

Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева

УДК 681.5:662.76 (043)

На правах рукописи

ЖИРНОВА ОКСАНА ВИКТОРОВНА

**Разработка автоматизированной системы диагностики и
управления процессом сжигания биогаза**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
Сулейменов Б.А.
доктор технических наук,
профессор

Зарубежный научный
консультант
Waldemar Wojcik
Prof. dr hab. inz.
(доктор технических наук,
профессор)

Республика Казахстан
Алматы 2017

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	16
1.1 Обзор существующих и перспективных технологических решений по получению, сжиганию и использованию биогаза	16
1.2 Анализ конструкции биогазовых установок	19
1.2.1 Зарубежный опыт использования технологического биогазового оборудования	19
1.2.2 Особенности конструкций установок отечественного производства	25
1.2.3 Классификация биогазовых установок	35
1.2.4 Анализ существующих и перспективных технологических решений контакторных систем	40
1.3 Особенности синтеза и технологии процесса сжигания биогаза	44
1.4 Методы, алгоритмы, модели, применяемые при исследовании процесса сжигания биогаза	47
1.5 Использование комплексного термического анализа для исследования свойств биогаза	57
1.6 Постановка задачи исследования	64
1.7 Выводы по главе	68
2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ БИОГАЗА	69
2.1 Математическое моделирование процесса сжигания биогаза	69
2.2 Разработка методики расчета параметров процесса сжигания биогаза	72
2.3 Моделирование установки в компьютерной программе MathLab	74
2.4 Этапы имитационного моделирования при исследовании сложной проблемной ситуации	77
2.5 Оптимизация теплового режима в биогазовых установках	84
2.6 Нейронные сети в области моделирования и управления	106
2.7 Управление на основе прогнозирования	118
2.8 Выводы по главе	123
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	125
3.1 Общая методика экспериментального исследования	125
3.2 Описание лабораторной установки для проведения экспериментов	126
3.2.1 Экспериментальная установка в лабораторных условиях Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)	126
3.2.2 Экспериментальная установка в промышленных условиях ТЭЦ MEGATEM (г.Люблин, Польша)	130
3.2.3 Экспериментальная установка в промышленных условиях	

очистных сооружений ГКП «Астана Су Арнасы» (г.Астана, Казахстан)	137
3.3 Методика экспериментальных исследований системы управления и диагностики процесса сжигания биогаза на очистных сооружениях	143
3.4 Тарировка датчиков и измерение параметров процесса средствами автоматизации	145
3.5 Выводы по главе	147
4 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ БИОГАЗА	150
4.1 Автоматизация процессов сжигания биогаза	150
4.2 Существующая практика диагностики процесса сжигания биогаза	153
4.2.1 Методы диагностики и их возможности	153
4.2.2 Анализ методов технической диагностики БГУ с позиций информативности	157
4.2.3 Эффективность трибодиагностики элементов БГУ	164
4.2.4 Эффективность диагностики БГУ по термогазодинамическим параметрам	167
4.3 Методы обобщенной оценки состояния технических систем	169
4.3.1 Методы сверток частных параметров контроля к обобщенному показателю	169
4.3.2 Методы обобщенной оценки состояния технических систем по информационному критерию	174
4.4 Требования к информационному критерию технического состояния БГУ	177
4.5 Описание функционирования автоматизированной системы диагностики технологического процесса	179
4.6 Выводы по главе	184
5 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ И АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ	186
5.1 Структура трехуровневой системы управления процессом	186
5.2 Алгоритм для расчета расхода биогаза при заданной степени газификации	187
5.3 Разработка интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления	188
5.4 Выводы по главе	189
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	192
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	194
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Экспериментальные данные	200
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Чертежи	202
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт внедрения результатов диссертационной работы в Lublin (Польша, г. Люблин)	203
Акт внедрения в учебный процесс результатов исследований в лабораторию Люблинского технического университета (Польша, г. Люблин)	
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Публикации	207
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Программная часть	211

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

«Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», Высший аттестационный комитет. – Алматы, 2004 г., №377-3 ж.

ГОСТ 7.32 - 2001 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». – Астана, 2001 г.

