходных материалов полезную энергию и/или ценные товарные продукты.

Среди методов термической переработки отходов выделяют гетерогенный катализ, пиролиз и газификацию, жидкофазное окисление, плазменную и огневую переработку [41, 42].

Гетерогенный катализ эффективен как метод обезвреживания жидких и газообразных отходов с низким содержанием углеводородных примесей, поскольку применение для этого других методов обезвреживания требует значительных затрат топлива. Процесс окисления на катализаторах в данном случае проводят при температурах ниже пределов самовоспламенения горючей части отходов, где температура процесса составляет порядка 200-300 ºС, что ниже температуры сжигания отходов в печах (950-1100 °С), необходимой для полного обезвреживания газообразных отходов. Металлы платиновой группы являются наиболее эффективными катализаторами, катализаторы из оксидов металлов (меди, алюминия, хрома, марганца, кобальта и др.) менее эффективны в использовании. Используемые металлы платиновой группы, такие как платина, родий и другие, позволяют максимальным образом снижать температуру начала окислительного процесса. В реакторах термического катализа происходит полное окисление водорода, оксидов углерода, аммиака, углеводородов, альдегидов, фенолов, кетонов и других соединений. В процессе термохимических реакций образуются двуокись углерода, вода и азот, а степень окисления при этом может достигать 99,9% [42]. Для экономии дорогостоящих металлов-катализаторов и увеличения каталитической поверхности взаимодействия продуктов окисления обычно применяют пористые керамические материалы.

Обезвреживание газообразных отходов с высокой концентрацией горючих компонентов термокаталитическим методом становится нецелесообразным из-за быстрого механического разрушения катализаторов при возникновении высокотемпературных зон и дезактивации катализаторов. С целью снижения адиабатического разогрева газообразные отходы разбавляют воздухом или дымовыми газами, что приводит к увеличению затрат на обезвоживание и к высоким расходам катализатора. Конструкционные решения и эксплуатация

термокаталитических реакторов весьма усложнены ввиду необходимости организации отвода избыточного тепла из слоя катализатора.

Для переработки отходов с получением горючих газов, смол и шлаков применяется так называемый метод газификации [43]. Данный метод является высокотемпературным термохимическим процессом, в котором органическая масса взаимодействует с газифицирующими агентами, в результате чего органика преобразуется в горючие газы. В качестве агентов газификации используются кислород, воздух, диоксид углерода, водяной пар и их различные смеси. В основном процесс газификации реализуют в механизированных газогенераторах шахтного типа с применением воздушного дутья. В сравнении с огневым методом переработки отходов, газификация имеет весомые преимущества, а именно: возможность использования образующейся смолы в качестве химического сырья или топлива; возможность использования полученных горючих газов в качестве топлива; возможность уменьшения воздействия на атмосферу путем значительного снижения выбросов золы и сернистых соединений.

Продуктом газификации с воздушным и паровоздушным дутьем является генераторный газ, который из-за низкой теплоты сгорания (3,5-6,0 МДж/м3) [44–46] непригоден для транспортировки и может использоваться только на месте его производства. Получаемый газ с теплотой сгорания 9,5–20,0 МДж/м3 [47, 48] при паровой или парокислородной газификации становится возможным транспортировать на значительные расстояния.

Наиболее пригодна газификация в переработке газопроницаемых, сыпучих, дробленых отходов. Крупногабаритные, пастообразные отходы не перерабатываются этим методом.

Разложение отходов пиролизом (или методом «сухой перегонки») заключается в термическом воздействии на них и отсутствии доступа атмосферного воздуха. При этом образуется газ с высокой теплотой сгорания, а также жидкие продукты и твердый углеродистый остаток. Этот метод в основном применяют для твердых отходов, таких как пластмассы, резины, полиэтиленовые упаковки (мусорные полиолефины) и пр. В этом случае нагрузка на окружающую

среду значительно ниже, чем при огневой утилизации. При этом существует необходимость переработки производных пиролиза в полезные нефтехимические продукты, либо утилизировать их. Прямое же сжигание подобных отходов может способствовать образованию продуктов горения более высокого класса опасности, чем исходный отход за счет образования супертоксинов [24, 49].

Для высокотоксичных газообразных и жидких отходов используют плазмохимическую переработку, в результате которой наряду с обезвреживанием опасных отходов происходит производство ценных товарных продуктов. Процесс ведется в плазмотроне при температуре более 4000 °С. За счет энергии электрической дуги отходы и кислород расщепляются до радикалов, электронов и ионов, при этом степень разложения исходных реагентов достигает 99,99995 % [50].

В Национальном исследовательском Томском политехническом университете разработан опытный промышленный образец установки для плазмокаталитической утилизации нефтяных шламов и нефтесодержащих отходов [51]. Данную установку авторы предлагают к использованию в нефтегазовом, нефтехимическом промышленном комплексе. Подобная утилизация НО включает в себя плазменную обработку в присутствии катализаторов. Утилизируемые отходы подаются в установку в виде диспергированных водотопливных горючих композиций в условиях воздушной каталитически активной плазмы электрических разрядов при температурах диапазона 1500–6000 К за 10^{5}–10^{-3} секунд. Содержание ультрадисперсных каталитически активных материалов составляет 0,01–1,0 мас.% в процессе плазмокаталитической утилизации НО. Также предусмотрена «влажная» система очистки уходящих газов путем барботажного распыления капель воды. При производительности установки 1 т/ч ее потребляемая электрическая мощность может составлять порядка 50 кВт·ч.

Существенным недостатком установки является нецелесообразность ее использования при утилизации малообъемных накоплений НО с необходимой

производительностью переработки отходов менее 1 т/ч. Значительные температуры в инициирующем процесс реакторе могут создавать условия для образования высоких концентраций термических оксидов азота, что делает установку менее экологичной. Отсутствует техническая возможность утилизации получаемой теплоты. Высоки капитальные затраты на серийное производство мобильного блока утилизационной установки, а эксплуатация такого технического комплекса требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

Из-за перечисленных проблем и высокой энергозатратности плазмохимическую технологию применяют только для обезвреживания таких высокотоксичных отходов, для которых огневая утилизация не может обеспечить соответствие требованиям защиты окружающей среды. Зато перспективно применение плазмохимического метода для переработки отходов в восстановительной среде ввиду возможности получения при этом ценных товарных продуктов. Например, в России разработан метод пиролиза в низкотемпературной восстановительной плазме [52], который используется для жидких хлорорганических отходов и позволяет получать ряд таких продуктов как хлористый водород, этилен, ацетилен и другие, синтезируемые на их основе.

Разливы нефти и нефтепродуктов с поверхностей акваторий ликвидируют посредством химической технологии комплексообразования с помощью веществ-эмульгаторов, которые органически разлагаемыми ПАВ. Разбавляя их органическими растворителями, что облегчает применение, и подмешивая в загрязненные водоемы, удается локализовать удаляемые НО с дальнейшим их биохимическим окислением. С такой же целью используют магнитные жидкости [53], представляющие собой устойчивые коллоиды с магнитными свойствами и получаемые смешиванием воды с фторированными минеральными маслами, углеводородами, кремнийорганическими присадками, различными магнетиками и др. Используются магнитные жидкости для извлечения НО из сточных вод. Их распыляют на поверхности загрязненной воды, затем образующуюся смесь собирают с помощью плавающих магнитных устройств.

Представляет интерес опыт использования предназначенных к утилизации НО для снижения потерь при транспортировке дисперсных сыпучих материалов. По данным ПО «Воркутауголь» [54], использование эмульсии, состоящей на 60% из нефтепродукта и на 40% из воды, при обработке ею одного полувагона, груженого углем, с расходом эмульсии порядка 75–100 кг уменьшило потери груза на маршруте Воркута – Черновцы на 80%. При дальнейшем сжигании угольной смеси в энергоустановках эмульсионная добавка выступает в качестве топливного компонента [54].

Наибольшее распространение при утилизации горючих отходов, включая НО, приобрел способ термической переработки путем сжигания в огневых устройствах различного конструктивного исполнения: циклонных топках, топках с кипящим слоем, печах барабанного типа, печах поверхностного и многоподового сжигания [33].

Топочная камера в печах промышленного назначения, являющихся технологическими или энерготехнологическими агрегатами, представляет собой необходимый элемент установки огневой утилизации поскольку тепловая энергия, получаемая при сжигании топливных отходов, используется для отопительных или технологических целей. В таких агрегатах с той же целью используется теплота, производимая за счет вырабатываемого в основном процессе электрического тока.

Основными и наиболее важными классификационными признаками топочных устройств являются те, которые обусловлены аэродинамическими характеристиками, так как организация подвода окислителя к реагирующим поверхностям в наибольшей мере влияет на экономичность топочного процесса и его удельную теплопроизводительность. Таким образом, различают: камерные топки, предназначенные для сжигания наиболее широкой гаммы топлив (жидких и газообразных отходов, твердых мелкодисперсных отходов); факельно-слоевые топки для комбинированнного сжигания крупнокусковых, неизмельченных ТБО; барботажные и турбобарботажные камеры сгорания для сжигания жидких

отходов, из-за особенностей конструкции иногда упрощенно называемые горелками.

Исходя из сравнительных характеристик работы печей [55] при использовании огневого метода обезвреживания жидких отходов, наиболее производительными из них являются печи с псевдоожиженным слоем и циклонные печи. При этом слоевые топки подразделяются на устройства с кипящим и плотным слоем, камерные топки подразделяются на циклонные (вихревые) и факельные (прямоточные).

Жидкие отходы химических производств и сточные воды с примесями НО можно сжигать двумя способами. Первый осуществляется над слоем в распыленном виде и применяется преимущественно для горючих отходов. Второй – путем подачи отходов через форсунки в топки печей за счет его распыления, приведения в состояние мельчайших капель, обеспечивая таким образом хорошее перемешивание с кислородом воздуха и полноту сгорания. Процесс горения тем совершенней, чем лучше рассредоточены и перемешаны с воздухом частицы топлива. В основном для распыливания топлив применяются механические, воздушные и паровые форсунки.

Огневое обезвреживание НО и других жидких горючих отходов в печах с форсуночной подачей топлива часто встречает ограничения из-за возможности срыва горения за счет засорения форсунок инородными механическими включениями, за счет попадания воды в отходы и т.п. Но существуют форсунки, не чувствительные к механическому засорению каналов истечения, в частности, для сжигания шламов, содержащих НО, часто используют ротационные форсунки и горелки с распыливающим органом вращения. Эти горелки не чувствительны не только к засорению твердыми частицами, но и к повышенной вязкости используемых топлив.

Основную часть НО, которые образуются на предприятиях транспортного хозяйства, составляют консистентные смазки и смазочные масла. Ежегодная масса маслосодержащих отходов в мировом масштабе оценивается на уровне 60% от всех потерь нефтепродуктов, т.е. более чем 40 млн тонн. В числе их основных

источников значатся эксплуатация энергетического и промышленного оборудования, транспортных средств, станочного парка, а также случайные разливы, утечки из емкостей хранения, технологические процессы и т.д. Сбору подвергается не более 20 млн тонн маслоотходов в год, причем на переработку направляются около 2 млн тонн, т.е. всего 10% от собираемой массы [33]. Даже в странах с передовыми технологиями утилизации доля перерабатываемых жидких отходов не превышает 60% [38]. Неутилизированные отработанные масла, содержащие в своем составе более 200 опасных соединений [56], причиняют значительный ущерб окружающей среде, загрязняя воздух, воду и почву. В то же время в организации вторичных производств сырьем являются отработанные масла.

В России сбор и утилизация маслоотходов ведется с 1930 г. К 80-м годам их сбор достиг 1700 тыс. тонн в год при потреблении масел в объеме 7800 тыс. тонн. Но степень переработки отходов при этом составила всего 3% от объема использованного продукта, или 260 тыс. тонн в год. В 1994 году сбор отработанных масел значительно снизился и не превысил значения в 470 тыс. тонн, т.е. сократился в 3,6 раза [57]. В настоящее время в России на переработку направляется примерно 15 % от всего количества образующихся отходов [38, 54].

Многие производственные предприятия используют жидкие НО для собственных нужд. В таких случаях обычно используют простейшую технологию предварительной подготовки или обработки отходов (отстаивание, нагрев совместно с отстаиванием, применение реагентов), а нередко НО не обрабатывается вовсе. Направлениями использования НО для собственных нужд является смазка неответственных механизмов, форм, узлов цепных передач, а в домостроительных производствах – при производстве железобетонных плит [58–61].

1.3 Огневая утилизация жидких углеводородных отходов

Огневая утилизация в нашей стране насчитывает немало разновидностей конструкций используемых для этого устройств. Так, большое распространение получили установки турбобарботажного типа, их производительность достигала

10 т/ч при температурах процесса 800–1100 °С [33]. Одна из модификаций установок «Вихрь» в передвижном варианте имеет номинальную производительность 200 кг/ч и оснащена «мокрой» очисткой дымовых газов по реагентному или безреагентному типу. Допустимыми параметрами утилизируемых отходов являются: высота слоя отходов 2–3 см; коэффициент избытка воздуха 1,4–1,9; содержание влаги в отходах от 15 до 60%; наличие твердых минеральных включений с размером частиц в пределах 200 мкм.

К недостаткам утилизаторов турбобарботажного типа относят повышенное в сравнении со слоевыми топками значения коэффициентов избытка воздуха. Это способствует снижению коэффициента полезного действия, а пульсирующее горение факела провоцирует возможность его срыва. Конструктивное исполнение утилизатора не позволяет обеспечить техническую совместимость с устройствами утилизации теплоты.

Метод «мокрого» сжигания или жидкофазное окисление применяется при обезвреживании осадков сточных вод и жидких отходов [62]. Окисление кислородом воздуха углеводородных и органических примесей сточной воды при давлении 2-28 МПа и температурах 150-350 °С лежит в основе данного метода.

Оценкой эффективности метода является глубина окисления органической части осадка, в основном зависящая от температуры обработки. Окисление осадка сопровождается выделением тепла, которого становится достаточно для поддержания режима температуры при влажности 96%. Процесс интенсивного окисления органической составляющей осадка кислородом происходит в течение 30-40 минут. Преимущество метода жидкофазного окисления заключается в малых энергозатратах на процесс, подвергая незначительному испарению сточную воду. Но и этот способ не лишен серьезных недостатков, а именно: высокой капиталоемкости производства и сильной коррозии оборудования, неполного окисления отходов, образования накипных отложений на рабочих поверхностях теплообменников и др. Ввиду перечисленных недостатков данный способ применяется весьма ограниченно.

В Институте теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН разработано горелочное устройство [63], позволяющее утилизировать НО посредством их сжигания в струе потока перегретого пара. Перегретый пар подается в горелочное устройство из электропарогенератора через форсунку, которая установлена в основании горелки. Паровая струя с высокой скоростью истечения из форсунки попадает в камеру газогенерации. К центру парового потока гидростатическим способом в виде тонкой струи течет НО, определенного расхода. В результате формируется мелкодисперсный газокапельный поток. Кроме распыления, поток перегретого пара повышает температуру диспергированных частиц топлива, что способствует интенсификации смесеобразования и массообмена, а также активации процесса устойчивого воспламенения и последующей газификации НО. Такая конструкция горелочного устройства обеспечивает возможность распыления и сжигания некондиционных жидких углеводородов даже с механическими загрязнениями.

Вместе с тем конструкция горелочного устройства не позволяет изменять параметры пара для регулирования горения. В частности, сжигание жидких углеводородов тяжелого фракционного состава не является эффективным ввиду нестабильного горения и сильного коксования поверхностей данной горелки. Поэтому для широкого использования конструкции необходима разработка специального способа подачи и смешения топлива с паром, кроме того использование перегретого пара в технологии утилизации ограничивает возможности по созданию на ее основе мобильной, компактной установки малотоннажной утилизации ЖУО, так как дополнительно необходим генератор перегретого пара с системой водоподготовки.

Известная голландская компания «Breda BV» занимается выпуском воздушных обогревателей «Thermobile» для складских и производственных помещений [33]. Топливами для таких обогревателей используют моторные масляные отходы, загрязненное дизельное топливо и другие нефтепродукты, которые доступны для полного сжигания без выделения вредных газов и дыма,

что достигается за счет специального испарителя. Отсутствие несгоревшего твердого остатка в дымовых газах достигается за счет сбора его на специальном устройстве-тарелке, таким образом обеспечивая соответствие санитарно-гигиеническим требованиям по допустимому уровню их воздействия на атмосферу. Производительность модификаций этих установок по теплу составляет в номинальном диапазоне от 19 до 59 кВт при среднем расходе топлива соответственно от 2 до 6,2 л/ч [64].

В варианте индустриальной утилизации способом сжигания топливных и других соединений отходов простого органического синтеза практиковалось применение огневой утилизации в цементной промышленности. В США в 1984г. [65] было сожжено 1,2 млн тонн разнообразных жидких отходов на основе углеводородного состава, включая отработанные масла, красители и разбавители красок, растворители, спирты, бензин, керосин, смолы и т.п. Все это было использовано при производстве цемента. Степень термического разложения органической части материалов при сжигании составляла 99,99%.

Методом перспективной утилизации маслосодержащих отходов является процесс их горения в «сверхадиабатическом» режиме [66]. Такой режим основан на сжигании, при котором за счет теплообмена между продуктами горения и еще непрореагировавшим топливом температура в зоне реагирования может развиваться до значения выше адиабатического, определяемого отношением теплоты сгорания к теплоемкости продуктов горения.

Адиабатическое горение реализуется в двухстадийном процессе [18, 41]. Первая стадия – режим фильтрационного горения части отходов масел при подаче воздуха в реактор шахтного типа, в результате чего образуется высокодисперсный аэрозоль, представляющий собой смесь капель жидких углеводородов и газообразных продуктов. В следующей стадии аэрозольная взвесь направляется в зону дожигания с подачей в нее дополнительного расхода воздуха.

Среди преимуществ данного метода отмечают возможность достигать высокую эффективность утилизации маслоотходов даже при совокупном содержании в них влаги и минеральных примесей до 80% при высоком КПД. Все

это позволяет проводить утилизационный процесс горения таких низкокалорийных отходов практически без привлечения затрат на дополнительное топливо.

Среди способов огневой утилизации, применяемых для замасленных осадков сточных вод, известен способ совместного сжигания диспергированных сточных вод в смеси с углем в слоевых топках с подвижной колосниковой решеткой. Для этого в зону горения подаются сгущенные шламы путем распыливания сжатым воздухом или паром, благодаря чему развивается температура на уровне 650 °С и производится дополнительное количество тепловой энергии [67].

Направлением по утилизации отходов моторных масел, распространенным с середины 80-х годов двадцатого века в странах Западной Европы и США, становится их совместное применение с различными горючими отходами и использование в качестве топлив в печах обжига цементных заводов [68, 69]. В США таким способом утилизировалось до 70% жидких и твердых горючих отходов ежегодно [68].

Также перспективна разработка, в основе которой лежит получение стабильного вододисперсного топлива. Для этого отработанные моторные масла после очистки от твердых минеральных включений размерами более 50–70 мкм обезвоживают до 20–35% и направляют в аппарат эмульгирования. Вододисперсную смесь после нагрева до 50–90 °С вдувают через форсунки в воздушные фурмы доменных печей под давлением, которое превышает давление горячего дутья на 50-250 кПа [70].

В соответствии с существующей теорией горения процесс окисления топлива – это процесс, в котором участвуют молекулы кислорода, углеводородов, воды и газообразные продукты распада, представляющий собой совокупность непрерывных цепных реакций взаимодействия углеводородов с кислородом. Продукты распада топлива представляют собой свободные радикалы и другие активные частицы, которые обеспечивают протекание процесса в автотермическом режиме.

Едва ли не особую роль в обеспечении процесса горения играет вода. Она участвует в реакции дегидратации топлива, и активизирует этот процесс [71]:

$$H_2O + CO = CO_2 + H_2. \quad (1)$$

Первую фазу цикла развития цепей также открывает вода:

$$H_2O = H^\circ + OH^-; \quad (2)$$

$$OH^- + CO = CO_2 + H^\circ; \quad (3)$$

$$H^\circ + CO + O_2 = CO_2 + OH^-. \quad (4)$$

Сумма уравнений (1), (2) и (3) дает уравнение:

$$H_2O + 2CO + O_2 = 2CO_2 + H^\circ + OH^-. \quad (5)$$

Затем следует цикл разветвления цепей (6), а за ним фаза неполного сгорания углерода (7):

$$OH^- + O_2 = O^\circ + OH^- \quad (6)$$

$$C + H_2O = CO + H_2. \quad (7)$$

Фаза неполного сгорания углерода сопровождается продуцированием малоактивных молекул, которые в последующем участвуют в реакциях обрыва цепей:

$$CO + O^\circ = CO_2; \quad (8)$$

$$H_2 + O^\circ = H_2O. \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) соответствуют циклу начала затухания горения. А уравнения (1), (2) и (7), в свою очередь, свидетельствуют о важнейшей роли воды, на первой стадии зарождающей, а на заключительном этапе прекращающей процесс горения. По этой причине горят более интенсивно в меру обводненные НО, чем необводненные, что подтверждают исследования в области воспламенения композитных топлив/воды [72], нефтесодержащих угольно-водных суспензий [73]. В процессе разрыва сплошной фазы («микровзрыва») за счет испарения субкапель воды (при температурах 850 – 1100℃) – происходит их быстрый распад, снижая выбросы оксидов азота и твердых частиц. При сжигании угольно-водной суспензии с нефтепродуктами концентрации оксидов азота и серы значительно ниже, чем при сжигании углей.

Таким образом, сжигание синтезированных из нефти отработанных веществ при выполнении ряда условий можно проводить как процесс, обеспечивающий перевод сложных горючих вредоносных веществ в менее экологически опасные газообразные продукты. Если при этом НО содержат особо токсичные вещества, то для сжигания используют специальные аппараты, максимально обезвреживающие нефтесодержащий утилизант. При всех несомненных достоинствах огневой утилизации как универсального и доступного способа обезвреживания НО он имеет ряд существенных недостатков.

Первый недостаток, из-за которого сложилось негативное отношение по линии экологии, состоит в том, что в уходящих газах утилизационных устройств, в основном печей, обнаруживались термически устойчивые вещества из группы Д и из группы ПАУВ, считающиеся соответственно супертоксичными и токсичными. Следует отметить, что эти соединения по сути являются продуктами химического недожога, т.е. устраняемыми за счет полноценной оптимизации воздушного режима. Также важно учитывать, что группа ПАУВ включает в себя десятки веществ, из которых только некоторые единичные являются действительно токсичными. Из группы Д, в которой насчитываются сотни токсинов, только около тридцати относятся к супертоксичным веществам.

ПДК для супертоксинов не имеют практически значимого смысла, т.к. они токсичны при любых, ничтожно малых концентрациях. Поэтому в мировой практике используется единственный критерий – величина допустимой суточной дозы (ДСД), относительно не опасной по онкотоксичности для организма человека. В России ДСД, установленная Госсанэпиднадзором РФ, равна 10^{-11} г/кг веса в день из расчета поступления в организм за период жизни 70 лет – 0,02 мг Д-токсинов [74].

Традиционный (факельный) процесс сжигания является малоэффективным с точки зрения утилизации тепловой энергии и ценных компонентов продукта, что является вторым недостатком огневого рафинирования НО как метода.

Третьим недостатком обезвреживания НО методом сжигания является выделение в атмосферу больших количеств тяжелых металлов, входящих в состав сжигаемых продуктов, таких как кадмий, свинец, ванадий, ртуть и другие.

Но в сложных климатических и логистических условиях Севера и АЗРФ применение компактной установки огневой утилизации НО, ЖУО самостоятельно, или совместно с технологией пиролиза, будет способствовать взаимному, относительно безопасному и эффективному использованию жидких и твердых продуктов пиролиза отходов в качестве энергоносителей, нормализуя обстановку региона в части ликвидации отходов органического состава. Оправданным может быть использование пиролизной жидкости в качестве энергоносителя, а пиролизного углеродистого остатка – в качестве материала, формирующего фильтрационный слой зоны горения для малотоннажного устройства и дополнительного топлива. Такой способ позволит использовать теплоту сгорания продуктов в компактной установке для отопления и ГВС мобильных производственно-хозяйственных помещений и других передвижных сооружений в составе экспедиций.

1.4 Конструктивные типы горелочных устройств

Горелочные устройства, как известно, оказывают существенное влияние на теплообмен в камере горения и надежность работы всего топливосжигающего агрегата. Их основные технические показатели – это производительность (чаще всего под этой характеристикой подразумевают тепловую мощность) и коэффициенты сопротивления по первичному и вторичному воздуху.

Конструкция, размещение и взаимная компоновка горелочных устройств определяют аэродинамический, тепловой и концентрационный режимы процесса сжигания, а также стадии воспламенения, горения и выгорания топлива.

Горение любого топлива с химической точки зрения является процессом реагирования горючих составляющих и кислорода, сопровождающимся выделением теплоты. Окислителем, вернее носителем кислорода, является воздух, в отдельных технологиях применяется технический кислород или его смесь с воздухом. Сложный и непостоянный состав сжигаемых жидких углеводородных

отходов является фактором, который крайне затрудняет создание топочных устройств, полностью удовлетворяющих необходимым требованиям. Данное положение усугубляет и то, что повсеместно используемый нормативный метод расчета котлов [75] задает при конструировании главным образом подход к обеспечению заданного номинального режима для работы топки при наперед принимаемых параметрах продуктов сгорания [76], а выбор наиболее рационального пути в организации процесса горения остается вполне самостоятельной и неоднозначной задачей. В связи с этим создание новых типов топочных устройств требует физических экспериментов и данных о работе существующих аналогов. Это привело к появлению разнообразных конструктивных типов топочных устройств. Резюмируя вышеотмеченное для топочных устройств, в русле конкретной задачи предпочтительнее будет учитывать значительное количество разработанных типов горелочных устройств, а не самих камер сгорания.

Наиболее распространенными в эксплуатации являются горелки, где процесс сжигания топлив организуется по факельному принципу, а весь необходимый для горения воздух подается в корень факела. Такой подход предполагает значительное пространство в случае сжигания многокомпонентных смесей и ведет к габаритным конструкциям проектируемых установок [77]. Наряду с этим получили распространение горелки, процесс горения в которых происходит на поверхности излучающего элемента. Такие горелки называют инфракрасными или беспламенными. Они представляют собой самостоятельную ветвь горелочной техники, и их можно классифицировать исходя из множества технических решений, различающихся по конструкции и назначению (рисунок 1.1). Некоторые из горелок данного класса, непосредственно относящиеся к направленности настоящей диссертационной работы, рассмотрены ниже. Преобладание доли лучистого тепла в производимой энергии и малоёмкие, негабаритные конструкции таких устройств делают их предпочтительнее для разработки на этой основе новых или модернизированных устройств, в частности, для малотоннажной утилизации углеводородных отходов.



Рисунок 1.1 – Общая классификация горелочных устройств

В распространенной конструкции горелки беспламенного горения и инфракрасного излучения (рисунок 1.2) [78], газ инжектирует воздух посредством истечения из форсунки 6. Здесь расчет инжектора-смесителя 5 выполняется таким образом, чтобы при исходном заданном давлении газа перед форсункой и гидравлическом сопротивлении излучающего насадка 3 первичный воздух имел давление в пределах 820,8-836,0 мм вод. ст.

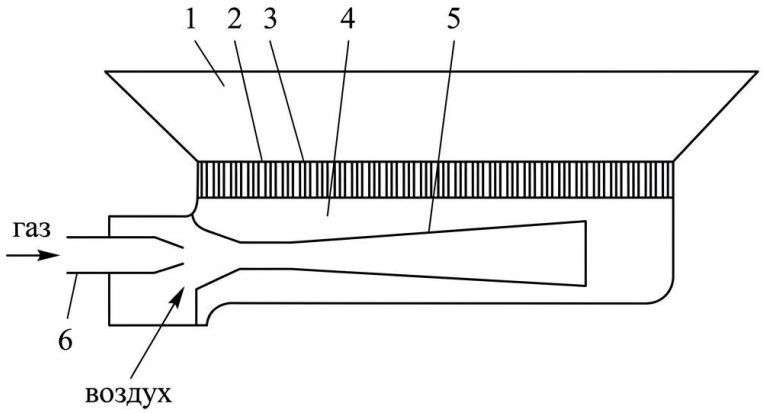


Рисунок 1.2 – Схематичное устройство беспламенной излучающей горелки [78]:

1 – рефлектор; 2 – каналы в керамической насадке; 3 – насадка;

4 – распределительная коробка; 5 – инжектор–смеситель; 6 – форсунка

Топливовоздушная смесь, образующаяся в инжекторе 5, под давлением порядка 0,15–0,2 мм вод. ст. подается в распределительную коробку 4, откуда через насадку 3 поступает для сгорания у ее наружной поверхности. Насадка 3 набрана из огнеупорных плиток, имеющих сквозные цилиндрические и/или конические каналы малых диаметров или, по другому варианту, вначале каналы с меньшими диаметрами, а на выходе по ходу движения газовоздушной смеси – с большими диаметрами.

Соотношение расходов газа и воздуха, близкие к стехиометрическим, обеспечиваются качественной подготовкой смеси наряду с невысокой скоростью истечения на выходе каналов. Таким образом достигается возможность процесса окисления в тонком слое вблизи поверхности насадка. При самом незначительном отклонении воздушного режима от оптимального коэффициента избытка воздуха возможно резкое нарушение эффекта беспламенного горения газа. Наличие большого подсоса первичного воздуха влияет на снижение температуры насадка и тем самым снижает излучательную способность газогорелочного устройства, а при небольшом подсосе возникают языки пламени и неполное сгорание и как следствие необходимость подвода вторичного воздуха.

Для исключения возникновения проскока пламени диаметр цилиндрических каналов насадки и диаметр конусных или ступенчатых каналов на выходе

горючей смеси выполняют менее «критического», т.е. с диаметром, при котором невозможно превышение скорости распространения фронта пламени в сравнении со скоростью истечения газовоздушной смеси.

В ступенчатых отверстиях горение сосредоточивается в расширенной области канала, т.е. внутри насадочной плитки, а в цилиндрических каналах – вблизи поверхности керамического насадка. При сжигании горючей смеси на поверхностях плоских керамических перфорированных плиток сталкиваются с неравномерностью их нагрева, т.е. с возникновением зон с различающейся температурой нагрева. Это связывают с неодинаковыми диаметрами отверстий и с различной толщиной перемычек между ними.



Рисунок 1.3 – Устройство горелочного насадка с пирамидальными выступами на излучающей поверхности [78]

В представленной на рисунке 1.3 [78] горелке окисление горючей смеси протекает на поверхности керамических конусов или пирамидок. Использование таких геометрических форм позволяет увеличить площадь поверхности излучения, значительно или частично исключить неравномерность нагрева насадки, повысить полноту сгорания топлива и долю передаваемого лучистого тепла. Вместе с тем практика использования таких керамических насадок подтверждает их недолговечность [79]: под действием температурных колебаний в них возникают механические напряжения, приводящие к растрескиванию. Интенсифицировать процесс сжигания топлива и устранить разверку температур активной зоны керамической насадки возможно путем установки над ней металлической сетки из жаростойкой стали на расстоянии 8-10 мм. Такая сетка также является стабилизатором горения при небольшом ветровом воздействии на насадку и увеличивает температуру насадки на 100-130 °С.

В процессе разогрева керамической плитки ввиду значительного повышения температуры газовоздушной смеси вероятным становится возникновение проскока пламени даже в условиях использования диаметров отверстий менее «критического». В этой связи керамические плитки стремятся изготавливать из материалов с низкой теплопроводностью. Когда в какой либо точке фронта распространения пламени его скорость превышает скорость истечения топливовоздушной смеси, возникает эффект проскока пламени. Он зависит от многих факторов: от характеристик используемых топлив, их состава, диаметров огневых отверстий и распределения скоростей истечения в выходных отверстиях, температур и расходов топливовоздушных смесей. Форма огневых каналов также может оказывать некоторое влияние на возникновение условий для проскока пламени.

Таким образом, керамические насадки должны подбираться под конкретный вид топлива, что исключает принцип универсальности при использовании на практике и в применении к изменяющемуся составу утилизата.

Установка над керамическими насадками металлических сеток ведет к понижению устойчивости работы горелочных устройств инфракрасного излучения в части возникновения проскока пламени. Поэтому для выравнивания температуры излучающей поверхности и повышения ветроустойчивости горелок за счет этих сеток необходимо некоторое уменьшение номинального расхода газа. Сетка одновременно выполняет функцию вторичного излучателя и способствует увеличению коэффициента излучения горелочного устройства. При наличии над керамическими насадками сеток-стабилизаторов, изготовленных из хромоникелевой проволоки, передача лучистого тепла будет наибольшей [80]. Из экспериментальных исследований известно [78, 81], что для повышения температуры излучающего насадка и ее выравнивания, а также для стабилизации горения целесообразно использование ребристой поверхности на активной стороне излучающей панели.

Еще одним конструктивным решением является излучающая насадка, выполненная из сеток жаропрочной стали (в соответствии с типом конструкции

на рисунке 1.4 [78]). Принцип работы такой горелки мало чем отличается от принципа работы горелки с керамической насадкой. Подготовленная в смесительной камере 5 однородная газовоздушная смесь поступает в зону активного окисления через один или несколько рядов металлических сеток 3 и 4, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Между ними протекает процесс горения газа, а раскаленные сетки становятся источниками излучения.

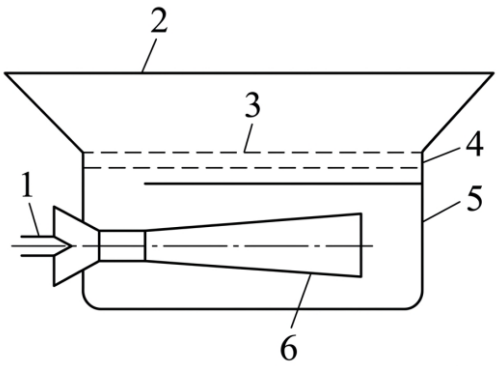


Рисунок 1.4 – Схематическое устройство горелки инфракрасного излучения с металлическим сетчатым излучателем [78]:

1 – форсунка; 2 – рефлектор; 3 – сетка-насадка;

4 – предохранительная сетка; 5 – смесительная камера; 6 –диффузор

При разработке инфракрасных горелочных устройств с сетчатыми металлическими насадками немаловажным является подбор материала сеток, их количества и взаимного расположения. Правильное сочетание этих условий обеспечивает устойчивое горение при высоких значениях температур, что в свою очередь способствует подогреву топливовоздушной смеси, увеличению лучистого теплового потока и стабилизации процессов горения. Для надежной работы таких горелок количество сеток должно быть не менее двух, а диаметр ячеек в нижнем ряду сеток не должен быть выше «критического». Исходя из общего гидравлического сопротивления сеток, напор газа по тракту перед горелочным устройством может быть определен расчетом или подобран экспериментально.

Кроме вышерассмотренных типов инфракрасных излучателей применение нашли кольце- и чашеобразные, панельные и трубчатые излучатели из металлических листов и с керамической насадкой. Кольце- и чашеобразные излучающие элементы используются для термической обработки деталей на

производственных конвейерах, или при групповой компоновке для образования панели излучения значительных площадей. Через пористую структуру керамических панелей поступает газ, смешанный с воздухом, затем подготовленную горючую смесь сжигают на поверхности керамических панелей. Окислы металлов могут применяться в качестве катализаторов и активизировать процесс горения топлива на поверхности панели.

К катализаторам могут добавляться промоторы, усиливающие их действие. Поэтому полное сгорание газа происходит на активизированной поверхности панели со скоростью, присущей процессу при более высоких температурах горения. В таких условиях возникает возможность сжигания газов с различной скоростью распространения пламени даже при возникновении кратковременного соприкосновения газовоздушной смеси с раскаленным керамическим материалом. Такие свойства материала панели как зернистость и его состав имеют большое значение ввиду необходимости стабилизации зоны горения в пределах 5 мм над поверхностью панели, температура которой может достигать 950–1000 °С. Процесс в панели происходит подобно сжиганию газового топлива в других типах беспламенных горелок инфракрасного излучения. Смесь газа с воздухом подводится под панель (головку горелки) под давлением, достаточным для преодоления гидравлического сопротивления панели и для достижения необходимой скорости смеси на выходе из нее. Смесь газа и воздуха, выходя через пористую разветвленную структуру панели, сгорает на ее поверхности. Пламя «невидимо» при высоких скоростях окисления газа, а процесс сжигания газа на слух воспринимается как слабое шипение [71]. Изменяя давление газовой смеси под головкой горелки, соответственно изменяют тепловую производительность горелки.

Компания «Прометей» разработала керамическую инфракрасную горелку «Гелиос» (рисунок 1.5) [82], под которую спроектирован целый ряд отопительных газовых котлов. Процессы, происходящие при сгорании газа в этой горелке, превращают в тепловое излучение до 99,9% тепла. Это позволяет значительно уменьшить размеры котла и сократить расход топлива до 2 раз по сравнению с

обычными пламенными горелками. Горючая газовоздушная смесь сгорает в сотах керамической плитки, происходит нагрев керамики до значительной температуры (порядка 900 и до 1000 ºС на поверхности излучателя), что вызывает интенсивное излучение инфракрасного спектра (тепловое излучение).

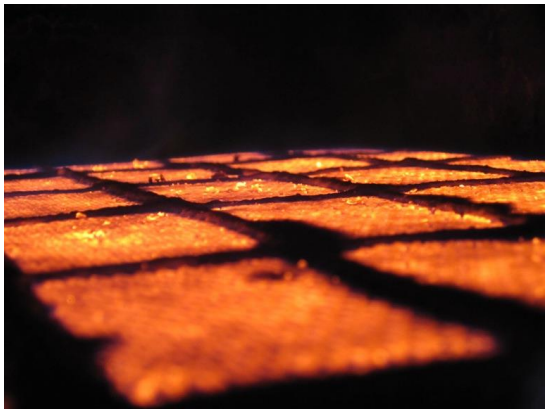


Рисунок 1.5 – Излучатель керамической инфракрасной горелки «Гелиос» [82]

Горение газа происходит внутри пор керамического излучателя, открытое пламя отсутствует. Преимущества использования керамической горелки описаны профессором ИХФ РАН В.М. Шмелевым [83]. Показано, что следует тщательно подбирать геометрию излучающих элементов и конструкции топки котельной установки. Так, при использовании прямоугольных, плоских форм композитных излучающих элементов неизбежно в топочной камере возникают зоны неравномерного теплораспределения, результатом чего может стать снижение тепловосприятия поверхностями нагрева и эффективности в целом. А использование принципа предварительной или частичной подготовки топливовоздушной смеси требует тщательной настройки стехеометрического соотношения «топливо-воздух» для обеспечения безопасной и экологичной эксплуатации тепловых энергоустановок.

Опубликованы [83] вариации инфракрасных горелок с объемной проницаемой матрицей для различного назначения (рисунок 1.6). Представленные варианты горелок позволяют обеспечить экологичность сжигания газообразного топлива (NO_x ~ 2,5–10 ppm) в широком диапазоне регулирования мощности даже

при избытке воздуха α=2 [83]. Однако недостатком этих горелок является довольно высокий выброс CO (40-200 ppm).

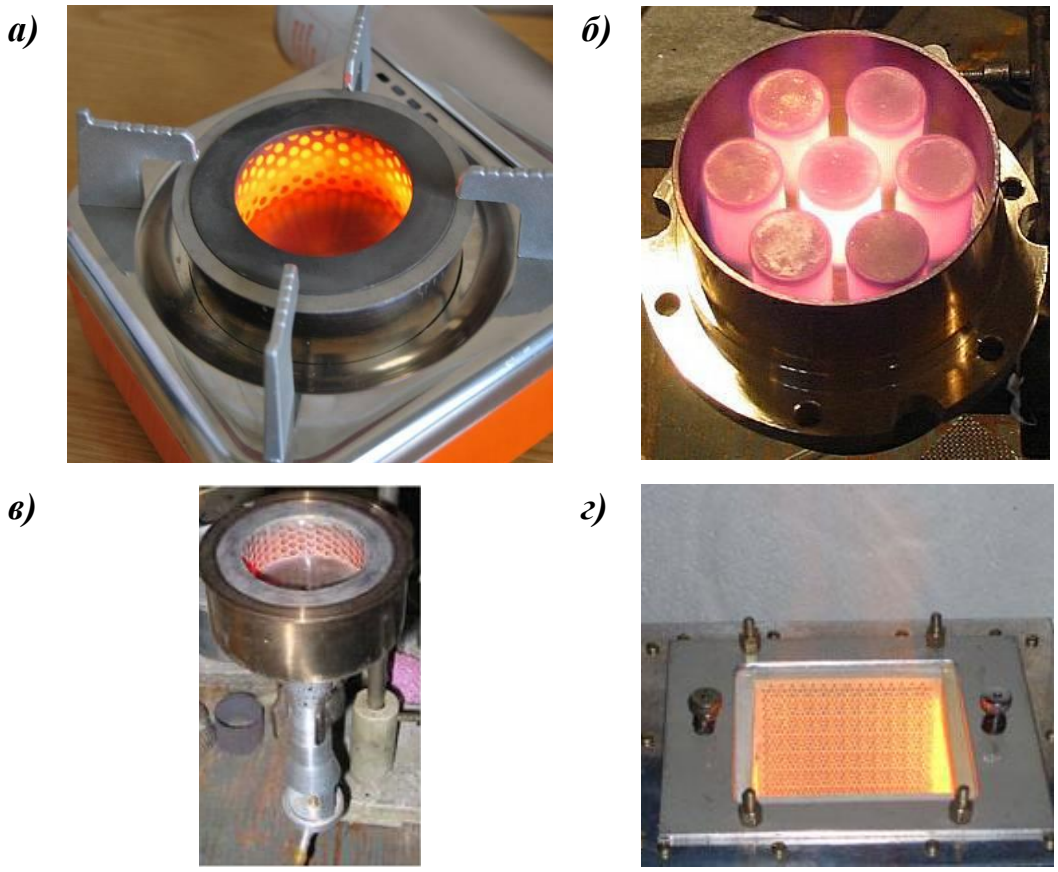


Рисунок 1.6 – Макеты инфракрасных горелочных устройств различного назначения [83]:

а) – горелка газовой плиты, б) – модуль газового котла, в) и г) – горелка для газотурбинных установок, промышленных котлов и др.

В развитие горелочных устройств [83, 84] исследовано влияние покрытий из высокопористой металлической пены, нанесенных на поверхности проницаемых матриц, на процесс горения смесей природного газа с воздухом [80]. Покрытия (рисунок 1.7) выполнялись из порошков оксида алюминия (Al_2O_3) и силиката циркония ($ZrSiO_4$). Использование покрытий позволило увеличить тепловую эффективность, уменьшить количество вредных выбросов в продуктах сгорания, увеличить срок службы пористых металлических матриц и уменьшить материалоемкость горелочных устройств.

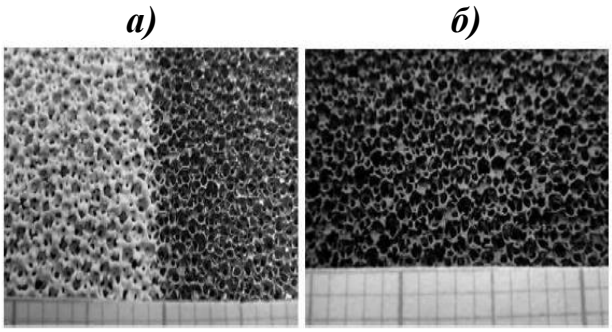


Рисунок 1.7 – Пористые матрицы из хромаля с покрытиями из оксида алюминия (*а)*, и из силиката циркония (*б*) [80]

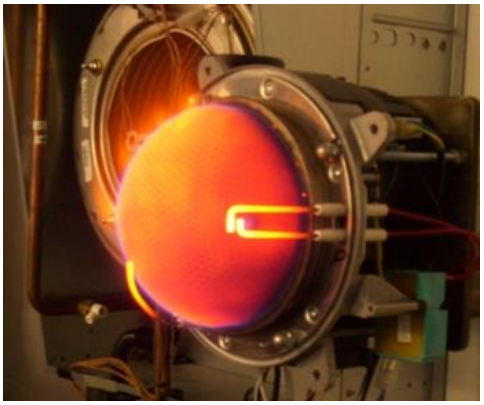


Рисунок 1.8 – Инфракрасная горелка MATRIX [85]

Примером реально действующего образца горелочного устройства также является разработка «MATRIX» (рисунок 1.8) германской фирмы Viessmann [85], выполненная полусферической формы в виде сетки из жаропрочной легированной стали. В этих горелках происходит инфракрасное сжигание газа при полном сгорании, что позволяет уменьшить эмиссию в атмосферу оксидов азота NO_x и угарного газа CO ниже предельно допустимых концентраций.

Другим вариантом исполнения инфракрасного горелочного устройства является горелка (рисунок 1.9) [86], корпус 1 которой содержит топочную или реакционную камеру 5 с впускным отверстием 2 и выпускным сечением 3, соответственно для подачи газовоздушной смеси из смесительной камеры 7 и для выпуска отработанных продуктов сгорания. Объем камеры 5 заполнен засыпным пористым материалом, размер фракций которого изменяется по ходу потока от 5 до 11 мм в сторону его увеличения.

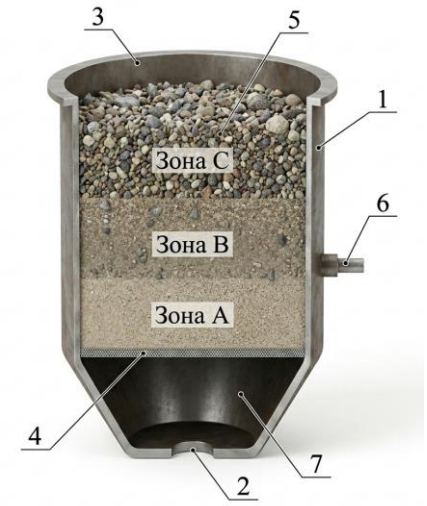


Рисунок 1.9 – Схема горелочного устройства инфракрасного излучения с пористым слоем [86]:

1 – корпус; 2 – впускное отверстие газовоздушной смеси; 3 – выпускное отверстие отработанных газов; 4 – перфорированная пластина на выходе топливовоздушной смеси из смесительной камеры; 5 – пористый материал; 6 – запальный элемент; 7 – смесительная камера

Процесс горения организуется так, что в зоне В насыпного пористого материала образуется граничная поверхность для распространения пламени с критическим значением Pe (Пекле), характеризующим отношение конвективного теплового потока к кондуктивному тепловому потоку (передача теплоты теплопроводностью), то есть отношение, при котором может возникнуть пламя, а ниже которого пламя подавляется.

В радиационной газовой горелке (рисунки 1.10 и 1.11) [87] процесс горения ведется путем подачи топлива через сопло во внутреннюю полость пористого цилиндрического насадка 1, выполненного из жаростойкого материала. Из-за возникающего разрежения окружающий воздух эжектируется через проницаемую стенку пористого насадка, полость которого играет роль смесителя газообразного топлива с эжектируемым воздухом. Качество подготавливаемой смеси поддерживается наличием зоны рециркуляции (зоны возвратных течений) в области смешения 2.

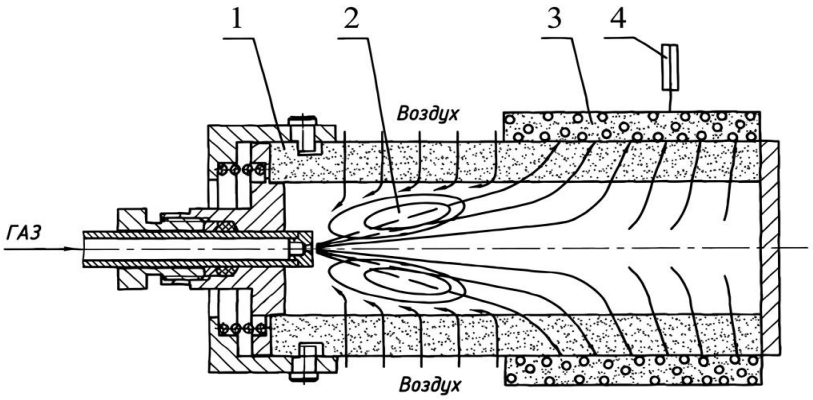


Рисунок 1.10 – Схема радиационной газовой горелки в разрезе с зоной рециркуляции и зоной горения [87]:

1 – цилиндрический пористый насадок;

2 – зона рециркуляции газовоздушной смеси; 3 – кольцевой пористый насадок;

4 – запальное устройство

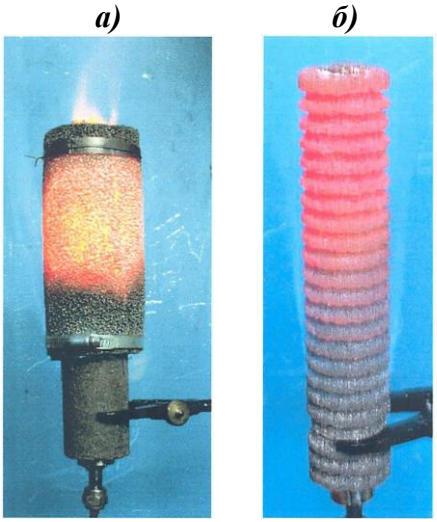


Рисунок 1.11 – Внешний вид радиационной газовой горелки в процессе испытаний [87]:

а) – исполнение с дополнительным кольцевым насадком; б) – исполнение с профилированной поверхностью

Возвратное течение возникает из-за сопротивлений трения на стенках пористого насадка движению расширяющейся струи газового топлива. В эту зону через поры цилиндрической стенки эжектируется воздух и смешивается с газообразным топливом. Далее по ходу струи профиль скорости потока смеси

выравнивается, а скорость падает из-за отвода массы на периферию, вследствие чего давление в полости насадка возрастает с превышением над атмосферным, и горючая смесь истекает через кольцевой пористый насадок 3 наружу. Здесь с помощью запального устройства 4 происходит розжиг смеси, воспламенившаяся смесь охватывает наружную поверхность 3 газопроницаемого насадка. По мере разогрева этой поверхности слой пламени истончается, а в излучательной части наступает режим внешнепорового горения, при котором цилиндрический насадок постепенно раскаляется, вызывая интенсивное инфракрасное излучение.

Регулирование работы радиационной газовой горелки ведется посредством изменения давления впрыска топлива и/или положения сопла в полости насадка, в результате чего изменяется величина зоны рециркуляции и поток эжектируемого воздуха.

Одним из доступных решений являются автономные обогреватели на солярке и керосине «Солярогаз» (рисунок 1.12) производства компании Саво [88].

Основной принцип работы заключается в равномерном сгорании топлива и нагреве рабочей поверхности прибора. По заявлениям производителя, рабочая поверхность нагревается до 800 °С, таким образом происходит не только обогрев конвекцией, но и инфракрасным излучением. Конструкция горелочного устройства обогревателя «Солярогаз» (рисунок 1.13) направлена на максимальное сгорание паров топлива, благодаря чему достигается высокая экологичность в сравнении с горелками факельного типа на том же виде топлива и той же мощности [88].

Среди теплогенерирующих устройств, не использующих факельное горение, можно также отметить газовые инфракрасные обогреватели «Гик-1.8» и «Диксон 4.62» (рисунок 1.14; 1.15) [89].

Обобщая опыт использования инфракрасной техники, к «плюсам» применения можно отнести: высокую долю лучистого тепла, генерируемого горелочным устройством; высокую плотность тепловых потоков от единицы



Рисунок 1.12 – Автономный обогреватель «Солярогаз» [88]

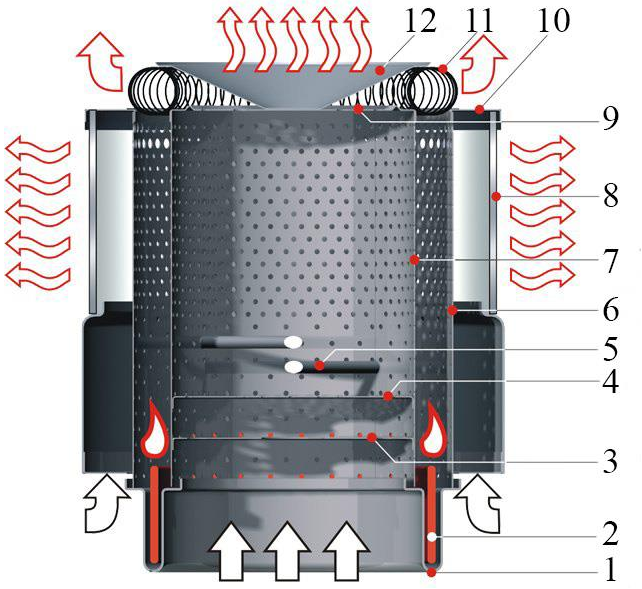


Рисунок 1.13 – Конструкция обогревателя «Солярогаз» [88]:
1 – система топливопровода; 2 – лента поджига; 3 – диффузор смешивания воздушных потоков 1 стадии; 4 – диффузор смешивания воздушных потоков 2 стадии; 5 – шпильки соосности; 6 – большой цилиндр перфорации; 7 – малый цилиндр перфорации; 8 – термостойкое стекло; 9 – рассеиватель теплового потока; 10 – направляющее кольцо; 11 – спираль-катализатор

площади поверхности излучения горелки; малый удельный вес устройства относительно его заявленной мощности; высокую эффективность сжигания топлив, экологичность и безопасность при эксплуатации горелки. На основе

опыта конструирования подобных горелок и применительно к цели настоящей работы представляется перспективным его использование в создании мобильных энергетических устройств по утилизации малотоннажных скоплений жидких углеводородных производственных отходов.



Рисунок 1.14 – Инфракрасный обогреватель Диксон 4.62 [89]

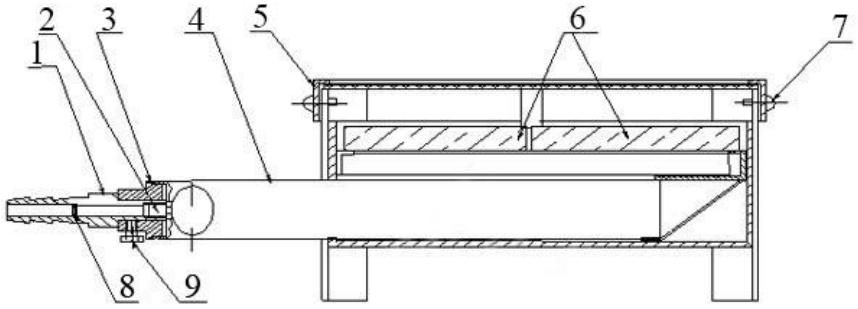


Рисунок 1.15 – Конструктивная схема обогревателя «Диксон 4.62» [89]:
1 – штуцер, 2 – форсунка, 3 – фланец, 4 – смеситель, 5 – рамка, 6 – панель излучателя, 7 – саморез, 8 – фильтр, 9 – стопорный винт, 10 – корпус

1.5 Материалы, используемые для пористых элементов в устройствах беспламенного горения

Используемые в горелочных устройствах рассматриваемого класса пористые неметаллические материалы имеют ряд преимуществ над металлическими: прежде всего по таким свойствам как высокая коррозионная стойкость, устойчивость к радиационному воздействию, биологическая совместимость, возможность изменения свойств материала за счет изменения пористой

структуры. Немаловажные преимущества дают доступность сырья для производства с низкой энергоемкостью, возможность применения экологически безопасных технологий получения и многофункциональность применения [90]. По сравнению с другими видами материалов (например, металлами и полимерами) они отличаются еще и исключительным многообразием свойств. Среди видов композитных структур всегда находятся такие, которые вполне способны заменить полимеры и металлы, тогда как наоборот возможно заменить далеко не всегда.

Конструкционная керамика с технологической точки зрения менее энергоемкое производство, в сравнении с производством альтернативных металлических материалов. Примером может служить выпуск технической бескислородной керамики типа нитрида кремния, энергозатраты при производстве которой значительно ниже, чем при изготовлении конструкционных металлических материалов [90].

Преимуществом при производстве композитных материалов является относительно низкое воздействие на окружающую среду в отличие от металлургического, тем самым позволяя принимать оправданные технологические и экологические решения в сторону использования керамических материалов. Как пример, получение водорода посредством высокотемпературного электролиза воды [91] в электролизерах с керамическими электролитами и электродами.

Устойчивость к радиации и высокая коррозионная стойкость керамических материалов в сравнении с металлическими материалами обусловливает больший ресурс при использовании керамо-конструкций в агрессивных средах. Так, например, попытка альтернативной замены магнитной керамики, которая использовалась в качестве элементов памяти ЭВМ, на полупроводниковые интегральные элементы в условиях космоса оказалась неудачной, так как выяснилось, что альтернативные элементы под воздействием солнечной радиации перестают нормально работать [91].

Приведенные свойства пористых неметаллических материалов позволяют им с каждым годом завоевывать все расширяющиеся области применения, в том числе в качестве элемента газовых горелочных устройств [90].

В рассматриваемом контексте представляющим интерес направлением является использование неметаллических материалов в горелочных устройствах инфракрасного излучения. Как показано выше (п. 1.3), их применяют в качестве пористых насадок-излучателей, в рабочей зоне которых происходят процессы активного окисления топлива, тем самым преобразуя химическую энергию связи в тепловое излучение. Горелочными устройствами инфракрасного излучения осуществляют высокоскоростной или высокотемпературный нагрев при большом температурном градиенте, так как поверхность керамического излучателя позволяет держать температуры значительно выше температур, выдерживаемых материалом нагревателей (в основном нагреватели изготавливают из жаропрочных металлов и сплавов) [92].

Важнейшими компонентами современных конструкционных композитов, используемых в качестве излучающих насадок горелочных устройств инфракрасного излучения, являются оксиды бора, алюминия, титана, бериллия, циркония, магния, кремния, карбиды кремния и бора, нитриды кремния, их разнообразные неметаллические структуры и твердые растворы [93]. Так же, как и горелочных устройств, существует множество разновидностей применяемых пористых неметаллических насадок. Их различают по разным характеризующим физическим и химическим параметрам: геометрической форме, прочности, термическому сопротивлению и жаростойкости, эффективности излучения, химическому составу, экономической целесообразности, экологической применимости и др.

В отечественной практике для горелок в большинстве случаев применялись насадки (рисунок 1.16) [27] из плиток композитной керамики, соединяемых друг с другом склеиванием специальной массой. При этом на каждой отдельной субплитке имеется до 700 сквозных цилиндрических каналов диаметром порядка 1,0–1,5 мм. Общее проходное сечение каналов обеспечивало низкие

гидравлические сопротивления насадки при высоких тепловых напряжениях поверхности и составляло порядка 40-45% от всей рабочей поверхности плитки.

На современном этапе развития и производства инфракрасных горелочных устройств существует множество конструктивных решений для используемых керамических насадок излучателей. Варианты форм излучающих элементов из корундовой керамики представлены на рисунке 1.17 [27].

Панели керамические инфракрасного излучения предназначены для комплектации горелок печей хлебопекарной промышленности, теплогенераторов инфракрасного излучения, работающих на природном и сжиженном газе, бензине, которые используются в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Данные излучающие панели, собранные в горелку, при сжигании топлива позволяют получить инфракрасный тепловой поток, воздействующий непосредственно на нагреваемые предметы.

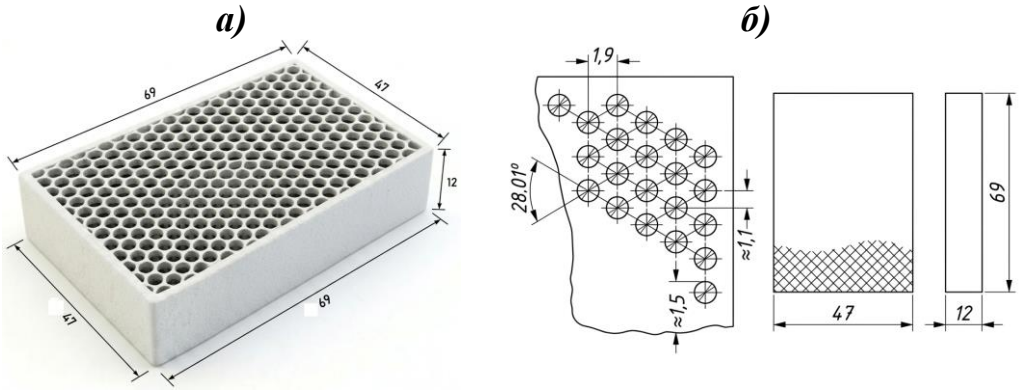


Рисунок 1.16 – Излучающий керамический элемент (*а*) и размещение отверстий на поверхности насадки (*б*) [27]

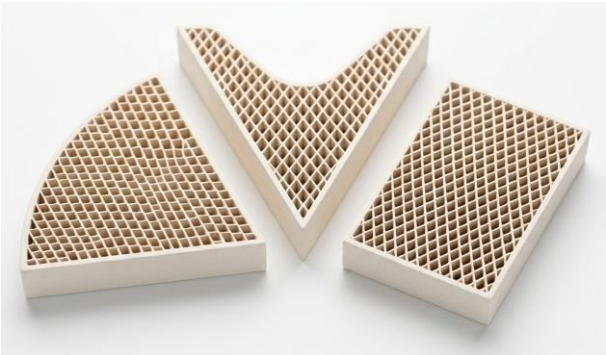


Рисунок 1.17 – Излучающие керамические элементы [27]

Универсальный пористый насадок [94] для беспламенной горелки, структура которого представлена на рис. 1.18, изготовлен из материала на основе оксидов металлов, имеет цилиндрическую форму длиной до 2000 мм и диаметром до 500 мм. Открытая пористость составляет 60–70 %, каналы пор с длиной периода от 200 до 5000 мкм имеют переменное сечение при соотношении минимального сечения к максимальному 1:(50–70). Такая пористая структура позволяет упростить конструкцию горелки и работать в широком диапазоне ее мощности вплоть до 4 МВт.

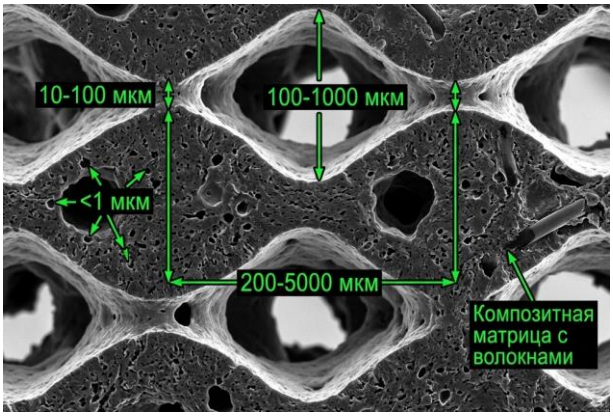


Рисунок 1.18 – Структура универсального пористого керамического насадка [94]

Горелочная керамика выдерживает резкие и высокотемпературные колебания благодаря обеспечению при изготовлении ряда технических требований – по объемному весу (в пределах 1 г/см^3), по теплопроводности (коэффициент теплопроводности не более 0,5 ккал/(ч·м·град)), по прочности (предел прочности при изгибе не менее 35 кгс/см^2). При попадании на такую керамическую насадку работающей горелки холодной воды насадка не должна растрескиваться. Свойством большей части из керамических насадок является постоянное уменьшение температуры тыльной стороны по мере возрастания удельной тепловой нагрузки до $500 \cdot 10^3$–$530 \cdot 10^3$ ккал/(м^2·ч). Это возможно, если скорость отвода тепла потоком топливовоздушной смеси преобладает над скоростью подвода тепла из зоны горения [27]. В этой связи использование неметаллической пористой структуры в качестве матрицы рабочей зоны окисления оказывается предпочтительным.

1.6 Постановка задач исследования

Анализ тенденций накопления отходов показал, что наиболее широко распространенными отходами являются НО, а именно жидкие горючие углеводородные соединения – как результат производственно-хозяйственной деятельности предприятий различных отраслей. Опыт практического вовлечения углеводородсодержащих отходов в общий технологический баланс так же свидетельствует об этом. Отходы продуктов нефтепереработки, складируемые или вывезенные и захороненные на неадаптированных территориях, наносят значительный вред экосистеме обитания человека. В результате загрязнений ими почв дальнейшее использование таких территорий в качестве сельхозугодий становится невозможным. С осадками и грунтовыми водами загрязняющие продукты отравляют естественные подземные запасы пресной воды, погибает флора и фауна и т.д.

В этой связи в России и других странах было разработано множество технических и технологических решений по утилизации отходного сырья и получения при этом вторичных полезных продуктов, тепловой и электрической энергии. Среди них основными методами утилизации и обезвреживания нефтепроизводных веществ можно считать термические методы, прежде всего способ огневой утилизации. Из-за эффективности способа утилизации окислением, простоты эксплуатации сжигающих установок и относительно высокой производительности таких систем этот способ нашел наибольшее распространение. Малая экологичность в применении такого способа может быть компенсирована разработанными техническими комплексами на основе существующих методов по очистке продуктов горения от содержащихся в них токсичных соединений.

Практика последних десятилетий показывает, что мотивирующим приоритетным аспектом в создании установок огневой переработки явились проблемы утилизации, связанные с массовыми, многотоннажными образованиями горючих отходов. Вместе с тем не меньшую значимость имеет проблема утилизации локальных малотоннажных скоплений отходных углеводородов,

которую крайне сложно решить по техническим и финансовым соображениям из-за невозможности дислокации и использования в труднодоступных регионах практически любого варианта из существующих аналогов утилизационных установок.

Таким образом, существующие установки, рассчитанные на большие объемы переработки горючих отходов и имеющие сложную, емкую и дорогостоящую конструкцию, становятся малополезными в решении этих проблем. Отсутствие простых конструкторских решений для сжигания малых скоплений жидких углеводородов, отходов пиролиза мотивирует к созданию мобильных компактных и экономически оправданных устройств, работающих в условиях малообъемной утилизации вторичных энергоресурсов.

Создание полноценных устройств, позволяющих согласно современным требованиям сжигать жидкие углеводороды, является само по себе сложным мероприятием. В отношении топок тепловых энергоустановок это привело к созданию большого количества типов горелочных устройств. Ведь в этом случае горелочные устройства выполняют функцию организации подготовки реакционной смеси в топочной камере и обеспечения окислительного процесса в факеле. Такой принцип требует существенных объемов топочного пространства для организации сжигания горючих смесей, тем самым приводит к увеличению габаритов установки и, соответственно, ее стоимости. Естественно, такой принцип не позволяет рассматривать его в качестве оптимального при создании мобильных утилизирующих энергоустановок. Тем не менее, огневая утилизация, по мнению автора, является наиболее эффективным способом применительно к углеводородным отходам, а также для использования получаемой тепловой энергии. Как способ ликвидации углеводородных отходов она позволяет предварительно оценить перспективу использования реализующих его установок, например, в условиях работы в северных, труднодоступных регионах.

Согласно известному опыту, при эксплуатации значение имеют технические решения, связанные с улучшением качества углеводородного сырья, на которое в значительной мере влияет стадия топливоподготовки. Ведь даже минеральные

примеси в виде мелкодисперсных частиц и парафиновые включения могут инициировать абразивный износ элементов в обычных конструкциях горелочных устройств, а также отложения в каналах истечения и распыления, подачи топлива вплоть до перекрытия проходного сечения. В связи с этим проблема качественной утилизации жидких углеводородных отходов подводит к необходимости выработки новых подходов в ее решении. Основой концепции для создания утилизирующего устройства в перспективе могут стать принципы, позволяющие эффективно утилизировать жидкие углеводороды с минимальным воздействием на окружающую среду, в том числе:

– выбор доступного (простого, недорогого, эффективного) способа для утилизации углеводородных отходов;

– выбор способа подачи жидких углеводородов, в активную зону окисления (матрицу) исходя из цели разработки технически простой, компактной, мобильной установки;

– выбор материалов для элементов конструкции, имеющих невысокую стоимость, с достаточными для использования характеристиками и высокой товарной доступностью.

Практика предварительной подготовки топлива перед сжиганием в горелочном устройстве делает установку технически сложной, не компактной и тем более не мобильной. В соответствии с этими принципами необходимо выбрать такую систему подвода топлива и окислителя, а также матрицу, формирующую активную зону окисления, которая была бы не чувствительна к наличию различных дисперсных частиц в составе жидких горючих отходов, а также к их фракционному составу, обеспечивая при этом допустимое экологическое воздействие на окружающую среду и необходимый уровень безопасности. По мнению автора, прототипами такой системы могут служить конструкции горелочных устройств беспламенного типа. Этот вывод подтверждается сведениями из приведенного в настоящей главе обзора опубликованных работ о том, что данные горелочные устройства характеризуются простотой конструкции и сравнительно невысокими

материальными затратами на изготовление, а также возможностью сжигания обводненных жидких углеводородов без предварительной подготовки и кавитационной очистки. Таким образом, устройства с пористой и фракционной структурой являются перспективными в развитии направления малотоннажной огневой утилизации углеводородных отходов.

Вышеизложенные соображения, базирующиеся на анализе тенденций и способов огневой утилизации жидких углеводородных отходов, позволяют в соответствии с целью настоящей работы определить следующие задачи:

– Обоснование выбора материала для формирования фильтрационного слоя как аналога горелочного устройства инфракрасного излучения и беспламенного горения.

– Разработка методической базы и проведение серии экспериментов, направленных на определение основных характеристик фильтрационного слоя.

– Обоснование возможности реализации процесса фильтрационного горения посредством физического эксперимента.

– Создание огневого модуля, оснащенного фильтрационным слоем, с обоснованием конструктивных характеристик его элементов, совместимого с компактным теплогенератором.

Глава 2. Методические положения исследований

2.1 Описание объекта исследования

Применительно к технике беспламенного горения, инфракрасного нагрева существуют немногочисленные общие критерии подхода к проектированию и к подбору конструкционных материалов. Так, увеличения теплоотдачи от проницаемого мелкозернистого насадка можно добиться двумя путями: во первых, за счет увеличения отношения поверхности пористой среды к занимаемому объему; во вторых, за счет увеличения теплоотдачи с единицы поверхности [28]. При этом размеры зерен (пор) должны быть такими, чтобы предотвращать проскоки пламени.

Среди используемых горелочных устройств такого типа особое значение придается пористым керамическим изделиям в качестве излучающих элементов и зон активного окисления, на поверхности которых механизм горения топлива зависит от многих факторов. В их числе химическая кинетика реагирования, аэродинамические условия удаления продуктов сгорания, теплообмен между топливовоздушной смесью и продуктами сгорания, а также между ними и окружающей средой. Следует отметить, что создание необходимых свойств пористой конструкции требует особой технологии изготовления – от подбора гранулометрического состава керамического наполнителя до применения технологических операций при обжиге, прессовании, формовании и др.

Применительно к особенностям рассматриваемого в настоящей работе жидкого утилизата, который может состоять из углеводородных отходов разного состава и качества, принципиально важно использовать такой метод подготовки реакционной среды, который обеспечит не только полноту сгорания, но и безопасность ведения процесса. Это осуществимо, если подготовка и горение смеси происходит в ограниченном объеме. Известно, что объем зоны реакции имеет огромное значение для безопасности сжигания взрывоопасных топлив, поскольку при увеличении объема активной зоны горения не склонная к взрыву смесь становится взрывоопасной, а сокращение пространства реагирования, наоборот, ведет к исключению возможности возникновения взрыва [26]. Такая

роль размеров реакционного пространства открывает возможности в использовании пористо-дисперсных неметаллических материалов в качестве насыпной матрицы, ячейки которой образуют зону горения и ограничивают возникновение «критических» концентраций реагентов (газов и паров), приводящих к взрыву, за счет уменьшения в рабочей части матрицы объемов (ячеек) реагирования, а за счет достаточной высоты насыпного слоя препятствуют проскоку пламени и недожогу топлива.

Изложенный в главе 1 анализ применения техники беспламенного горения позволяет выделить главный принцип для организации как стадии подготовки топливовоздушной смеси, так и основной стадии сжигания жидких горючих отходов. Принцип состоит в осуществлении обеих стадий внутри пористой структуры, образованной из фракционного материала, который таким образом формирует объем активной зоны горения. Есть все основания полагать, что такой подход к подготовке и окислению топливовоздушной смеси применительно к горючим отходам способен обеспечить стабильный температурный режим горения в активной зоне и снизить концентрации вредных составляющих в продуктах сгорания.

В соответствии с целью работы в основу реализации поставленных задач положены исследования ячеек фильтрационного горения [95, 96], рассматриваемые как модули с фильтрационным слоем на предваряющем этапе в разработке конструкции утилизирующей установки. Работа каждой из них, несколько отличающихся конструктивно, основана на едином принципе – обеспечение подготовки топливовоздушной смеси и ее реагирование внутри пористой структуры, формируемой засыпным фракционным материалом и образующей активную зону горения. Такой подход позволяет предотвратить возможность, с одной стороны, проскока пламени, а с другой – развития взрывного объема [18], что призвано обеспечить эффективность и безопасность при утилизации как низкокалорийных, так и высококалорийных топливных смесей.

Принцип организации процесса горения в них способствует сокращению объема, занимаемого реагирующим факелом в традиционных топливосжигающих энергоустановках, и в сравнении с существующими горелками камерных топок. Таким образом, становится возможным сокращение габаритов, повышение мобильности и, как следствие, уменьшение материальных затрат на изготовление и логистику применения установок для утилизации жидких углеводородных отходов. Относительная простота конструктивных решений модулей и доступность конструкционных материалов формирует подход к созданию в дальнейшем энергетических установок на их основе. В этой связи вариант исполнения модуля взят за основу в решении поставленных задач.

Схема ячейки фильтрационного слоя (горелки) представлена на рисунке 2.1. Она состоит из цилиндрического корпуса (*1*), покрытого изоляцией, который закреплен на несущем каркасе (*5*) из разнесенных по окружности стальных прутков. Каркас удерживает на себе сетчатую насадку-излучатель (*2*). Объем внутри сетчатой насадки плотно заполнен пористыми частицами и в таком виде представляет пористую структуру рабочей зоны (*6*) горения. Продольной вертикальной осью рабочей зоны является канал подачи топлива (*3*), выполненной в виде металлической трубки с отверстиями для истечения струй топлива. Воздух поступает в рабочую зону горения через три канала (*4*), каждый из которых выполнен из стальной трубки с прямоугольными перфорациями, обращенными к топливному каналу. Трубчатые каналы воздуха расположены вокруг топливного канала по окружности с шагом 120 °.

Вариант выбора конструктива ячейки обусловлен выявлением оптимальной геометрии и взаимного размещения элементов подвода воздуха и топлива для полноценного образования топливовоздушной смеси и распределения ее в реакционной зоне горения. В более общем смысле под этим следует понимать применение простых конструктивных решений для элементов подачи топлива и воздуха, но таких которые бы при совместной эксплуатации содействовали

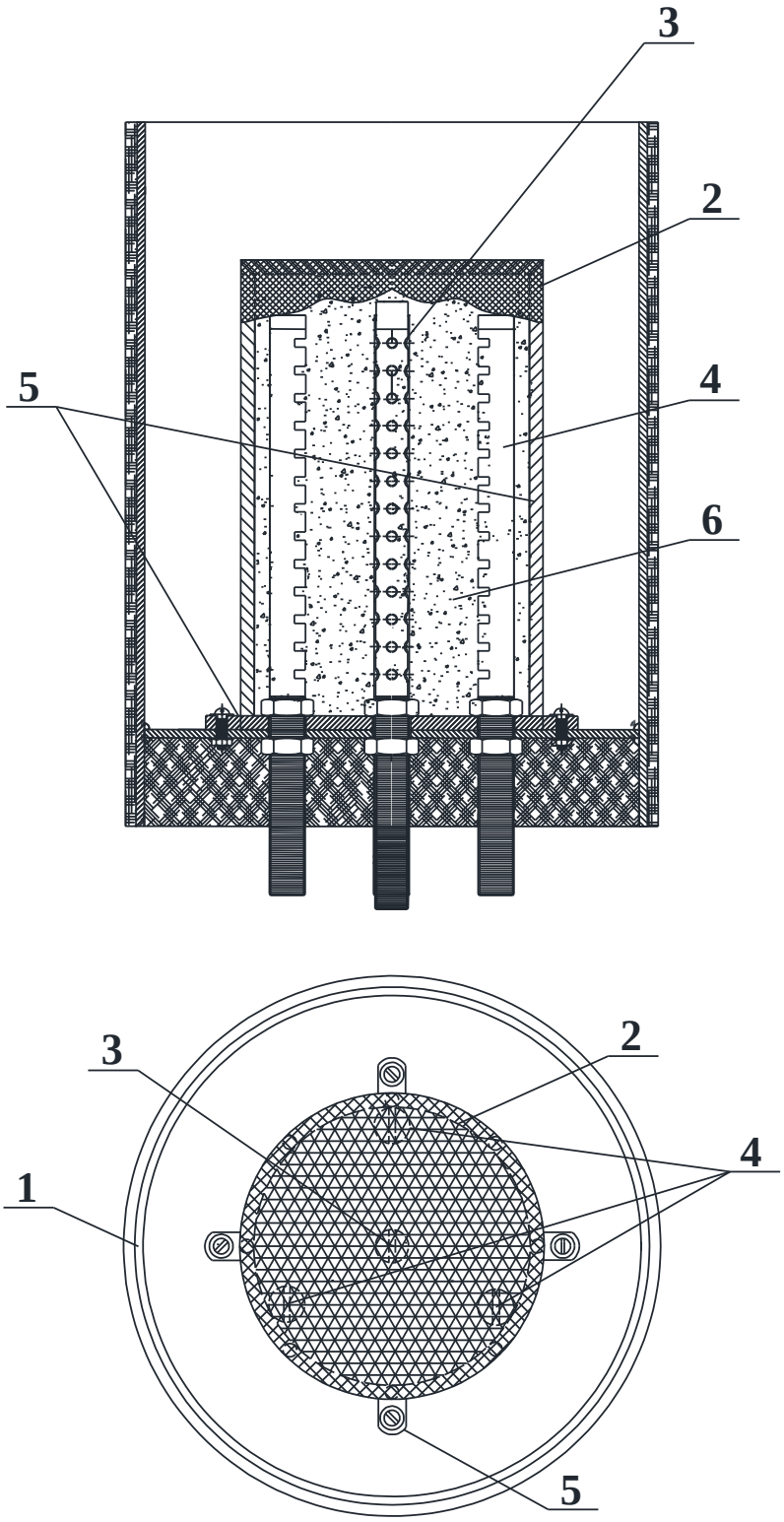


Рисунок 2.1 – Конструктивная схема ячейки фильтрационного слоя [30]:

1 – корпус; 2 – сетчатая насадка-излучатель; 3 – трубка подачи топлива; 4 – трубки подачи воздуха; 5 – опорный каркас; 6 – рабочая зона с криптоловой засыпкой.

надежной реализации процесса горения в беспламенном режиме, исключая образование горящего факела. Поэтому возможны отличия в конструкциях рассматриваемых ячеек, определяющие разную организацию подвода воздуха в реакционную зону, следовательно, и процесса образования реакционной смеси.

В данном варианте – подача воздуха осуществляется через прямоугольные перфорации трубок воздухоподачи, расположенных непосредственно в зоне горения, которая ограничена периметром размещения сетчатой насадки-излучателя.

2.2 Выбор наполнителя фильтрационного слоя

При формировании решения по выбору материала фильтрационного слоя и подготовке топливной смеси является значимым проведение предварительного анализа, связанного с четким представлением о назначении, экономической обоснованности использования, теплофизических свойствах материала.

Такую структуру может представлять зернистая дисперсная система, являющаяся продуктом дробления твердого остатка (отходов) металлургического производства в виде сильно прокаленного кокса или углеродистого остатка термолиза (пиролиза) и лома графитовых электродов электродуговых печей, получившая название криптол [96]. По химическому составу криптол практически целиком состоит из углерода (95 – 98 %), а по морфологическому строению представляет собой материал с развитой пористой структурой [97]. Доминирующее содержание углерода и его роль в формировании кристаллической решетки этого материала определяют высокую температуру плавления криптола, которая может достигать до 3500 °С [98], что и придает высокую устойчивость его к температурным воздействиям. Опыт применения криптола в электроиндукционных термических печах [99] подтверждает возможность его использования в высокотемпературных установках (рисунок 2.2).

К преимуществам криптола также можно отнести высокую интенсивность излучения и низкую степень поглощения теплового излучения инфракрасного

диапазона. Согласно [28] степень черноты подобной дисперсной системы, обуславливающая перечисленные преимущества, может достигать значения 0,9.

Данный факт объясняется тем, что теплофизические характеристики структуры вещества определены свойствами углерода (рисунок 2.3).



Рисунок 2.2 – Режимы работы криптоловой печи [100]

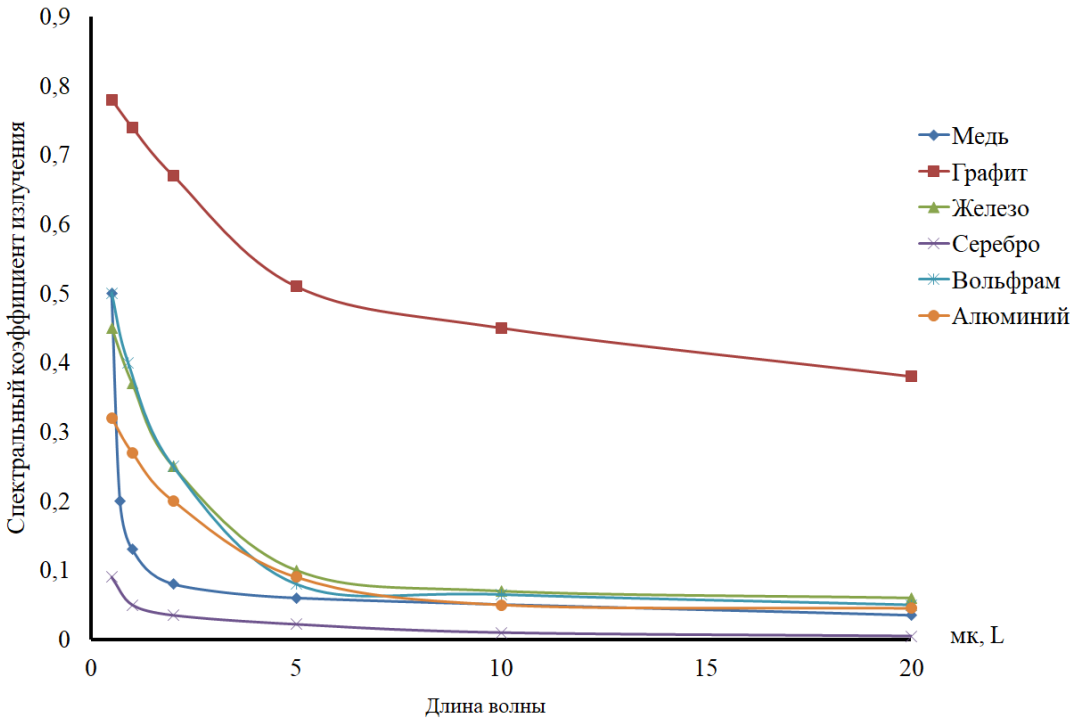


Рисунок 2.3 – График зависимости коэффициента излучения твердых тел от длины волны [101]

Криптол является дешевым и легкодоступным материалом (отходом), а его использование в виде фракций позволит не допустить возникновения механических напряжений внутри материала засыпки при температурных

градиентах. При термических воздействиях на объем его структура способствует «свободному» перемещению частиц относительно друг друга, не допуская механических напряжений и нежелательных разрушений материала активной зоны.

Для формирования геометрии объема активной зоны, создаваемой криптоловой засыпкой, необходим каркас и сетка вторичного излучения, формирующие этот объем. С выбранным принципом подготовки и организации горения топливовоздушной смеси необходимо предусмотреть элементы подачи топлива и воздуха из материалов, устойчивых к циклическим высокотемпературным воздействиям. Для модуля с пористым слоем, целесообразно использование ферритной стали марки 15Х25Т (химический состав [102] (%): C=0,15; Si=1,0; Mn=0,8; S=0,025; P=0,035; Cr=24÷27), которая в основном применяется в сварных конструкциях, не испытывающих ударных нагрузок и работающих в широком диапазоне температур (от -20 до +1100 °С) и в агрессивных средах.

Наряду с первично-излучающим материалом в виде криптоловой засыпки необходимым становится использование вторичных излучателей в виде металлических сетчатых насадок, выполненных из термостойкой стали. Такой излучатель способен препятствовать выносу частиц из активной зоны и способствовать увеличению доли лучистого тепла, излучаемого горелкой, а также дожиганию несгоревших горючих соединений. В этом случае оптимальным выбором является нержавеющая сетка (сталь 12Х18Н10Т) из проволоки диаметром 0,5 мм с размерами ячеек 0,9×1,8 мм. Жаростойкость такого изделия по некоторым источникам [102] составляет 800-1100 ºС.

2.3 Основные этапы исследований

Разработка любых технических устройств всегда сопровождается этапом практических испытаний. Задачей таких испытаний в конкретном случае становится определение номинальных характеристик ячеек с фильтрационным слоем (горелок), выявление недостатков конструкций, а нередко даже в процессе их опытной эксплуатации. Полученные при этом технические характеристики

испытываемых прототипов являются основными критериями для оценки их работоспособности.

Как известно [103], теплотехнические испытания разделяются на две категории. К первой относят испытания, выполняемые для определения балансовых характеристик тепловых энергоустановок (производительность, коэффициент полезного действия, тепловые потери, удельный расход топлива) и выявления их эксплуатационных особенностей. Во вторую категорию выделяют исследовательские работы, в ходе которых исследуют новые конструкции тепловых энергоустановок, новые конструкторские решения отдельных элементов и характеристики конструкционных материалов.

Исходя из необходимости проведения теоретического анализа данных, а также для формирования наиболее полного представления о возможностях теплогенератора с модулем фильтрационного горения была выбрана следующая структура организации проведения испытаний (рисунок 2.4). Таким образом, исследования слоя организуются пятью параллельными этапами экспериментов с последующей обработкой полученных данных.



Рисунок 2.4 – Структура организации исследования фильтрационного слоя

Оценка погрешности проведенных экспериментов является основой достоверности полученных характеристик, хотя и обеспечиваемой в определенной части применением аттестованных методик ГОСТ. Применительно к методике проведения балансовых и аэродинамических испытаний достоверность контролируемых параметров обеспечивалась многократными

повторениями измерений, а также последующей статистической обработкой данных, позволяющей исключить случайные ошибки (Приложение А).

2.4 Испытательный стенд

Физические испытания ячеек с пористым слоем, являющиеся необходимым элементом исследований при разработке нового устройства, выполнены на специально созданном для этого экспериментальном стенде (рисунок 2.5), который оснащен средствами измерения эксплуатационных характеристик, параметров топливной и воздушной сред и позволяет воспроизводить все операции обслуживания устройства. Стенд является универсальным, имея единую базу в регистрации фиксируемых параметров при проведении теплотехнических испытаний ячеек фильтрационного слоя (далее по тексту - ячейка). Регистрация температур в активной зоне осуществляется пятью термопарами, горячие спаи четырех из них размещены симметрично по периферии активной зоны, и один в центре верхней части зоны горения.

Такое расположение термопар обусловлено конструктивными особенностями ячейки и, по представлению автора, возможностью наиболее качественной оценки температурного поля внутри рабочей зоны горения.