ГОСТ 7.1 – 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации использованы следующие определения:

Оптимальное управление - это задача проектирования системы, обеспечивающей для заданного объекта управления или процесса закон управления или управляющую последовательность воздействий, обеспечивающих максимум или минимум заданной совокупности критериев качества системы.

Идентификация систем – совокупность методов для построения математических моделей динамической системы по данным наблюдений.

Синтез систем автоматического управления - выбор структуры и параметров САУ, начальных условий и входных воздействий в соответствии с требуемыми показателями качества и условиями функционирования.

Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью, описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе.

Объект управления - в качестве него выступает камера сжигания биогаза.

Автоматизированная система управления технологическими процессами – группа технических и программных средств, предназначенных для автоматизации управления технологическим оборудованием на промышленных предприятиях.

Состояние системы – минимальное количество информации о системе, чтобы предсказать ее будущее поведение.

Модель – это упрощенное, можно сказать «упакованное» знание, несущее вполне определенную ограниченную информацию о предмете (явлении), отражающее те или иные его свойства [2].

Модель – объект-заместитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала [3].

Модель – реально существующая или мысленно представляемая система, которая, замещая и отображая оригинал с определенной целью, находится с ним в отношениях подобия (сходства) [4].

Объект (от лат. *objectum* – предмет) – все, на что направлена человеческая деятельность [3]. Любой объект исследования является бесконечно сложным и характеризуется бесконечным числом состояний и параметров.

Процесс – определенная совокупность действий, направленных на достижение поставленной цели.

Система – целенаправленное множество объектов любой природы [3].

Элемент системы – часть системы, не подвергаемая дальнейшему делению.

Внешняя (окружающая) среда – множество существующих вне системы (объекта) элементов любой природы, оказывающих влияние на систему (объект) или находящихся под ее (его) воздействием [3].

Гипотеза (от гр. hypothesis – основание, предположение) – определенные предсказания, предположительные суждения о причинно-следственных связях явлений, основанные на некотором количестве опытных данных, наблюдений, догадок [2].

Аналогия (от гр. analogia – соответствие, соразмерность) – представление о каком-либо частном сходстве двух объектов (существенном либо несущественном) [2]. Говоря о модели, нельзя не сказать о моделировании.

Моделирование – замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом, описанием или другим объектом (моделью) и познание свойств оригинала путем исследования свойств модели [5].

Моделирование – метод познания окружающего мира, который можно отнести к общенаучным методам, применяемым как на эмпирическом, так и на теоретическом уровне познания [2].

Моделирование – замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели [3].

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

1. БиБТ – биомасса и биодегредовальные биогаза.
2. ТВТ – твердые виды биогаза
3. CFD – Computational Fluid Dynamics
4. DPM – Discrete Particie Model
5. БиБО – биомасса и биоразлагаемые отходы
6. СС – Преобразование угля (англ. carbon conversion)
7. СGE – Химическая эффективность (cold gas efficiency),
8. АСУ – автоматизированная система управления
9. ОУ – объект управления
10. ПО – программное обеспечение
11. ПК – персональный компьютер
12. ГС – гибридные сети
13. БМ – биомасса
14. ВДГ – восходящее движение биогаза
15. ГГ – генераторный газ
16. ДВС – двигатель внутреннего сгорания
17. КПД – коэффициент полезного действия
18. КС – кипящий слой
19. НДГ – нисходящее движение биогаза
20. ПГТУ ВГ – парогазотурбинная установка с внутрицикловой газификацией биомассы
21. ПДГ – поперечное движение биогаза
22. ТБО – твердые бытовые отходы
23. ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
24. ЦКС – циркулирующий кипящий слой

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Интенсивное развитие промышленности Казахстана создает глобальную проблему утилизации жидких и твердых органических отходов на очистных сооружениях, образующихся в большом количестве. Хранить и перерабатывать такие отходы весьма непросто. Кроме того, в последнее время проблемы использования отходов привлекают пристальное внимание специалистов по охране окружающей среды и органон здравоохранения, озабоченных возможностью проникновения загрязнений в водоемы и распространения таким путем возбудителей заболеваний.