Запуск стенда в работу (рисунок 2.5) осуществляется после надежной фиксации ячейки на опорной стойке строго в вертикальном положении и подготовки линии подачи воздуха от компрессора (*2*), управляемой и регулируемой с помощью регулировочного вентиля (*3*в) и ротаметров (*4*). Топливо подается в рабочую зону ячейки за счет гидростатического давления из емкости (*5*), которая находится под атмосферным давлением, для чего она фиксируется на высоте порядка 2 м, а регулирование подачи ведется тоже с помощью регулировочного вентиля (*3*т) и ротаметра (*6*) на линии подачи топлива. Для контроля температуры в различных точках рабочей зоны предусмотрены термопары (*7*) (градуировка ХА), а термо-эдс, (мВ), возникающая между спаями термопар (т.1, т.2, т.3, т.4, т.5), регистрируется милливольтметром (*8*). Вывод стенда из работы осуществляется путем прекращения подачи топлива вентилем

(*З*т), вентиляции рабочей зоны ячейки с последующим закрытием воздушного вентиля (*З*в) и отключением компрессора (*2*).

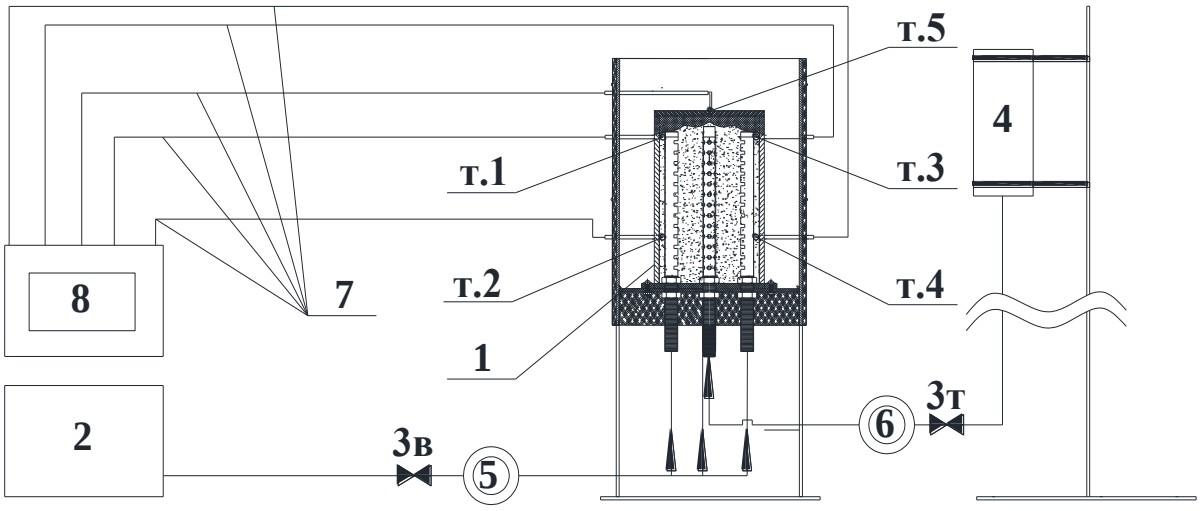


Рисунок 2.5 – Схема испытательного стенда:

*1–ячейка фильтрационного слоя; 2–компрессор подачи воздуха; З*в, *З*т*–регулировочные вентили на линиях подачи воздуха и топлива соответственно; 4–ротаметр (тип РП–8); 5–топливная емкость; 6–ротаметр (тип РП–5); 7–термопары; 8 – милливольтметр; т.1,…,т.5 – места установки спаев термопар.*

2.5 Методика физических экспериментов

Рассматриваемые в данной главе методические основы исследований ячейки фильтрационного слоя можно отнести и к первой и ко второй категории теплотехнических испытаний. При этом к основным контролируемым параметрам работы относятся следующие технические характеристики: тепловая мощность (теплопроизводительность) (*Q*), кВт; полнота сгорания топлива по отсутствию содержания окиси углерода (CO) в продуктах сгорания, %; содержание в продуктах сгорания оксидов серы (SO_2) при сжигании жидких топлив, %; обеспечение необходимых расходов воздуха для полного сгорания топлива, $м^3/с$ (характеризуемых коэффициентом избытка воздуха (α), идущего на горение); коэффициент полезного действия установок (η), %; аэродинамические сопротивления слоя засыпки (*ΔP*), Па; распределение температур в рабочей зоне горения (t_i), °С.

Из приведенного перечня эксплуатационных характеристик особое значение при испытаниях приобретает измерение состава газовой среды. В последние годы в практике многих наладочных организаций широкое применение нашли портативные газоанализаторы-оптимизаторы горения различных фирм-изготовителей, в том числе и отечественных. Они компактны, просты в обслуживании и обеспечивают высокую точность измерения объемного содержания различных компонентов газовых смесей в анализируемой пробе. В зависимости от комплектации газоанализаторы позволяют определять следующие составляющие продуктов сгорания: кислород (O_2), окись углерода (CO), окислы азота (NO, NO_2), серный ангидрид (SO_2).

Прибор укомплектован специальными газозаборными зондами из нержавеющей стали, позволяющими осуществлять измерения при температуре продуктов сгорания свыше 1000 °C. Встроенная в зонд термопара измеряет температуру дымовых газов и дутьевого воздуха, а отдельный штуцер позволяет осуществлять измерение давления или разрежения в газовом тракте установки. Газозаборный зонд оснащен также конденсатосборником, который «осушает» пробу продуктов сгорания и задерживает частицы пыли и сажи.

Программное обеспечение газоанализатора позволяет незамедлительно обработать результаты опытов на месте измерений. Вычисленные прибором технико-экономические показатели работы топливосжигающей установки (КПД, потери тепла с уходящими газами, коэффициент избытка воздуха), а также компонентный состав сухих продуктов сгорания и их температура выводятся на дисплей прибора, возможна их распечатка на принтере.

Учитывая широкие возможности и высокую точность, для анализа концентраций дымовых газов при испытаниях горелочных устройств использован портативный газоанализатор «Testo 330-2».

Предварительно для измерений газовых компонентов продуктов сгорания выполнена калибровка прибора по температуре воздуха, идущего на горение, а также рассчитано максимальное теоретическое содержание трехатомных газов (RO_2^{max}, %), образующихся при сжигании 1 $м^3$ топлива [104]. В конкретном случае

максимальное (теоретическое) содержание трехатомных газов определялось по известной формуле:

$$RO_2^{max} = 21/(1+\beta), \%,$$

где β – безразмерная характеристика используемого топлива, рассчитываемая по формуле [100]:

$$\beta = 2{,}35\cdot(H^r - 0{,}126\cdot O^r + 0{,}04\cdot N^r) / (C^r + 0{,}375\cdot S^r),$$

где H^r, O^r, N^r, C^r, S^r – массовая доля содержания водорода, кислорода, азота, углерода, общей серы в рабочем состоянии топлива соответственно.

Полученная расчетная величина RO_{2max} для каждого использованного топлива вводилась в память газоанализатора.

В режиме установившейся тепловой нагрузки газозаборный зонд газоанализатора продувался встроенным в прибор компрессором в течение 2-3 минут, затем вводился в пробоотборник дымовых газов с последующим замером контролируемых величин объемных концентраций, %: O_2, CO_2, CO, SO_2.

Принципиальная схема фиксируемых параметров работы модуля с пористым слоем при проведении балансовых испытаний приведена на рисунке 2.6.

Температура топлив измерялась с помощью лазерного термометра марки Hotliner TIR-1650. Температура воздуха, подаваемого на горение, как упомянуто выше, измерялась встроенной термопарой заборного зонда газоанализатора «Testo 330-2».

Испытания модуля выполняли путем регистрации контролируемых параметров, характерных для пяти тепловых режимов работы. Продолжительность каждого испытания при установившемся тепловом режиме составила два часа. В период установившегося теплового режима пятикратно регистрировались параметры работы устройств, а именно: расходы воздуха, топлива, значения температур активной зоны горения. Газовый анализ концентраций компонентов уходящих газов за цикл испытаний регистрировался однократно.

В качестве формирующей структуры активной зоны горения испытательного стенда использовался криптол фракцией 2-5 мм, рисунок 2.7

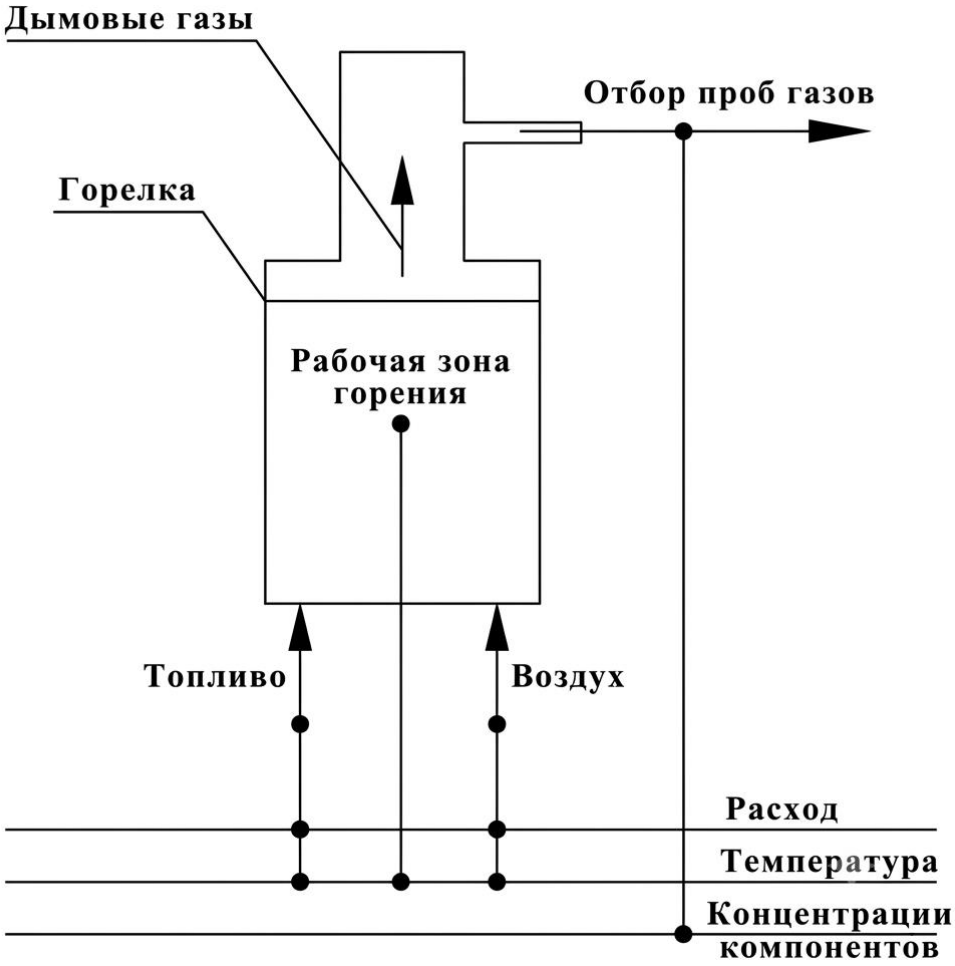


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема измерений

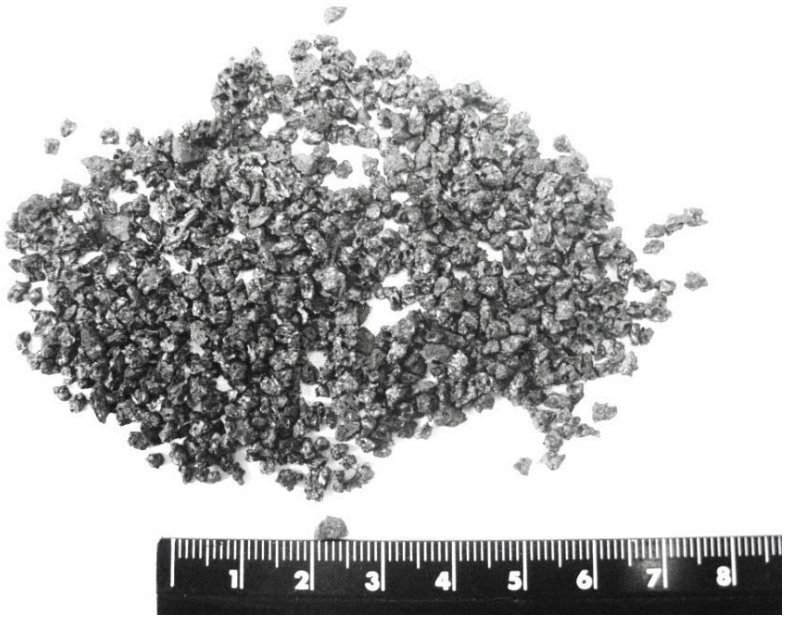


Рисунок 2.7 – Фото криптола для наполнения активной зоны:

фракции 2-5 мм

2.6 Определение теплотехнических и теплофизических характеристик криптолового слоя

Развитие дальнейших исследований условий инициации воспламенения и поддержания автотермического горения, а также поиск оптимальных конструкционных решений в разработке модульного теплогенератора с фильтрационным слоем предполагает нацеленность на определение теплофизических свойств криптоловой засыпки.

Выполнялось определение стандартных (гостированных) для твердого топлива теплотехнических характеристик применительно к криптолу, таких как: влажность, зольность, выход летучих веществ, теплота сгорания. Также был установлен элементный состав и содержание микроэлементов.

Влажность криптола определялась согласно ГОСТ Р 52911-2013. Сущность метода заключается в высушивании пробы материала до постоянной массы и измерении потери массы относительно начальной массы пробы [105].

Зольность криптола определялась согласно ГОСТ Р 55661-2013. Сущность метода заключается в полном сжигании пробы материала и определении массы золового остатка [106].

Выход летучих веществ определялся по ГОСТ Р 55660-2013. Сущность метода заключается в нагревании пробы материала при температуре 815°С в течение 7 минут с последующим измерением разности массы пробы до и после нагрева [107].

Для получения элементного состава криптола был проведен анализ на элементном анализаторе Vario MICRO cube. Значения определены для сухого состояния материала.

Теплота сгорания криптола вычислена по формуле Менделеева [75] по данным элементного анализа:

$$Q^{daf} = 340 \cdot C^{daf} + 1030 \cdot H^{daf} - 109 \cdot (O - S)^{daf}, \quad (2.14)$$

где

индекс «daf» – топливо находится в условном состоянии сухой и беззольной массы;

C – содержание углерода, %; H – содержание водорода, %;

O – содержание кислорода, %; S – содержание серы, %.

Низшая теплота сгорания вычислена по формуле [75]:

$$Q^r = Q^{daf} \cdot \frac{100 - W^r - A^r}{100} - 24{,}42 \cdot W^r, \quad (2.15)$$

где

индекс «r» – топливо находится в состоянии рабочей массы;

W – влажность, %; A – зольность, %.

Истинная плотность ($\rho_{ист}$) определена как отношение измеренной массы криптолового образца, изготовленного прессованием (P=314 МПа) измельченного криптола, к его объему.

Для детализации процессов, происходящих в криптоле под воздействием температуры, был произведен дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический (ТГА) анализы. Показаны функции: DTA, определяющая разность температур между испытуемым образцом и эталоном, что дает качественно-количественную оценку наблюдаемого процесса физико-химической трансформации материала, при этом отклонения пика кривой DTA (вверх или вниз) показывают экзо- или эндотермический тепловые эффекты, а площадь пика пропорциональна их величине; TG регистрирует изменение массы образца во времени; DTG – производная от TG, характеризующая скорость превращения. Анализы выполнены в среде воздуха для изучения процесса горения криптола, а также в инертной среде (гелий) для изучения возможных конверсионных превращений. Масса пробы для анализа составила 10 мг, начальная температура 20°C, скорость нагрева 10°C в минуту, конечная температура 900°C в среде воздуха и 1000°C в среде гелия.

Вместе с этим по полученным кривым определена температура начала окисления криптола, а также проверено значение зольности, полученное по методике ГОСТ.

Исследование состава минеральной части криптола проводилось методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра Shimadzu EDX-720-P.

Определение истинной теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности криптола выполнено анализатором Discovery Laser Flash DLF-1200 (температурный диапазон 298-848 K). Анализируемый образец изготавливался прессованием измельченного криптола, фракцией менее 0,2 мм, с добавлением 5 %-го раствора декстрина.

При исследовании теплообмена в системе «газ – пористая среда», которой является слой криптоловой засыпки, необходимо учитывать, что эффективная теплопроводность системы – комплексный параметр, который определяется теплопроводностью самого вещества, теплопроводностью контактных зон и перемычек в пористой неоднородной среде, теплопроводностью газа вблизи материала и лучистой составляющей.

Таким образом, для определения эффективных характеристик теплообмена рациональным было создание специальных экспериментальных стендов, условия в которых максимально приближены к предполагаемым рабочим условиям в пористом слое. Прогнозирование неравновесных тепловых процессов в слое криптола требует определения теплофизических свойств, которые характеризуют скорость изменения температуры среды, а именно: теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность.

Исследования в этом направлении и конструкторские проработки на их основе базируются на знании как истинных теплофизических характеристик криптола как материала заполнения слоя, так и эффективных термических характеристик пористого слоя. Значения эффективных термических характеристик определяют условия тепломассообмена в пористой среде и зависят от ее проницаемости и параметров нагрева и, как правило, отличаются от значений истинных характеристик материала. В связи с этим представляют интерес экспериментальные исследования работы слоя в стендовых условиях.

Теплоемкость определяется как количество теплоты, необходимое для нагрева тела (единицы массы/объема вещества) на один градус.

$$C = \frac{Q}{(T_2 - T_1)m}, \text{ Дж/кг·К,} \qquad (2.16)$$

где Q – теплота, кДж/кг; T_1 – начальная температура, К; T_2 – конечная температура, К; m – масса, кг.

Коэффициент теплопроводности λ определяется из дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho c} div(\lambda \cdot gradT) + \frac{q}{\rho c}, \qquad (2.17)$$

где T– температура, К; t – время, с; ρ – плотность криптола кг/м^3; λ – коэффициент теплопроводности Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$; c – теплоемкость криптола Дж/кг: q – подведенное извне количество теплоты, Вт.

Температуропроводность определяет скорость распространения тепла в материале как функцию изменения температуры от времени. Температуропроводность связана с удельной теплоемкостью и теплопроводностью следующим законом:

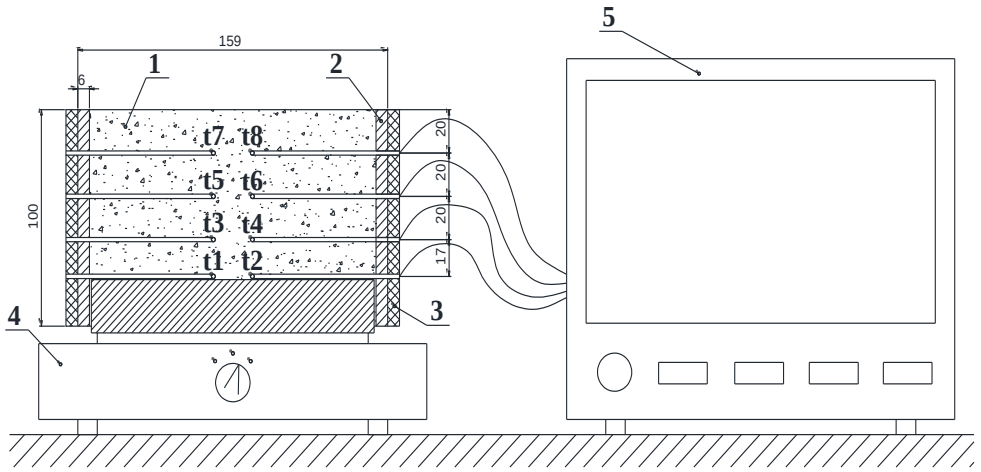
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \qquad (2.18)$$

где λ – теплопроводность, Вт/м·К; ρ – плотность, кг/м^3; c – удельная теплоемкость Дж/м·К.

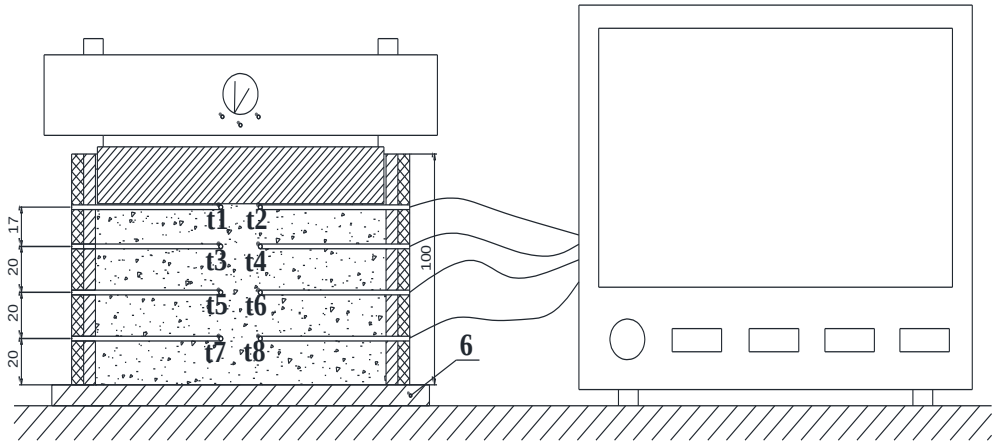
Для исследования теплофизических процессов при прогреве криптолового пористого слоя разработан специальный экспериментальный стенд (рисунок 2.8) с плоским нагревательным элементом. Вертикально расположенный металлический цилиндр (*2*), покрытый тепловой изоляцией, заполнен частицами криптола (*1*) с варьируемым размером фракций (2-5; 5-10; 10-20 мм). В засыпанном слое криптола установлены термопары (градуировка ХА), соединенные с многоканальным технологическим регистратором (*5*). Термопары расположены у поверхности нагревательного элемента (t1 и t2) и на трех уровнях по высоте слоя (t3, t5, t7) с фиксированным шагом. Для контроля измерений предусмотрены

дублирующие термопары (t4, t6, t8), установленные на тех же уровнях, что и измерительные.

В ходе экспериментов на стенде (рисунок 2.8) велась непрерывная регистрация температуры в трех точках по высоте слоя на фиксированном расстоянии от источника теплоты.



а)



б)

Рисунок 2.8 – Экспериментальный стенд для определения теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности криптола при различной направленности подвода тепла: а) первый вариант (поверхность нагревательного элемента ориентирована вверх); б) второй вариант (поверхность нагревательного элемента ориентирована вниз); 1 – криптол; 2 – металлический цилиндр; 3 – теплоизоляция; 4 – нагревательный элемент; 5 – многоканальный технологический регистратор РМТ-59М (Элемер, Россия); 6 – крышка; t1, t3, t5, t7 (t2, t4, t6, t8) – измерительные (дублирующие) термопары (ХА).

Для минимизации влияния погрешности на результаты каждый эксперимент воспроизводится трижды, при этом криптоловая засыпка между опытами заменялась полностью или оставалась неизменной.

Перед каждым экспериментом контролировалась равномерность распределения температуры в объеме пористого заполнения в цилиндре (2) и ее соответствие температуре окружающей среды.

Эксперименты по измерению температуропроводности криптола проводились на другом стенде (рисунок 2.9). Через каждые 25 мм по высоте керамической трубы (4) установлены термопары, использован регистратор РМТ-59М, регистрирующий показания каждой термопары с интервалом в одну секунду.

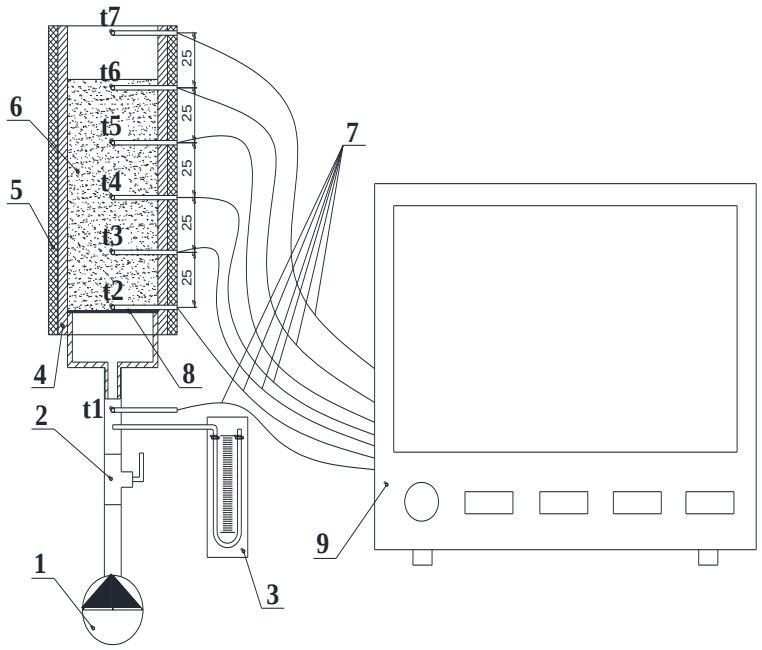


Рисунок 2.9 – Экспериментальный стенд для определения теплоотдачи, температуропроводности и аэродинамических сопротивлений криптола:
1 – компрессор Ergus Piccolo-6, 2 – вентиль для регулирования расхода,
3 – ротаметр РМ-6,3 Г, 4 – керамическая труба, 5 – теплоизоляция,
6 – криптол, 7 – термопары типа ХА, 8 – сетка, 9 – регистратор РМТ-59М.

Предварительно нагретый криптол различных фракции: размер гранул 2–5 мм; 5–10 мм; 10–20 мм, помещался в экспериментальный стенд (рисунок 2.9) и продувался воздухом с помощью компрессора при разных расходах.

В процессе эксперимента регистрировались значения температур при помощи пяти термопар, расположенных в объеме криптоловой засыпки с шагом 25 мм, а также двух термопар, фиксирующих температуру воздуха на входе и выходе из трубки (t1 и t7).

При математической обработке экспериментов изменение температуры, которая является определяющей величиной для эффективного коэффициента температуропроводности, в пространстве и времени рассчитано через эффективное уравнение теплового баланса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}, \qquad (2.19)$$

где T – температура, К; t – время, с; X – вертикальная координата в направлении теплопереноса, характеризующая расстояние до нагревательного элемента, отложенное по нормали к его поверхности, м; a – коэффициент температуропроводности слоя, эффективный, м^2/с.

Из уравнения (2.19) следует, что эффективное значение коэффициента температуропроводности прямо пропорционально скорости изменения температуры $\partial T/\partial t$ и обратно пропорционально величине изменения температуры в направлении теплопереноса $\partial^2 T/\partial X^2$, конечноразностный аналог которой:

$$\frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{X}^2} = \frac{\mathrm{T_1} - 2\mathrm{T_2} + \mathrm{T_3}}{\mathrm{h}^2}, \qquad (2.20)$$

где T_1, T_2, T_3 – единовременные показания первой, второй и третьей термопар соответственно, К; h – шаг между точками установки термопар по оси X, м.

Выразив эффективное значение коэффициента температуропроводности из (2.19) и заменив частные производные конечноразностными схемами, получим:

$$a = \frac{dT \cdot h^2}{T_1 - 2T_2 + T_3}, \qquad (2.21)$$

где dT – изменение показаний второй термопары в единицу времени, К/с (dt=1 с).

Используя результаты экспериментов на стендах (рис. рис. 2.8, 2.9), динамика изменения эффективного коэффициента теплоотдачи нагретого

криптола при продувке воздухом может быть определена уравнением Ньютона-Рихмана:

$$\alpha = \frac{Q}{A_{eff} \cdot \Delta T_{ln}}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \qquad (2.22)$$

где Q – тепловой поток (мощность), передаваемый через поверхность криптола, Вт;

A_{eff} – эффективная площадь поверхности теплообмена, м^2;

$\Delta T_{ln} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$ – среднелогарифмический температурный напор, К;

Значения температурных градиентов между криптоловым слоем и воздухом (на входе в слой), криптоловым слоем и воздухом (на выходе из слоя) рассчитываются по формулам соответственно:

$$\Delta T_1 = \left| T_{\text{ср.к}} - T_1 \right|, \qquad (2.23)$$

$$\Delta T_2 = \left| T_{\text{ср.к}} - T_7 \right|, \qquad (2.24)$$

$T_{ср.к}$ – значение средней температуры криптолового слоя, регистрируемое термопарами (№ № 2 – 6) второго стенда, К;

T_1 *и* T_7 – значения температур воздуха на входе и выходе из криптолового слоя соответственно, регистрируемые термопарами (№ № 1, 7) второго стенда, К.

Для расчета мощности теплового потока (Q), целесообразно использовать уравнение:

$$Q = M \cdot C_в \cdot \Delta T, \qquad (2.25)$$

где M – массовый расход воздуха через криптоловый слой засыпки, кг/с;

$C_в$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ΔT – разность температур воздуха на выходе и входе в криптоловый слой, К.

Ввиду того, что центры крупных криптоловых частиц прогреваются значительно медленнее их поверхностей, то логично предположить, что не вся геометрическая площадь частиц слоя участвует в теплообмене с одинаковой эффективностью. В этой связи, для определения эффективной площади поверхности теплообмена (A_{eff}) необходимо учитывать инерцию теплообмена

криптола, а значит перейти от статического расчета к расчету коэффициента тепловой эффективности (η) посредством критерия Био (*Bi*).

Таким образом, коэффициент тепловой эффективности имеет вид:

$$\eta = \frac{tanh(Bi)}{Bi}, \qquad (2.26)$$

где *Bi* – число Био, представляющее собой безразмерный критерий подобия теплообмена, физическим смыслом которого является отношение внутреннего термического сопротивления частицы (обусловленного теплопроводностью криптола) к внешнему тепловому сопротивлению ее поверхности (обусловленному коэффициентом теплоотдачи);

tanh(Bi) – гиперболический тангенс Био, определяющий форму внутреннего температурного поля частицы криптола и внутренней доли ее термического сопротивления.

Число Био, а следовательно и его гиперболический тангенс рассчитываются путем предварительного определения среднего радиуса частицы криптола (*R*, м) и коэффициента теплопроводности криптолового слоя (λ, Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$):

$$Bi = \frac{\alpha_1 \cdot R}{\lambda}, \qquad (2.27)$$

$$tan\,h(Bi) = \frac{e^{Bi} - e^{-Bi}}{e^{Bi} + e^{-Bi}}, \qquad (2.28)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи турбулентного обтекания криптоловых частиц, принятый в первом приближении, Вт/(м^2·К).

В этом случае, эффективная площадь теплообмена определяется уравнением:

$$A_{eff} = A \cdot \eta, \qquad (2.29)$$

A – геометрическая площадь контакта криптолового слоя с воздухом, м^2.

Для минимизации вычислительных операций, принимаем форму фракции криптола близкой к сферической, тогда удельная поверхность (a_υ), образованная частицами криптола, определяется по формуле:

$$a_\upsilon = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_p}, \text{ м}^2/\text{м}^3 \qquad (2.30)$$

ε –доля пустого межфракционного пространства в объеме, заполненном криптоловым слоем (порозность);

d_p – средний диаметр частицы криптола, м.

Исходя из этого, геометрическая площадь контакта вычисляется:

$$A = a_{\text{ъ}} \cdot V, \qquad (2.31)$$

V – объем криптолового слоя, м^3.

Для оценки применимости той или иной фракции криптола в модуле фильтрационного горения важно иметь достоверные данные аэродинамического сопротивления системы. Для этого в соответствующих измерениях был использован тот же экспериментальный стенд, который был задействован для определения коэффициента температуропроводности (рисунок 2.9). Фракции криптола (2-5 мм, 5-10 мм и 10-20 мм) продувались с помощью компрессора при разных расходах воздуха с одновременным замером давления на входе и выходе посредством дифференциального цифрового манометра «Testo 510».

Оценка погрешностей стендовых теплофизических измерений, а также результатов аэродинамических испытаний (глава 3), получена в соответствии с ГОСТ [108] и проведена при помощи показателя воспроизводимости по формуле:

$$\Delta = \pm 1{,}96 \cdot \sigma_R\,, \qquad (2.28)$$

где $\sigma_R = \frac{R_m}{Q \cdot (P,n)}$ – показатель воспроизводимости методики анализа в виде среднеквадратичного отклонения; R_m – показатель воспроизводимости методики анализа в виде предела повторяемости; Q(P,n) – коэффициент, зависящий от числа параллельных определений n и доверительной вероятности P (при n=2 и P=0,95 коэффициент Q=2,77).

Глава 3. Теплофизические исследования криптолового слоя

3.1 Свойства криптола применительно к рабочим условиям модуля фильтрационного горения

Результаты определения теплотехнических характеристик криптола по методикам ГОСТ для твердого топлива [75, 105-107] приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Теплотехнические характеристики криптола

Характеристика	Обозначение	Значение
Зольность	A^r, %	0,47 ± 0,14
Влажность	W_t^r, %	0,5 ± 0,35
Выход летучих	V^{daf}, %	1,425 ± 0,21
Содержание углерода	C^{daf}, %	86,57 ± 0,42
Содержание водорода	H^{daf}, %	0,3 ± 0,05
Содержание азота	N^{daf}, %	1,37 ± 0,02
Содержание серы	S^{daf}, %	0,221 ± 0,09
Содержание кислорода	O^{daf}, %	11, 067
Низшая теплота сгорания	Q_i^r, кДж/кг	29961,08
Истинная плотность	$\rho_{ист}$, кг/м^3	1418,9

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что теплота сгорания криптола имеет высокое значение, сопоставимое с характеристиками углей высокой степени метаморфизма (марок А и Т). Таким образом, сочетание криптола с ЖУО может формировать композитную топливную основу. В случае выгорания криптола в слое будет наблюдаться дополнительное тепловыделение за счет высокой теплоты сгорания, при небольшом количестве образующейся золы (0,33÷0,61%). Последнее позволит иметь продолжительный цикл эксплуатации одиночной массы засыпки слоя в ячейке.

Благоприятным фактом для использования криптола в качестве заполнения рабочего пространства ячейки, особенно для передвижного варианта, также является низкая влагоемкость рабочей массы.

Таблица 3.2 – Состав минеральной части криптола

Показатель	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg(%)	Na(%)	P(%)	Si(%)
Значение	153,081	1169,429	1,299	9,389857	0,515125	1,4785

Анализ компонентов минеральной части, которые вероятнее всего представлены в виде карбонатов $MeCO_3$ или гидроксидов $Me(OH)_n$, показан таблицей 3.2. Известно [109], что эти вещества являются сорбентами при улавливании таких выбросов с дымовыми газами как оксиды азота (NO_x) и серы (SO_2), что в перспективе может положительно влиять на экологические показатели ячейки фильтрационного горения. Фосфор, благодаря своей способности связываться с кальцием и магнием, может образовывать устойчивые соединения, способные сохраняться при умеренных температурах и не улетучиваться в процессе горения [110], что также является ценным преимуществом. Незначительное содержание кремнесодержащих соединений, формирующих так называемую «внешнюю» золообразующую массу, равно как и общая зольность, благоприятно сказывается на эксплуатации ячейки фильтрационного горения. Теоретически, соединения калия могут способствовать формированию пористой и проницаемой структуры криптола [111], а также катализировать газификацию органических соединений, предотвращая образование полимерных ароматических углеводородов и битумной сажи [112].

Для формирования представления об этапах превращения криптола в зависимости от изменения температур в воздушной и инертной средах проведены исследования проб криптола методом дифференциально-термического и термогравиметрического анализа (ДТА и ТГА), результаты которого представлены рисунком 3.1.

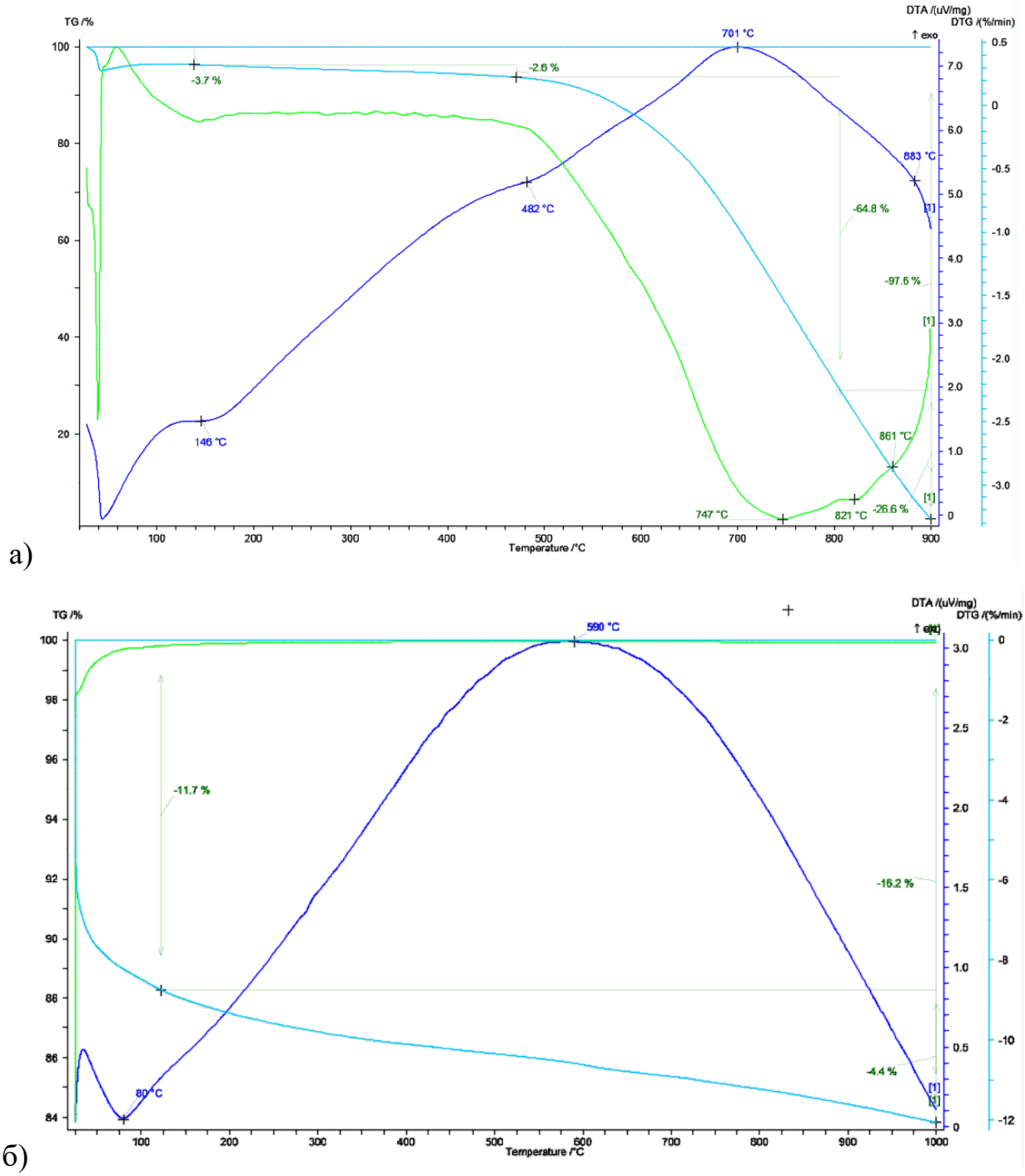


Рисунок 3.1 – Кривые дифференциально-термического анализа криптола: а) – в окислительной среде (воздух), б) – в инертной среде (гелий)

Из результатов ДТА и ТГА (рисунок 3.1 а) видно, что криптол может реагировать в среде воздуха при температуре около 480°С. При этом максимальная скорость потери массы отмечена при 747°С. Снижение массы пробы в интервале температуры от 20 до 150 °С частично связано с выходом влаги и разложением связующего 5% раствора декстрина из пробы криптола. Количество

образовавшегося при анализе зольного остатка совпадает со значением, определенным по ГОСТ Р 55661-2013.

При нагреве криптола в инертной среде (рисунок 3.1 б) термическая деструкция практически отсутствует: потеря массы в диапазоне температур 100–900 °С не превысила 5 %.

3.2 Результаты теплофизических испытаний криптолового слоя

Измерения температуропроводности криптола проводились для трех фракций: размер гранул 2-5 мм; 5-10 мм; 10-20 мм. Полученные характеристики представлены рисунками 3.2–3.7, на которых показаны графики изменения температуры в каждой точке, фиксируемой термопарами t1÷t8, согласно схеме на рис. 2.8. Результаты измерений распределения температур приведены также таблицами А.1–А.6 (Приложение А).

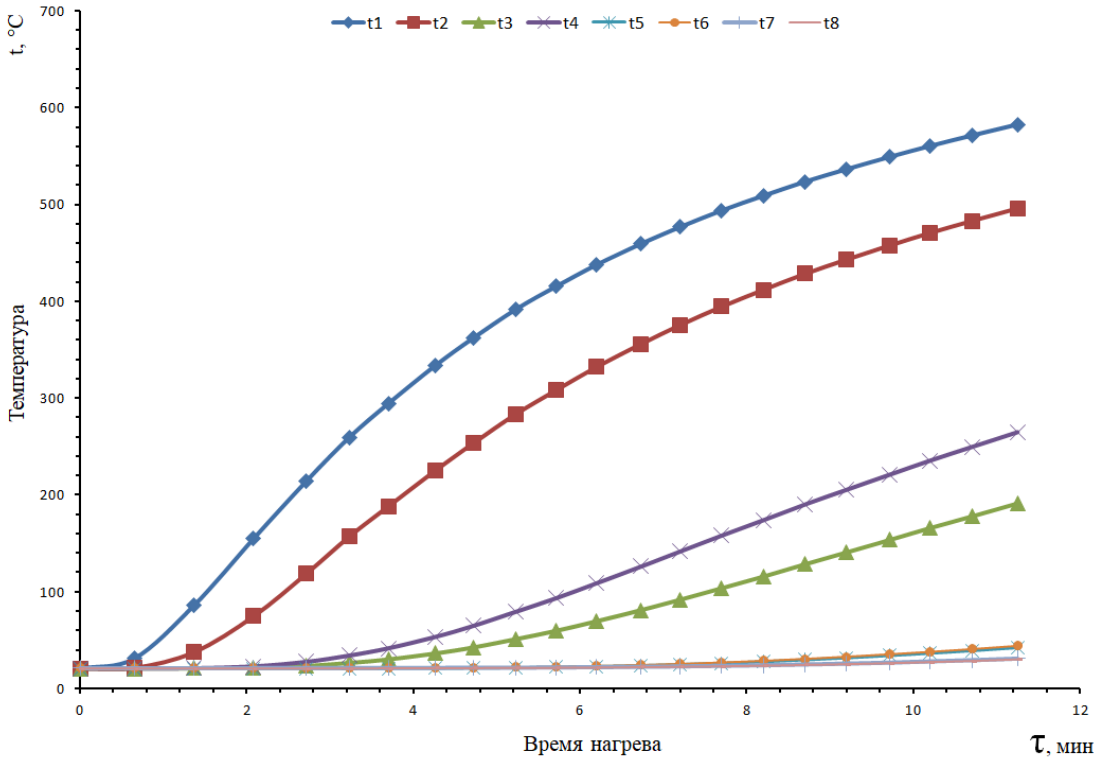


Рисунок 3.2 – Распределение температуры внутри слоя криптола фракции 2-5 мм при нагреве снизу

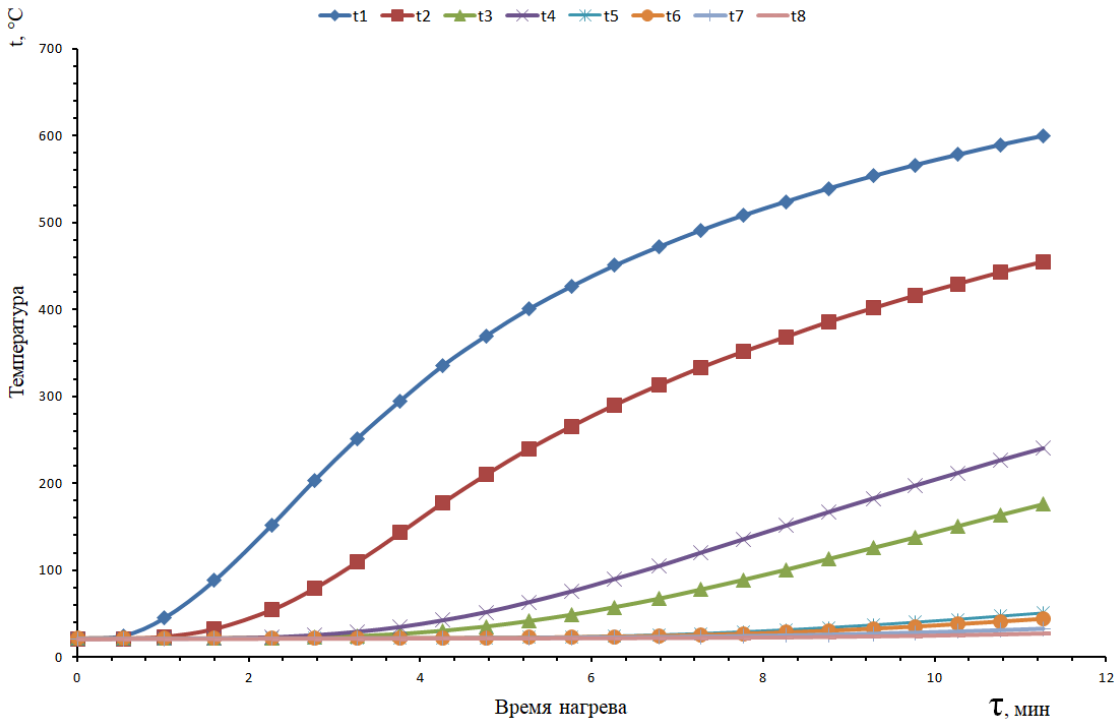


Рисунок 3.3 – Распределение температуры внутри слоя криптола фракции 2-5 мм при нагреве сверху

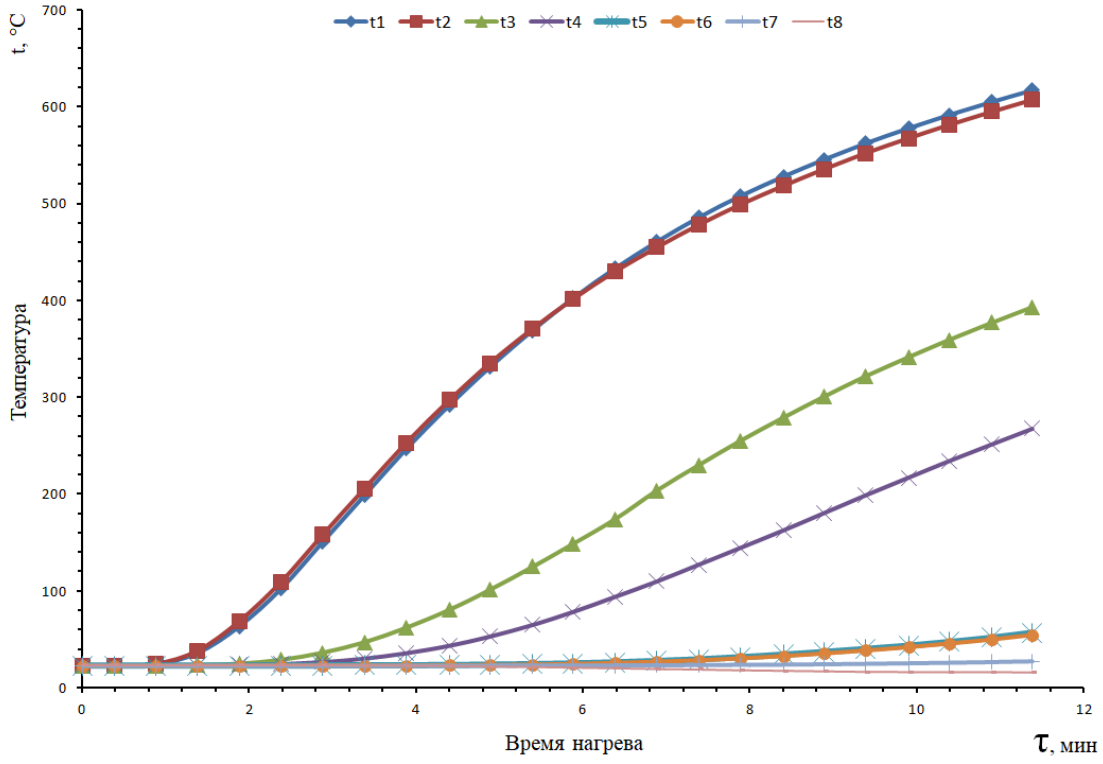


Рисунок 3.4 – Распределение температуры внутри слоя криптола фракции 5-10 мм при нагреве снизу

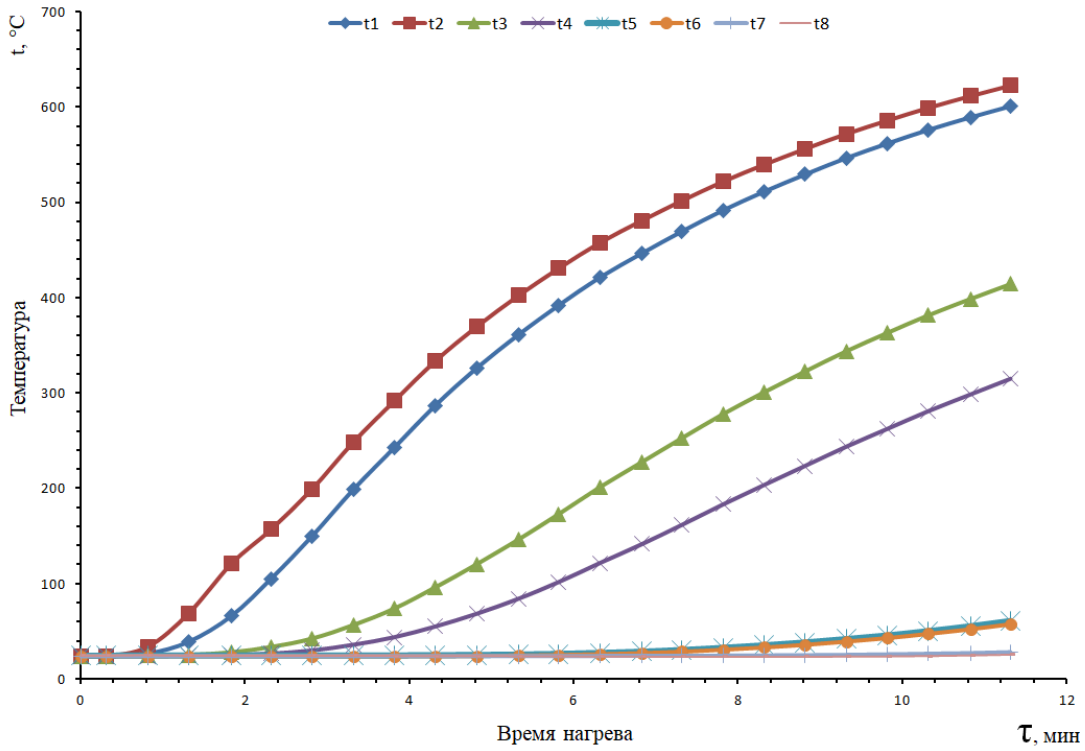


Рисунок 3.5 – Распределение температуры внутри слоя криптола фракции 5-10 мм при нагреве сверху

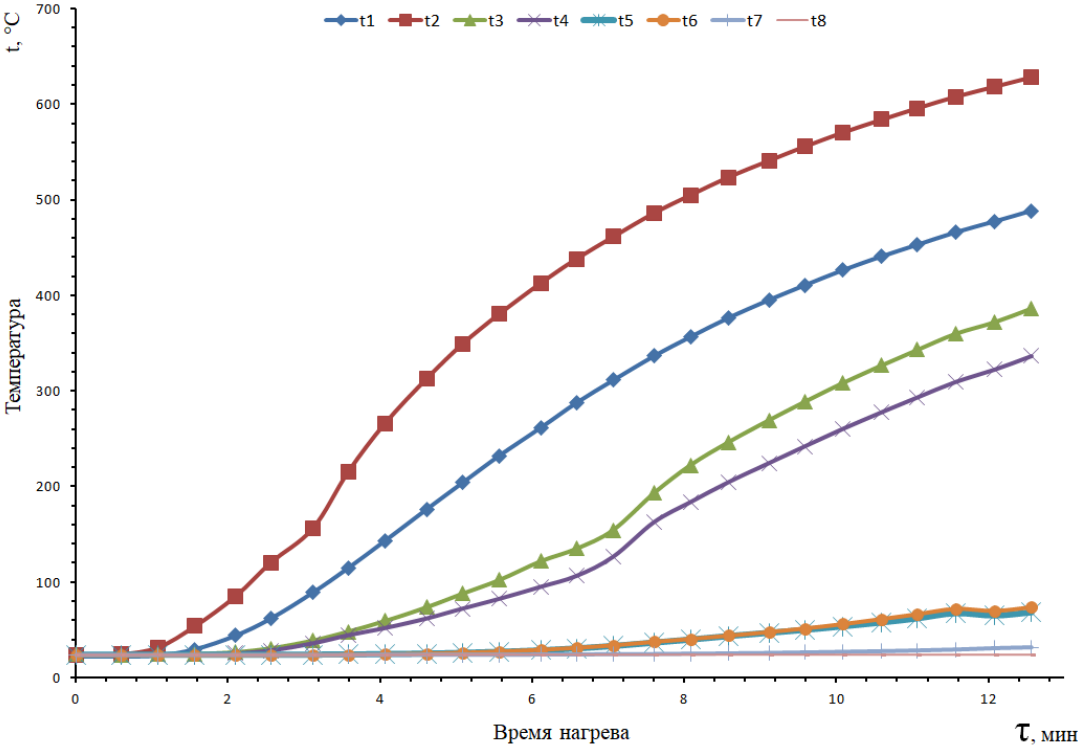


Рисунок 3.6 – Распределение температуры внутри слоя криптола фракции 10-20 мм при нагреве снизу

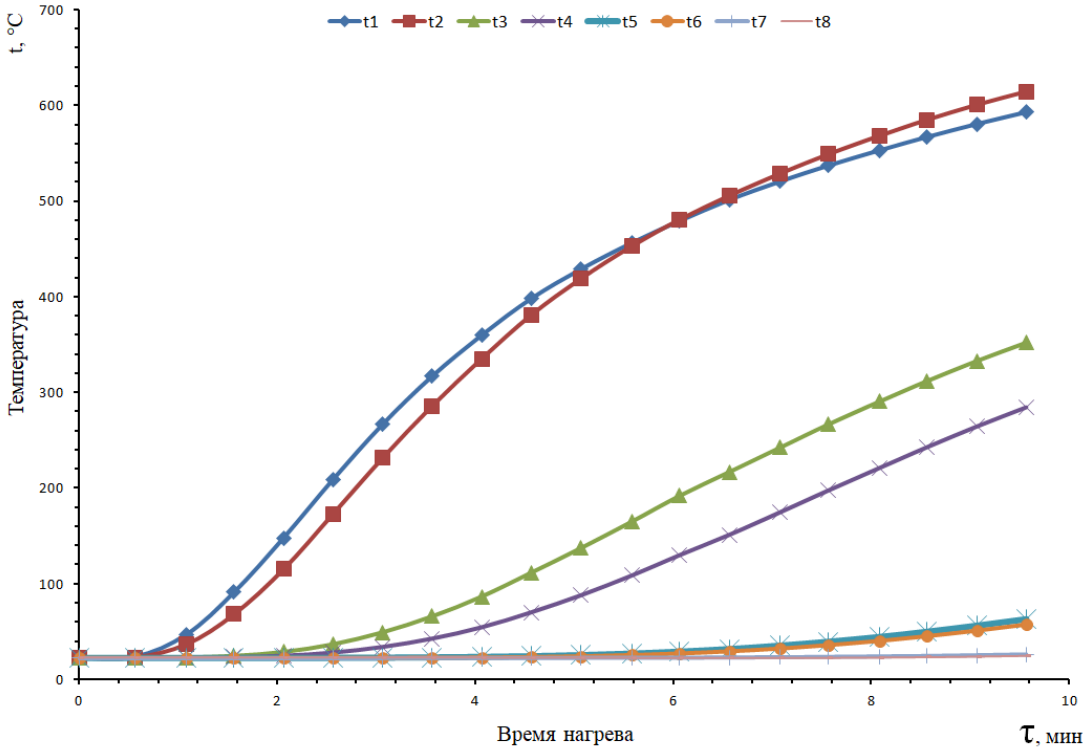


Рисунок 3.7 – Распределение температуры внутри слоя криптола фракции 10-20 мм при нагреве сверху

Предварительный графический анализ распределения температуры внутри слоя криптола в зависимости от ориентации электронагревательного элемента (снизу / сверху) показывает, что скорость распределения температуры в слое при ориентации электронагревательного элемента снизу вверх выше, чем при втором варианте его размещения. Таким образом, есть смысл рассматривать физический процесс в виде аналитической зависимости эффективных характеристик температуропроводности.

Результаты исследования конвективного теплообмена в криптоловом слое для фракций: 5-10 мм, 10-20 мм представлены рисунками 3.8–3.13, значения представлены также таблицами А.7–А.12 (Приложение А). Для криптола размером гранул 2-5 мм получение результатов при продувке воздухом (расход: 25–45 л/мин) не представляется возможным ввиду возникновения условий начала его воспламенения (в отсутствии углеводородного топлива) и автотермического горения, что недопустимо исходя не только из условий настоящего эксперимента, но и в эксплуатации ячейки фильтрационного горения.

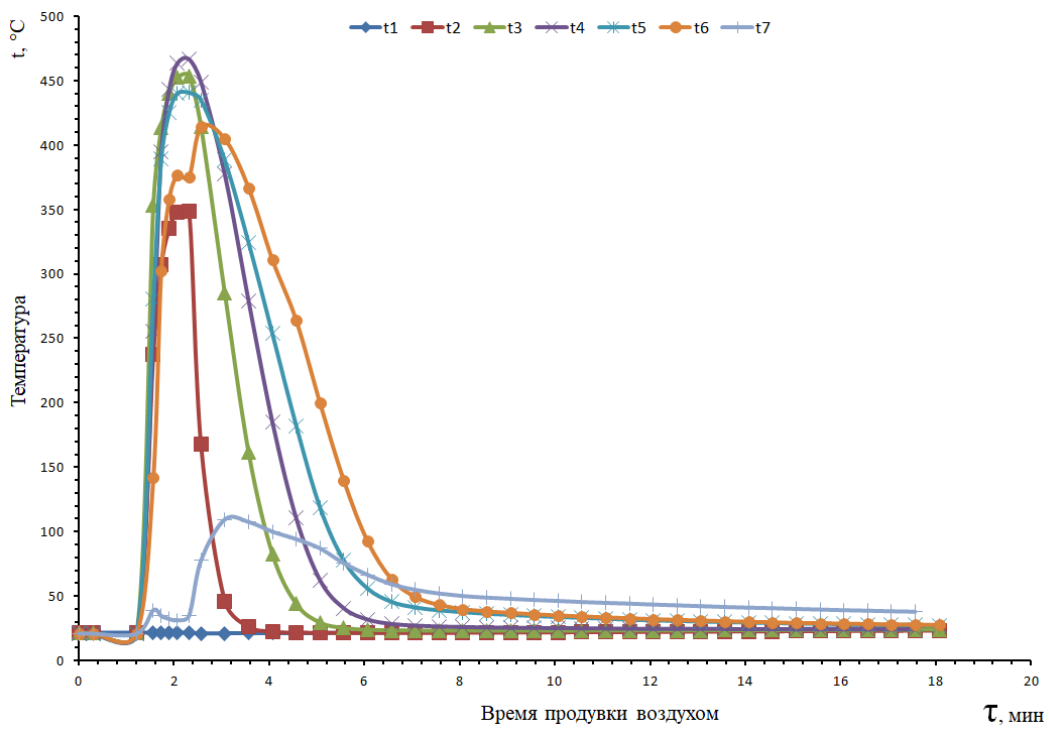


Рисунок 3.8 – Изменение температуры криптоловой засыпки фракции 5-10 мм при продувке воздухом с расходом 25 л/мин

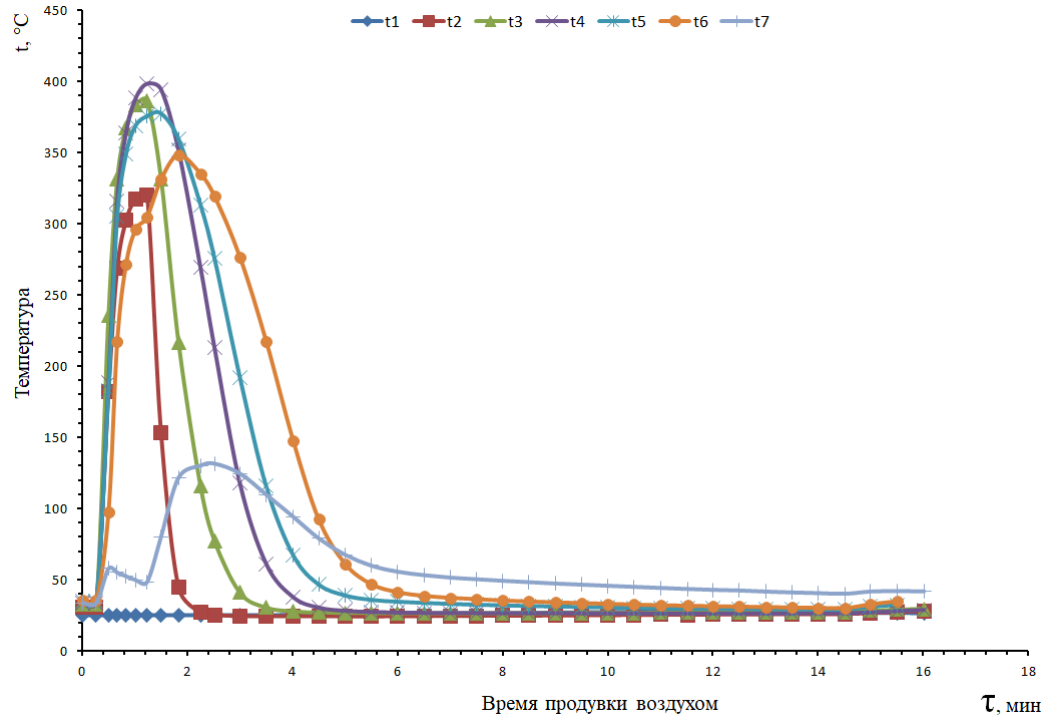


Рисунок 3.9 – Изменение температуры криптоловой засыпки фракции 5-10 мм при продувке воздухом с расходом 35 л/мин

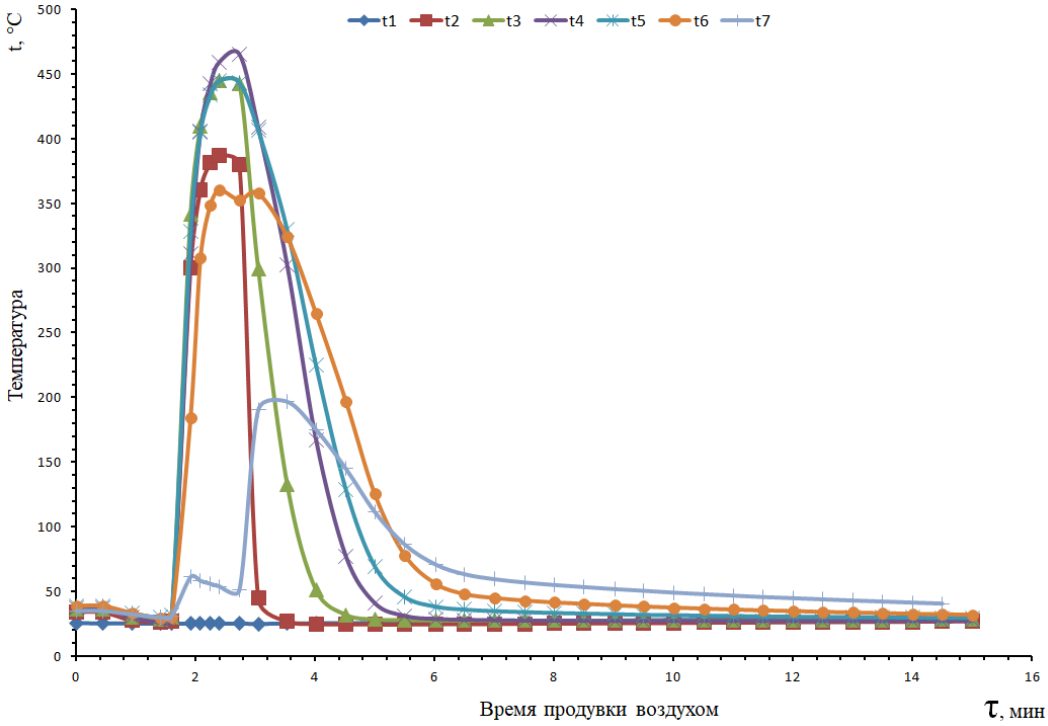


Рисунок 3.10 – Изменение температуры криптоловой засыпки фракции 5-10 мм при продувке воздухом с расходом 45 л/мин

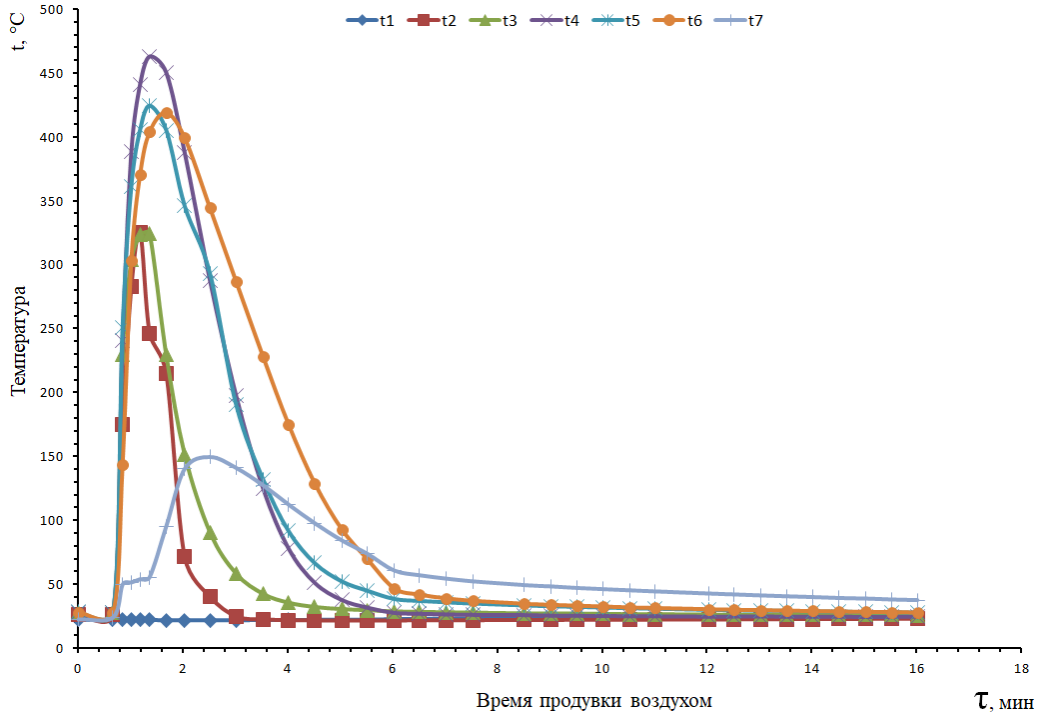


Рисунок 3.11 – Изменение температуры криптоловой засыпки фракции 10-20 мм при продувке воздухом с расходом 25 л/мин

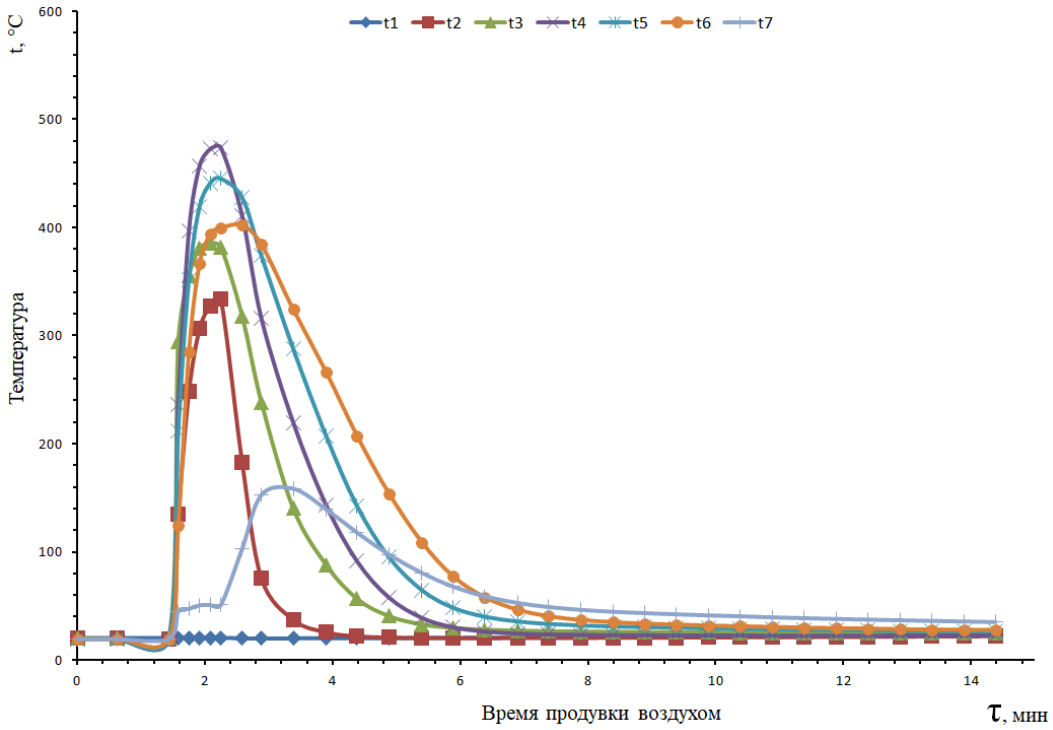


Рисунок 3.12 – Изменение температуры криптоловой засыпки фракции 10-20 мм при продувке воздухом с расходом 35 л/мин

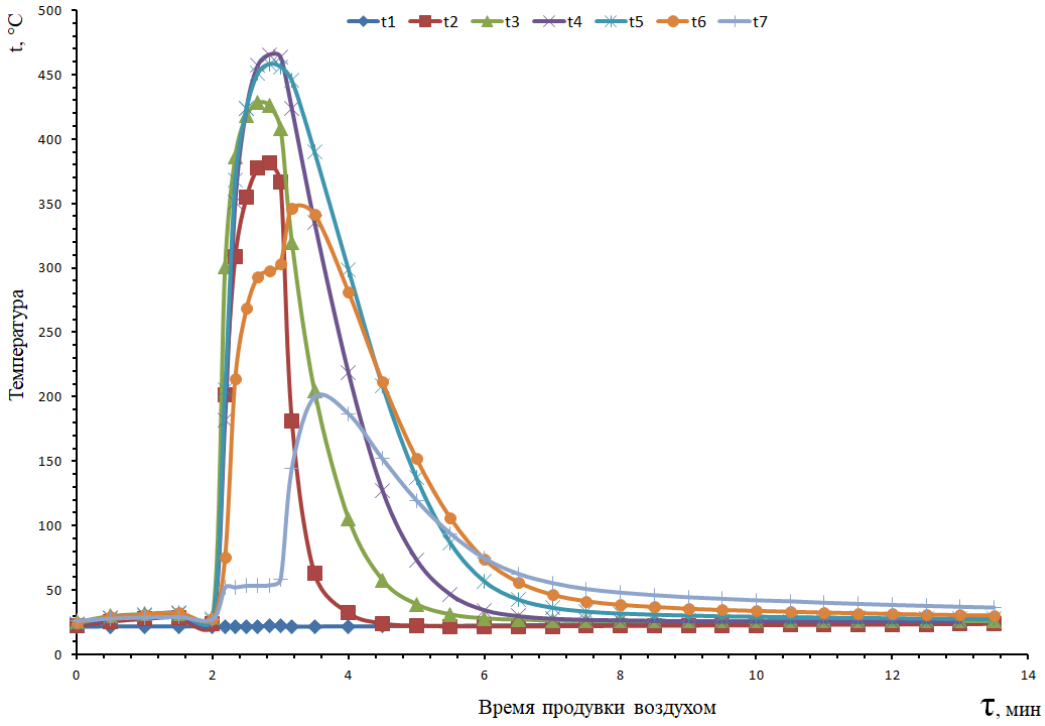


Рисунок 3.13 – Изменение температуры криптоловой засыпки фракции 10-20 мм при продувке воздухом с расходом 45 л/мин

Значения коэффициента температуропроводности криптола определенные методом приборного исследования с достоверностью $R^2 = 0{,}924$ (коэффициент

детерминации) описывается линейной функцией в зависимости от температуры криптола:

$$a = 3{,}15 \cdot 10^{-9} \cdot (\mathrm{T} - 273) + 3{,}14 \cdot 10^{-7}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

Установлено, что специфика теплообмена в порах зависит от расположения и ориентации нагревательного элемента.

Направленность нагрева вниз из-за низкой интенсивности охлаждения конвективными потоками воздуха поверхности нагревательного элемента приводит к увеличению температурного градиента в масштабах зерна отдельной фракции криптола. Эффективный коэффициент температуропроводности при этом увеличивается за счет радиационной составляющей теплообмена между частицами криптола. Аналитическая зависимость от температуры с достоверностью R^2=0,97 для этого случая имеет вид:

$$a = -8{,}14 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 273) + 6{,}33 \cdot 10^{-7}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

При направленности нагрева снизу вверх в пористой зоне, находящейся выше поверхности нагревательного элемента, за счет свободной конвекции в поле сил тяжести в межзеренных каналах развивается циркуляция воздуха. Зависимость эффективного значения температуропроводности от температуры с достоверностью R^2=0,924 описывается квадратичной функцией:

$$a = 7 \cdot 10^{-11} \cdot (T - 273)^2 - 7{,}74 \cdot 10^{-9} \cdot (T - 273) + 9{,}37 \cdot 10^{-7}\ \text{м}^2/\text{с}.$$

Результаты измерения истинной теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности представлены рисунком 3.14. Изменение значений температуры, являющихся определяющими для параметров теплообмена, приводит к существенному различию их в пространстве и времени. Для установления зависимостей между этими значениями, применяя методы математической физики, изменение температурного поля во времени записывается через дифференциальное уравнение теплопроводности (формула 2.17, п. 2.7).

Для решения этого уравнения сделаны следующие допущения: слой криптола однороден и изотропен; тепловая деформация криптола очень мала по сравнению с его объемом (т.е. плотность криптола постоянна). Задача заключалась в определении теплоемкости и теплопроводности при математической обработке экспериментальных данных, полученных на стенде (рис. 2.8, п. 2.7). На границах расчетной области приняты граничные условия: второго рода – от нагревательного элемента, и третьего рода – при контакте с окружающей средой. Металлическая оболочка (цилиндр) экспериментального стенда (рис. 2.8) теплоизолирована, поэтому в уравнении (2.17, п. 2.7) количество теплоты, которое поступает извне, принималось равным нулю.

Частные производные заменены на конечно-разностное подобие, интегрируя которые, получены функциональные зависимости:

$$c(T) = -0{,}00163 \cdot T^2 + 0{,}834 \cdot T + 672{,}8 \text{ , Дж/(кг·К);}$$

$$\lambda(T) = 2{,}54 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 0{,}000185 \cdot T + 0{,}282 \text{ , Вт/(м·К).}$$

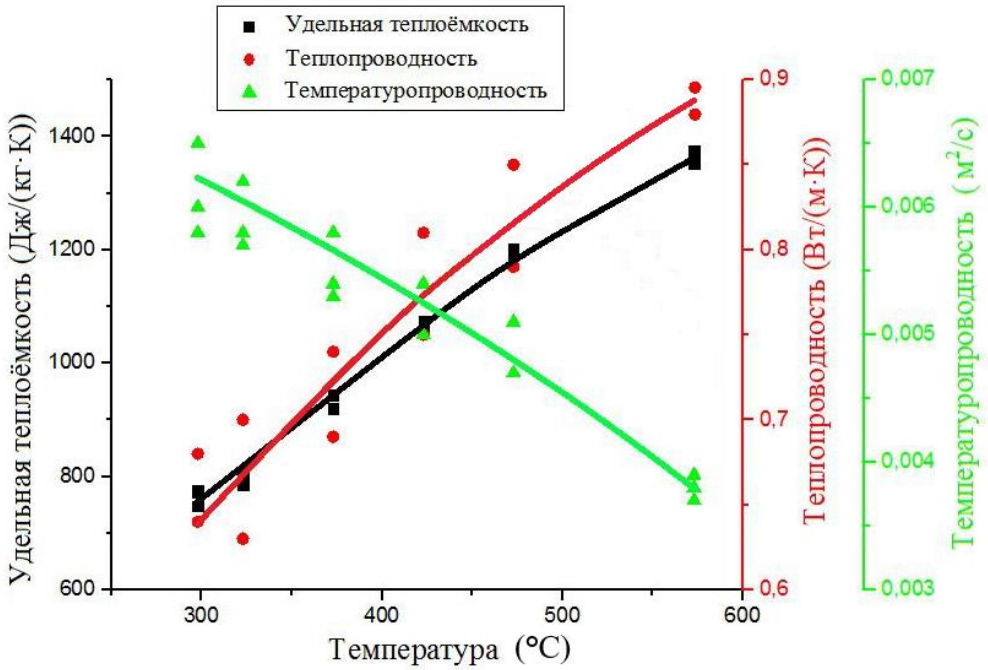


Рисунок 3.14 – Истинные значения теплоемкости (Дж/(кг·К)), теплопроводности (Вт/(м·К)) и температуропроводности (м²/с) криптола

Анализ полученных данных (рисунок 3.14) показал:

1) с ростом температуры от 300 до 575 °С наблюдается увеличение удельной теплоемкости от 750 до 1350 Дж/(кг·К);

2) с ростом температуры от 300 до 575 °С наблюдается уменьшение температуропроводности с 0,0064 до 0,0036 см^2/с;

3) теплопроводность растет в интервале температуры 300–575 °С, затем до температуры 600 °С наблюдается ее снижение. Такой эффект объясняется наличием декстрина при подготовке пробы криптола, который при температуре свыше 240 °С начинает разлагаться [113]. Протекающие при разложении декстрина реакции и изменение структуры образца могут оказывать влияние на полученные результаты при температурах выше 240 °С.

Подставляя результаты теплофизических исследований в формулу 2.21 (п. 2.7), получаем зависимости эффективного коэффициента температуропроводности пористого криптола фракции 5–10 мм от температуры (рисунок 3.15). Анализ этого графика подтверждает, что истинная температуропроводность криптолового слоя слабо зависит от температуры и практически не изменяется с её ростом. Наряду с этим эффективная температуропроводность пористого криптола с повышением температуры растет.

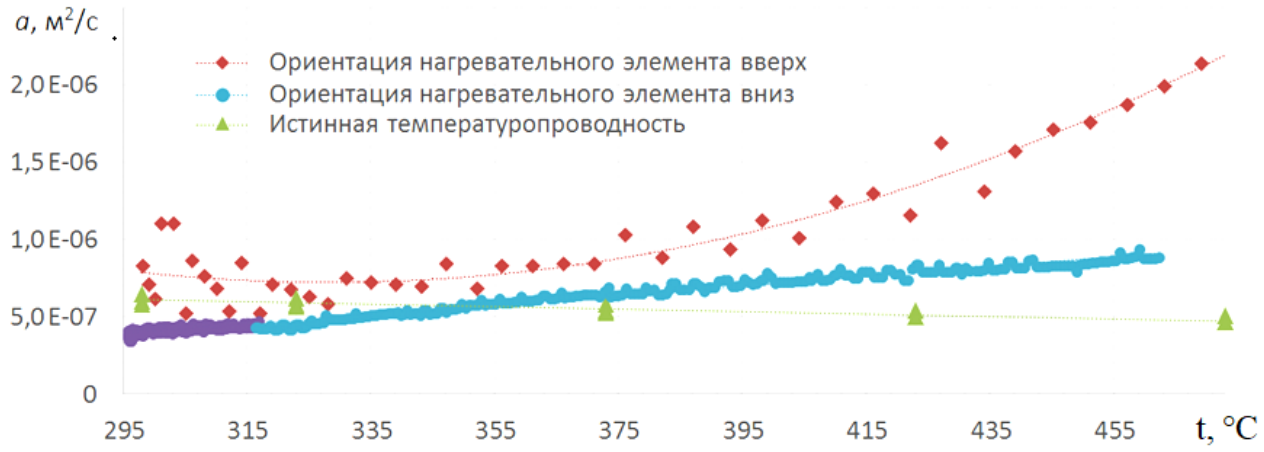


Рисунок 3.15 – Зависимость эффективного коэффициента температуропроводности (м^2/с) от температуры

Разница в экспериментальных кривых при различной интенсивности свободной конвекции подводит к заключению о том, что высокие эффективные

значения коэффициентов температуропроводности криптоловой среды обусловлены в основном конвекцией. Это хорошо согласуется с представлениями, изложенными в [114]: в слое частицы криптола имеют малую поверхность контактирования друг с другом и поэтому теплоперенос осуществляется главным образом конвективными потоками воздуха. Следовательно, «эффективный коэффициент температуропроводности того же порядка, что и эффективный коэффициент диффузии» [115].

Интегрирование уравнения 2.19 (п. 2.7) с подстановкой в него полученных функциональных зависимостей для *a* (рисунок 3.15) дает значения температуры для всей области интегрирования по координате x (рисунок 3.16) на момент окончания эксперимента (570 секунда). Значения, определенные на основе выведенных зависимостей, показывают хорошую сходимость температуры в точках замеров на стенде с результатами эксперимента для всей области интегрирования по времени.

Следует отметить, что ориентация нагревательного элемента сверху вниз не способствует интенсификации циркуляции воздуха в пористом слое, т.к. пористая зона лежит ниже его поверхности, из-за чего при малых значениях температуры теплоперенос обусловлен в основном только теплопроводностью внутри зерен криптола и статичного воздуха в межфракционном пространстве. Эффективное значение температуропроводности пористой засыпки в этом случае на 41 % ниже её истинного значения, определенного экспериментально. Однако вблизи от ориентированной вниз поверхности нагревательного элемента (рисунок 3.16) каждые 5–10 мм (размер зерна криптола исследуемой фракции) температура изменяется на 100–200 °C. Из-за таких высоких значений температурного градиента в области высоких температур эффективный коэффициент температуропроводности значительно увеличивается по отношению к истинному значению (рисунок 3.16) за счет радиационного теплообмена между твердыми частицами криптола.

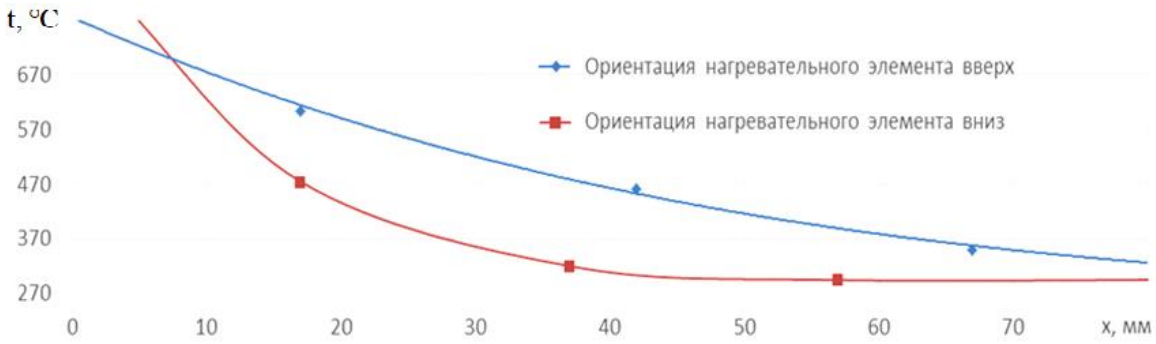


Рисунок 3.16 – Изменение температуры в слое по нормали от поверхности нагревательного элемента в направлении теплопереноса на момент времени 570 секунд

Таким образом, для организации локальной зоны предварительного прогрева, воспламенения и автотермического горения криптола в ячейке нагревательный элемент целесообразней располагать в самой нижней части слоя, при оптимальном размере фракции в 5–10 мм.

По результатам эксперимента в сочетании с его математической обработкой, проведен анализ динамики изменения эффективного значения коэффициента теплоотдачи криптолового слоя, фракцией 5-10 мм, в течение цикла испытания слоя (рис. 3.17).

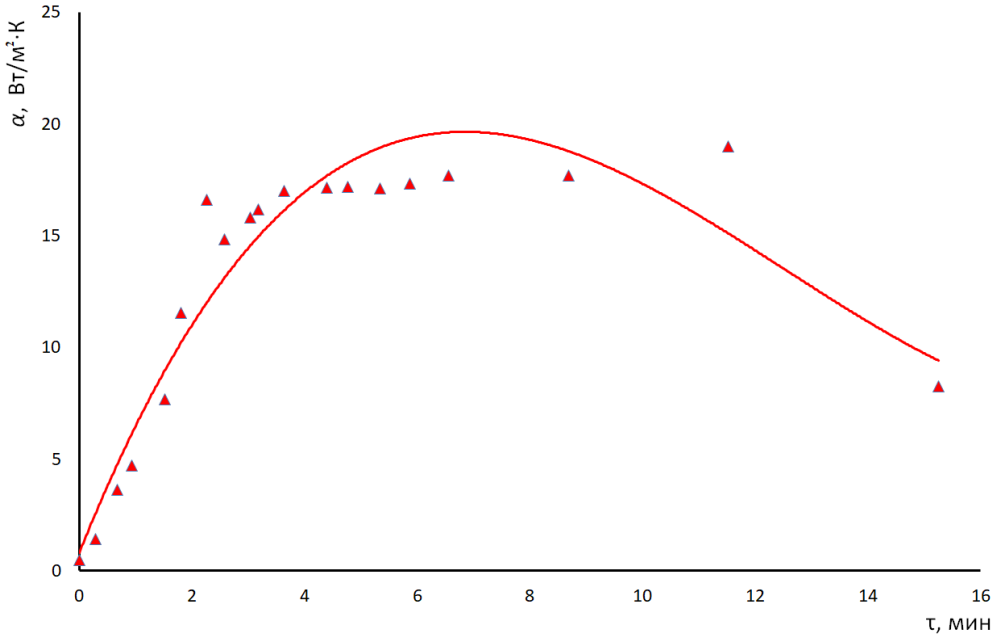


Рисунок 3.17 – Изменение эффективного коэффициента теплоотдачи криптола, фракции 5-10 мм, за период одного экспериментального цикла

После начала продувки воздухом нагретого криптолового слоя ($T_{ср.к}$=441 °С), максимальное значение эффективной теплоотдачи составило более 17 Вт/(м^2·К) на пятой и шестой минуте эксперимента при расходе воздуха 45 л/мин. Таким образом, теплоотдача криптола воздушному потоку возросла в 34 раза с момента начала продувки. До продувки – процесс лимитирован внутренней диффузией, или так называемым «кондуктивным проскоком теплоты» между зернами, после перехода в режим активной конвекции инерционное сопротивление потоку теплоты практически исчезает, а скорость прогрева воздушного потока ограничивается не теплофизикой взаимодействия сред «криптол-воздух», а отсутствием подвода новой теплоты от источника к криптолу для компенсации потерь.