В настоящее время в Республике достаточно остро стоит энергетическая проблема. В народном хозяйстве она усугубляется дефицитом энергетических мощностей, недостаточным уровнем централизации электроснабжения. Теплоснабжение производственных объектов и жилого сектора осуществляется от мелких котельных, работающих на привозном топливе, доставка которого требует больших экономических и энергетических затрат. Необходимость энергосбережения и снижения загрязнения окружающей среды заставляет более рационально использовать традиционные энергоресурсы, атак же искать другие, желательно возобновляемые и недорогие источники энергии. Большое значение приобретают вопросы экономии материалов и топливно-энергетических ресурсов, охраны окружающей среды. В этих условиях развитие коммунальных услуг немислимо без развития нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Их преимущества заключаются в том, что они являются неисчерпаемыми и экологически безопасным. Современная технология очистки городских сточных вод связана с потреблением значительных объемов электрической и тепловой энергии. В условиях острого энергетического кризиса остро стоит проблема сокращения этих энергозатрат за счет использования нетрадиционных источников энергии, имеющих на очистных сооружениях и постоянно обновляемых. Развитие этого направления приведет к значительной экономии традиционных видов биогаза. Не менее важным является экологический аспект, поскольку утилизация энергии органическими отходами значительно снизит загрязнение окружающей среды.

Существуют различные методы и способы переработки органических отходов производства. Анализ работ [4,5,14,21,28.35,38.56,83,96] показывает, что использование топливно-энергетических ресурсов невозможно без совершенствования существующих и создания новых энергосберегающих технологий, к которым в полной мере можно отнести процесс анаэробного сбраживания отходов с очистных сооружений. Совершенствование данного процесса позволит успешно бороться с высокой загрязненностью почвы и водных слоев отходами производства, а также решать вопросы по обеззараживанию и более глубокой переработке отходов с одновременным получением товарного биогаза и высококачественных удобрений.

Процессы, основанные на разложении отходов, с получением биогаза и его последующим использованием в производстве, известны давно: в Китае - мировом лидере по производству биогаза история насчитывает 5 тыс. лет, в Индии - 2 тыс. лет. При переработке отходов в анаэробных условиях образуется горючий газ на 60% состоящий из метана, содержащий весь или почти весь азот и все другие питательные вещества, содержащиеся в исходном растительном материале. В природе такой процесс развивается при недостатке кислорода в местах скопления веществ растительного и животного происхождения: в болотах, осадках на дне озер, а также в желудке травоядных. Он может протекать и в закрытой емкости, наполненной подходящим органическим веществом, куда не поступает воздух. Метанобразующие бактерии и некоторые другие микроорганизмы, продуцирующие нужные этим бактериям субстраты, формируют в таких условиях систему прочных симбиотических отношений, которая может функционировать неопределенно долгое время, если в нее в подходящем количестве поступают все новые порции отходов.

В последнее время возрастает интерес к разработкам новых конструкций биоэнергетических установок для переработки органических отходов в условиях анаэробного сбраживания [23,43,90,137,105], для получения газообразного биогаза и органических удобрений в процессе метановой ферментации отходов производства и имеющих следующие достоинства, выгодно отличающие от других методов и способов переработки [7,9.12.14,15.20.26.43.92]:

- выделяемый биогаз является источником энергии;
- получение высококачественного органического удобрения;
- поддержание чистоты окружающей среды;
- улучшение социальных условий проживания населения;
- возможность организации безотходного производства.

Главным недостатком анаэробных процессов переработки является малая скорость реакции по сравнению с аэробными процессами [126], поэтому для достижения лучшего эффекта требуется установки больших размеров. К тому же сказывается недостаток фундаментальных научных знаний по данным процессам, а также опыта и данных по их крупномасштабной реализации.