Результаты стендовых испытаний и полученные аналитические зависимости в дальнейшем могут быть использованы при математическом моделировании процессов теплопереноса в фильтрационном слое устройства, реализующего принцип огневой, беспламенной утилизации жидких углеводородных отходов.

3.3 Результаты теплофизических испытаний ячейки фильтрационного слоя

При физических испытаниях ячейки с пористым слоем в качестве топлива использовался керосин. Обусловлено это тем, что жидкие горючие отходы имеют многокомпонентный, изменяющийся состав, что замедляет процесс балансовых расчетов (при повторяющихся циклах испытаний) за счет необходимости определения теплотехнических характеристик жидкой горючей смеси, когда как для керосина эти характеристики известны. Состав и теплотехнические характеристики керосина приведены в таблице 3.4.

Для определения вредных выбросов окислов серы в качестве ячейки газового анализатора «Testo 330-2» выбрана «SO2». В ходе увеличения тепловых нагрузок фиксируемые температуры в рабочих зонах горения изменялись в диапазоне от 0 до ~1300 °С.

Фотографии ячейки в режиме испытаний представлены на рисунке 3.18. Результаты испытаний сведены в таблицу (Приложение Б).

Таблица 3.4 – Состав и теплотехнические характеристики топлива [116]

Топливо	Элементный массовый состав,%					Низшая теплота сгорания ($Q_н^p$), кДж/кг	Плотность (ρ), кг/м^3	Влажность (W^r), %	Зольность (A^r), %
	C^r	H^r	N^r	O^r	S^r				
Керосин	83,50	16,40	–	0,0839	–	44835,07	780,0	0,0001	0,016

Наиболее интенсивное реагирование в структуре (рисунок 3.18) соответствует пространственной локализации стехиометрических условий смесеобразования, которая зависит от местоположения, характера ввода и распределения составляющих горючей смеси. Состав смеси керосина с воздухом проявляет себя рассредоточенностью зон реагирования по ширине и высоте слоя криптоловой среды.

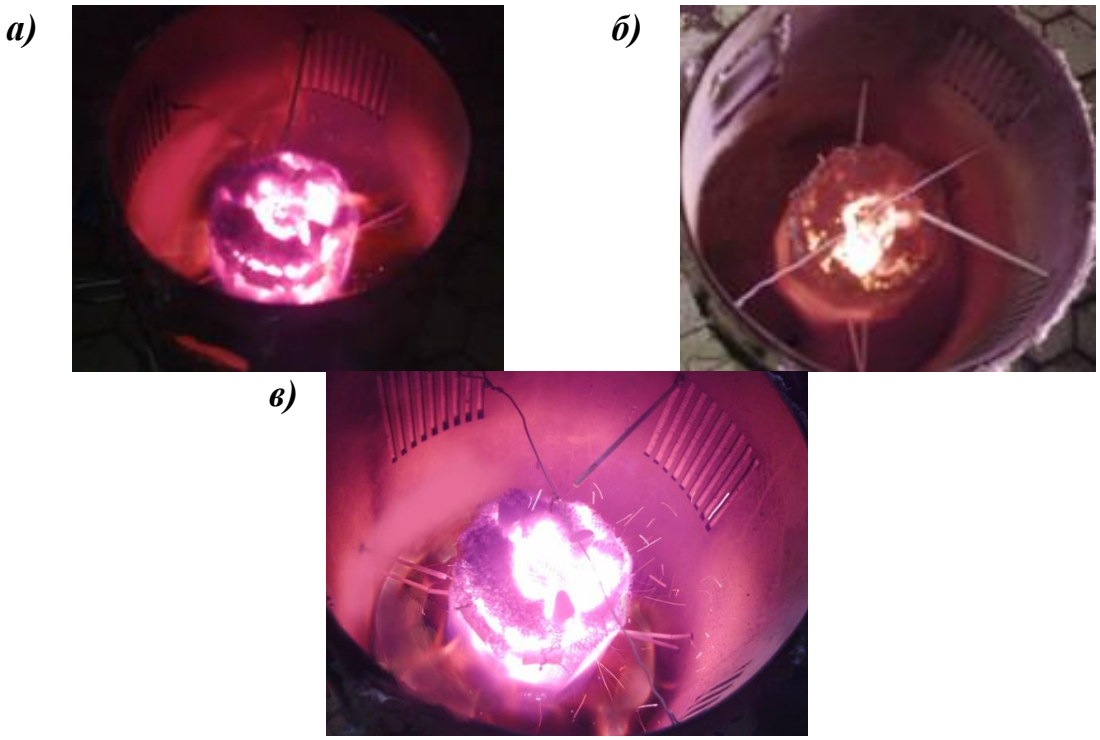


Рисунок 3.18 – Ячейка фильтрационного слоя в стадии испытания [30, 116-118]:

а) режим пуска (через 5 минут после розжига); б) режим останова («расхолаживание»); в) режим номинальной нагрузки

Следствием этого может проявляться возможность неполного сгорания топлива в объеме пористого слоя, с увеличением расхода топлива (рис. 3.18). Выявленной причиной недостатка ячейки – высоких значений избытков воздуха – является отсутствие сплошного корпуса, что может давать возможность окислителю беспрепятственно покидать криптол, не прореагировав.

3.4 Результаты аэродинамических испытаний криптолового слоя

Результаты измерения аэродинамического сопротивления криптолового слоя представлены рисунком 3.19. Из исследования аэродинамического сопротивления криптолового слоя различных фракций можно заключить, что в перспективе целесообразно рассматривать фракцию размером гранул 5-10 мм, так как при меньшем размере гранул значительно возрастает аэродинамическое сопротивление, при большем – возникает вероятность возникновения «хлопков» в процессе горения [119-121].

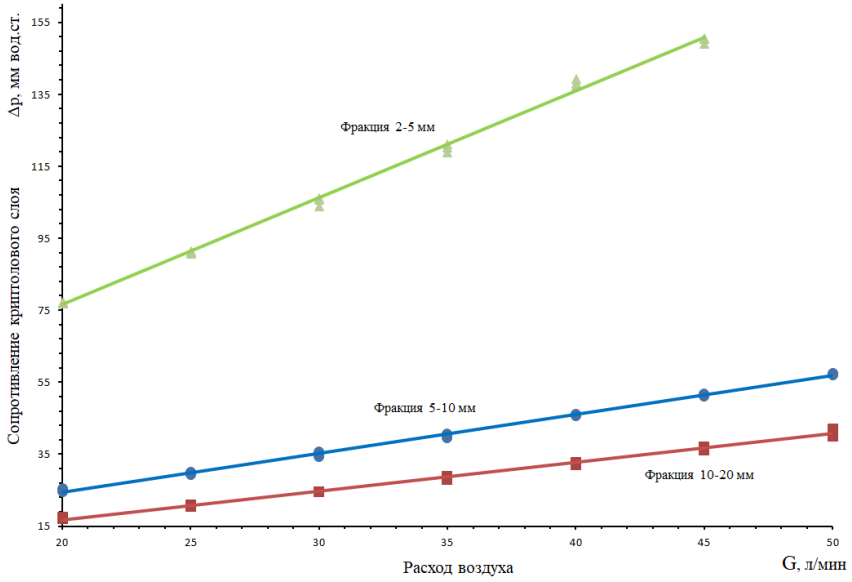


Рисунок 3.19 – Зависимость аэродинамического сопротивления от расхода воздуха через слой криптола, фракций: 2-5 мм, 5-10 мм, 10-20 мм

Для оценки случайной погрешности измерений аэродинамического сопротивления криптоловой засыпки выполнены расчеты (Приложение В) в соответствии с методикой [108], численные значения которых представлены

таблицей 3.3 справа от значений аэродинамических сопротивлений фракций криптола.

Таблица 3.3 – Среднеквадратичное отклонение значений аэродинамического сопротивления

Расход воздуха, л/мин	Аэродинамическое сопротивление, мм вод. столба при размере фракций в слое		
	2-5 мм	5-10 мм	10-20 мм
50	-	57,4 ± 0,66	41,56 ± 0,33
45	150,42 ± 1,66	51,54 ± 0,63	36,88 ± 0,63
40	138,24 ± 2,03	46,2 ± 0,2	32,44 ± 0,36
35	120,16 ± 1,74	40,22 ± 0,65	28,3 ± 0,58
30	105,9 ± 1,94	35,04 ± 0,74	24,46 ± 0,19
25	91,32 ± 0,54	29,9 ± 0,26	20,8 ± 0,38
20	77,24 ± 0,6	25 ± 0,39	17,34 ± 0,23

3.5 Обсуждение результатов

На базе конструкции ячейки фильтрационного слоя и теплофизических исследований криптола формируется общая концепция утилизации малотоннажных скоплений жидких углеводородных отходов, термолизатов в ячейке фильтрационного горения теплогенератора [122–124], принципиальная схема которого представлена рисунком 3.20, которая в свою очередь является основой для дальнейшего конструирования, развития и совершенствования аналогичных систем.

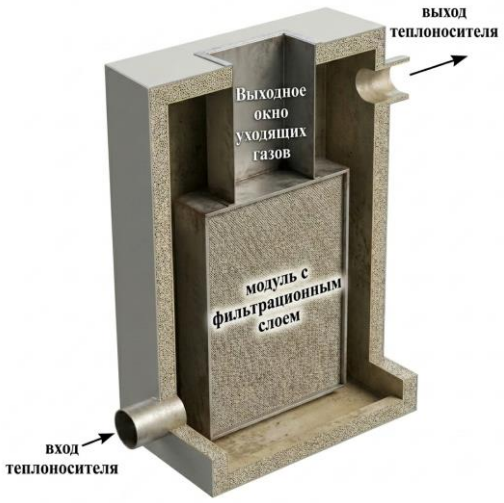


Рисунок 3.20 – Принципиальная схема компоновки ячейки фильтрационного слоя (горелки) в теплогенераторе [122]

Результаты физического испытания ячейки при сжигании керосина показали, что её конструкция обладает рядом следующих особенностей.

1. Возможно наличие диффузионного горения (пламени), обусловленное высоким аэродинамическим сопротивлением пористого слоя и низким коэффициентом избытка воздуха ($\alpha < 1{,}5$), что указывает на отсутствие целесообразности создания пористо-фракционных систем большого объема.

2. При отсутствии точного регулирования подачи жидкого топлива с постоянно малым расходом, достаточным только для его испарения и полного окисления в криптоловом слое, процесс горения топлива сопровождается недожогом (Приложение Б). В этой связи организация подвода углеводородов по всей высоте активной зоны приводит к сложно-регулируемому его избытку и как следствие химической неполноте сгорания. Таким образом, при конструировании подобных систем целесообразно предусматривать предварительный перевод жидкой фазы топлива в газообразное состояние (аэрозоль).

3. Тепловая инерция наполнителя при его значении теплоемкости затрудняет активацию воспламенения, а также требует времени для прогрева зоны испарения и активации горения топлива с переходом в автотермический режим, как следствие, усложняя регулирование расхода топлива и тепловой мощности устройства. Таким образом, для локализации зоны воспламенения целесообразным становится использование предварительного источника нагрева с порциально-импульсной подачей топлива для испарения.

4. Диапазон температурного воздействия на элементы топливо-и воздухоподачи модуля в пределах 700-820℃ предопределяет для них возможность применения конструкционных жаропрочных сталей.

5. Преимущественно равномерное распределение температуры в ячейке, а, следовательно, и излучаемых тепловых потоков может способствовать эффективной передаче тепла через поверхности нагрева к агенту термического воздействия (теплоносителю) в теплогенераторе.

6. Относительно низкие температуры в активной зоне (менее 1100℃) при горении способствуют снижению выбросов термических оксидов азота и других вредных веществ [116].

7. В ходе экспериментов установлено, что благодаря теплопроводности и тепловой инерции в пористой среде наполнителя происходит ее интенсивный теплообмен с топливовоздушной смесью. Выравнивается объемное распределение температуры, а зона реагирования заполняет бóльшую часть располагаемого пространства. Однако недопущение перехода горения в диффузионный режим требует для полного сгорания больших избытков воздуха и удлинения траекторий спутных течений топлива и окислителя. Для этого одним из решений может стать размещение ячейки в ограниченном пространстве (камере сгорания), способствуя возвратному движению первично не вступившего в реакцию воздуха для повторного реагирования в реакции окисления.

8. По результатам физических испытаний ячейки на керосине, она работоспособна в диапазоне общей тепловой нагрузки до ~6 кВт. При рабочем режиме визуально наблюдается стабильный процесс горения, сопровождаемый ярким светло-оранжевым свечением. Видимый факел, как правило, отсутствовал на протяжении всего периода испытаний. В условиях температур (до ~1300 С) была показана устойчивость горения и перспектива дальнейшего использования углеродистого остатка термолиза (криптола) в качестве формирующей засыпки активной зоны. Испытания показали, что процесс горения топлива проходит в условиях высоких значений избытков воздуха (до α=5,8) и расхода криптола (2,7 г/мин) ввиду его окисления, что требует доработок устройства в конкретных условиях эксплуатации с последующей наладкой режимов его работы.

Глава 4. Технические решения модуля фильтрационного горения и теплогенератора

4.1 Результаты, определившие конструктивные решения модуля фильтрационного горения

Разработка устройств огневой утилизации осложняется непостоянством состава жидких углеводородных отходов. Традиционный подход, опирающийся на математическое и физическое моделирование, а также на конструктивные решения аналогичных устройств, порождает множество вариантов котельных установок и теплогенераторов. В данном контексте целесообразнее ориентироваться на типы эффективных конструкций горелочных устройств, нежели на камеры сгорания теплогенерирующих установок в целом.

Традиционные «факельные» горелки, требующие значительных топочных объемов, конструктивно увеличивают габариты проектируемых установок [77, 123], что противоречит стремлению к созданию компактного устройства огневой утилизации. В противовес им, «бесфакельная», или беспламенная, система инфракрасного нагрева, где подготовка и горение смеси происходят в малом объеме, представляется более предпочтительной. Организация подготовки топливовоздушной смеси и интенсификация сжигания жидких углеводородов внутри фильтрационного слоя, заполняющего объем активной зоны горения, повышает взрывоустойчивость системы за счет обеспечения горения во внутреннем межфракционном пространстве [26]. Передача теплоты к эффективной поверхности посредством излучения в режиме инфракрасного нагрева экономически наиболее выгодна, поскольку инфракрасные лучи практически не подвержены рассеянию и поглощению атмосферной средой. Следовательно, технические устройства беспламенного горения, использующие инфракрасное излучение, можно отнести к прогрессивному способу передачи тепловой энергии [28]. Однако, несмотря на очевидные преимущества инфракрасной техники, разработка и внедрение компактных устройств огневой утилизации отстает от общего темпа технологического развития. Отчасти именно

поэтому горелки данного типа приняты за основу в создании концепции нового устройства – модуля фильтрационного горения теплогенератора [30, 122, 124].

Модуль фильтрационного горения теплогенератора – это взаимосвязанная система элементов конструкции горелки инфракрасного излучения, беспламенного горения, формирующая объем активной зоны из фракций засыпки, где процесс образования и окисления топливовоздушной смеси происходит в межфракционном пространстве (режим фильтрации), а затем в камере сгорания тепловой энергоустановки (теплогенератора) с генерацией теплоты и ее использованием вне этого устройства.

В развитие классификации инфракрасных излучателей, предложенной источником [125], ее структура может быть дополнена перспективной ветвью в направлении развития (рисунок 4.1), соответствующем цели настоящей работы.

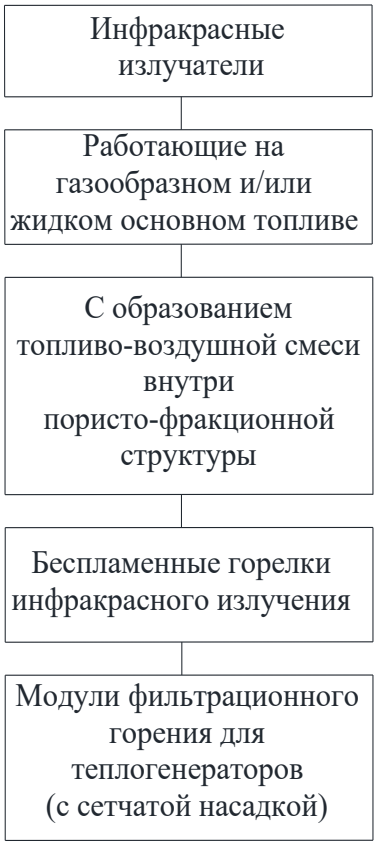


Рисунок 4.1. – Классификационная ветвь перспективного развития инфракрасных излучателей

Модуль фильтрационного горения теплогенератора представлен одним вариантом и является базовым в дальнейшем изучении, разработке и совершенствовании конструкций установок огневой утилизации конструкторами или техническими исследователями.

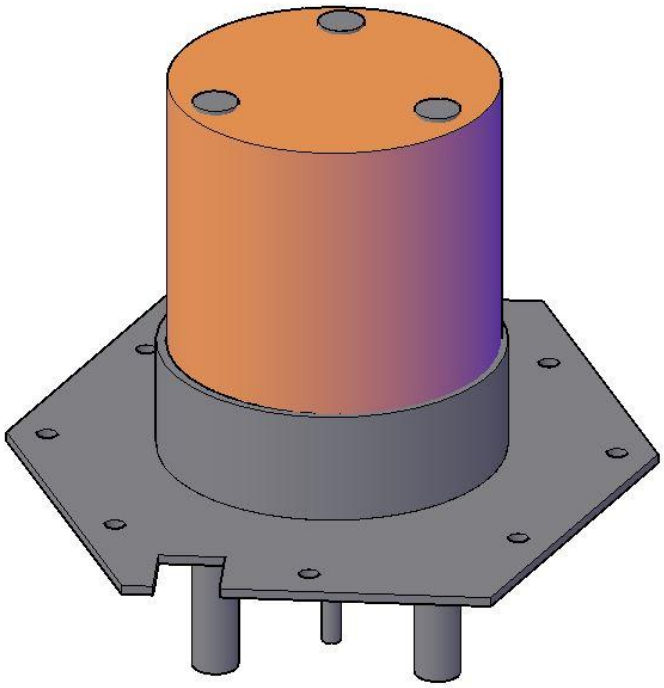


Рисунок 4.2. – Внешний вид модуля фильтрационного горения теплогенератора

* *сетка-излучатель условно не показана*

Концепция малотоннажной утилизации ЖУО представлена в виде описания конструкции модуля теплогенератора, взаимной компоновки основных его элементов в сборе, описания особенностей и обоснования логически принятых конструктивных решений (рисунки 4.2, 4.3). Конструктивной основой для модуля послужили предшествующие этому конструкции горелочного устройства инфракрасного излучения, камеры сгорания теплогенератора и теплогенератора, которые защищены патентами (Приложение Г) [30, 95, 122, 124].

Экстраполируя экспериментальные значения аэродинамических сопротивлений криптолового слоя для расхода воздуха $4{,}4\times10^{-3}$ $м^3/с$ (обеспечивался для работы ячейки фильтрационного слоя при испытаниях): сопротивление слоя размером частиц 2-5 мм (высота засыпки 0,1 м) составит

порядка 7,86 кПа; для криптола размером 5-10 мм сопротивление слоя при тех же вводных параметрах составит 2,92 кПа; для фракции 10-20 мм аэродинамические потери в слое составят 2,07 кПа. Исходя из этого, наибольшее значение аэродинамического сопротивления дисперсная система имеет с фракцией криптола 2-5 мм, что не может являться оптимальным для конструкции модуля. Минимальные аэродинамические потери определены у фракции 10-20 мм, тем не менее, ввиду наибольшего размера исследуемого ряда частиц удельная площадь соприкосновения криптола между собой будет наименьшей. Вместе с тем экспериментально подтверждено, что теплоперенос в слое (диапазона температур 20–575 °С) преимущественно осуществляется конвекцией, а значит, может оказывать влияние на длительность предварительного прогрева криптола в сторону его увеличения, а также на увеличение длительности распространения фронта горения по всему активному объему модуля. Учитывая вышеприведенные факты и малую сравнительную разницу значений аэродинамических потерь (при прочих равных условиях) между фракциями 5-10 и 10-20 мм (составляет 0,85 кПа), использование криптола размером 5-10 мм в формировании активной зоны горения является предпочтительней. Высокие же значения удельной теплоемкости криптола фракции 5-10 мм, лежащие в диапазоне температур (до 480 °С) начала его окисления, со значениями, достигающими 1185 Дж/(кг·К), подтверждают отсутствие рациональной возможности создания крупногабаритных дисперсных излучающих систем. В этой связи, габариты ячейки фильтрационного слоя [30]: высота активной зоны (0,17 м), диаметр активной зоны (0,1 м), экспериментально подтвердившие работоспособность системы, целесообразно принимать во внимание. В обратном случае, из-за увеличения габаритов, а вместе с тем и общей теплоемкости системы это обстоятельство может привести к увеличению: энергозатрат, инерционности и непроектным режимам работы модуля.

Для равномерного распределения теплового потока в направлении тепловоспринимающих поверхностей предпочтительней является цилиндрическая форма модуля горения. Такая форма способствует излучению

потока с малыми углами раскрытия в горизонтальных и вертикальных плоскостях, минимизируя потери тепла, интенсифицируя лучистый теплообмен (в сравнении с излучающей способностью газов), что также способствует снижению температуры ядра активной зоны, снижая уровень образования термических оксидов азота [126].

Из результатов физических экспериментов горения, организованного в ячейке фильтрационного слоя, предполагается, что интенсивность реагирования в слое зависит от условий стехиометрического образования смеси, а именно, от условий ввода и преобразования компонентов ЖУО внутри фракционной структуры. При вводе и инициации воспламенения жидких углеводородов непосредственно в криптоловый слой окисление топливной смеси происходит в режиме локализации зон реагирования, занимающих незначительную часть всей активной зоны. Таким образом, ввод углеводородов в газофазном состоянии, способствует расширению зоны качественного термохимического реагирования.

Из-за значительной теплоемкости системы активация ее горения и вывод в рабочий режим может быть затруднительным. Исходя из исследования криптолового слоя, подтвердившего бóльшую интенсивность конвективного теплопереноса (в малых диапазонах температур) при размещении источника предварительного нагрева снизу вверх, предполагается применение так называемого топливного буфера. Топливный буфер представляет собой пористый, огнеупорный материал (муллит) с сорбционной емкостью до 81,7% [127], выполняющий функцию накопления (сорбции), диспергирования и диффузионного воспламенения топлива с помощью размещенных внутри него электронагревательных элементов. Образование топливного аэрозоля и его воспламенение за счет электронагревателей будет способствовать формированию локальной зоны горения на границе раздела сред (муллитового буфера и криптолового слоя), тем самым обеспечивая предварительный нагрев до начала окисления углеродистого слоя, и после которого будет осуществляться постепенное распространение фронта горения на весь объем криптолового слоя [127]. Использование углеводородного топлива в газообразном агрегатном

состоянии является более предпочтительным из соображений качественной подготовки топливо-воздушной смеси внутри фильтрационного слоя, а также минимизации механических и химических потерь топлива, ранее возможных в конструкции ячейки фильтрационного слоя [30].

Принимая во внимание опыт применения топливного канала, выполненного в виде перфорированной трубки и размещенного в центре активной зоны ячейки с фильтрационным слоем (0,142 м) с целью исключения температурного воздействия на него, предполагается размещение трубки в центре топливного буфера, с расположением топливного отражателя и его перфорированной части выше слоя муллита (на 0,009 м). По представлению автора, такая конструкция позволит исключить потери топлива (его вытекание из зоны горения) и снизить воздействие тепловых потоков активной зоны модуля на топливную трубку, обеспечив равномерное распределение ЖУО по топливному буферу.

Данными аэродинамических сопротивлений криптолового слоя и визуальной индикации потоков реагирования воздуха от каналов подачи воздуха ячейки фильтрационного слоя косвенно подтверждено образование обратных воздушных потоков, что приводит к отсутствию возможности вторичного реагирования воздуха, а, следовательно, и к увеличению необходимого избытка. В то же самое время, обратные потоки воздуха формируют своеобразную зону охлаждения перфорированных трубок, снижая их температуру до уровня допустимых эксплуатационных значений (700–820 °С). Учитывая вышеизложенное, в конструкции модуля фильтрационного горения рекомендуется аналогичное размещение воздушных трубок (под углом 120° друг относительно друга), где перфорации каждого из них по направлению сверху вниз смещены относительно перфораций следующего по часовой стрелке на одинаковый шаг [124]. Предполагается, что такое расположение перфораций трубок будет способствовать снижению взаимных сопротивлений потоков воздуха, направленных к центру модуля, оказывая благоприятное воздействие на процесс подготовки топливной смеси.

Высокие значения коэффициентов избытка воздуха при испытаниях ячейки фильтрационного слоя (5,8–2,66), исходя из данных [28, 125], могут способствовать стабилизации фронта окисления для инфракрасных горелочных устройств. Но все же их завышенные значения будут влиять на уменьшение коэффициента полезного действия утилизирующей ЖУО установки. Для оптимизации коэффициента избытка воздуха предполагается, что размещение модуля внутри камеры сгорания теплогенератора с особой геометрией поверхностей нагрева может обеспечить вторичное использование непрореагировавшего воздуха в слое, формируя завихренные газо-воздушные потоки и создавая условия для вторичного реагирования окислителя с топливом в противоточном режиме [128].

4.2 Конструкция и работа модуля

Система топливоподачи модуля (рис. 4.3) организована через топливный канал (1), который размещен снизу в центре модуля и представляет собой трубку с двумя боковыми прямоугольными перфорациями и сварной заглушкой сверху. Ниже перфораций размещен топливный отражатель, который выполнен в виде диска и соединен с трубкой сваркой. Три элемента канала воздухоподачи (2) являются трубками с перфорациями прямоугольного сечения, которые размещены по внутреннему периметру активной зоны горения и под углом 120^{o} друг относительно друга, с перфорациями, направленными к центру модуля. Сверху в них установлены сварные заглушки. На равном удалении от канала подачи топлива, по окружности и под углом 120^{o} размещены три электровоспламенителя (3), представляющие собой металлокерамические стержни электрического накала (12 В), предназначенные для разогрева локальной зоны и активации воспламенения топливных паров. Каркас (4) и сетка-излучатель (5) формируют объемную цилиндрическую матрицу – активную зону окисления модуля, а также являются источниками вторичного излучения.

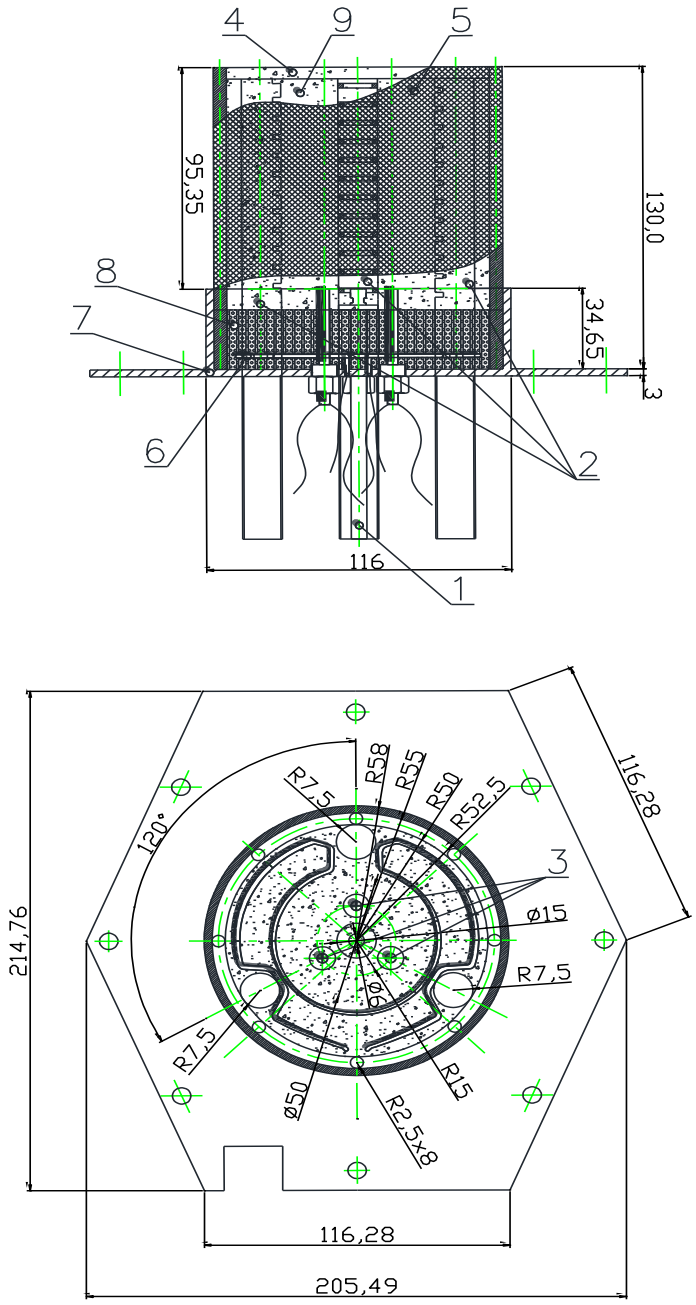


Рисунок 4.3. – Конструктивная схема модуля фильтрационного горения теплогенератора.

1 – топливная трубка; 2 – трубка подачи воздуха (3 шт); 3 – электровоспламенители (3 шт); 4 – каркас; 5 – сетка-излучатель; 6 – электроиспаритель; 7 – основание; 8 – топливный буфер (муллит); 9 – фракция засыпки твердого углеродистого материала (криптол)

Электроиспаритель (6), расположенный в зоне основания модуля (7) и топливного буфера (8), представляет собой электронагревательный элемент (12 В) для испарения ЖУО из пористого негорючего материала (муллит) сорбционной

емкостью до 90%. Пространство модуля заполнено фракцией твердого углеродистого материала (9), который формирует слой фильтрационного горения активной зоны и служит дополнительным топливом.

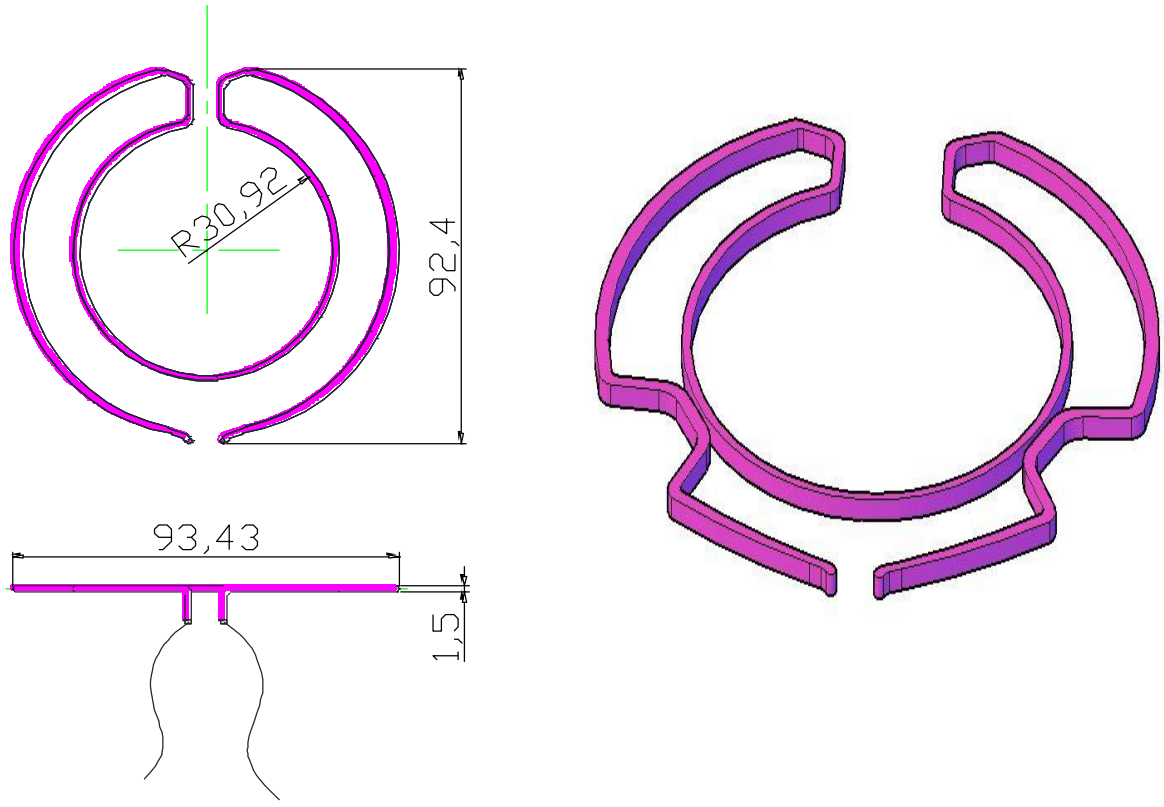
Процесс пуска в работу модуля осуществляется путем импульсно-порционной подачи утилизируемого ЖУО через топливную трубку (1), запитывая, таким образом, топливный буфер (8). Далее производится включение нагревательных элементов (3 и 6), с помощью которых осуществляется разогрев локальной зоны и термическое диспергирование (испарение) ЖУО с последующим горением. После этапа термической активации воспламенения топлива через воздуховодные патрубки (8) подается воздух на горение, способствуя таким образом переходу в режим автотермического окисления топлива и дальнейшего распределения температурного поля по всей матрице активного углеродистого объема. Настройка соотношения «топливо-воздух» осуществляется путем ручного режимно-наладочного регулирования после выхода модуля в стационарный режим работы. В последующем электровоспламенители (3) отключаются, а электроиспаритель (6) остается включенным на протяжении всего цикла работы модуля. При эксплуатации модуля в составе мобильной теплогенерирующей установки электропитание нагревательных элементов целесообразно осуществлять за счет переносной аккумуляторной батареи и компактного топливного генератора.

Останов работы модуля выполняется путем прекращения подачи топлива через патрубок (1), при этом воздуховодные трубки (2) и электроиспаритель (6) остаются в работе до полного останова и расхолаживания.

Решение о размещении условной зоны испарения и активации воспламенения топлива в модуле, следуя анализу результата физического эксперимента ячейки фильтрационного слоя, направлено на необходимость исключения или минимизации проблем, связанных с обеспечением эффективной эксплуатации установки. Так как организация горения утилизата требует предварительного прогрева криптола до температур, обеспечивающих воспламенение жидкого топлива, то процесс усложняется инерционностью

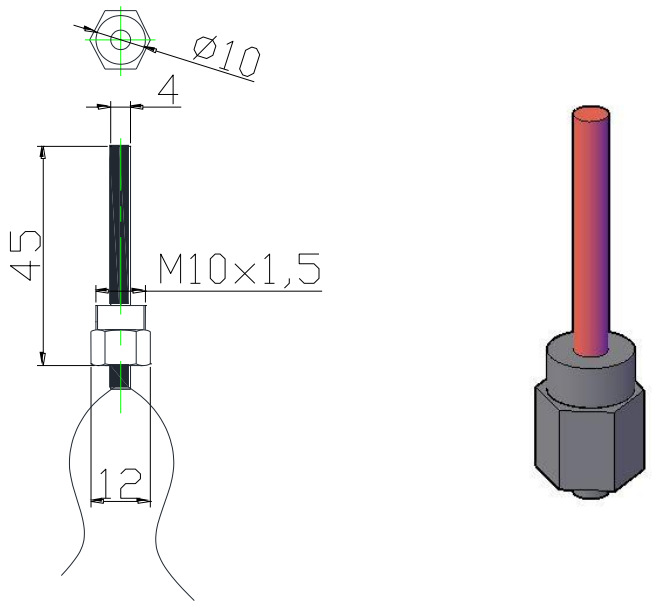
нагрева криптоловой засыпки из-за высокой теплоемкости системы. Ввод в систему значительного объема жидкого топлива и его распределение по всей высоте является избыточным, приводит к химической неполноте сгорания и накоплению его излишков в нижней части установки. В этой связи более тонкое управление расходом топлива может быть обеспечено путем импульсно-порционной подачи его в сорбирующий неметаллический материал, с последующей его трансформацией до состояния аэрозоля, и воспламенением посредством электроиспарителя и электровоспламенителей (соответственно, рисунки 4.4, 4.5).

Для исключения перегрева и выхода из строя электронагревательных элементов модуля схема подключения должна предусматривать периодичность их отключения исходя из ресурса времени работы нагревателей «на отказ», определяемого опытным путем.



а) б)

Рисунок 4.4. – Схемы электроиспарителя
а – конструктивная схема; б – модель



а) б)

Рисунок 4.5. – Схемы электровоспламенителя
а – конструктивная схема; б – модель

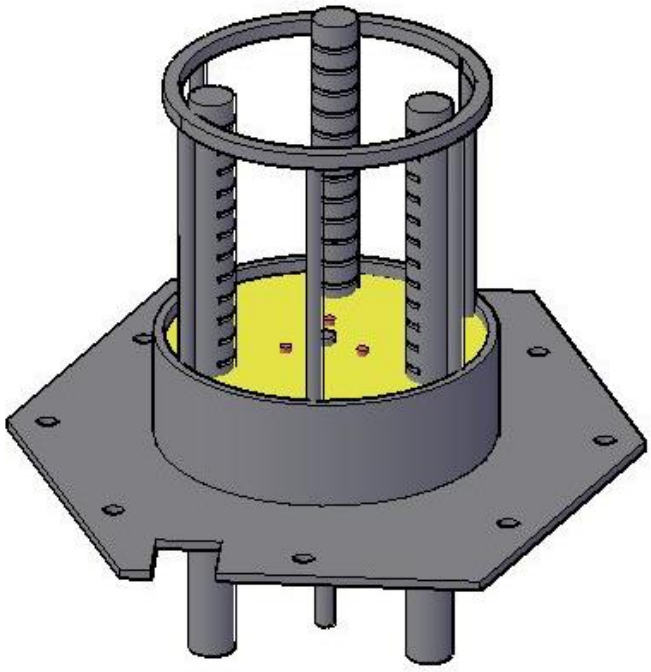


Рисунок 4.6. – 3D модель размещения топливного буфера в модуле фильтрационного горения теплогенератора
**сетка-излучатель и фракция засыпки не показаны*

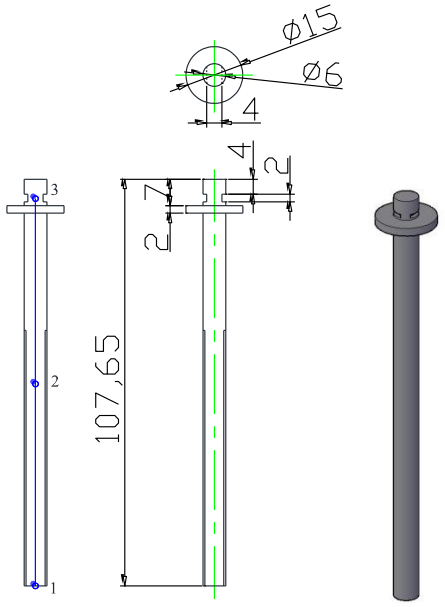
С целью недопущения тепловой паузы электровоспламенителями при режимах выключения целесообразна организация между ними поочередно-

последовательного включения и выключения. Размещение нагревательных элементов вне зоны активного окисления способствует сохранению эксплуатационного ресурса за счет недопущения разрушительного воздействия тепловых потоков, вызванных термической деструкцией и последующим горением ЖУО в активной зоне горения. Зона топливного буфера (зона размещения электронагревательных элементов) обозначена желтым цветом на рисунке 4.6.

Для конструирования модуля фильтрационного горения и правильного подбора оборудования системы воздухо-и топливоподачи, кроме определения аэродинамических сопротивлений фильтрационного слоя, не менее важна оценка сопротивлений топливного и воздушных патрубков с расчетом оптимальных диаметров проходных сечений и эквивалентных диаметров перфораций. Для этих целей подходит использование программного комплекса «Гидросистема», версии 3.87 [129].

При гидравлическом расчете трубок подачи топлива и воздуха потери давления рассчитаны при средних значениях скорости и плотности рабочей среды на участке в зависимости от начальной температуры и давления. При этом изменение давления при подъеме среды в патрубке также учитывается. Сопротивления трения определяются в соответствии с режимом течения среды и шероховатостью стенки трубки, а расчет коэффициентов гидравлических сопротивлений проводится по рекомендациям справочников [130, 131]. Алгоритм программы обеспечивает расчет коэффициента сопротивления трения с погрешностью до 3% [129]. Гидравлические схемы топливной и воздушной трубок представлены рисунками 4.7, 4.8.

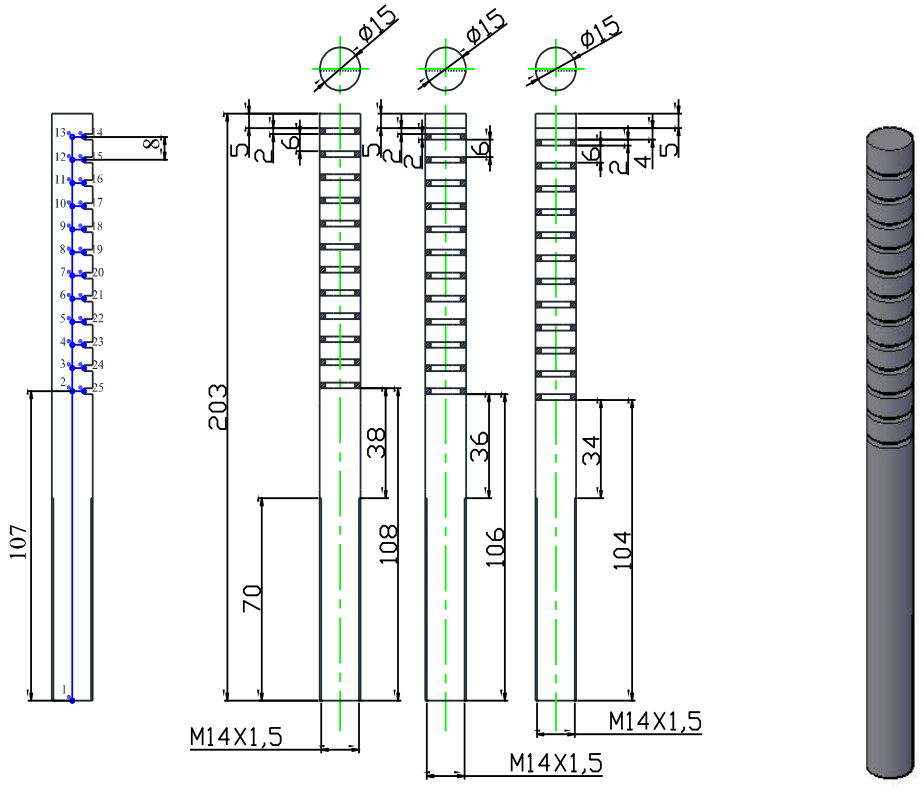
На первом этапе производится определение предпочтительных узловых давлений, которые соответствуют таким значениям диаметров (не обязательно из стандартного ряда), которые обеспечивают значение стоимости (материалоемкости) трубопровода, близкое к оптимальному.



а) б) в)

Рисунок 4.7. – Схемы топливного патрубка в модуле

а – гидравлическая схема; б – конструктивная схема; в – модель



а) б) в)

Рисунок 4.8. – Схемы патрубков подачи воздуха в модуле

а – гидравлическая схема; б – конструктивная схема; в – модель

На втором этапе по полученным давлениям определяются диаметры патрубков из стандартного ряда условных диаметров труб, обеспечивающие необходимый расход через перфорации.