Следовательно, развитие в области анаэробной переработки отходов производства и переработки на очистных сооружениях должно идти в направлении разработки систем с большой биологической активностью, проектирования более компактных аппаратов, при одновременном изучении кинетики, микробиологического и биохимического механизмов процессов сбраживания. Установлено [36,84,93,94,1] что анаэробная переработка отходов приводит к минерализации азота и фосфора основных слагаемых удобрений, обеспечивая их лучшую сохранность, тогда как при традиционных способах приготовления органических удобрений методами компостирования безвозвратно теряется до 30-40% азота.

Международный опыт последних лет, показывает, что биогазовые технологии при их комплексной экономической оценке с учетом требований современного рынка становятся востребованными. Эти технологии являются, комплексными техническими решениями в независимости от социально-экономического положения общества на рынке может доминировать тот или иной продукт в зависимости от способа переработки. Если до последнего времени рынок определял в качестве доминирующего положения производство органических удобрений, а биогаз и экология, стояли на втором месте, то в настоящее время упор делается на выработку биогаза [94].

Тема диссертационной работы «Разработка автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза» связана с тем, что эта система позволяет решать комплекс проблем, связанных с использованием некачественных и возобновляемых ресурсов для производства тепла и энергии для очистных сооружений в г.Астане. В то же время гетерогенность используемых сырьевых материалов, сложность и разнообразие химических реакций, необходимость увеличения теплотворной способности получаемого биогаза (синтез-биогаза) обуславливают необходимость создания эффективной системы для диагностики и контроля обработать. Проблема снижения энергозатрат всегда была очень острой. Кроме того, энергосбережение является важнейшим средством защиты окружающей среды, обеспечивая сокращение вредных выбросов пропорционально количеству сэкономленного биогаза. Поэтому оптимизация процесса сжигания биогаза на основе создания новых методов и средств контроля качества горения является актуальной научно-технической задачей [26, 30, 52]. Переход на предлагаемый вид биогаза для решения проблем энергоснабжения промышленности должен сопровождаться применением передовых энергоэффективных технологий на базе пиролиза или газификации исходного сырья и последующей комбинированной выработки электрической и тепловой энергии в цикле установки.

Цель диссертационной работы – провести проблемно-ориентированные поисковые исследования в области технологий новых и возобновляемых источников энергии. Исследовать и разработать эффективную автоматизированную систему диагностики и управления процессом сжигания биогаза для выработки тепловой энергии и электроэнергии. Эта цель была полностью достигнута.

Объект исследований. Процесс переработки органических отходов, с получением биогаза, обогащенного метаном, воздуха либо воды насыщенным углекислым газом, и высококачественного удобрения, и его сжигания в биогазовой установке.

Для достижения указанной цели ставились и решались следующие **задачи**:

1. проведен анализ технологического процесса сжигание биогаза как объекта управления;
2. разработана математическая модель процесса сжигания биогаза;

3. проведены экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях;

4. проведена параметрическая идентификация математической модели процесса сжигания биогаза и сделано описание процесса сжигания биогаза с получением кинетических параметров, отвечающих за данный процесс;

5. сделан вывод уравнений управляющих каналов и оценка их динамических характеристик;

6. проведен статистический анализ динамических характеристик объекта управления;

7. разработаны алгоритмы диагностики процесса сжигания биогаза;

8. рассчитана оценка благоприятных режимных параметров работы установки сжигания биогаза;

9. определены параметры модели системы управления и сделана проверка эффективности работы алгоритма управления с помощью имитационного моделирования;

10. разработаны структура и алгоритмы управления автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза;

11. проведены испытания автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза.

Научная новизна. В результате проведенного исследования диссертантом получены следующие результаты, определяющие научную новизну работы и являющиеся предметом защиты:

- выделены определяющие факторы и разработана математическая модель процесса сжигания биогаза, позволяющая оптимизировать параметры работы биогазовой установки в составе системы комплексной переработки

- проведена параметрическая идентификация математической модели;

- предложена структура системы управления процессом сжигания биогаза;

- разработаны алгоритмы расчета режимов процесса сжигания биогаза;

- предложены алгоритмы диагностики процесса сжигания биогаза.

В процессе работы проводились: исследования кинетических закономерностей образования газообразных веществ и твердого остатка при сжигании биогаза на сырьевой базе отходов угледобычи и углеобогащения; построение методики расчета технологического процесса сжигания биогаза в среде водяного пара (в одномерном приближении); разработка математической модели и методики технологического расчета процесса газификации биомассы; определение оптимальных параметров процесса газификации биомассы; разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс. При выполнении экспериментальных работ использовались термодинамические методы измерения расхода водяного пара и водородно-кислородной смеси на основе дифференциальных манометров, методы контактного и бесконтактного измерения температуры в перегревателе, проницаемом слое биомассы, отработанные стандартные

методики анализа синтез-биогаза на хроматографе и поточном газоанализаторе. При математическом моделировании использованы апробированные математические модели и проверенные надежные методы.

Методика исследований. Теоретические и экспериментальные исследования переработки органических отходов и разделения полученного биогаза выполнены методом факторного анализа, методом планирования экспериментов; экспериментальные исследования проведены на основе общих положений проведения научно-исследовательских работ с использованием стандартных методик получения и разделения биогазов; параметры оптимизировались путем математического моделирования.

Методы исследования включают в себя экспериментальные исследования по установлению влияния температурных условий газификации, свойств исходного сырья на качественный состав и количественный выход биогаза; моделирование процесса газификации углеродсодержащих веществ с решением полученной модели итерационно-интерполяционным методом. Существующие способы и методы переработки напоя животных для получения органических удобрений не нашли широкого применения в Республике из-за неподходящих климатических условий и низкого технического уровня производства. По нашему мнению, наиболее подходящим способом переработки может послужить анаэробное метановое сбраживание, в биогазовых установках, устанавливаемых непосредственно на очистных сооружениях, работающих круглогодично. Проведенные исследования показали, что состав и количество биогаза не являются постоянными и зависят от вида перерабатываемого субстрата и технологии производства биогаза. Для стабилизации состава получаемого биогаза и доведение его до качественного, самостоятельного альтернативного источника энергии возможно при использовании мембранного газоразделения, что позволит расширить сферы применения биогаза. Разработанный новый метод разделения, основанный на использовании селективных мембран нашел применение в предложенной к разработке технологической схеме. Имеющие ряд преимуществ мембранные технологии, позволяют качественно извлекать, из газовой смеси заданный компонент, используя мембранную абсорбцию в противоточном режиме между жидкой и газовой фазами разделенных мембраной в мембранном контакторе. К тому же мембранные методы в большинстве случаев являются более дешевыми и экологически чистыми.

В настоящее время мембранное разделение является одной из наиболее интенсивно развивающихся отраслей технологии разделения газов. Наиболее перспективным представляется использование мембранной абсорбции для очистки газовых смесей от кислых примесей, осушки воздуха, а также для регенерации, озонирования и обеззараживания жидкостей. И связи с этим, разработка и исследование технологии для анаэробной переработки органических отходов с применением очистки биогазов методом мембранного подразделения и получения смеси газов, обогащенной метаном

является актуальной задачей, решение которой будет способствовало совершенствованию технологий получения биогазов.

Практическая ценность работы. Разработана технологическая линия комплексной переработки органических отходов, с получением биогаза, обогащенного метаном, воздуха либо воды насыщенными углекислым газом, и высококачественного удобрения. Новизна технического решения подтверждена публикациями в зарубежных научно-исследовательских журналах и международных научно-практических конференциях.

В результате исследования кинетических закономерностей образования газообразных веществ и твердого остатка при сжигании биогаза установлено влияние состава биомассы на выход оксида и диоксида углерода, а также водорода и метана. Присутствие биомассы при паровой конверсии при одной и той же температуре повышает выход водорода по сравнению с конверсией карбонизированного угля, а при содержании в шихте древесины свыше 30% – количество водорода в составе синтез-биогаза остается постоянным и соответствует его выходу при газификации биомассы. Присутствие древесины в шихте при прочих равных условиях оказывает снижающее действие на выход оксида углерода и повышающее – на долю диоксида углерода.