Гидравлический расчет топливного патрубка производился из предположения о движении керосина. Температура топлива принималась равной среднегодовой температуре наружного воздуха (в г. Томск), принятой в соответствии с климатологической базой, интегрированной в программный комплекс. Начальное давление в нем задавалось исходя из наименее благоприятных условий движения керосина при избыточном давлении 19,61 кПа. При расчете патрубков подачи воздуха избыточное давление воздуха в начале участка принималось равным 0,2 МПа, начальная температура воздушной среды (+20 ^{o}C). Результаты расчетов сведены в таблицы Д.1– Д.3 (Приложение Д).

4.3 Компоновочное решение теплогенератора с модулем горения

Итогом проведенных исследований стала разработанная конструкция теплогенератора для огневой утилизации малотоннажных локаций жидких углеводородных отходов [123, 124], с возможностью использования полученной теплоты. Его принципиальная схема представлена рисунком 4.9.

В основе конструкции теплогенератора лежит модуль фильтрационного горения с камерой сгорания [30, 122]. Конфигурация корпуса установки может быть различной, но для компактности и удобства их совместной компоновки предложена шестиугольная форма поперечного сечения, позволяющая в объеме получить шестигранную конструкцию. Геометрия внутренних поверхностей нагрева установки теплогенератора рисунком 4.9 не представлена, но предполагает возможность применения их разнообразных форм, эффективных для восприятия лучистой теплоты.

Работа теплогенератора осуществляется посредством ввода и вывода теплоносителя (1) через соответствующие патрубки (2) и (3), таким образом организуя через них циркуляцию теплоносителя (1) и обеспечивая тем самым

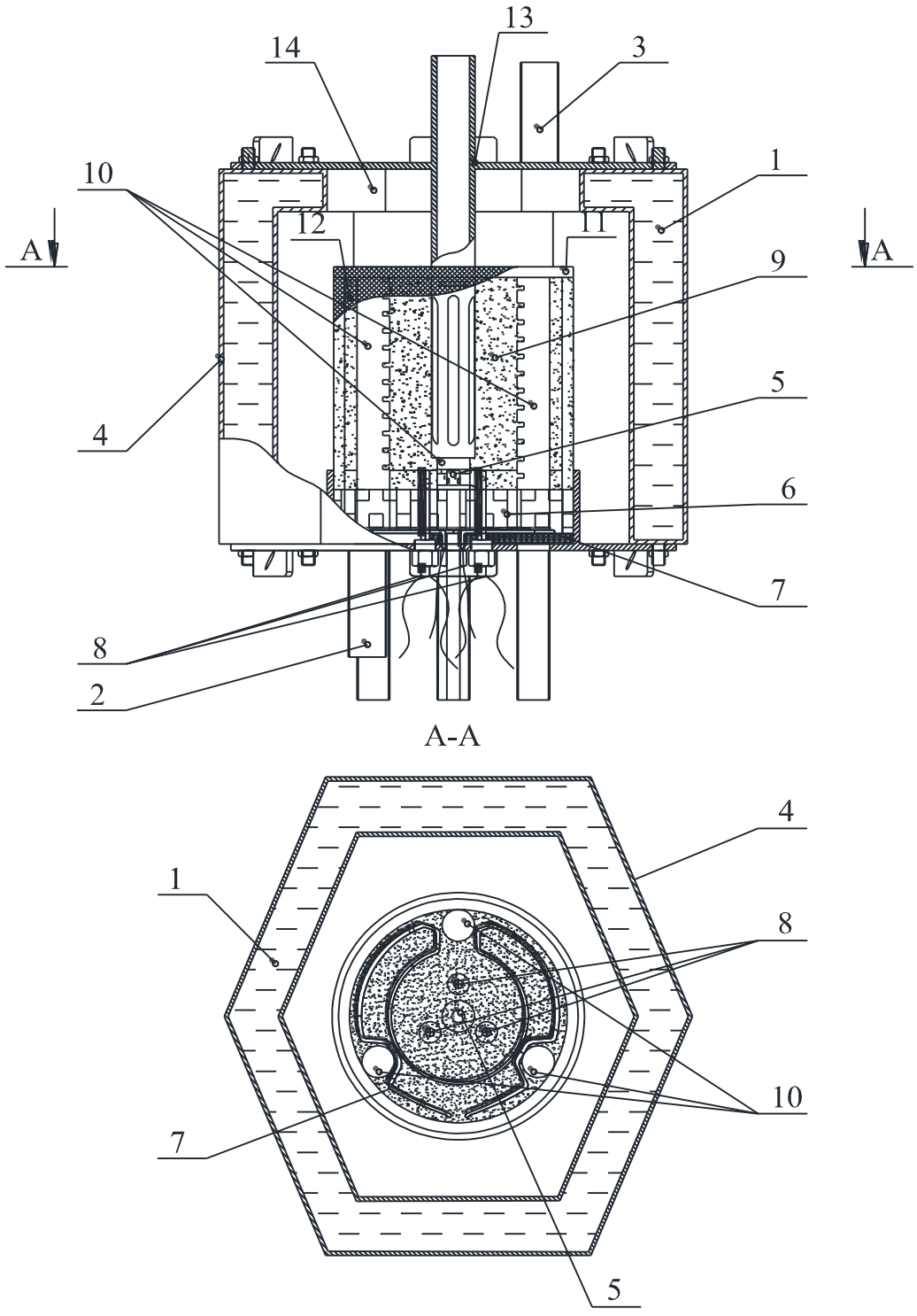


Рисунок 4.9. – Принципиальная схема теплогенератора [123, 124]:

1 – теплоноситель; 2 – патрубок входа теплоносителя; 3 – патрубок выхода теплоносителя; 4 – теплогенератор; 5 – трубка подачи топлива; 6 – муллит; 7 – электроиспаритель; 8 – электровоспламенители; 9 – криптол; 10 – трубки подачи воздуха; 11 – каркас модуля горения; 12 – сетка-излучатель; 13 – газоотводящий патрубок (с крышкой); 14 – выходное окно уходящих газов.

съем полученной теплоты внутри теплогенерирующей установки (4). Процесс генерации теплоты осуществляется за счет дозированной подачи жидкого топлива через топливный патрубок (5) модуля фильтрационного горения. Через перфорации патрубка (5) жидкое топливо равномерно распределяется внутри сорбционного материала (6), в котором за счет температурного воздействия электронагревательных элементов (7 и 8) оно диффундирует, трансформируясь в аэрозоль. Воспламеняясь, аэрозоль образует локальную зону горения, которая по мере прогрева криптоловой засыпки (9) распространяется на весь объем фильтрационного слоя. После достижения установившегося режима работы теплогенератора электрические воспламенители (7 и 8) отключают от электропитания. Одновременно с вышеприведенными этапами компрессором нагнетается воздух в криптоловый слой (9) через перфорации воздушных трубок (10). Металлический каркас (11) является несущим элементом и обеспечивает устойчивость геометрической формы модуля, сетка (12) выполняет функцию вторичного источника излучения, а также катализатора для доокисления продуктов неполного горения. Удаление дымовых газов из рабочей зоны в атмосферу происходит через газоотводящий патрубок (13) при его наличии, а в случае его возможного отсутствия – через выходное окно уходящих газов (14).

Принципы компоновки устройств охватывают вопросы, связанные с использованием теплогенератора совместно с модулем фильтрационного горения для огневой утилизации ЖУО, и возможности формирования на этой базе компактных систем – кластера(ов) из нескольких единичных теплогенераторов до общей необходимой утилизационной и тепловой мощности (рисунок 4.10), где в качестве нагреваемого агента используется теплоноситель.

Беспламенное горение в инфракрасном диапазоне, правильно организованное внутри теплогенератора, позволяет значительно сократить объем пространства, которое занимает факел горелки, в сравнении с системами традиционных («факельных») методов окисления. Геометрическая форма теплогенератора, выполненная в форме «пчелиной соты», создает возможность для компактной кластеризации. Благодаря унифицированной шестигранной форме, при равных

поверхностях каждого элемента длина периметра всего кластера «пчелиной соты» оказывается наименьшей, что способствует решению для минимизации удельной металлоемкости установки на единицу генерируемой теплоты. По укрупненной оценке – кластер, состоящий из четырнадцати теплогенераторов (мощностью 3,5 кВт каждый), займет объем порядка 0,168 м³. [123].

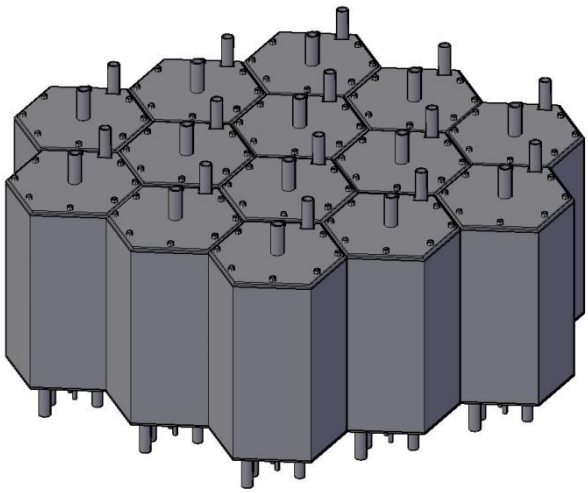


Рисунок 4.10. – Пример компоновки кластера теплогенераторов с модулями фильтрационного горения

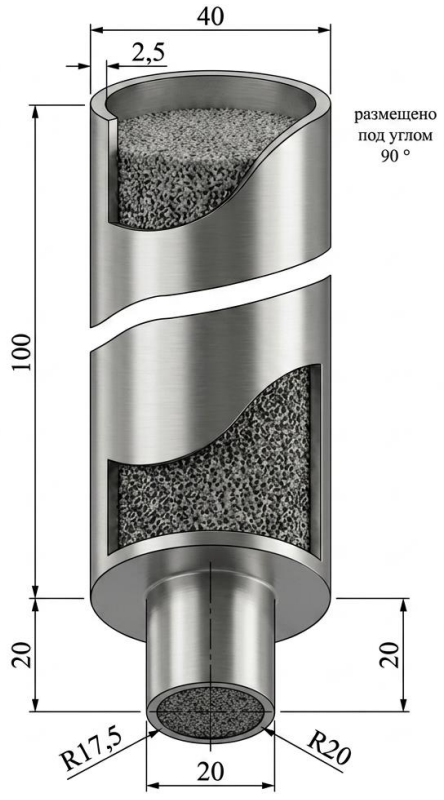


Рисунок 4.11. – Фильтрующая кассета, заполненная цеолитом

Экологическая составляющая вопроса утилизации ЖОУ в слое также является важной. По данным источников [132, 133] эффективность в очистке газов проявляют цеолиты, такие как гейландит-клиноптилолит и шабозит. Универсальным решением для этого может стать применение природных цеолитов для очистки дымовых газов от оксидов азота, оксидов серы и иных канцерогенных веществ [134], позволяя создавать на этой основе сменные компактные фильтрующие кассеты для разрабатываемых устройств, конструктивная модель которой представлена рисунком 4.11.

Фильтрующая кассета может представлять собой цилиндрическую трубку заполненную цеолитом, которая с помощью резьбового соединения устанавливается на газовыпускном патрубке теплогенератора с модулем фильтрационного горения. После исчерпания сорбционной способности цеолитом, кассета подлежит замене. Также возможно повторное ее использование после проведения регенерации цеолита в ней. В этом случае [132], сорбент восстанавливает сорбционную способность на 48% в течение 20 минут путем интенсивного дутья воздуха через него при температурах 350÷400 °С, таким же образом возможна безотходная утилизация оксидов азота в цеолите посредством парового дутья.

4.4 Схема компоновки реактора пиролиза отходов с модулем горения

Развитие и совершенствование конструкций модуля фильтрационного горения, а также конструкций компактных установок пиролизной переработки отходов в части обеспечения автоматической выгрузки твердого углеродистого остатка из реактора и его загрузки в активную зону горения модуля (при непрерывном цикле переработки отходов) с последующим удалением золы, сулит возможность взаимной интеграции подобных технических устройств. Инициатива такой интеграции в перспективе может быть реализована протоколом согласования намерений (Приложение Ж), подписанным между ООО «Завод Аэроэнергопром» (г. Минск) и Инженерной школой энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, вызванного

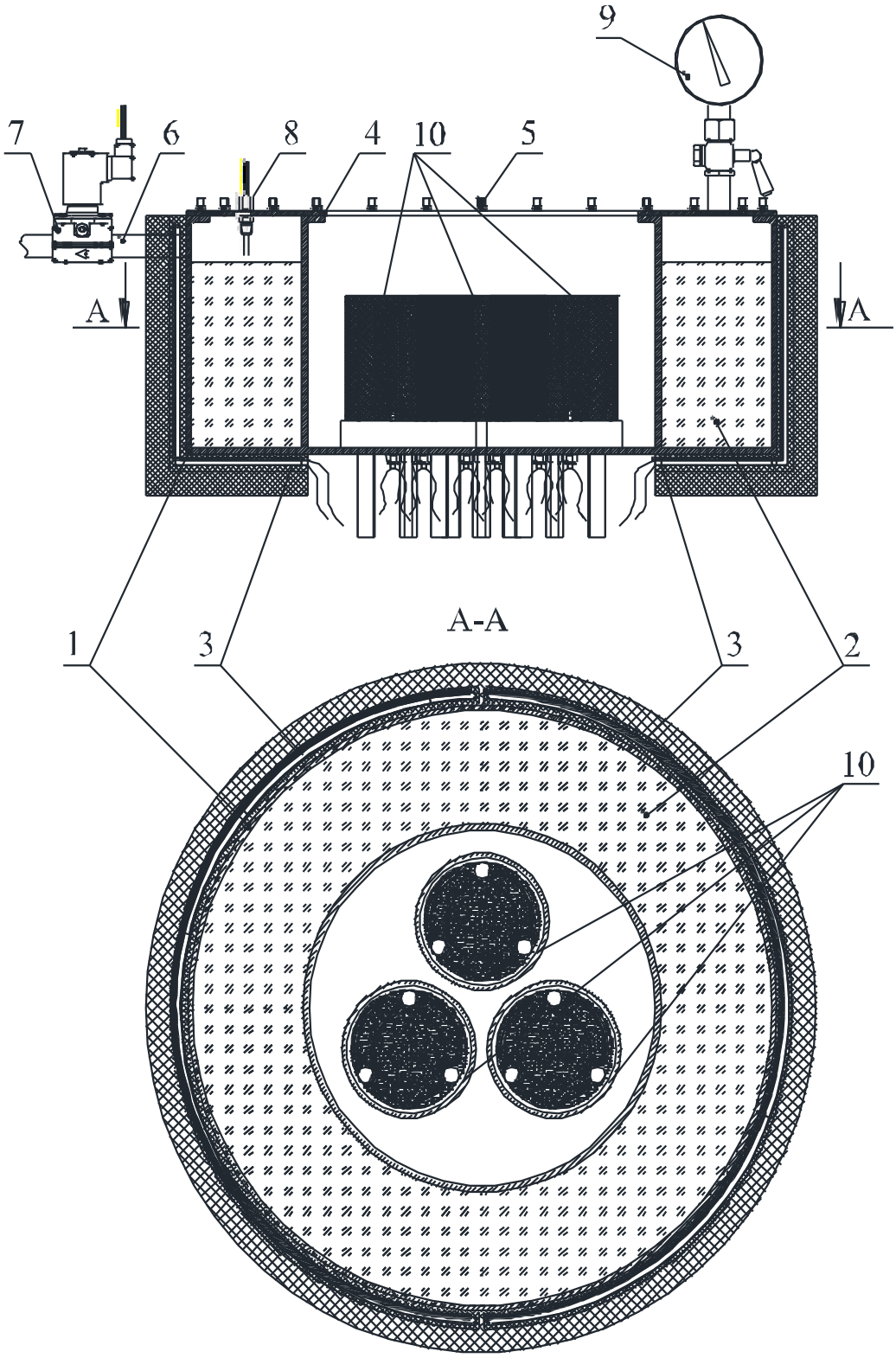


Рисунок 4.12. – Принципиальная схема реактора пиролиза отходов

1 – реактор; 2 – утилизируемые отходы; 3 – нагревательный элемент; 4 – крышка; 5 – резьбовое соединение (гайка и шпилька); 6 – газоотводящий патрубок; 7 – электромагнитный клапан; 8 – датчик температуры; 9 – манометр; 10 – модуль фильтрационного горения.

практическим интересом к использованию конструкционной основы модуля фильтрационного горения в мобильных комплексах пиролиза отходов с огневой утилизацией его продуктов. Упрощённая схема совместного использования этих устройств, не предусматривающая автоматическую выгрузку и загрузку углеродистого остатка и золы, может быть представлена рисунком 4.12.

На схеме работа компактного комплекса переработки отходов организована за счет размещения внутри теплоизолированного реактора (1) отходов различного морфологического состава (углеводородсодержащие, не хлорсодержащие) (2) и их нагрева до температуры пиролиза (400 – 600 °С) посредством нагревательных элементов (3), размещенных по периметру реактора. Герметичность реактора (1) обеспечивается за счет плотной фиксации крышки (4) посредством резьбового соединения гаек со шпильками (5), размещенных сверху реактора (1) по его окружности. В процессе термической деструкции отходов парогазовая углеводородная смесь отводится из зоны реактора (1) через газоотводящий патрубок (6) путем автоматического открытия электромагнитного клапана (7) с последующей конденсацией газов вне этого устройства. Контроль температуры и давления газов в реакторе (1) могут быть обеспечены датчиком температуры (8) и манометром (9) соответственно. Полученные в процессе переработки: пиролизная жидкость, синтез-газ (и/или парогазовая смесь), твердый углеродистый остаток могут быть использованы в качестве энергоносителей в модулях фильтрационного горения (10), которые размещены в центре внутренней цилиндрической полости реактора (1). Принцип действия и особенности работы модуля горения представлены ранее (см. пункт 4.2, глава 4).

Использование продуктов пиролиза (жидких, твердых, газообразных) в качестве энергоносителей обуславливает возможность их последующей низкотемпературной утилизации (до 1300 °С) в модулях горения с генерацией необходимой теплоты для обеспечения режима термической деструкции отходов, таким образом, замыкая цикл переработки отходов.

Заключение

Условия Арктики и Крайнего Севера, где климат и логистика вносят свои граничные условия, определяя основные критерии в утилизации малотоннажных ЖУО, компактно функционирующая установка, отдельно или в симбиозе с технологией пиролиза, способна стать эффективной в утилизации отходов жидких углеводородов. В сравнении с аналогами «факельного» типа, используемый принцип фильтрационного горения способен не только сократить удельный вес установки, но и относительно безопасно нейтрализовать углеводородные отходы до состояния золы. Для слоя, формирующего зону горения модуля, криптол является определяющим перспективы для изучения и использования иных доступных дисперсно-углеродистых систем в этом качестве, включая и отходное углеродсодержащее сырье.

В соответствии с поставленной целью настоящей работы выполнено комплексное исследование, направленное на разработку устройства для решения актуальной проблемы малотоннажной утилизации углеводородных отходов, рассредоточенных на местности.

На основе анализа известных подходов к обезвреживанию углеводородных отходов избран огневой принцип как наиболее совместимый с мобильным вариантом устройства, позволяющий полезно использовать теплоту продуктов сгорания. В этом ключе наиболее доступным, экономичным и безопасным признано использование способа беспламенного горения в пористом слое по типу соответствующей модификации горелочных устройств.

Для реализации сформулированной концепции предложены на уровне изобретений и полезных моделей несколько вариантов конструктивных схем так называемого модуля беспламенного горения, основным элементом которого является фильтрационный слой из частиц твердого углеродистого материала (криптола). Один из этих вариантов принят в качестве ячейки с фильтрационным слоем для подробных исследований согласно предложенной структуре их методологического обеспечения.

Исследованиями теплотехнических и теплофизических свойств криптола подтверждена его пригодность для формирования насыпного слоя модуля беспламенного горения. А именно: определен минералогический состав, дающий о нем исходное представление в качестве материала, формирующего матрицу фильтрационного слоя и дополнительного топлива (из-за сравнительно высокого значения низшей теплоты сгорания, сопоставимого с теплотой сгорания углей).

Экспериментами, определяющими истинные значения: теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности криптола, а также значениями коэффициента теплоотдачи подтверждена интенсификация циркуляции воздуха в межфракционном пространстве при ориентации источника предварительного нагрева снизу вверх.

Предложено направление развития инфракрасных излучателей, использующих энергоносители углеводородного состава в комплексе с компактными теплогенерирующими установками (и реакторами пиролиза отходов). Введено понятие модуля фильтрационного горения теплогенератора как конструктивной единицы или опорного конструкторского решения в формировании и развитии исследовательской базы аналогичных систем.

В соответствии с защищаемыми положениями диссертационной работы выработаны конструктивные решения и сформулированы нижеследующие выводы.

1. Экспериментами на ячейке фильтрационного слоя, как аналоге горелочного устройства инфракрасного излучения, подтверждена возможность организации фильтрационного горения углеводородов с образованием низких концентраций термических оксидов азота, значение которых не превышает 22 ppm при усредненной температуре горения 1316 °C.

2. Разработана методика определения теплофизических и эксплуатационных характеристик фракционного материала (дисперсных систем), которые в перспективе могут быть использованы для моделирования процессов горения в них с последующим проектированием устройств, заполненных слоем из частиц различных свойств и характеристик.

3. Основываясь на данных о габаритах ячейки фильтрационного слоя, обеспечивающей стабильный режим работы при испытаниях, экспериментально определены эффективные параметры активной (криптоловой) зоны горения: диаметром и высотой 0,11 м и 0,095 м, соответственно, формируя основу геометрии модели модуля фильтрационного горения теплогенератора.

4. Обоснован размер фракции криптола (5-10 мм), который способен обеспечить наиболее экономичное энергопотребление с расходом воздушной среды через слой $4{,}4\times10^{-3}$ $м^3/с$ при сопротивлении не превышающем величину 2,92 кПа.

5. Разработана новая конструкция теплогенератора с модулем фильтрационного горения, принцип организации горения в которой позволяет уменьшить объем топочного пространства, занимаемый факелом, сравнительно с традиционными топливосжигающими устройствами, тем самым снижая удельную металлоемкость перспективных установок в два и более раз. Геометрия теплогенератора позволяет формировать компактные, мобильные кластеры утилизационной и тепловой производительностью, необходимой для решения конкретных задач.

6. Конструкция и принцип действия модуля фильтрационного горения применимы в устройстве для утилизации продуктов пиролиза отходов, за счет широкого спектра совместно вводимых утилизируемых веществ различных агрегатных состояний (пиролизная жидкость, пиролизный газ, твердый углеродистый остаток).

7. Компанией ООО «Завод Аэроэнергопром», г. Минск, подтверждена работоспособность теплогенерирующей установки в опытно-промышленной лаборатории завода с идентичным горелочным устройством инфракрасного излучения в качестве модуля теплогенератора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. – URL: http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf (Дата обращения: 24.01.2025).

2. Энергетическая стратегия России до 2035 года. – URL: http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf (Дата обращения: 24.01.2025).

3. Bouallagui H., Touhami Y., Ben Cheikh R., Hamdi M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes // Process Biochemistry. – 2005. – Vol. 40. – Issue 3-4. – P. 989–995.

4. Cherubini F., Bargigli S., Ulgiati S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration // Energy. – 2009. – Vol. 34. – Issue 12. – P. 2116–2123.

5. Troschinetz A.M., Mihelcic J.R. Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries // Waste Management. – 2009. – Vol. 29. – Issue 2. – P. 915–923.

6. Чередниченко Р.О., Станьковски Л., Дорогочинская В.А. Современное состояние переработки отработанных смазочных материалов в РФ // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2010. – № 2. – С. 81–85.

7. Дьяков М.С., Солдатенко Н.А., Глушанкова И.С. Обоснование выбора ресурсосберегающих технологий утилизации отработанных масел // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 16–19.

8. Наркевич И.П., Печковский В.В. Утилизация и ликвидация отходов технологии органических веществ. – М.: Химия, 1984. – 239 с.

9. Дадашев М.Н., Кобелев К.В., Раджабов З.М., Филенко Д.Г., Капустин М.А., Винокуров В.А. Экологические и экономические аспекты безопасной утилизации отходов перерабатывающих предприятий // Экология промышленного производства. – 2011. – № 1. – С. 49–54.

10. Осипов В.И. Техногенез и современные задачи наук о Земле // Экология и промышленность России. – 2016. – № 3. – С. 4–12.

11. Лосюк Ю.А. Нетрадиционные источники энергии: учебное пособие. – Минск: Технопринт, 2005. – 233 с.

12. Байкулатова К.Ш. Вторичное сырье – эффективный резерв материальных ресурсов. – Алма-Ата: Казахстан, 1982. – 78 с.

13. Municipal waste generated by country in selected years (kg per capita) // Информационный статистический источник Eurostat [ISSN 2443-8219] – URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Municipal_ waste_generated_by_country_in_selected_years_(kg_per_capita).png
(Дата обращения: 24.01.2025).

14. Охрана окружающей среды в России. 2018: Стат. сб. / Росстат – 0-92 М., 2018. – 125 с.

15. Россия в цифрах. 2018: Крат. стат. сб. / Росстат – М. 2018-552с.

16. Равич Б.М., Окладников В.П., Лыгач В.Н., Менковский М.А. Комплексное использование сырья и отходов. – Москва: Химия, 1988. – 287 с.

17. Белогорьев А.М., Горевалов С.В., Косарев Ю.А., Куричев Н.К., Молачиев А.С., Цуневский А.Я. Топливно-энергетический комплекс России 2000-2010. Справочно-аналитический обзор: учебное пособие. – М.: Энергия, 2011. – 331 с.

18. Талантов А.В. Основы теории горения. Ч.1. – Казань: КАИ им. А.Н. Туполева, 1975. – 273 с.

19. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.: указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 // Собрание законодательства РФ, 2020. № 44. Ст. 6970.

20. Пальгунов П.П., Сумароков М.В. Утилизация промышленных отходов. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.

21. Николаев В. В., Ипатова Д. А. Реверсивная логистика в системе обращения с отходами на территории Арктической зоны Российской Федерации // Экономический вектор, – 2021. – № 2 (25). – С. 21–25.

22. Мизин И. А. Современные проблемы удаления ТБО из труднодоступных

районов Российской Арктики // Справочник эколога. 2014. №8 (20) С. 85-96.

23. Мухсинова Л.Х. Приоритетные направления устойчивого развития мировой энергетики // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – № 12. – С. 106–112.

24. Мазурин И.М., Понуровская В.В., Колотухин С.П. Экологический тупик от сжигания мусора и возможные пути его преодоления // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Человек и среда обитания – 2018. – Т.16. Вып. 3-4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskiy-tupik-ot-szhiganiya-musora-i-vozmozhnye-puti-ego-preodoleniya/viewer

(Дата обращения: 24.01.2025).

25. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: пер. с англ.– М.: Мир, 1984 – 310 с.

26. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. – М.: Наука, 1973. – 292 с.

27. Фискуль В.И. Новые материалы (состояние, проблемы, перспективы): учебное пособие. – М.: МИСиС, 1995. – 141 с.

28. Богомолов А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. – М.: Издательство литературы по строительству, 1977. – 252 с.

29. Пальгунов П.П., Сумароков М.В. Утилизация промышленных отходов. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.

30. Пат. на полез. модель 129599 Россия. МПК F23D14/12. Горелочное устройство инфракрасного излучения / **С.В. Долгов (С.В. Турчин)**, А.Ю. Долгих, А.С. Заворин и др.; заяв. 28.09.2012; опубл. 27.06.2013. – 2 с.

31. Short-term energy outlook. Energy Information Administration 2025 – URL: https://www.eia.gov/outlooks/steo/

(Дата обращения: 23.01.2025).

32. Соколов Э.М., Москвичев Ю.А., Фролова Е. А., Яманина Н.С., Филиппова О.П., Володин Н.И., Макаров В.М. Утилизация отходов производства и потребления: учебное пособие. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2006. – 388 с.

33. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. – Екатеринбург: Полиграфист, 2007. – 503 с.

34. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. – М.: Химия, 1982. – 288 с.

35. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды: учебное пособие. – М.: Химия, 1989. – 511 с.

36. Глушков Д., Паушкина К., Шабардин Д., Стрижак П. Экологические аспекты преобразования твердых бытовых отходов в энергию в составе композитного топлива // Журнал более чистого производства. – 2018. – Т.201. – С. 1029–1042

37. II Velo di Maya MAGAZINE – URL:
https://ilvelodimaya.eu/innovazioni-nella-pirolisi-per-il-trattamento-dei-rifiuti/
(Дата обращения: 23.01.2025).

38. Дьяков М.С., Солдатенко Н.А., Глушанкова И.С. Обоснование выбора ресурсосберегающих технологий утилизации отработанных масел // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 16–19.

39. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. – М.: Химия, 1990. – 304 с.

40. Иванова М.А., Муртазина Р.Т., Зенитова Л.А. Центрифугирование как способ регенерации поглощённой нефти сорбентом «Гринсорб» // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 21. – С. 127–129.

41. Бобович Б.Б. Переработка промышленных отходов. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1999. – 445 с.

42. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления: справочное издание. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. – 496 с.

43. Чуханов З.Ф., Хитрин Л.Н. Энерготехнологическое использование топлива. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 128 с.

44. Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. – Москва: Изд-во АН СССР, 1961. – 478 с.

45. Сафиев Х., Усманов Р., Азизов Б.С., Мирпочаев Х.А., Сайдалиев Ф.У., Каримов Э.Х. Получение синтез-газа из угля Фан-Ягнобского месторождения // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2012. – № 7. – С. 577–581.

46. Зайченко В.М. Повышение потребительских свойств твердого топлива из биомассы // Энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 66–68.

47. Д.В. Ермолаев. Технико-экономическое обоснование применения схем газификации при добыче битума // Энергетика Татарстана. – 2014. – № 3-4. – С. 51–56.

48. Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: автореферат … дис. канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2002. – 16 с.

49. Турчин С.В., Берикболов А.К. Переработка нефтеотходов пиролизом для энергогенерации // IV Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские Чтения»: сборник научных трудов. Томск – 2024. – С. 318–321.

50. Фридланд С.В., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н. Получение синтез-газа плазмохимической переработкой полимерных отходов // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – № 6. – С. 10–15.

51. Пат. 2218378 Россия. МПК C10 G15/12, B01 J19/08, H05 H1/00. Способ утилизации нефтяных шламов и плазмокаталитический реактор для его осуществления / А.Г. Каренгин, А.М. Шабалин; заяв. 09.12.2002; опубл. 10.12.2003. – 1 с.

52. Мамонтов Ю. Н., Разина Г. Н., Щетинина К. В. Плазмохимическая переработка хлорорганических отходов // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – № 6. – С. 77–82.

53. Кузнецов Ю.Н., Смирнов А.Н., Барышенко А.В., Степанчикова И.Г., Котлярова Н.Б., Калиниченко В.Н. Новый способ очистки сточных вод // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 11. – С. 26–29.

54. Иванов А.А. Экономическая оценка эффективности утилизации тонкодисперсных отходов добычи и обогащения угля Печорского бассейна: На

примере ОАО «Воркутауголь»: автореферат ... дис. канд. экон. наук. – Санкт-Петербург: СПГУ, 2001. – 23 с.

55. Ветошкин А.Г. Защита литосферы от отходов: учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 189 с.

56. Филатов Д.А., Селявский В.Ю. Потенциал использования углеводородокисляющих микроорганизмов для утилизации отработанных масел, а также жидких органических радиоактивных отходов // Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. трудов XI Междунар. конф. студ. и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 520–523.

57. Юзефович В.И. Организация сбора отработанных масел // Мир нефтепродуктов. – 2003. – № 3. – С. 28–30.

58. Razzell W.E. Chemical fixation, solidification of hazardous waste // Waste Management and Research. – 1990. – Vol. 8. – P. 105–111.

59. Shi C., Spence R. Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2004. – Vol. 34. – P. 391–417.

60. Achternbosch M., Bräutigam K.-R., Hartlieb N., Kupsch C., Richers U., Stemmermann P. Impact of the use of waste on trace element concentrations in cement and concrete // Waste Management and Research. – 2005. – Vol. 23. – P. 328–337.

61. Monosi S., Ruello M.L., Sani D. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production // Cement and Concrete Composites. – 2016. – Vol. 66. – P. 66–72.

62. Герценштейн Ф.Э., Шагивалеева Р.Г. Энергетика высокотемпературного жидкофазного окисления биоорганики // Известия Оренбургского государственного аграрного университета России. – 2009. – № 2. – С. 144–148.

63. Пат. 2684300 Россия. МПК F23L7/00, F23D 5/04. Паромасляное горелочное устройство / И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, О.В. Шарыпов, Е.П. Копьев; заяв. 09.02.2018; опубл. 05.04.2019. – 9 с.

64. Воздушные обогреватели «Thermobile» на отработанном масле // Федеральный информационный фонд отечественных и иностранных каталогов промышленной

продукции. – URL: https://thermobile-russia.ru/wp content/uploads/2017/05/Catalogue_Russisch.pdf
(Дата обращения: 23.01.2025).

65. Evans J.O. Recycling for the future // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 1996. – № 8. – С. 35–79.

66. Белов С.В. Охрана окружающей среды: учебное пособие – М.: Высшая школа, 1991. – 318 с.

67. Patent PL160434 Poland. International classification B09B5/00; C02F11/06. Method of utilizing oily wastes from petroleum refining industry / J. Pachowski, W. Tokaj, P. Wilenski and etc.; Priority number 30.05.1989; Publushed 31.03.1993. – 2 p.

68. Kleppinger E.W. Cement clinker: An environmental sink for residues from hazardous waste treatment in cement kilns // Waste Management. – 1993. – Vol. 13. – P. 553–572.

69. Hundrieser J. Innovative measuring technology on the burner cuts operating costs when using liquid substitute fuels // IEEE Cement Industry Technical Conference: 54th Cement Industry Technical Conference. – San Antonio: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2012. – P. 2–5 (Article number 6215680).

70. Пат. 2240352 Россия. МПК C21B5/00. Способ утилизации отработанных моторных масел / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, Ю.С. Карабасов и др.; заяв. 25.11.2003; опубл. 20.11.2004. – 4 с.

71. Харлампович Г.Д., Кудряшова Р.И. Безотходные технологические процессы в химической промышленности. – М.: Химия, 1978. – 280 с.

72. Антонов Д.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Рыбдылова О., Сажин С.С. Микровзрыв и самовоспламенение композитных капель топлива/воды // Горение и пламя. – 2019 – Т.210. – С. 479–489.

73. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Стрижак А.П. Экологические показатели сжигания перспективной угольно-водной суспензии, содержащей нефтепродукты // Журнал опасных материалов. – 2017 – Т.338. – С. 148–159.

74. Худолей В.В., Денисов В.Р., Гусаров Е.Е., Клинский А.В., Ливанов Г.А., Старцев А.А. Стратегия и национальный план действий по обеспечению

экологической безопасности в связи со Стокгольмской конвенцией о стойких органических загрязнителях // Сборник работ Гатчинского экологического движения. – 2011. – № 14. – С. 1–4 – URL: http://www.eco.nw.ru/lib/data/14/1/010114.pdf
(Дата обращения: 23.01.2025 года).

75. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.

76. Щеголев М.М. Топливо, топки и котельные установки. – Москва: Государственное изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 544 с.

77. Данилова О.Л. Костюченко П.А. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов. – Москва: Технопромстрой, 2006. – 668 с.

78. Богомолов А.И., Вигдорчик Д.Я., Маевский М.А. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. – 254 с.

79. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного излучения. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.

80. Василик Н.Я., Шмелев В.М. Радиационный коэффициент полезного действия и экологичность инфракрасных горелок сматрицами из пенометалла с керамическими покрытиями // Горение и взрыв. – 2015. – № 1. – С. 63–70.

81. Миссенар Ф.А. Лучистое отопление и охлаждение / Пер. с французского И.С. Утёвский. – М.: Гос. изд-во лит-ры по строительству, 1961. – 312 с.

82. Керамическая инфракрасная горелка «Гелиос» с объемной матрицей // Компания «Прометей» [1995–2014]. – URL: http://prometey.kg/gazovyie-kotlyi/keramicheskaya-infrakrasnaya-gorelka/
(Дата обращения: 23.01.2025 года).

83. Мазалов Ю.А., Шмелев В.М., Захаров А.А. Инфракрасные горелки с объемной матрицей и перспективы их применения в АПК // Труды ГОСНИТИ. – 2009. – № 1. – С. 128–131.

84. Шмелев В.М., Николаев В.М., Арутюнов В.С. Эффективные горелочные устройства на основе объемных матриц // Газохимия. – 2009. – №8. – С. 28–34.

85. Газовое конденсационное оборудование // Российский сайт компании «Viessmann» – URL: http://www.viessmann.ru/ru/zilye-zdania/kakaa-sistema-otoplenia.html

(Дата обращения: 23.01.2025 года).

86. Пат. 2125204 Россия. МПК F23D14/16, F24H1/40. Горелка / Ф. Дурст, Д. Тримис, Г. Димачек; заяв. 01.07.1994; опубл. 20.01.1999. – 11 с.

87. Пат. 2462661 Россия. МПК F23D14/14. Радиационная газовая горелка и способ проведения процесса горения в ней / В.К. Баев, А.Н. Николаевич, Д.В. Чусов и др.; заяв. 04.05.2011; опубл. 27.09.2012. – 11 с.

88. ООО «Белагро Бел», сеть магазинов «Хозтоварищ». Преимущества и особенности обогревателя «Солярогаз» – URL: https://hoztov.by/company/news/obogrevatel-solyarogaz-preimushchestva-i-osobennosti/

(Дата обращения: 24.01.2025 года).

89. Обогреватель газовый керамический. Обзор – URL: https://8sezon.ru/obogrevatel-gazovyy-keramicheskiy-sibiryachka/

(Дата обращения: 24.01.2025 года).

90. Третьяков Ю.Д. Керамика – материал будущего. – М.: Знание, 1987. – 48 с.

91. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.: ил.

92. Романова Е. А. Энергосберегающие системы газового отопления и вентиляции часть 1. Инфракрасные темные излучатели // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2005. – № 2. – С. 19–23.

93. Любин Д. Справочник по композиционным материалам / Пер. с англ. Т 1. – М.: Машиностроение, 1988. – 488 с.

94. Пат. 2310129 Россия. МПК F23D14/12. Универсальный пористый насадок для беспламенной газовой горелки / А.Н. Гущин, Л.С. Баев, Ю.М. Максимов и др.; заяв. 10.05.2006; опубл. 10.11.2007. – 9 с.

95. Пат. на полез. модель 136875 Россия. МПК F23D14/12. Горелочное устройство инфракрасного излучения / **С.В. Долгов (С.В. Турчин)**, А.Ю. Долгих, А.С. Заворин и др.; заяв. 23.07.2013; опубл. 20.01.2014. – 2 с.

96. Кулеш Р.Н., **Долгов С.В. (Турчин С.В.)**, Фисенко Р.Н., Макеев А.А. Высокотемпературная экспериментальная установка с самогенерирующейся защитной атмосферой // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докладов XII Всерос. научно-техн. конф. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – С. 166–169.

97. Казаков А.В., **Долгов С.В. (Турчин С.В.)** Низкотемпературная каталитическая конверсия углеродосодержащих материалов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 1. – С. 33–36.

98. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ., 1959. – 356 с.

99. Иванова А.В., Михайлова Н.А. Технологические испытания глин. ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.

100. Коаксиальная криптоловая печь // Институт химии и химической технологии СО РАН г. Красноярск, 2016 г. – URL: http://old.icct.ru/sites/default/files/Cryptol-01.pdf

(Дата обращения: 29.01.2025 г.).

101. Вейник А.И. Термодинамика. – Минск: Изд-во Министерства высш., среднего спец. и проф. образования Белорусской ССР, 1961. – 368 с.

102. Орлов П.Н., Скороходов Е.А. Краткий справочник металлиста. – М.: Машиностроение, 1986. – 959 с.

103. Вакулин А.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2010. – 255 с.

104. Янкелевич В.И. Наладка газомазутных промышленных котельных. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 216 с.: ил.

105. ГОСТ Р 52911-2013 Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги (с Поправкой).

106. ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010) Топливо твердое минеральное. Определение зольности (с Изменением N 1).

107. ГОСТ Р 55660-2013 Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ.

108. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013.

109. Носков А.С., Пай З.П. Технологические методы защиты атмосферы от вредных выбросов на предприятиях энергетики / СО РАН; Институт катализа; ГПНТБ. – Новосибирск, 1996 – 156 с.

110. Брянин С.В., Кондратова А.В. Функции постпирогенного угля в почвах бореальных лесов Дальнего Востока // Международный научно-исследовательский журнал (МНИЖ). – 2019. – № 12. – С. 169–178.

111. Yingying Lv, Fan Zhang, Yuqian Dou, Yunpu Zhai, Jinxiu Wang, Haijing Liu, Yongyao Xia, Bo Tua, Dongyuan Zhao. A comprehensive study on KOH activation of ordered mesoporous carbons and their supercapacitor application // Journal of Materials Chemistry (RSC Publishing). – 2012. – №22. – P. 93–99.

112. Филофеев, С.В. Каталитический пиролиз легких алканов в присутствии соединений металлов VI и VIII групп: дис. … канд. хим. наук: 02.00.04 / Филофеев Сергей Васильевич; науч. Рук. Ю.А. Александров; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». – Нижний Новгород, 2016. – 109 с.

113. Кузнецов Б.Н. Каталитическая химия растительной биомассы // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №12. – С 47–55.

114. Чудновский. А.Ф. Теплообмен в дисперсных средах. – М.: Гостехиздат, 1954. – 444 с.

115. Иоффе И.И., Письмен Л.М. Инженерная химия гетерогенного катализа. – Л.: Химия, 1972. – 464 с.

116. **Dolgov S.V.** (**Turchin S.V.)**, Visloguzov R.A., Khaustov S.A., Tabakaev R.B., Ermolaev A.N. Testing the design of technical solutions for liquid hydrocarbon wastes

fire disposal // MATEC Web of Conferences . - 2016 - Vol. 91, Article number 01024. - p. 1-5.

117. Dolgov S. (Turchin S.), Savchenko E., Khaustov S., Tabakaev R., Zavorin A. Disposal of liquid combustible wastes using flameless burners with porous carbon matrix // EPJ Web of Conferences. – 2016. – Vol. 110. – P. 1–5 (article number 01074).

118. **Долгов С.В. (Турчин С.В.)**, Заворин А.С., Долгих А.Ю., Субботин А.Н. Испытания горелочного устройства беспламенного горения и инфракрасного излучения // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 4. – С. 39–42.

119. **Долгов С.В. (Турчин С.В.)**, Хаустов С.А., Табакаев Р.Б. Тестирование конструктивного исполнения технических решений по огневой утилизации жидких углеводородных отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – № 9. – С. 49–56.

120. **Долгов С.В. (Турчин С.В.)**, Клочко К.И., Табакаев Р.Б. Испытания горелочного устройства // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2014. – № 2. – С. 38–41.

121. **Долгов С.В. (Турчин С.В.),** Заворин А.С., Долгих А.Ю., Фисенко Р.Н., Аэродинамические испытания горелочного устройства // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – №. 4. – С. 33–37.

122. Пат. 2616962 Россия. МПК F24C 5/00, F23C 3/00, F23G 7/05. Камера сгорания теплогенератора / **С.В. Долгов (С.В. Турчин)**, Е.К. Савченко, Р.Б. Табакаев, А.С. Заворин; заяв. 27.04.2016; опубл. 18.04.2017. – 9 с.

123. **Турчин С.В.**, Ковалева О.Г., Кулеш Р.Н. Теплогенератор с модулем фильтрационного горения для утилизации малотоннажных локаций жидких углеводородных отходов // XV Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России»: сборник научных трудов: Москва, 26 Апреля 2022. - С. 220-228.

124. Пат. 2747900 Россия. СПК F23C 3/002, F23G 7/005. Теплогенератор / **С.В. Турчин**, А.С. Заворин, А.Н. Субботин, Р.Н. Кулеш; заяв. 02.10.2020; опубл. 07.05.2021. – 16с.