При разработке методики расчета технологического процесса газификации отходов угольных предприятий предложен эскизный вариант противоточного газификатора непрерывного действия. При разработке модели технологического процесса за основу была принята модель автотермической слоевой газификации в одномерном приближении. Слой представляет собой монофракционную угольную засыпку, через которую движется поток пара. Отличие от автотермической паровоздушной газификации состоит в отсутствии зоны окисления. Система уравнений модели включает уравнения переноса компонент газовой фазы, уравнение энергии газовой фазы, уравнения переноса компонент твердой фазы и уравнение энергии твердой фазы. Поставленная краевая задача решалась численно. Для проверки модели использовалось аналитическое решение при начальной температуре пара менее 300°C. В этом случае задача инертного нагрева имеет аналитическое решение.

При установлении оптимальных параметров процесса газификации выбор начальных параметров слоевого противоточного газификатора был обусловлен тепловой мощностью парового потока, который составляет 50 кВт. Выбор критериев оптимальности обусловлен: 1) выходом газифицируемого органического сырья из реактора с содержанием углерода не более 1% (масс.) от начального содержания на входе в реактор при варьировании геометрических размеров аппарата, расходных и термодинамических параметров паровой и твердой фаз; 2) максимальной теплотой сгорания продуктового биогаза. В результате численного расчета разработана методика определения оптимальных параметров для процесса газификации органического сырья на модели противоточного шахтного слоевого газификатора.

При исследовании кинетических закономерностей образования газообразных веществ и твердого остатка при сжигания биогаза полученные результаты показывают, что образование продуктов газификации в условиях проведения процесса начинается на поверхности частицы и по мере удаления углерода фронт газовыделения продвигается внутрь ее, обнажая минеральный каркас. На это указывает изменение рельефа и структуры поверхности частицы во время протекания процесса. Изучение твердого остатка газификации проводились методом растровой электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM6390 SEM с приставкой для микроанализа JED 2300.

Одной из основных областей применения результатов НИР может быть создание оригинальной технологии для переработки биомассы в мобильных реакторах-газификаторах на высокотемпературном перегретом водяном паре атмосферного давления с целью получения высококалорийного биогаза, синтез-биогаза, синтетических жидких топлив и кокса. Построена модель и разработана методика расчета технологического процесса паровой сжигания биогаза предприятий на примере противоточного газификатора непрерывного действия. При начальной температуре пара менее 300°C задача инертного нагрева имеет аналитическое решение. В результате численного расчета разработана методика определения оптимальных параметров для процесса сжигания биогаза в модели противоточного слоевого газификатора мощностью 50 кВт по двум критериям оптимальности: наивысшая теплота сгорания продуктового биогаза и степень конверсии органической части не менее 99%. Изменение рельефа и структуры поверхности частицы во время протекания процесса, результат анализа состава частиц после газификации позволяет утверждать, что при использовании предлагаемого способа переработки шламов может быть достигнуто практически полная конверсия углерода, трудно достижимая даже в процессах газификации. В образовательном процессе для студентов направления «5В070200-Автоматизация и управление» раздел «Автоматизация процессов газификации биомассы» излагается с учетом полученных результатов в данной научно-исследовательской работе. Разработана физико-математическая модель процесса сжигания биогаза в опытном горизонтальном реакторе.

На защиту выносятся:

1. Усовершенствованная система комплексной переработки органических отходов, с получением биогаза, обогащенного метаном, воздуха либо воды насыщенных углекислым тазом, и высококачественного удобрения.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов массопереноса в мембранно-сорбционных газоразделительных системах.

3. Методика расчета технологической линии комплексной переработки органических отходов.

4. Результаты испытаний и технико-экономическая эффективность опытно-промышленного образца биогазовой установки, размещенной в Люблинском технологическом университете (Польша), эффективность его использования в хозяйственных условиях.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований доложены и одобрены на зарубежных и отечественных научных конференциях, на научных семинарах кафедры «Автоматизация и управление», на научных семинарах института «Информационных и телекоммуникационных технологий».