125. Пелипенко В.Н. Газовые горелки инфракрасного излучения: учеб. пособие / В.Н. Пелипенко, Д.Ю. Слесарев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 118 с.: обл.

126. Ведрученко В.Р., Жданов Н.В., Об экологическом обосновании установки вторичного излучателя в цилиндрической топке водогрейного котла // Известия Транссиба. – 2011. – №. 2(6). – С. 64–67.

127. Вислогузов Р.А., Хаустова О.В., **(Долгов С.В.) Турчин С.В.** Тестирование различных пористых материалов применительно к теплогенераторам беспламенного горения // Современные тенденции котлостроения: материалы II международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 22 Марта 2018. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018 – С. 33-38.

128. Салганский Е.А. Типы структур волны фильтрационного горения при газификации твёрдого горючего // Ежегодник ИПХФ РАН. – 2004. – Т.1. – С. 132–134.

129. Выбор диаметров и теплогидравлический расчет трубопроводных систем. Руководство пользователя «Гидросистема». Москва, 2015.

130. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Машиностроение, 1975.

131. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. Санкт-Петербург, «Мир и семья», 2002.

132. Купрюнин А.А. Разработка технологических основ использования природного цеолита для денитрации дымовых газов котельных установок: дис. … канд. техн. наук: 05.14.14 / Томский политехнический университет. — Томск, 1998. — 169 с.

133. Ильина М.Н. Подготовка попутного нефтяного газа к сжиганию в условиях автономного энергообеспечения нефтепромыслов: дис. … канд. техн. наук: 05.14.04 / Томский политехнический университет. — Томск, 2009. — 162 с.

134. Будилов, О.И. Сорбентная очистка дымовых газов котельных установок: монография / О.И. Будилов, А.С. Заворин, А.А. Купрюнин. — Томск: STT, 2002. — 192 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АЗРФ – Арктическая зона Российской Федерации;

ГСМ – горюче-смазочные материалы;

ГВС – горячее водоснабжение;

Д – диоксины;

ДСД – допустимая суточная доза;

ЖУО – жидкие углеводородные отходы;

ЛВЖ – легковоспламеняющиеся жидкости;

НИР – научно-исследовательская работа;

НО – нефтяные отходы;

ПО – производственные отходы;

ПАВ – поверхностно-активные вещества;

ПАУВ – полиароматические углеводороды;

ПДК – предельно допустимая концентрация

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований;

СОМ – смазочные и охлаждающие масла;

СОЖ – смазочно-охлаждающие жидкости;

ТЭК – топливно-энергетический комплекс;

ТБО – твердые бытовые отходы;

МФГ – модуль фильтрационного горения.

Приложение А. Протоколы измерения температур криптолового слоя

Таблица А.1 – Измерения температур внутри криптолового слоя фракции 2-5 мм (нагрев снизу)

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %	t8, °C	δ, %
1	14:01:18	20,62485	0,48	20,6601	0,48	20,8118	0,48	20,7288	0,48	20,59875	0,49	21,1374	0,47	21,0725	0,47	20,64755	0,48
2	14:01:57	30,9748	0,32	21,3212	0,47	20,8293	0,48	20,7419	0,48	20,59675	0,49	21,1629	0,47	21,0787	0,47	20,65465	0,48
3	14:02:40	85,74825	0,12	37,44365	0,27	20,902	0,48	20,9866	0,48	20,6299	0,48	21,16945	0,47	21,11015	0,47	20,68305	0,48
4	14:03:23	154,9159	0,06	74,6393	0,13	21,54215	0,46	22,92795	0,44	20,668	0,48	21,20615	0,47	21,13055	0,47	20,73235	0,48
5	14:04:01	214,3289	0,05	118,6204	0,08	23,44375	0,43	27,63255	0,36	20,72065	0,48	21,2355	0,47	21,17315	0,47	20,7866	0,48
6	14:04:32	259,64175	0,04	157,1078	0,06	26,49045	0,38	34,13355	0,29	20,77775	0,48	21,28475	0,47	21,2205	0,47	20,8172	0,48
7	14:05:00	294,4446	0,03	188,19035	0,05	30,14445	0,33	41,5974	0,24	20,8512	0,48	21,352	0,47	21,2786	0,47	20,8982	0,48
8	14:05:34	333,83915	0,03	225,32615	0,04	36,28955	0,28	53,4467	0,19	21,0004	0,48	21,50665	0,46	21,3895	0,47	21,00165	0,48
9	14:06:01	361,9543	0,03	253,25825	0,04	42,4716	0,24	64,7133	0,15	21,19835	0,47	21,6901	0,46	21,5009	0,47	21,08595	0,47
10	14:06:32	391,82325	0,03	283,63735	0,04	51,06445	0,20	79,39025	0,13	21,5547	0,46	22,0376	0,45	21,6637	0,46	21,24185	0,47
11	14:07:01	415,5677	0,02	308,35985	0,03	59,70235	0,17	93,43035	0,11	22,03225	0,45	22,5447	0,44	21,85045	0,46	21,42305	0,47
12	14:07:30	437,80445	0,02	332,16405	0,03	69,55325	0,14	108,8242	0,09	22,726	0,44	23,26835	0,43	22,12485	0,45	21,6923	0,46
13	14:08:02	459,42825	0,02	355,9112	0,03	81,0565	0,12	126,05745	0,08	23,70085	0,42	24,30695	0,41	22,4958	0,44	22,04445	0,45
14	14:08:30	476,6741	0,02	375,2868	0,03	91,71685	0,11	141,48235	0,07	24,75545	0,40	25,4519	0,39	22,91785	0,44	22,433	0,45
15	14:09:00	493,8094	0,02	394,4832	0,03	103,66615	0,10	158,02215	0,06	26,18505	0,38	26,9476	0,37	23,4542	0,43	22,959	0,44
16	14:09:30	508,9918	0,02	411,78435	0,02	115,6272	0,09	173,8841	0,06	27,7891	0,36	28,6479	0,35	24,111	0,41	23,5742	0,42
17	14:10:00	523,5522	0,02	428,3655	0,02	128,38515	0,08	190,18325	0,05	29,72735	0,34	30,68815	0,33	24,9081	0,40	24,34425	0,41
18	14:10:30	536,49	0,02	443,1071	0,02	140,6769	0,07	205,39815	0,05	31,79235	0,31	32,91365	0,30	25,8112	0,39	25,17695	0,40
19	14:11:01	549,15425	0,02	457,6702	0,02	153,5607	0,07	221,0086	0,05	34,18095	0,29	35,46	0,28	26,8658	0,37	26,20415	0,38
20	14:11:30	560,42905	0,02	470,61435	0,02	165,71965	0,06	235,4182	0,04	36,57855	0,27	38,02065	0,26	28,0629	0,36	27,3301	0,37
21	14:12:00	571,23795	0,02	482,8862	0,02	177,74625	0,06	249,50325	0,04	39,167	0,26	40,8086	0,25	29,33965	0,34	28,55605	0,35
22	14:12:33	582,66285	0,02	495,97785	0,02	191,19435	0,05	264,87775	0,04	42,31775	0,24	44,12385	0,23	30,96175	0,32	30,12235	0,33

Дата: 18.01.2018

Таблица А.2 – Измерения температур внутри криптолового слоя фракции 2-5 мм (нагрев сверху)

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %	t8, °C	δ, %
1	16:29:44	21,12415	0,47	21,0898	0,47	21,2899	0,47	21,1698	0,47	21,0164	0,48	21,4742	0,47	20,9591	0,48	20,5563	0,49
2	16:30:16	24,32975	0,41	21,21485	0,47	21,3213	0,47	21,19735	0,47	21,04705	0,48	21,50	0,47	21,04125	0,48	20,6311	0,48
3	16:30:45	44,85755	0,22	23,3313	0,43	21,36325	0,47	21,25735	0,47	21,10605	0,47	21,5714	0,46	21,127	0,47	20,70335	0,48
4	16:31:20	87,9688	0,11	32,27715	0,31	21,4452	0,47	21,5271	0,46	21,17765	0,47	21,63905	0,46	21,2627	0,47	20,81995	0,48
5	16:32:00	151,567	0,07	54,0166	0,19	21,79885	0,46	22,8469	0,44	21,25505	0,47	21,68945	0,46	21,3459	0,47	20,93985	0,48
6	16:32:30	203,14925	0,05	78,82045	0,13	22,587	0,44	25,19935	0,40	21,3116	0,47	21,73887	0,46	21,4304	0,47	20,9971	0,48
7	16:33:00	251,5702	0,04	109,218	0,09	24,09435	0,42	29,0738	0,34	21,41975	0,47	21,8058	0,46	21,5085	0,46	21,09325	0,47
8	16:33:30	294,9018	0,03	142,90365	0,07	26,5542	0,38	34,59055	0,29	21,5257	0,46	21,88185	0,46	21,61465	0,46	21,17105	0,47
9	16:34:00	335,5056	0,03	177,7462	0,06	30,28415	0,33	42,3405	0,24	21,7286	0,46	22,00045	0,45	21,71835	0,46	21,25805	0,47
10	16:34:30	369,47535	0,03	209,74195	0,05	35,08265	0,29	51,6047	0,19	22,0229	0,45	22,1566	0,45	21,84395	0,46	21,35415	0,47
11	16:35:00	400,41755	0,02	239,4281	0,04	41,3605	0,24	63,0762	0,16	22,5256	0,44	22,4242	0,45	22,043	0,45	21,44585	0,47
12	16:35:30	426,6281	0,02	265,5734	0,04	48,67525	0,21	75,66345	0,13	23,21605	0,43	22,8382	0,44	22,26755	0,45	21,55275	0,46
13	16:36:00	450,5112	0,02	290,02575	0,03	57,38015	0,17	89,74695	0,11	24,19345	0,41	23,44485	0,43	22,5672	0,44	21,6902	0,46
14	16:36:31	471,9628	0,02	312,81585	0,03	67,2148	0,15	104,7166	0,10	25,5043	0,39	24,287	0,41	23,00475	0,43	21,87435	0,46
15	16:37:00	490,8071	0,02	332,85195	0,03	77,59	0,13	119,8905	0,08	27,07355	0,37	25,36925	0,39	23,49465	0,43	22,0859	0,45
16	16:37:30	508,1525	0,02	351,3528	0,03	88,75695	0,11	135,4952	0,07	29,00885	0,34	26,7459	0,37	24,1086	0,41	22,36415	0,45
17	16:38:00	524,09755	0,02	368,4777	0,03	100,4672	0,10	151,196	0,07	31,2804	0,32	28,34135	0,35	24,8605	0,40	22,7032	0,44
18	16:38:30	539,34705	0,02	385,77825	0,03	112,881	0,09	167,00535	0,06	33,96515	0,29	30,3442	0,33	25,7888	0,39	23,18335	0,43
19	16:39:01	553,52175	0,02	401,48225	0,02	125,5998	0,08	182,5874	0,05	36,9596	0,27	32,6487	0,31	26,8779	0,37	23,7494	0,42
20	16:39:30	566,08695	0,02	415,78095	0,02	137,54775	0,07	197,20765	0,05	40,08105	0,25	35,0962	0,28	28,0622	0,36	24,37485	0,41
21	16:40:00	577,9915	0,02	429,38965	0,02	150,4965	0,07	211,82445	0,05	43,43915	0,23	37,83995	0,26	29,42275	0,34	25,14015	0,40
22	16:40:30	589,4946	0,02	442,78995	0,02	163,3993	0,06	226,5456	0,04	47,09395	0,21	40,9036	0,24	30,94755	0,32	26,045	0,38
23	16:41:00	599,764	0,02	454,9472	0,02	175,724	0,06	240,33195	0,04	50,7524	0,20	44,02305	0,23	32,6025	0,31	27,08125	0,37

Дата: 22.01.2018

Таблица А.3 – Измерения температур внутри криптолового слоя фракции 5-10 мм (нагрев снизу)

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %	t8, °C	δ, %
1	14:51:07	22,63295	0,44	22,70395	0,44	22,90845	0,44	22,87655	0,44	23,0601	0,43	22,74205	0,44	22,51455	0,44	23,2013	0,43
2	14:51:30	22,63995	0,44	22,6719	0,44	22,8834	0,44	22,86975	0,44	23,03165	0,43	22,73895	0,44	22,50895	0,44	23,21435	0,43
3	14:52:00	24,25825	0,41	24,64945	0,41	22,9361	0,44	22,8754	0,44	23,04675	0,43	22,7474	0,44	22,50955	0,44	23,21675	0,43
4	14:52:30	35,81525	0,28	38,2022	0,26	23,2382	0,43	22,93355	0,44	23,01445	0,43	22,76235	0,44	22,51765	0,44	23,2445	0,43
5	14:53:00	63,4444915	0,16	68,7776	0,15	24,9175	0,40	23,2547	0,43	23,0396	0,43	22,78265	0,44	22,5254	0,44	23,2513	0,43
6	14:53:30	102,26325	0,10	109,34145	0,09	28,8233	0,35	24,20585	0,41	23,02985	0,43	22,77475	0,44	22,5358	0,44	23,22715	0,43
7	14:54:00	150,7314	0,07	158,1482	0,06	36,2308	0,28	26,4239	0,38	23,07345	0,43	22,81475	0,44	22,58185	0,44	23,1464	0,43
8	14:54:30	198,7157	0,05	205,74475	0,05	46,99505	0,21	30,0545	0,33	23,1447	0,43	22,86395	0,44	22,6114	0,44	22,9874	0,44
9	14:55:00	246,69535	0,04	253,06025	0,04	61,9831	0,16	35,60355	0,28	23,26265	0,43	22,98105	0,44	22,65895	0,44	22,7324	0,44
10	14:55:31	291,74835	0,03	296,98285	0,03	80,525	0,12	43,31105	0,23	23,47435	0,43	23,1449	0,43	22,70905	0,44	22,3549	0,45
11	14:56:00	330,90065	0,03	335,121	0,03	101,093	0,10	52,80225	0,19	23,81235	0,42	23,42655	0,43	22,7744	0,44	21,8943	0,46
12	14:56:31	369,16755	0,03	370,96605	0,03	125,03	0,08	64,90345	0,15	24,3661	0,41	23,91655	0,42	22,8663	0,44	21,34785	0,47
13	14:57:00	402,2758	0,02	401,50395	0,02	148,7081	0,07	78,3159	0,13	25,12185	0,40	24,6031	0,41	22,9655	0,44	20,74395	0,48
14	14:57:30	432,95605	0,02	429,84905	0,02	173,9364	0,06	93,76955	0,11	26,1681	0,38	25,6023	0,39	23,0819	0,43	20,0264	0,50
15	14:58:00	460,4302	0,02	454,6278	0,02	203,5967	0,05	109,6809	0,09	27,56515	0,36	26,84155	0,37	23,2349	0,43	19,32285	0,52
16	14:58:30	485,4627	0,02	477,86035	0,02	229,6971	0,04	126,89845	0,08	29,3181	0,34	28,41705	0,35	23,4034	0,43	18,727	0,53
17	14:59:00	507,65035	0,02	498,8449	0,02	254,86295	0,04	144,3256	0,07	31,52835	0,32	30,3891	0,33	23,65505	0,42	17,9933	0,56
18	14:59:31	527,71915	0,02	518,24485	0,02	278,9185	0,04	162,4769	0,06	34,2062	0,29	32,7679	0,31	23,9212	0,42	17,4263	0,57
19	15:00:00	545,2356	0,02	535,3774	0,02	300,407	0,03	180,17035	0,06	36,93895	0,27	35,38735	0,28	24,2689	0,41	16,907	0,59
20	15:00:30	562,05975	0,02	551,99265	0,02	321,5172	0,03	198,58545	0,05	40,03535	0,25	38,485	0,26	24,71525	0,40	16,3602	0,61
21	15:01:01	577,6338	0,02	567,40925	0,02	341,35995	0,03	216,9131	0,05	43,4926	0,23	41,9829	0,24	25,22835	0,40	16,1642	0,62
22	15:01:30	591,3351	0,02	581,12625	0,02	359,05945	0,03	233,9267	0,04	47,2252	0,21	45,65905	0,22	25,78565	0,39	16,15155	0,62
23	15:02:01	604,926	0,02	594,8138	0,02	376,95895	0,03	251,35255	0,04	51,68515	0,19	49,92505	0,20	26,4899	0,38	16,0511	0,62
24	15:02:30	616,976	0,02	607,09025	0,02	393,03935	0,03	267,36445	0,04	56,79545	0,18	54,6575	0,18	27,27335	0,37	15,83195	0,63

Дата: 23.03.2018

Таблица А.4 – Измерения температур внутри криптолового слоя фракции 5-10 мм (нагрев сверху)

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %	t8, °C	δ, %
1	9:46:11	23,7256	0,42	23,69845	0,42	24,11495	0,41	23,9921	0,42	24,3884	0,41	23,9006	0,42	23,8539	0,42	24,31015	0,41
2	9:46:30	23,79115	0,42	23,82335	0,42	24,13605	0,41	24,01665	0,42	24,40155	0,41	23,9246	0,42	23,87905	0,42	24,3071	0,41
3	9:47:00	26,6336	0,38	33,6592	0,30	24,33465	0,41	24,0686	0,42	24,4212	0,41	23,9265	0,42	23,9558	0,42	24,8725	0,40
4	9:47:30	39,00175	0,26	68,9266	0,15	25,2328	0,40	24,30195	0,41	24,45755	0,41	23,95925	0,42	24,0178	0,42	24,298	0,41
5	9:48:01	66,0259	0,15	120,82795	0,08	28,04785	0,36	24,98625	0,40	24,49	0,41	23,98055	0,42	24,07035	0,42	24,3277	0,41
6	9:48:30	105,08785	0,10	156,7443	0,06	33,5156	0,30	26,61395	0,38	24,52165	0,41	23,9744	0,42	24,07325	0,42	24,30685	0,41
7	9:49:00	149,88565	0,07	199,093	0,05	42,39105	0,24	29,9508	0,33	24,53255	0,41	23,9483	0,42	24,0523	0,42	24,28475	0,41
8	9:49:30	198,54495	0,05	248,2035	0,04	56,47735	0,18	35,83975	0,28	24,58675	0,41	23,9342	0,42	24,027715	0,42	24,2269	0,41
9	9:50:00	242,61425	0,04	291,5933	0,03	73,8422	0,14	43,8406	0,23	24,66695	0,41	23,9282	0,42	24,02215	0,42	24,1771	0,41
10	9:50:30	286,9094	0,03	333,4148	0,03	96,1201	0,10	55,04795	0,18	24,85145	0,40	24,00925	0,42	24,044	0,42	24,1161	0,41
11	9:51:00	325,9354	0,03	369,29825	0,03	120,2095	0,08	68,3163	0,15	25,11925	0,40	24,177	0,41	24,1036	0,41	24,01825	0,42
12	9:51:31	361,3801	0,03	402,31025	0,02	146,59915	0,07	84,31535	0,12	25,59045	0,39	24,4853	0,41	24,11055	0,41	23,83585	0,42
13	9:52:00	391,8805	0,03	430,55845	0,02	172,8882	0,06	101,6332	0,10	26,2351	0,38	25,02795	0,40	24,1315	0,41	23,6957	0,42
14	9:52:30	421,08865	0,02	457,4716	0,02	201,04515	0,05	121,53485	0,08	27,2418	0,37	25,87625	0,39	24,18655	0,41	23,5194	0,43
15	9:53:01	446,6019	0,02	480,8674	0,02	227,6714	0,04	141,5704	0,07	28,6186	0,35	27,05455	0,37	24,22185	0,41	23,3666	0,43
16	9:53:30	469,38945	0,02	501,57405	0,02	252,63375	0,04	161,64845	0,06	30,3675	0,33	28,5674	0,35	24,2865	0,41	23,2268	0,43
17	9:54:00	491,52185	0,02	521,6478	0,02	277,80615	0,04	183,06	0,05	32,6479	0,31	30,63985	0,33	24,442255	0,41	23,1508	0,43
18	9:54:30	511,1087	0,02	539,4693	0,02	300,76415	0,03	203,4605	0,05	35,2581	0,28	33,004	0,30	24,63745	0,41	23,1066	0,43
19	9:55:00	529,20225	0,02	555,9335	0,02	322,575	0,03	223,5036	0,04	38,24205	0,26	35,79645	0,28	24,9162	0,40	23,1869	0,43
20	9:55:30	546,3627	0,02	571,6408	0,02	343,72525	0,03	243,66125	0,04	41,8287	0,24	39,1676	0,26	25,28915	0,40	23,3817	0,43
21	9:56:00	561,5795	0,02	585,6515	0,02	362,9789	0,03	262,341	0,04	45,62695	0,22	42,8797	0,23	25,794	0,39	23,63795	0,42
22	9:56:30	575,9696	0,02	599,01675	0,02	381,4763	0,03	280,9285	0,04	50,15345	0,20	47,27705	0,21	26,4116	0,38	24,0564	0,42
23	9:57:01	589,1343	0,02	611,36785	0,02	398,7297	0,03	298,61725	0,03	55,33195	0,18	52,21985	0,19	27,1409	0,37	24,6639	0,41
24	9:57:30	600,7019	0,02	622,38765	0,02	414,13545	0,02	314,87945	0,03	60,77985	0,16	57,4262	0,17	28,0633	0,36	25,46265	0,39

Дата: 26.03.2018

Таблица А.5 – Измерения температур внутри криптолового слоя фракции 10-20 мм (нагрев снизу)

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %	t8, °C	δ, %
1	18:47:56	22,0685	0,45	24,06255	0,42	24,1913	0,41	23,2366	0,43	23,86875	0,42	23,35345	0,43	23,7236	0,42	23,8243	0,42
2	18:48:32	22,07365	0,45	24,65505	0,41	24,1673	0,41	23,2917	0,43	23,8694	0,42	23,41565	0,43	23,7311	0,42	23,8422	0,42
3	18:49:01	23,2256	0,43	31,5699	0,32	24,1906	0,41	23,39825	0,43	23,8803	0,42	23,4349	0,43	23,7424	0,42	23,8823	0,42
4	18:49:30	29,64305	0,34	53,7638	0,19	24,70645	0,40	23,8616	0,42	23,88575	0,42	23,4743	0,43	23,74135	0,42	23,83235	0,42
5	18:50:02	43,9365500	0,23	85,0102	0,12	26,716	0,37	25,43485	0,39	23,90905	0,42	23,49115	0,43	23,7655	0,42	23,8436	0,42
6	18:50:30	61,90895	0,16	120,5019	0,08	30,75375	0,33	28,47045	0,35	23,9623	0,42	23,56225	0,42	23,7761	0,42	23,82325	0,42
7	18:51:03	88,93085	0,11	156,06765	0,06	38,7326	0,26	35,91425	0,28	24,10635	0,41	23,72255	0,42	23,81085	0,42	23,8283	0,42
8	18:51:31	114,73275	0,09	215,4812	0,05	48,2178	0,21	44,4973	0,22	24,30155	0,41	23,99085	0,42	23,85545	0,42	23,8396	0,42
9	18:52:00	143,2621	0,07	266,18025	0,04	59,28275	0,17	51,974	0,19	24,63795	0,41	24,41425	0,41	23,8732	0,42	23,85075	0,42
10	18:52:33	176,322	0,06	313,1617	0,03	73,7221	0,14	62,05805	0,16	25,20055	0,40	25,1279	0,40	23,9216	0,42	23,86535	0,42
11	18:53:01	203,81955	0,05	349,01495	0,03	87,8552	0,11	72,25695	0,14	25,9702	0,39	26,07055	0,38	23,9764	0,42	23,88185	0,42
12	18:53:30	232,12975	0,04	380,40945	0,03	102,06855	0,10	82,4914	0,12	27,0482	0,37	27,31095	0,37	24,07365	0,42	23,9097	0,42
13	18:54:03	261,68975	0,04	412,95665	0,02	121,82605	0,08	95,13715	0,11	28,6773	0,35	29,1873	0,34	24,19955	0,41	23,9162	0,42
14	18:54:31	287,5022	0,03	438,12955	0,02	134,88975	0,07	106,46385	0,09	30,64555	0,33	31,2502	0,32	24,33975	0,41	23,93745	0,42
15	18:55:00	311,1501	0,03	461,2491	0,02	154,48265	0,06	126,54965	0,08	33,2158	0,30	33,90055	0,29	24,50215	0,41	23,94715	0,42
16	18:55:32	336,33865	0,03	485,9205	0,02	192,88565	0,05	162,55835	0,06	36,7163	0,27	37,4344	0,27	24,74355	0,40	23,9602	0,42
17	18:56:01	356,5821	0,03	504,8843	0,02	222,4028	0,04	183,72175	0,05	39,9368	0,25	40,53075	0,25	25,0278	0,40	23,95665	0,42
18	18:56:31	376,4701	0,03	523,6052	0,02	246,47705	0,04	204,64635	0,05	43,51915	0,23	43,94635	0,23	25,4084	0,39	23,9659	0,42
19	18:57:03	395,23085	0,03	540,9202	0,02	269,3889	0,04	224,53965	0,04	46,98045	0,21	47,74455	0,21	25,8898	0,39	23,9674	0,42
20	18:57:31	410,4937	0,02	555,53705	0,02	288,57205	0,03	241,9453	0,04	50,1054	0,20	51,4929	0,19	26,392	0,38	23,9859	0,42
21	18:58:01	426,3132	0,02	570,2412	0,02	308,16865	0,03	260,1824	0,04	53,71485	0,19	56,0174	0,18	27,00935	0,37	23,97	0,42
22	18:58:32	440,8976	0,02	583,86955	0,02	326,73745	0,03	277,8085	0,04	57,89445	0,17	61,3828	0,16	27,7184	0,36	23,98765	0,42
23	18:59:00	452,9873	0,02	595,72305	0,02	342,90895	0,03	293,2221	0,03	62,12905	0,16	66,3915	0,15	28,50515	0,35	23,98555	0,42
24	18:59:30	465,93865	0,02	607,6762	0,02	359,64665	0,03	309,3028	0,03	67,4885	0,15	71,91175	0,14	29,4326	0,34	24,01425	0,42
25	19:00:01	477,44085	0,02	618,2288	0,02	371,9332	0,03	322,3286	0,03	65,0782	0,15	69,8535	0,14	30,8601	0,32	24,01045	0,42
26	19:00:30	488,55905	0,02	628,1223	0,02	386,1593	0,03	336,3909	0,03	68,4321	0,15	73,7428	0,14	31,7737	0,31	24,04845	0,42

Дата: 19.03.2018

Таблица А.6 – Измерения температур внутри криптолового слоя фракции 10-20 мм (нагрев сверху)

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %	t8, °C	δ, %
1	16:14:26	22,0685	0,45	22,0929	0,45	22,64785	0,44	22,62355	0,44	22,3611	0,45	22,2437	0,45	22,08855	0,45	22,90615	0,44
2	16:15:00	23,67115	0,42	23,00685	0,43	22,65395	0,44	22,63615	0,44	22,39375	0,45	22,25525	0,45	22,13045	0,45	22,9102	0,44
3	16:15:31	46,7269	0,21	36,54885	0,27	22,9818	0,44	22,7237	0,44	22,40015	0,45	22,2684	0,45	22,1478	0,45	22,93235	0,44
4	16:16:00	91,02885	0,11	68,0039	0,15	24,58285	0,41	23,2572	0,43	22,4426	0,45	22,31635	0,45	22,16535	0,45	22,989	0,43
5	16:16:30	147,9275	0,07	115,099	0,09	28,66435	0,35	24,7489	0,40	22,489	0,44	22,34855	0,45	22,18755	0,45	23,0096	0,43
6	16:17:00	209,08665	0,05	172,9089	0,06	36,6755	0,27	28,05355	0,36	22,5494	0,44	22,36	0,45	22,2013	0,45	22,994	0,43
7	16:17:30	266,5989	0,04	231,36365	0,04	49,21975	0,20	33,95645	0,29	22,73095	0,44	22,442	0,45	22,2538	0,45	22,94625	0,44
8	16:18:00	316,79795	0,03	285,7358	0,03	65,8605	0,15	42,6529	0,23	23,00035	0,43	22,59995	0,44	22,29185	0,45	22,8895	0,44
9	16:18:30	359,78225	0,03	335,0845	0,03	86,4987	0,12	54,46425	0,18	23,4614	0,43	22,85555	0,44	22,33385	0,45	22,7884	0,44
10	16:19:00	397,96345	0,03	380,79985	0,03	111,5289	0,09	70,1241	0,14	24,21995	0,41	23,37275	0,43	22,41455	0,45	22,691	0,44
11	16:19:30	428,6319	0,02	418,71885	0,02	137,13795	0,07	87,8198	0,11	25,32905	0,39	24,18435	0,41	22,49665	0,44	22,5852	0,44
12	16:20:01	456,269	0,02	452,79475	0,02	164,9273	0,06	108,65235	0,09	26,96965	0,37	25,4526	0,39	22,6103	0,44	22,51525	0,44
13	16:20:30	479,2173	0,02	480,5674	0,02	191,87655	0,05	129,9361	0,08	29,0231	0,34	27,1237	0,37	22,7399	0,44	22,4158	0,45
14	16:21:00	501,16265	0,02	505,4884	0,02	216,73925	0,05	151,0926	0,07	31,72165	0,32	29,3541	0,34	22,9599	0,44	22,3607	0,45
15	16:21:31	520,50415	0,02	528,75925	0,02	242,3856	0,04	174,85545	0,06	35,2972	0,28	32,3461	0,31	23,2144	0,43	22,36065	0,45
16	16:22:00	537,0126	0,02	548,8397	0,02	266,4459	0,04	197,4014	0,05	39,3449	0,25	35,89285	0,28	23,5495	0,42	22,45395	0,45
17	16:22:31	552,91485	0,02	568,16475	0,02	290,34815	0,03	220,96505	0,05	44,358	0,23	40,32415	0,25	24,001	0,42	22,77715	0,44
18	16:23:00	566,95085	0,02	584,94335	0,02	311,86345	0,03	242,80345	0,04	49,8332	0,20	45,25925	0,22	24,53515	0,41	23,17135	0,43
19	16:23:30	580,4788	0,02	600,5866	0,02	332,75375	0,03	264,3337	0,04	56,1644	0,18	51,03505	0,20	25,2535	0,40	23,78925	0,42
20	16:24:00	592,93945	0,02	614,41215	0,02	351,9655	0,03	284,4711	0,04	62,93515	0,16	57,34915	0,17	26,1087	0,38	24,5871	0,41

Дата: 21.03.2018

Таблица А.7 – Измерения температур криптолового слоя при продувке воздухом (расход 25 л/мин), фракция 5-10 мм

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
1	14:41:47	21,5945	0,46	21,4089	0,47	21,467	0,47	20,9052	0,48	21,2241	0,47	20,9655	0,48	20,9418	0,48
2	14:42:06	21,6289	0,46	21,2624	0,47	21,3881	0,47	20,6963	0,48	21,1812	0,47	20,9443	0,48	20,7833	0,48
3	14:42:39	21,6467	0,46	21,2973	0,47	21,4276	0,47	20,7473	0,48	21,1157	0,47	20,9846	0,48	20,7645	0,48
4	14:43:00	21,5945	0,46	237,7915	0,04	353,5876	0,03	255,8514	0,04	280,6778	0,04	141,7887	0,07	39,1301	0,26
5	14:43:10	21,6331	0,46	306,7774	0,03	413,1587	0,02	394,6152	0,03	389,0246	0,03	302,2991	0,03	34,6429	0,29
6	14:43:20	21,6543	0,46	335,0318	0,03	439,8079	0,02	443,3388	0,02	425,4435	0,02	358,0876	0,03	32,2182	0,31
7	14:43:30	21,6167	0,46	348,066	0,03	452,2712	0,02	463,2863	0,02	439,861	0,02	376,6146	0,03	31,2396	0,32
8	14:43:45	21,5209	0,46	348,754	0,03	453,5992	0,02	466,5717	0,02	440,5919	0,02	375,0361	0,03	34,7457	0,29
9	14:44:00	21,0274	0,48	167,637	0,06	414,4465	0,02	449,0405	0,02	434,9985	0,02	414,0595	0,02	77,6526	0,13
10	14:44:30	21,1535	0,47	46,1425	0,22	285,1886	0,04	377,1994	0,03	388,1895	0,03	404,8202	0,02	109,5436	0,09
11	14:45:00	21,1926	0,47	26,191	0,38	161,4502	0,06	278,9759	0,04	324,1409	0,03	366,7455	0,03	107,5594	0,09
12	14:45:30	21,2248	0,47	22,4761	0,44	82,7722	0,12	185,0532	0,05	253,6842	0,04	311,084	0,03	100,0033	0,10
13	14:46:00	21,2195	0,47	21,6216	0,46	43,9915	0,23	110,3983	0,09	182,2269	0,05	264,0004	0,04	94,2341	0,11
14	14:46:30	21,3125	0,47	21,493	0,47	29,428	0,34	62,2771	0,16	118,6581	0,08	199,7658	0,05	86,9696	0,11
15	14:47:00	21,4527	0,47	21,3462	0,47	25,2758	0,40	40,5432	0,25	77,5807	0,13	139,6071	0,07	75,4814	0,13
16	14:47:30	21,6177	0,46	21,4405	0,47	23,927	0,42	31,8396	0,31	55,8257	0,18	92,4772	0,11	66,5074	0,15
17	14:48:00	21,7505	0,46	21,4278	0,47	23,5032	0,43	28,4273	0,35	45,5811	0,22	63,2392	0,16	59,2234	0,17
18	14:48:30	21,8959	0,46	21,3817	0,47	23,3062	0,43	27,1216	0,37	41,21	0,24	49,3664	0,20	54,8646	0,18
19	14:49:00	22,0429	0,45	21,4942	0,47	23,2339	0,43	26,4089	0,38	38,9915	0,26	43,1503	0,23	52,0145	0,19
20	14:49:30	22,1836	0,45	21,5767	0,46	23,1916	0,43	26,0319	0,38	37,505	0,27	39,9413	0,25	50,0606	0,20
21	14:50:00	22,4191	0,45	21,5616	0,46	23,2448	0,43	25,7052	0,39	36,3529	0,28	38,1886	0,26	48,8736	0,20
22	14:50:30	22,6022	0,44	21,8014	0,46	23,1654	0,43	25,4433	0,39	35,4038	0,28	36,9578	0,27	47,9015	0,21
23	14:51:00	22,8139	0,44	21,7679	0,46	23,2166	0,43	25,3061	0,40	34,5449	0,29	35,926	0,28	47,0091	0,21
24	14:51:30	22,9678	0,44	21,8893	0,46	23,2353	0,43	25,1627	0,40	33,8574	0,30	34,9955	0,29	46,2706	0,22
25	14:52:00	23,0792	0,43	21,9894	0,45	23,3006	0,43	25,0277	0,40	33,1483	0,30	34,2219	0,29	45,4404	0,22
26	14:52:30	23,3057	0,43	22,0857	0,45	23,4128	0,43	24,886	0,40	32,4694	0,31	33,482	0,30	44,7478	0,22
27	14:53:00	23,4888	0,43	22,1603	0,45	23,3577	0,43	24,7344	0,40	31,7264	0,32	32,7566	0,31	44,1767	0,23

Продолжение таблицы А.7

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
28	14:53:30	23,6644	0,42	22,3006	0,45	23,4477	0,43	24,5892	0,41	31,1441	0,32	32,1248	0,31	43,4333	0,23
29	14:54:00	23,8844	0,42	22,3106	0,45	23,506	0,43	24,5168	0,41	30,7392	0,33	31,5217	0,32	42,8229	0,23
30	14:54:30	24,0623	0,42	22,4891	0,44	23,4752	0,43	24,5039	0,41	30,2742	0,33	31,1077	0,32	42,2133	0,24
31	14:55:00	24,2289	0,41	22,5529	0,44	23,599	0,42	24,4966	0,41	29,8507	0,34	30,5736	0,33	41,5696	0,24
32	14:55:30	24,3381	0,41	22,66	0,44	23,6071	0,42	24,4455	0,41	29,4658	0,34	30,0802	0,33	41,0259	0,24
33	14:56:00	24,4134	0,41	22,6955	0,44	23,6209	0,42	24,3307	0,41	29,155	0,34	29,6924	0,34	40,6337	0,25
34	14:56:30	24,551	0,41	22,8017	0,44	23,7321	0,42	24,2016	0,41	28,8113	0,35	29,2173	0,34	40,0437	0,25
35	14:57:00	24,6876	0,41	22,8694	0,44	23,7579	0,42	24,2159	0,41	28,4935	0,35	28,9632	0,35	39,5378	0,25
36	14:57:30	24,8784	0,40	22,9303	0,44	23,8205	0,42	24,1633	0,41	28,2907	0,35	28,6725	0,35	39,0511	0,26
37	14:58:00	24,9256	0,40	22,9666	0,44	23,9079	0,42	24,1439	0,41	27,9165	0,36	28,2956	0,35	38,7013	0,26
38	14:58:30	25,0738	0,40	23,062	0,43	24,0905	0,42	24,2347	0,41	27,7428	0,36	28,0454	0,36	38,2476	0,26
39	14:59:00	25,2229	0,40	23,162	0,43	24,0747	0,42	24,2173	0,41	27,6215	0,36	27,8867	0,36	37,8979	0,26
40	14:59:30	25,4591	0,39	23,2464	0,43	24,1907	0,41	24,2534	0,41	27,4018	0,36	27,6315	0,36	37,575	0,27

Дата: 26.05.2018

Таблица А.8 – Измерения температур криптолового слоя при продувке воздухом (расход 35 л/мин), фракция 5-10 мм

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
1	13:27:30	25,1358	0,40	30,8812	0,32	32,8429	0,30	33,5495	0,30	35,0832	0,29	35,5663	0,28	33,6492	0,30
2	13:27:46	25,1435	0,40	30,7861	0,32	32,6857	0,31	33,5086	0,30	34,9359	0,29	35,4315	0,28	33,6539	0,30
3	13:28:00	25,1182	0,40	181,9766	0,05	235,396	0,04	188,3076	0,05	182,5092	0,05	97,3456	0,10	57,8275	0,17
4	13:28:10	25,0274	0,40	269,0127	0,04	331,1086	0,03	315,6645	0,03	305,3534	0,03	217,4356	0,05	55,0266	0,18
5	13:28:20	25,1106	0,40	302,1587	0,03	367,1679	0,03	363,6478	0,03	348,7373	0,03	271,3776	0,04	52,4708	0,19
6	13:28:31	25,238	0,40	317,2529	0,03	383,2815	0,03	388,1786	0,03	368,9089	0,03	296,1198	0,03	49,8093	0,20
7	13:28:44	25,2324	0,40	320,2817	0,03	386,5912	0,03	398,3581	0,03	375,4978	0,03	304,6346	0,03	48,3329	0,21
8	13:29:00	25,0592	0,40	153,1755	0,07	331,6498	0,03	394,3322	0,03	377,4073	0,03	331,0811	0,03	80,2467	0,12
9	13:29:20	25,0979	0,40	44,5812	0,22	216,6545	0,05	351,4104	0,03	359,518	0,03	348,2301	0,03	121,6639	0,08
10	13:29:45	25,0405	0,40	27,1387	0,37	115,8406	0,09	269,244	0,04	313,351	0,03	335,1555	0,03	130,12	0,08
11	13:30:01	25,078	0,40	25,3637	0,39	77,2414	0,13	212,9186	0,05	275,6323	0,04	319,4086	0,03	131,5504	0,08
12	13:30:30	25,0962	0,40	24,4734	0,41	40,9193	0,24	117,7216	0,08	192,1225	0,05	276,6992	0,04	124,6521	0,08
13	13:31:00	25,1731	0,40	24,3929	0,41	30,3804	0,33	61,1345	0,16	115,5618	0,09	217,5708	0,05	109,8143	0,09
14	13:31:31	25,2533	0,40	24,3632	0,41	27,7632	0,36	37,6794	0,27	66,9772	0,15	147,3184	0,07	94,1876	0,11
15	13:32:00	25,3328	0,39	24,3413	0,41	26,9154	0,37	30,4326	0,33	46,6236	0,21	92,4228	0,11	79,0336	0,13
16	13:32:30	25,2857	0,40	24,3506	0,41	26,711	0,37	28,2322	0,35	38,9747	0,26	61,2854	0,16	67,6118	0,15
17	13:33:00	25,4166	0,39	24,3098	0,41	26,6081	0,38	27,3926	0,37	35,8702	0,28	46,8987	0,21	59,9082	0,17
18	13:33:30	25,6992	0,39	24,3613	0,41	26,542	0,38	26,9982	0,37	34,5858	0,29	41,3066	0,24	55,6727	0,18
19	13:34:00	25,8509	0,39	24,4714	0,41	26,5413	0,38	26,789	0,37	33,7683	0,30	38,7435	0,26	53,2343	0,19
20	13:34:30	25,9937	0,38	24,6133	0,41	26,4604	0,38	26,655	0,38	33,062	0,30	37,3339	0,27	51,5451	0,19
21	13:35:00	26,2655	0,38	24,6752	0,41	26,4635	0,38	26,6439	0,38	32,4875	0,31	36,3858	0,27	50,3977	0,20
22	13:35:30	26,5045	0,38	24,7343	0,40	26,5159	0,38	26,4872	0,38	32,0227	0,31	35,4455	0,28	49,289	0,20
23	13:36:00	26,6679	0,37	24,8304	0,40	26,4772	0,38	26,4548	0,38	31,5769	0,32	34,7093	0,29	48,3131	0,21
24	13:36:30	26,9248	0,37	24,8968	0,40	26,6168	0,38	26,433	0,38	31,2365	0,32	34,1722	0,29	47,3427	0,21
25	13:37:00	27,1357	0,37	25,0059	0,40	26,7173	0,37	26,4345	0,38	30,8953	0,32	33,5807	0,30	46,547	0,21
26	13:37:30	27,312	0,37	25,1641	0,40	26,7655	0,37	26,3158	0,38	30,5712	0,33	33,1437	0,30	45,7741	0,22
27	13:38:00	27,4811	0,36	25,2425	0,40	26,7064	0,37	26,2632	0,38	30,2874	0,33	32,5809	0,31	45,0063	0,22

Продолжение таблицы А.8

д/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
28	13:38:30	27,6989	0,36	25,4368	0,39	26,8765	0,37	26,404	0,38	30,0317	0,33	32,1435	0,31	44,2717	0,23
29	13:39:01	27,8574	0,36	25,377	0,39	26,8985	0,37	26,3522	0,38	29,7993	0,34	31,7909	0,31	43,5448	0,23
30	13:39:30	28,006	0,36	25,5605	0,39	26,9847	0,37	26,3278	0,38	29,6806	0,34	31,4345	0,32	42,9031	0,23
31	13:40:00	28,1087	0,36	25,5812	0,39	26,9931	0,37	26,4028	0,38	29,5223	0,34	31,1031	0,32	42,4559	0,24
32	13:40:31	28,2221	0,35	25,7561	0,39	27,1513	0,37	26,4003	0,38	29,402	0,34	30,8521	0,32	41,6748	0,24
33	13:41:00	28,2999	0,35	25,8257	0,39	27,2108	0,37	26,4611	0,38	29,1774	0,34	30,5308	0,33	41,0933	0,24
34	13:41:30	28,4851	0,35	25,8988	0,39	27,2595	0,37	26,5971	0,38	29,0887	0,34	30,2605	0,33	40,6288	0,25
35	13:42:01	28,412	0,35	25,9529	0,39	27,3596	0,37	26,4664	0,38	29,0542	0,34	30,117	0,33	40,188	0,25
36	13:42:30	26,9229	0,37	26,6318	0,38	28,2988	0,35	27,1614	0,37	31,0392	0,32	32,8222	0,30	41,7683	0,24
37	13:43:00	26,6824	0,37	27,4172	0,36	28,9671	0,35	28,0147	0,36	32,3656	0,31	34,8894	0,29	41,9656	0,24
38	13:43:31	26,6035	0,38	27,9963	0,36	29,6258	0,34	28,8748	0,35	33,4084	0,30	36,5387	0,27	41,9019	0,24