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 43 печатных работах, в том числе 5 в журналах перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 15 таблиц, 43 рисунка, список литературы из 163 наименований, 5 приложений.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Обзор существующих и перспективных технологических решений по получению, сжиганию и использованию биогаза

Биогаз является одним из видов биобиогаза, которое получают из биомассы. Поскольку биогаз производится из биомассы, он относится к одному из видов возобновляемых источников энергии. Биогаз состоит в основном из метана и диоксида углерода и может содержать небольшое количество сероводорода. Существуют три основных источника биогаза: продукты очистки сточных вод, органические отходы и отходы животноводческих ферм. Известно использование биогаза и в древние времена: для нагрева воды в ваннах Ассирии (10 век до н.э.) и Персии (16 век н.э.). Современное использование биогаза (установки по растительному сбраживанию) началось в 17-м — 18-м веках. Первый реактор осадков сточных вод был построен в Англии в начале 20-го века.

Обычно под биогазовой установкой (БГУ) подразумевается комплекс инженерных сооружений, состоящий из устройств:

- подготовки сырья
- производства биогаза и удобрений
- очистки и хранения биогаза
- производства электроэнергии и тепла
- автоматизированной системы управления БГУ.

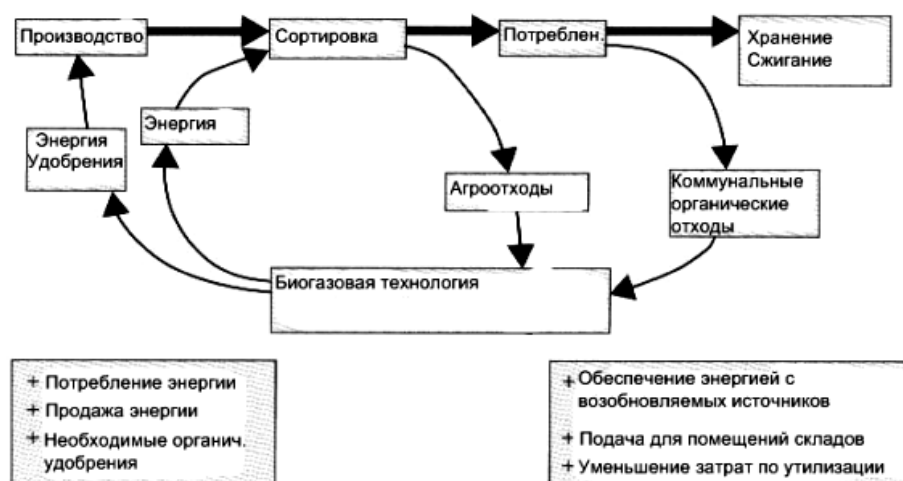
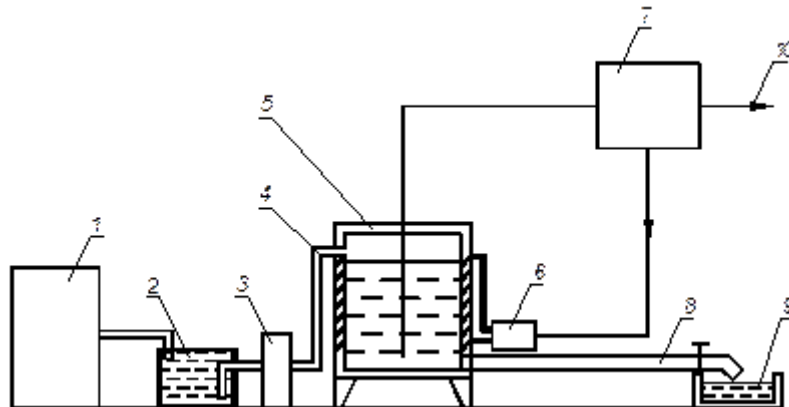


Рисунок 1.1 – Биотехнологии в круговороте веществ

Анаэробное сбраживание является биохимическим процессом сбраживания биомассы в бескислородной среде под влиянием определенных видов бактерий. Для контролируемого анаэробного сбраживания необходима герметичная камера, называемая реактором. Биогаз, полученный в реакторе (также известный как «газ реактора»), на самом деле является смесью метана и диоксида углерода, составляющих более 90 процентов общего объема.