Дата: 23.05.2018

Таблица А.9 – Измерения температур криптолового слоя при продувке воздухом (расход 45 л/мин), фракция 5-10 мм

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
1	12:46:34	25,5439	0,39	34,0715	0,29	36,6872	0,27	37,3884	0,27	38,803	0,26	39,0324	0,26	34,9231	0,29
2	12:47:01	25,4059	0,39	33,9934	0,29	36,4444	0,27	37,2485	0,27	38,6273	0,26	38,7631	0,26	34,9956	0,29
3	12:47:30	25,2513	0,40	27,6163	0,36	30,3885	0,33	29,798	0,34	33,207	0,30	33,5043	0,30	32,3287	0,31
4	12:48:01	25,1122	0,40	25,9939	0,38	28,3598	0,35	26,1201	0,38	29,7967	0,34	29,1201	0,34	29,9909	0,33
5	12:48:12	25,2133	0,40	26,9191	0,37	30,298	0,33	27,5932	0,36	31,4654	0,32	30,5247	0,33	30,9668	0,32
6	12:48:31	25,1203	0,40	299,9665	0,03	341,8405	0,03	310,9474	0,03	327,9004	0,03	183,9608	0,05	61,2266	0,16
7	12:48:41	25,1095	0,40	360,6629	0,03	409,6213	0,02	405,5771	0,02	405,0097	0,02	308,1752	0,03	58,2304	0,17
8	12:48:51	25,133	0,40	381,2925	0,03	435,5496	0,02	442,5345	0,02	433,5508	0,02	348,8696	0,03	55,9806	0,18
9	12:49:00	25,2199	0,40	387,1905	0,03	445,1827	0,02	459,2505	0,02	444,6844	0,02	360,3373	0,03	54,0304	0,19
10	12:49:20	25,1495	0,40	380,0167	0,03	442,5062	0,02	465,2851	0,02	443,1603	0,02	352,7575	0,03	51,0546	0,20
11	12:50:01	25,0335	0,40	44,6721	0,22	299,356	0,03	408,747	0,02	406,1906	0,02	357,7218	0,03	190,192	0,05
12	12:50:30	25,2502	0,40	27,1957	0,37	132,8671	0,08	302,2907	0,03	329,6642	0,03	323,9814	0,03	196,7041	0,05
13	12:51:01	25,4578	0,39	24,7789	0,40	51,0585	0,20	167,4275	0,06	224,71	0,04	264,8685	0,04	175,1137	0,06
14	12:51:31	25,6183	0,39	24,5094	0,41	32,049	0,31	77,2253	0,13	128,7735	0,08	197,0637	0,05	144,9168	0,07
15	12:52:00	25,7108	0,39	24,4991	0,41	28,4605	0,35	41,0937	0,24	69,4323	0,14	125,2611	0,08	111,505	0,09
16	12:52:30	25,9652	0,39	24,4708	0,41	27,857	0,36	31,1987	0,32	45,8366	0,22	78,244	0,13	86,3406	0,12
17	12:53:01	26,1948	0,38	24,7049	0,40	27,6442	0,36	28,7992	0,35	38,3234	0,26	56,0743	0,18	70,8846	0,14
18	12:53:30	26,4949	0,38	24,7489	0,40	27,508	0,36	28,1377	0,36	36,0543	0,28	48,0931	0,21	63,4206	0,16
19	12:54:00	26,6608	0,38	24,8506	0,40	27,4554	0,36	27,8121	0,36	34,8481	0,29	45,0357	0,22	59,5567	0,17
20	12:54:31	26,9117	0,37	25,0497	0,40	27,4714	0,36	27,5374	0,36	34,0773	0,29	43,0377	0,23	56,9876	0,18
21	12:55:00	27,1473	0,37	25,2084	0,40	27,4825	0,36	27,5064	0,36	33,4451	0,30	41,6349	0,24	55,0917	0,18
22	12:55:30	27,3851	0,37	25,2578	0,40	27,5284	0,36	27,4214	0,36	32,9543	0,30	40,5214	0,25	53,4855	0,19
23	12:56:01	27,6088	0,36	25,5395	0,39	27,5661	0,36	27,3503	0,37	32,5138	0,31	39,4659	0,25	51,8762	0,19
24	12:56:30	27,9261	0,36	25,5133	0,39	27,5791	0,36	27,3031	0,37	31,9743	0,31	38,4368	0,26	50,5874	0,20
25	12:57:00	28,0556	0,36	25,725	0,39	27,5816	0,36	27,3105	0,37	31,7375	0,32	37,5801	0,27	49,2126	0,20
26	12:57:31	28,1927	0,35	25,891	0,39	27,6163	0,36	27,3907	0,37	31,3918	0,32	36,7994	0,27	47,9942	0,21
27	12:58:00	28,3615	0,35	25,9466	0,39	27,7434	0,36	27,3768	0,37	31,1082	0,32	36,0665	0,28	46,8886	0,21

Продолжение таблицы А.9

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
28	12:58:30	28,5749	0,35	26,0601	0,38	27,8319	0,36	27,2931	0,37	30,7745	0,32	35,4705	0,28	45,7774	0,22
29	12:59:00	28,7398	0,35	26,2389	0,38	27,8496	0,36	27,3132	0,37	30,586	0,33	34,8913	0,29	44,8843	0,22
30	12:59:30	28,9429	0,35	26,3506	0,38	27,9757	0,36	27,3527	0,37	30,401	0,33	34,2772	0,29	43,9828	0,23
31	13:00:00	29,0515	0,34	26,4619	0,38	27,9814	0,36	27,4288	0,36	30,1865	0,33	33,7849	0,30	43,0993	0,23
32	13:00:30	29,1672	0,34	26,5985	0,38	28,0897	0,36	27,3542	0,37	30,0493	0,33	33,3619	0,30	42,2808	0,24
33	13:01:00	29,2532	0,34	26,64	0,38	28,0872	0,36	27,3578	0,37	29,8426	0,34	32,8263	0,30	41,4516	0,24
34	13:01:30	29,4801	0,34	26,7946	0,37	28,2342	0,35	27,3092	0,37	29,72	0,34	32,4933	0,31	40,7054	0,25
35	13:02:00	29,7594	0,34	26,9654	0,37	28,2489	0,35	27,4479	0,36	29,6734	0,34	32,0865	0,31	40,1269	0,25

Дата: 23.05.2018

Таблица А.10 – Измерения температур криптолового слоя при продувке воздухом (расход 25 л/мин), фракция 10-20 мм

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
1	14:47:29	22,0936	0,45	26,4226	0,38	27,6029	0,36	27,7082	0,36	28,2836	0,35	28,1456	0,36	22,4358	0,45
2	14:48:09	22,0162	0,45	26,4041	0,38	27,4621	0,36	27,5272	0,36	28,1639	0,36	28,0062	0,36	24,0128	0,42
3	14:48:20	22,0381	0,45	174,8378	0,06	229,3659	0,04	240,4124	0,04	250,4754	0,04	143,5391	0,07	49,8382	0,20
4	14:48:30	22,0129	0,45	282,5125	0,04	303,6146	0,03	388,1694	0,03	361,3408	0,03	303,0077	0,03	51,4303	0,19
5	14:48:40	22,1309	0,45	325,3331	0,03	323,2118	0,03	440,969	0,02	405,4943	0,02	370,4005	0,03	53,9165	0,19
6	14:48:51	22,1086	0,45	246,3553	0,04	324,1652	0,03	463,0272	0,02	424,4959	0,02	403,9709	0,02	55,583	0,18
7	14:49:10	21,8583	0,46	214,8771	0,05	229,5627	0,04	450,3743	0,02	405,2769	0,02	419,0924	0,02	95,261	0,10
8	14:49:31	21,8055	0,46	71,5656	0,14	151,6788	0,07	388,0547	0,03	346,2024	0,03	399,4926	0,03	140,1439	0,07
9	14:50:00	21,8724	0,46	40,3964	0,25	90,7426	0,11	287,816	0,03	293,1973	0,03	344,4815	0,03	149,5717	0,07
10	14:50:30	21,9163	0,46	24,8385	0,40	58,3554	0,17	197,5334	0,05	190,62	0,05	286,8944	0,03	141,0641	0,07
11	14:51:01	22,0024	0,45	22,5532	0,44	42,4526	0,24	124,7469	0,08	131,8927	0,08	227,7987	0,04	127,4212	0,08
12	14:51:30	22,0306	0,45	21,921	0,46	35,5805	0,28	77,9446	0,13	91,6216	0,11	175,1274	0,06	112,3714	0,09
13	14:52:00	22,1414	0,45	21,7284	0,46	32,2028	0,31	51,0919	0,20	66,5628	0,15	128,9837	0,08	97,7807	0,10
14	14:52:31	22,202	0,45	21,7143	0,46	30,5998	0,33	37,7017	0,27	52,2332	0,19	93,0021	0,11	84,3468	0,12
15	14:53:00	22,3484	0,45	21,6811	0,46	29,7374	0,34	31,7419	0,32	44,983	0,22	69,8425	0,14	73,9392	0,14
16	14:54:01	22,6734	0,44	21,6701	0,46	28,7761	0,35	27,6207	0,36	38,5133	0,26	46,7816	0,21	60,7996	0,16
17	14:54:30	22,8612	0,44	21,8132	0,46	28,3851	0,35	26,8852	0,37	36,961	0,27	41,9326	0,24	57,0892	0,18
18	14:55:00	23,0706	0,43	21,818	0,46	28,1097	0,36	26,41	0,38	35,9098	0,28	39,0508	0,26	54,4728	0,18
19	14:55:31	23,1962	0,43	21,9019	0,46	27,8257	0,36	26,0533	0,38	34,9211	0,29	37,1315	0,27	52,3301	0,19
20	14:56:30	23,3283	0,43	22,0325	0,45	27,22	0,37	25,8808	0,39	33,4645	0,30	34,7906	0,29	49,3838	0,20
21	14:57:01	23,6729	0,42	22,1097	0,45	27,1633	0,37	25,4248	0,39	32,8377	0,30	33,8683	0,30	48,2908	0,21
22	14:57:30	23,8531	0,42	22,2137	0,45	27,0208	0,37	25,3259	0,39	32,3334	0,31	33,2784	0,30	47,1576	0,21
23	14:58:00	23,9879	0,42	22,2562	0,45	26,8765	0,37	25,1099	0,40	31,8274	0,31	32,5865	0,31	46,2279	0,22
24	14:58:31	24,212	0,41	22,2569	0,45	26,5436	0,38	25,0432	0,40	31,2787	0,32	31,9227	0,31	45,2762	0,22
25	14:59:00	24,2154	0,41	22,3486	0,45	26,5878	0,38	24,8964	0,40	30,8845	0,32	31,4266	0,32	44,4193	0,23
26	15:00:01	24,422	0,41	22,4455	0,45	26,2051	0,38	24,6435	0,41	29,9573	0,33	30,4718	0,33	42,7759	0,23
27	15:00:30	24,529	0,41	22,5531	0,44	26,2269	0,38	24,6774	0,41	29,6605	0,34	30,0892	0,33	42,0402	0,24

Продолжение таблицы А.10

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
28	15:01:01	24,6652	0,41	22,6384	0,44	26,123	0,38	24,7433	0,40	29,3733	0,34	29,7078	0,34	41,2868	0,24
29	15:01:31	24,8261	0,40	22,7216	0,44	26,143	0,38	24,6364	0,41	29,1676	0,34	29,41	0,34	40,5754	0,25
30	15:02:00	24,9838	0,40	22,7308	0,44	25,9769	0,38	24,622	0,41	28,7969	0,35	29,0212	0,34	40,0088	0,25
31	15:02:30	25,1319	0,40	22,8533	0,44	25,919	0,39	24,5675	0,41	28,6038	0,35	28,6899	0,35	39,2602	0,25
32	15:03:01	25,2919	0,40	22,9522	0,44	25,9061	0,39	24,451	0,41	28,2538	0,35	28,4209	0,35	38,8025	0,26
33	15:03:30	25,3918	0,39	23,0021	0,43	25,8993	0,39	24,4886	0,41	28,1085	0,36	28,2198	0,35	38,1112	0,26
34	15:04:00	25,4599	0,39	23,1169	0,43	25,8255	0,39	24,5199	0,41	27,8951	0,36	27,925	0,36	37,5868	0,27

Дата: 29.05.2018

Таблица А.11 – Измерения температур криптолового слоя при продувке воздухом (расход 35 л/мин), фракция 10-20 мм

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
1	10:48:37	20,2688	0,49	19,8977	0,50	20,0217	0,50	19,4087	0,52	19,5923	0,51	19,519	0,51	19,327	0,52
2	10:49:15	20,3416	0,49	19,9119	0,50	19,9361	0,50	19,3523	0,52	19,6422	0,51	19,4954	0,51	19,2755	0,52
3	10:50:03	20,4466	0,49	19,7506	0,51	20,0084	0,50	19,2692	0,52	19,5243	0,51	19,4377	0,51	19,3281	0,52
4	10:50:12	20,3757	0,49	134,9885	0,07	294,3664	0,03	236,3801	0,04	212,0357	0,05	124,0602	0,08	44,8452	0,22
5	10:50:22	20,3935	0,49	247,9364	0,04	355,4845	0,03	397,1577	0,03	352,0681	0,03	285,2289	0,04	47,2407	0,21
6	10:50:32	20,516	0,49	306,2536	0,03	380,4529	0,03	457,0365	0,02	419,4832	0,02	366,7176	0,03	50,5643	0,20
7	10:50:42	20,5018	0,49	327,3619	0,03	385,5566	0,03	472,5199	0,02	440,9607	0,02	393,851	0,03	50,8239	0,20
8	10:50:52	20,5713	0,49	333,7131	0,03	381,7691	0,03	473,773	0,02	445,0715	0,02	399,5643	0,03	50,932	0,20
9	10:51:12	20,0337	0,50	182,9247	0,05	318,0904	0,03	410,8378	0,02	427,6468	0,02	402,1262	0,02	102,8388	0,10
10	10:51:30	19,9753	0,50	75,6514	0,13	238,4615	0,04	316,0433	0,03	373,9372	0,03	384,4375	0,03	152,6704	0,07
11	10:52:00	19,9987	0,50	37,174	0,27	140,2648	0,07	219,6203	0,05	287,7691	0,03	324,2294	0,03	158,4288	0,06
12	10:52:31	20,1443	0,50	25,5093	0,39	87,8323	0,11	143,0897	0,07	206,9536	0,05	266,2473	0,04	139,2932	0,07
13	10:53:00	20,1097	0,50	21,8701	0,46	56,5822	0,18	91,2374	0,11	142,2816	0,07	207,3532	0,05	117,79	0,08
14	10:53:30	20,1591	0,50	20,7404	0,48	40,5231	0,25	57,6525	0,17	94,9526	0,11	153,9723	0,06	97,444	0,10
15	10:54:01	20,299	0,49	20,2397	0,49	32,8941	0,30	38,9128	0,26	64,4857	0,16	108,8442	0,09	80,4586	0,12
16	10:54:30	20,405	0,49	20,2524	0,49	29,6979	0,34	30,2712	0,33	48,3583	0,21	77,6934	0,13	67,9025	0,15
17	10:55:00	20,6209	0,48	20,1827	0,50	28,0779	0,36	26,3169	0,38	40,0063	0,25	58,0733	0,17	58,8723	0,17
18	10:55:31	20,7504	0,48	20,2818	0,49	27,1622	0,37	24,36	0,41	35,597	0,28	46,5645	0,21	52,7239	0,19
19	10:56:00	20,8593	0,48	20,3049	0,49	26,6584	0,38	23,602	0,42	33,3137	0,30	40,4658	0,25	49,0149	0,20
20	10:56:30	21,148	0,47	20,4126	0,49	26,2978	0,38	23,2085	0,43	32,0025	0,31	37,1362	0,27	46,421	0,22
21	10:57:01	21,3694	0,47	20,512	0,49	26,0697	0,38	22,9683	0,44	31,0092	0,32	35,0203	0,29	44,6044	0,22
22	10:57:30	21,5951	0,46	20,6135	0,49	25,8622	0,39	22,8972	0,44	30,3708	0,33	33,7231	0,30	43,3928	0,23
23	10:58:00	21,6488	0,46	20,7083	0,48	25,6922	0,39	22,7703	0,44	29,7904	0,34	32,784	0,31	42,2717	0,24
24	10:58:30	21,8799	0,46	20,7721	0,48	25,4475	0,39	22,6421	0,44	29,2315	0,34	31,9181	0,31	41,2526	0,24
25	10:59:00	22,2111	0,45	20,9252	0,48	25,3054	0,40	22,6373	0,44	28,7466	0,35	31,2135	0,32	40,4085	0,25
26	10:59:30	22,39	0,45	21,0306	0,48	25,1	0,40	22,534	0,44	28,3489	0,35	30,6209	0,33	39,4197	0,25
27	11:00:00	22,4871	0,44	21,1503	0,47	25,0425	0,40	22,5179	0,44	28,0456	0,36	29,9944	0,33	38,6438	0,26

Продолжение таблицы А.11

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
28	11:00:30	22,7187	0,44	21,3258	0,47	24,9527	0,40	22,5435	0,44	27,6004	0,36	29,43	0,34	37,9624	0,26
29	11:01:00	23,1161	0,43	21,4005	0,47	24,9318	0,40	22,5329	0,44	27,4306	0,36	29,085	0,34	37,3353	0,27
30	11:01:30	23,3332	0,43	21,6198	0,46	24,8419	0,40	22,6634	0,44	27,0701	0,37	28,5834	0,35	36,7579	0,27
31	11:02:00	23,5045	0,43	21,7163	0,46	24,7629	0,40	22,6138	0,44	26,7942	0,37	28,1941	0,35	36,1731	0,28
32	11:02:30	23,6663	0,42	21,7738	0,46	24,8008	0,40	22,7061	0,44	26,7143	0,37	28,0444	0,36	35,6123	0,28
33	11:03:00	24,009	0,42	21,9928	0,45	24,8599	0,40	22,7079	0,44	26,4632	0,38	27,6847	0,36	35,0626	0,29

Дата: 29.05.2018

Таблица А.12 – Измерения температур криптолового слоя при продувке воздухом (расход 45 л/мин), фракция 10-20 мм

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °C	δ, %	t2, °C	δ, %	t3, °C	δ, %	t4, °C	δ, %	t5, °C	δ, %	t6, °C	δ, %	t7, °C	δ, %
1	17:12:00	21,5684	0,46	22,1575	0,45	25,1423	0,40	23,2602	0,41	24,2483	0,41	24,8127	0,40	26,136	0,38
2	17:12:30	21,8491	0,46	25,5952	0,39	29,8692	0,33	27,5889	0,35	28,978	0,35	29,0553	0,34	27,9391	0,36
3	17:13:00	21,9292	0,46	27,611	0,36	31,3977	0,32	30,0967	0,32	31,2501	0,32	31,1485	0,32	28,8111	0,35
4	17:13:30	21,9188	0,46	28,889	0,35	31,9352	0,31	31,4112	0,31	32,5191	0,31	32,4113	0,31	29,1917	0,34
5	17:14:00	21,7552	0,46	23,8266	0,42	28,534	0,35	25,977	0,36	27,7001	0,36	27,8062	0,36	27,424	0,36
6	17:14:11	21,8733	0,46	201,3485	0,05	300,731	0,03	182,0385	0,05	205,799	0,05	75,5826	0,13	51,8188	0,19
7	17:14:20	21,9017	0,46	308,5086	0,03	386,3824	0,03	350,6641	0,03	367,8653	0,03	214,2863	0,05	52,0597	0,19
8	17:14:30	21,9132	0,46	354,7966	0,03	418,3452	0,02	424,062	0,02	423,8582	0,02	268,4245	0,04	53,3728	0,19
9	17:14:40	21,9539	0,46	377,2523	0,03	428,0555	0,02	457,1497	0,02	451,0235	0,02	293,0399	0,03	53,3199	0,19
10	17:14:50	21,999	0,45	381,8102	0,03	425,9935	0,02	465,4461	0,02	458,1753	0,02	297,5763	0,03	53,7677	0,19
11	17:15:00	22,0099	0,45	366,242	0,03	408,1356	0,02	463,576	0,02	456,0883	0,02	303,5807	0,03	58,3473	0,17
12	17:15:10	21,5865	0,46	181,0527	0,06	319,8611	0,03	423,4983	0,02	445,4326	0,02	346,1563	0,03	144,6723	0,07
13	17:15:30	21,7047	0,46	62,9708	0,16	204,525	0,05	335,411	0,03	390,0764	0,03	341,7016	0,03	199,7259	0,05
14	17:16:00	21,8305	0,46	32,2113	0,31	105,5281	0,09	218,5269	0,03	298,5848	0,03	281,3628	0,04	186,7868	0,05
15	17:16:30	21,9935	0,45	24,1377	0,41	57,8634	0,17	127,1274	0,05	208,5052	0,05	211,5509	0,05	151,8598	0,07
16	17:17:00	22,1589	0,45	22,3902	0,45	39,0796	0,26	73,6005	0,07	136,9989	0,07	151,9566	0,07	119,675	0,08
17	17:17:30	22,2648	0,45	21,8532	0,46	31,1875	0,32	46,5547	0,12	86,4148	0,12	105,8163	0,09	93,9153	0,11
18	17:18:00	22,5074	0,44	21,7388	0,46	28,1211	0,36	34,412	0,18	56,7007	0,18	73,933	0,14	74,6141	0,13
19	17:18:30	22,7648	0,44	21,7743	0,46	27,0836	0,37	29,794	0,23	42,6542	0,23	56,0842	0,18	62,6281	0,16
20	17:19:00	23,027	0,43	21,9202	0,46	26,5112	0,38	27,8407	0,28	36,3459	0,28	46,4498	0,22	55,5069	0,18
21	17:19:30	23,3909	0,43	22,1225	0,45	26,3708	0,38	26,8957	0,30	33,325	0,30	41,3472	0,24	50,8671	0,20
22	17:20:00	23,5727	0,42	22,1849	0,45	26,1372	0,38	26,4953	0,31	31,7855	0,31	38,649	0,26	48,064	0,21
23	17:20:30	23,9128	0,42	22,3402	0,45	26,1003	0,38	26,1417	0,32	30,9034	0,32	36,9796	0,27	46,0835	0,22
24	17:21:00	24,2019	0,41	22,4812	0,44	25,9606	0,39	25,8822	0,33	30,2134	0,33	35,5499	0,28	44,4577	0,22
25	17:21:30	24,4312	0,41	22,64	0,44	25,9548	0,39	25,6367	0,34	29,6674	0,34	34,5507	0,29	43,2523	0,23
26	17:22:00	24,5988	0,41	22,6889	0,44	25,9231	0,39	25,6862	0,34	29,3091	0,34	33,8792	0,30	42,1145	0,24
27	17:22:30	24,8995	0,40	22,903	0,44	25,991	0,38	25,5861	0,34	29,0011	0,34	33,2271	0,30	41,3033	0,24

Продолжение таблицы А.12

п/п	Время, чч:мм:сс	t1, °С	δ, %	t2, °С	δ, %	t3, °С	δ, %	t4, °С	δ, %	t5, °С	δ, %	t6, °С	δ, %	t7, °С	δ, %
28	17:23:00	25,1244	0,40	23,1136	0,43	25,9951	0,38	25,558	0,35	28,6987	0,35	32,5537	0,31	40,1865	0,25
29	17:23:30	25,2274	0,40	23,1297	0,43	25,9804	0,38	25,3898	0,35	28,4213	0,35	32,0552	0,31	39,3228	0,25
30	17:24:00	25,3656	0,39	23,3311	0,43	25,9548	0,39	25,3085	0,36	28,1225	0,36	31,4968	0,32	38,5083	0,26
31	17:24:30	25,6405	0,39	23,5088	0,43	25,9517	0,39	25,3437	0,36	27,8838	0,36	31,0257	0,32	37,7267	0,27
32	17:25:00	25,8428	0,39	23,6308	0,42	26,0388	0,38	25,2818	0,36	27,6912	0,36	30,5869	0,33	37,0581	0,27
33	17:25:30	26,0892	0,38	23,7478	0,42	26,0504	0,38	25,3573	0,36	27,5993	0,36	30,3094	0,33	36,4276	0,27

Дата: 28.05.2018

Приложение Б. Балансовые испытания ячейки фильтрационного слоя (опорной модели)

Протокол балансовых испытаний опорной модели (модуль фильтрационного горения)

Ведомость балансовых испытаний модуля

Наименование величины		Единица измерения	Режим № 1	Режим № 2	Режим № 3	Режим № 4	Режим № 5
Цикл испытания нагрузки		час	2	2	2	2	2
Теплопроизводительность (Q)		кВт	2,86	4,04	5,20	5,80	6,25
Низшая теплота сгорания керосина ($Q_н$)		кДж/кг	44835,07				
Температура воздуха на горение ($t_в$)		°С	20				
Температура топлива ($t_в$)		°С	20				
Расход топлива ($G_т$)		кг/с×10^5	6,47	9,13	11,70	13,03	14,04
Расход воздуха ($V_в$)		$м^3$/с×10^3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Коэффициент избытка воздуха (α)		-	5,8	4,11	3,19	2,87	2,66
Максимальное содержание в продуктах сгорания трехатомных газов (RO_2^{max})		%	14,37				
Состав уходящих газов: углекислый газ (CO_2)		%	2,88	4,07	5,17	5,81	6,28
кислород (O_2)		%	17,52	16,07	14,65	13,92	13,35
угарный газ (CO)		ppm	<1000				
оксид серы (SO_2)		ppm	0	0	0	0	0
оксиды азота (NO_x)		ppm	11	15	19	20	22
Потери тепла с химической неполнотой сгорания топлива (q_3)		%	1,56	>1,56			
Коэффициент полезного действия (η)		%	98,44	≤ 98			
Контроль показаний температур зоны горения	Термопара № 1	°С	129,4	363,1,	688,3	701,0	1324,6
	Термопара № 2	°С	132,6	367,0	747,5	779,4	1298,1
	Термопара № 3	°С	143,4	364,5	676,4	776,1	1335,2
	Термопара № 4	°С	146,9	391,9	755,8	781,2	1305,6
	Термопара № 5	°С	163,2	241,8	314,5	358,9	501,3

* Состав уходящих газов, потери тепла с химической неполнотой сгорания топлива определялись газоанализатором «Testo 330-2».

Главный специалист по наладке и испытаниям ООО «ИЦ «Теплоуниверсал» А.В. Корженко

Эксперт первой категории в области промышленной безопасности ООО «ИЦ «Теплоуниверсал» А.В. Манаков

Приложение В. Методика оценки погрешности прямых измерений

Случайные ошибки, которые в измерениях исключить невозможно, подчиняются статистическим закономерностям. Каждая интересующая величина контролируемого параметра *X* измерялась непосредственно и таким образом ее оценка выражалась средним арифметическим из ***n*** полученных значений результатов измерений контролируемого параметра:

$$\tilde{\mathrm{X}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{X}_i. \qquad \text{(В.1)}$$

Оценка средней квадратичной погрешности серии измерений параметра определялась как:

$$\overline{\sigma}_{\tilde{\mathrm{X}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\tilde{\mathrm{X}} - \mathrm{X}_i\right)^2}{n\cdot(n-1)}} \qquad \text{(В.2)}$$

Задаваясь значением надежности α при фактическом числе измерений, равном ***n***, по таблице [108] принимался коэффициент Стьюдента (*t*). Границы доверительного интервала находились по формуле:

$$\Delta\overline{\mathrm{X}}_{сл} = t\cdot\tilde{\sigma}_{\overline{X}}. \qquad \text{(В.3)}$$

Определялась неточность однократного измерения (*l*) [108]. Тогда расчет погрешности однократного измерения осуществлялся по формуле:

$$\Delta\tilde{\mathrm{X}}_{ои} = \alpha\cdot l. \qquad \text{(В.4)}$$

Результирующее значение границы доверительного интервала рассчитывалось по [108]:

$$\Delta\tilde{\mathrm{X}} = \sqrt{\Delta\tilde{\mathrm{X}}_{сл}^2 + \Delta\tilde{\mathrm{X}}_{ои}^2}. \qquad \text{(В.5)}$$

Окончательный результат записывается в виде:

$$\overline{\mathrm{X}} = \tilde{\mathrm{X}} \pm \Delta\tilde{\mathrm{X}}. \qquad \text{(В.6)}$$

Данный результат является достоверным с доверительной вероятностью α.

Относительная погрешность результата измерений оценивалась как отношение оценки абсолютной погрешности к результату измерения

$$\delta = \frac{\Delta\tilde{X}}{\tilde{X}} \cdot 100. \qquad \text{(В.7)}$$

Для оценки погрешности косвенных измерений [108] использован приближенный способ с помощью дифференциального исчисления. Он исходит из того, что при оценке погрешности возможны два основных случая:

а) контролируемый параметр зависит от одной непосредственно измеряемой величины;

б) контролируемый параметр зависит от нескольких измеряемых величин.

В данном случае оценка погрешности измерений параметра (расход воздуха, расход топлива, температура рабочей зоны горения) происходит при условии зависимости искомой величины от одной непосредственно измеряемой величины и представляется в виде функции искомой величины *Y*, зависящей от одной величины *X*:

$$Y = f(X). \qquad \text{(В.8)}$$

Предположим истинное (точное) значение результатов прямых измерений:

$$\bar{X} = \tilde{X} + \Delta X, \qquad \text{(В.9)}$$

где $\tilde{X}$ – среднее найденное из опытов;

ΔX – ошибка.

В этом случае истинное значение результатов косвенных измерений примет вид:

$$\bar{Y} = \tilde{Y} + \Delta Y, \qquad \text{(В.10)}$$

где $\tilde{Y} = f(\tilde{X})$ – приближенное (оценочное) значение *Y*;

$\bar{Y} = f(\bar{X})$ – истинное значение интересующей величины;

$\Delta Y = \bar{Y} - \tilde{Y}$ – ошибка.

Подставим ранее выведенные значения в формулу для определения ошибки:

$$\Delta Y = f(\bar{X}) - f(\tilde{X}) = f(\tilde{X} + \Delta X) - f(\tilde{X}). \qquad \text{(В.11)}$$

Полагая величину абсолютной погрешности прямых измерений ΔX очень малой по сравнению с X, используется связь дифференциала функции $df(X)$ с бесконечно малым изменением аргумента dX :

$$df(X) = \frac{df}{dX} \cdot dX. \qquad \text{(B.12)}$$

Кроме того, дифференциал функции $df(X)$ равен главной части ее приращения ΔY. Поэтому оценка абсолютной ошибки результатов косвенных измерений в первом приближении будет равна:

$$\Delta\tilde{Y} = \frac{df}{d\tilde{X}} \cdot \Delta\tilde{X}, \qquad \text{(B.13)}$$

где df / dX – производная функции, подсчитанная при $X = \Delta\tilde{X}$;

$\Delta\tilde{X}$ – оценка ошибки прямых измерений величины X.

Оценка погрешности измерений в случае зависимости искомой величины от нескольких непосредственно измеряемых величин в простейшем случае, когда искомая величина Y является функцией двух переменных X_1 и X_2, значения которых непосредственно из серии n_1 и n_2 измерений соответственно, рассматривалась как: $Y = f(X_1, X_2)$. Соответственно в простейшем случае: $Y = X_1 + X_2$. Истинные значения $\bar{X}_1$ и $\bar{X}_2$ связаны со средними значениями $\tilde{X}_1$ и $\tilde{X}_2$ соотношениями:

$$\bar{X}_1 = \tilde{X}_1 + \Delta X_1, \qquad \text{(B.14)}$$

$$\bar{X}_2 = \tilde{X}_2 + \Delta X_2. \qquad \text{(B.15)}$$

Если обозначить среднее значение функции через $\Delta Y = \tilde{X}_1 + \tilde{X}_2$, то ошибка равна:

$$\Delta Y = \bar{Y} - \tilde{Y}. \qquad \text{(B.16)}$$

Средний квадрат ошибки в этом случае равен:

$$\Delta\tilde{Y}^2 = \Delta\tilde{X}_1^2 + \Delta\tilde{X}_2^2 + 2 \cdot \Delta \cdot \tilde{X}_1 \cdot \tilde{X}_2. \quad \text{(B.17)}$$

При достаточно больших значениях n_1 и n_2 и симметрии кривых распределения величин ΔX_1 и ΔX_2 член $2 \cdot \Delta \cdot \tilde{X}_1 \cdot \tilde{X}_2$ стремится к нулю. В этом случае средний квадрат ошибки примет вид:

$$\Delta\tilde{Y}^2 = \Delta\tilde{X}_1^2 + \Delta\tilde{X}_2^2. \qquad \text{(B.18)}$$

Аналогично, если $Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2$, где a и b – постоянные, получаем:

$$\Delta\tilde{Y}^2 = a^2 \cdot \Delta\tilde{X}_1^2 + b^2 \cdot \Delta\tilde{X}_2^2. \quad \text{(B.19)}$$

В случае, если $Y = f\left(X_1 + X_2\right)$, то оценка результата предстает в виде $\Delta\tilde{Y} = f(\tilde{X}_1 + \tilde{X}_2)$. Таким образом:

$$\Delta\tilde{Y}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{X}_1}\right)^2 \cdot \Delta\tilde{X}_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{X}_2}\right) \cdot \Delta\tilde{X}_2^2. \quad \text{(B.20)}$$

Следовательно, оценка ошибки (границы доверительного интервала) равна:

$$\Delta\tilde{Y} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{X}_1}\right)^2 \cdot \Delta\tilde{X}_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{X}_2}\right) \cdot \Delta\tilde{X}_2^2}. \quad \text{(B.21)}$$

Ошибка результата составит:

$$\Delta Y = \overline{Y} - \tilde{Y}. \qquad \text{(B.16)}$$

Оценка ошибки (границы доверительного интервала результата косвенных измерений) должна производиться как:

$$\Delta\overline{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \cdot \Delta\tilde{X}_i^2}. \quad \text{(B.22)}$$

В качестве предварительных выкладок рабочая формула для искомой величины параметра преобразовывается так, чтобы в нее входили непосредственно измеряемые величины. Для всех непосредственно измеряемых параметров, входящих в формулу определения искомой величины, проводится обработка прямых измерений. При этом для всех измеряемых величин задается одно и то же значение надежности α.

Рассчитывается искомая величина $\tilde{Y} = f\left(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, ...\tilde{X}_5\right)$, и находится выражение для границ доверительного интервала результата косвенных измерений.

Окончательный результат записывается в виде:

$$\overline{Y} = \tilde{Y} \pm \Delta Y, \qquad \text{(B.23)}$$

то есть с доверительной вероятностью α величина Y лежит в интервале $\tilde{Y} \pm \Delta Y$ При этом определяется относительная погрешность результата серии косвенных измерений δ, %:

$$\delta = \frac{\Delta \tilde{Y}}{\tilde{Y}} \cdot 100\%. \qquad \text{(В.24)}$$

Приложение Г. Патенты на полезные модели и изобретения



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 129599

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012141632**

Приоритет полезной модели **28 сентября 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***27 июня 2013 г.***

Срок действия патента истекает **28 сентября 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 136875

ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2013134821**

Приоритет полезной модели **23 июля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***20 января 2014 г.***

Срок действия патента истекает **23 июля 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2616962

КАМЕРА СГОРАНИЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА

Патентообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)***

Авторы: ***Долгов Сергей Викторович (RU), Савченко Евгений Константинович (RU), Табакаев Роман Борисович (RU), Заворин Александр Сергеевич (RU)***

Заявка № **2016116683**
Приоритет изобретения **27 апреля 2016 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **18 апреля 2017 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **27 апреля 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2747900

ТЕПЛОГЕНЕРАТОР

Патентообладатель: ***федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)***

Авторы: ***Турчин Сергей Викторович (RU), Заворин Александр Сергеевич (RU), Субботин Александр Николаевич (RU), Кулеш Роман Николаевич (RU)***

Заявка № **2020132526**
Приоритет изобретения **02 октября 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **17 мая 2021 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **02 октября 2040 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFBC00B1ACF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

Приложение Д. Расчет элементов топливо -и воздухоподачи

Таблица Д.1. – Результаты расчета и выбора диаметра топливного канала

п/п	Участок	Длина, мм	Внутренний диаметр, мм	Скорость, м/с	Вязкость, сСт	Плотность, кг/м^3	Сопр. трения, м.вод.ст.	Местное сопр., м.вод.ст.	Сопр. подъема, м.вод.ст.	Абсолютное давление, МПа	Температура среды, °С
1	вход		2	0,48	2,38	833,15				0,12	5,4
2	Топливный инжектор	107,65	2	0,48	2,38	833,15	0,084		0,09		5,4
3	выход		2		2,38	833,15		0,006			5,4

Таблица Д.2. – Результаты расчета и выбора диаметра канала воздухоподачи

п/п	Участок	Длина, мм	Внутренний диаметр, мм	Скорость, м/с	Вязкость, сСт	Плотность, кг/м^3	Сопр. трения, м.вод.ст.	Местное сопр., м.вод.ст.	Сопр. подъема, м.вод.ст.	Абсолютное давление, МПа	Температура среды, °С
Ветвь 1-2											
1	вход		10	8,22	5,13	3,57	-	0,006	-	0,3	20
2	прямой участок	107	10	8,22	5,13	3,57	0,008	-	0,000386	0,2999	20
Ветвь 2-3											
1	прямой участок	8	10	7,54	5,13	3,57	0,00052	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 3-4											
1	прямой участок	8	10	6,85	5,13	3,57	0,00043	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 4-5											
1	прямой участок	8	10	6,17	5,13	3,57	0,00035	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 5-6											
1	прямой участок	8	10	5,48	5,13	3,57	0,00028	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 6-7											
1	прямой участок	8	10	4,79	5,13	3,57	0,00021	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 7-8											
1	прямой участок	8	10	4,11	5,13	3,57	0,00015	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 8-9											
1	прямой участок	8	10	3,42	5,13	3,57	0,00011	-	2,86e-5	0,2998	20

Продолжение таблицы Д.2

п/п	Участок	Длина, мм	Внутренний диаметр, мм	Скорость, м/с	Вязкость, сСт	Плотность, кг/м^3	Сопр. трения, м.вод.ст.	Местное сопр., м.вод.ст.	Сопр. подъема, м.вод.ст.	Абсолютное давление, МПа	Температура среды, °С
Ветвь 9-10											
1	прямой участок	8	10	2,74	5,13	3,57	7,31e-5	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 10-11											
1	прямой участок	8	10	2,05	5,13	3,57	4,24e-5	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 11-12											
1	прямой участок	8	10	1,31	5,13	3,57	1,14e-5	-	2,86e-5	0,2998	20
Ветвь 12-13											
1	прямой участок	8	10	0,68	5,13	3,57	1,62e-6	-	2,86e-5	0,2998	20

Таблица Д.3. – Результаты расчета, выбора эквивалентного диаметра перфораций для канала воздухоподачи

№ по схеме	Участок	Эквивалентный диаметр перфорации, мм	Скорость, м/с	Сопр. трения, м.вод.ст.	Местное сопр., м.вод.ст.	Сопр. подъема, м.вод.ст.	Абсолютное давление, МПа	Температура среды, °С
25	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2999	20
24	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2999	20
23	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2999	20
22	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
21	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
20	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
19	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
18	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
17	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
16	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
15	перфорация	4,5	3,69	-	0,002	-	0,2998	20
14	перфорация	4,5	3,36	-	0,002	-	0,2998	20

Приложение Ж. Материалы по использованию результатов работы

Инженерная школа энергетики
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
СОГЛАСОВАНО
Директор
к.т.н., доцент
_____ А.С. Матвеев
«22» 05 2025г

ООО «Завод Аэроэнергопром»
СОГЛАСОВАНО
Директор, главный конструктор
д.ф.н.
_____ В.В. Шаблов
«15» 05 2025г

ПРОТОКОЛ
согласования намерений

На основании рассмотрения технических решений по разработке теплогенератора, камеры сгорания теплогенератора, модуля фильтрационного горения – горелочного устройства инфракрасного излучения, защищенных патентами РФ №2747900, №2616962, №129599, стороны констатируют, что теплогенератор, включающий в себя камеру сгорания и модуль фильтрационного горения, представляет практический интерес для использования в мобильных комплексах пиролиза отходов с огневой утилизацией его продуктов (твердых и жидких) и генерацией полезной теплоты.

Настоящим стороны согласовали намерения по сотрудничеству с целью использования разработанного теплогенератора:

- ООО «Завод Аэроэнергопром» на основе конструкторской документации патентообладателя – ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет – изготавливает автономный источник тепловой энергии на базе упомянутого теплогенератора, в опытном порядке применяет его для утилизации жидких и твердых горючих продуктов пиролиза, образующихся в лаборатории завода при пиролизной переработке отходов, используя для этого генерируемую устройством теплоту;

- Национальный исследовательский Томский политехнический университет обеспечивает возможность использования интеллектуальной собственности (патенты №2747900, №2616962, №129599) и осуществляет конструирование автономного источника теплоты на базе упомянутого теплогенератора;

- стороны взаимно содействуют друг другу для осуществления настоящих намерений, при получении перспективных результатов рассмотрят возможность продолжения сотрудничества на договорной или другой юридически согласованной основе.

ИШЭ НИ ТПУ
И.о. руководителя НОЦ И.Н. Бутакова
к.т.н., доцент
_____ Т.С. Тайлашева

ООО «Завод Аэроэнергопром»
Коммерческий директор
_____ В.В. Мазур

АКТ

проведения теплотехнических испытаний модуля фильтрационного горения – горелочного устройства

(Патент №129599)

17.05.2024г.

Комиссия в составе:
Директор – Шаблов Виталий Валерьевич
ООО «Завод Аэроэнергопром»
Коммерческий директор – Мазур Вадим Витальевич
ООО «Завод Аэроэнергопром»
Региональный главный инженер по собственной генерации – Турчин Сергей Викторович
АО «Тандер»

Составили настоящий Акт о том, что в период с 14.05.2024г. по 17.05.2024г. были проведены теплотехнические испытания модуля фильтрационного горения – горелочного устройства (далее «модуля») идентичной конструкции, описанной в документе об интеллектуальной собственности (патент №129599).

Испытания проводились в соответствии с разработанной программой теплотехнических испытаний данного модуля. В качестве топлива использовались жидкие углеводородные отходы (пиролизная жидкость), в качестве засыпки активной зоны и дополнительного топлива – углеродистый остаток пиролиза. Испытуемый модуль был сагрегирован вместе с используемой теплообменной (имеющей камеру сгорания) лабораторной установкой опытно-конструкторской лаборатории завода.

При испытаниях подача топлива осуществлялась из топливной емкости под гидростатическим давлением. Подача воздуха на горение осуществлялась воздушным компрессором. Общий период наладочных и эксплуатационных режимов испытаний устройства составил 72 часа 24 минуты.

Результатами испытаний подтверждена работоспособность конструкции модуля, а также перспективность использования данной разработки в автономных системах теплогенерации.

Директор
ООО «Завод Аэроэнергопром» В.В. Шаблов

Коммерческий директор
ООО «Завод Аэроэнергопром» В.В. Мазур

Региональный главный инженер по собственной генерации
АО «Тандер» С.В. Турчин

Общество с ограниченной ответственностью «Завод Аэроэнергопром»
РБ, 220070, г.Минск, ул.Солтыса, д.187, к.505. УНП 691460101, ОКПО 300890326000
Тел. +375 17 3996963, факс +375 3996863, моб. +375 29 6789001, E-mail: aeprom@mail.ru, info@aeprom.com

Р/с BY90 PJCB 3012 0261 8410 0000 0933 в «ПРИОРБАНК» ОАО ЦБУ 102, BIC PJCBBY2X
г.Минск, Логойский тр-т, д.15, корп.1