Биогаз обычно содержит небольшое количество сероводорода, азота, водорода, метилмеркаптана и кислорода. Метан является горючим газом. Теплотворная способность биогаза реактора зависит от количества метана, который в нем содержится. Содержание метана колеблется от 55 до 80%. Типичный газ реактора с концентрацией метана 65%, содержит около 22 МДж энергии на кубический метр.



1 – источник отходов; 2 – приемный бункер; 3 – бункер загрузки исходного субстрата; 4 – входной патрубок; 5 – биореактор; 6 – система подогрева; 7 – газгольдер; 8 – патрубок слива готового удобрения; 9 – хранилище удобрения; 10 – газ потребителю

Рисунок 1.2 – Общая схема биогазовой установки

Биогаз как энергоноситель может использоваться по-разному, в зависимости от природы источника биогаза и местных потребностей. Как правило, биогаз используется для производства тепла и электроэнергии путем прямого сжигания на котельных и ТЭЦ, для производства электроэнергии топливными элементами или микро-турбинами, или в качестве биогаза для транспортных средств; для производства электроэнергии в канализационных системах, в газовом двигателе ТЭЦ, где сбросное тепло от двигателя удобно использовать для нагрева реактора биогаза; приготовления пищи; обогрева помещений; нагрева воды и технологических процессов. Он может также заменить сжатый природный газ для использования в транспортных средствах, как топливо для двигателя внутреннего сгорания или для топливных элементов. Метан биогаза может быть сконцентрирован и доведен до стандартов качества ископаемого природного биогаза. После процесса очистки он становится биометаном.

Самым простым способом использования биогаза является прямое сжигание в котлах или горелках, которые широко используются для сжигания биогаза на небольших фермах. Прямое сжигание в обыкновенных газовых горелках широко применяется во многих странах. Для производства тепла биогаз можно сжигать, как на месте производства, так и транспортировать по трубопроводу до других конечных пользователей. В отличие от других видов применения, биогаз не нуждается в переработке и очистке от загрязнений при его сжигании для целей теплоснабжения. Тем не

менее, биогаз все равно должен подвергаться конденсации и удалению частиц, компрессии, охлаждению и сушке.



Рисунок 1.3 – Классификация биогазовых технологий

Теплоэлектроцентральный (ТЭЦ). ТЭЦ является распространенным потребителем биогаза во многих странах с развитым сектором биогаза, так как это считается очень эффективным способом производства энергии. ТЭЦ, созданные на основе двигателя внутреннего сгорания, имеют КПД до 90% и производят 35% электроэнергии и 65% тепла.

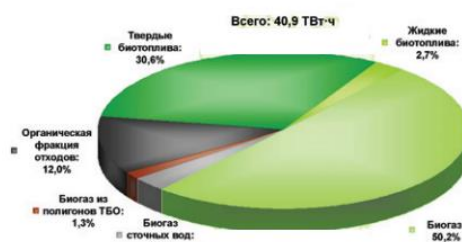


Рисунок 1.4 – Структура электроснабжения на базе биомассы и биогаза

Электроэнергия, полученная из биогаза, может использоваться для привода электрического оборудования, такого как насосы, системы управления и мешалки. Прежде, чем биогаз поступит на ТЭЦ, его обезвоживают и сушат. Важным вопросом для энергетической и экономической эффективности биогазовой установки является использование полученного тепла. Часть тепла используется для обогрева реакторов (технологическое тепло), оставшаяся часть, примерно 2/3 от всей произведенной энергии, — для внешних потребностей. В микротурбине воздух нагнетается в камеру сгорания под высоким давлением и смешивается с биогазом. Смесь воздуха и биогаза сгорает и приводит к повышению температуры и расширению газовой смеси. Горячие газы проходят через турбину, которая соединена с генератором электроэнергии. Электрическая мощность микро-турбины, как правило, менее 200 кВт. Перед подачей в сеть газоснабжения или перед использованием в качестве моторного биогаза биогаз должен пройти процесс переработки, где удаляются все загрязняющие вещества, а также углекислый газ, а содержание метана увеличивается с обычных 50-75% до более чем 95%. Переработанный биогаз часто называют биометаном.

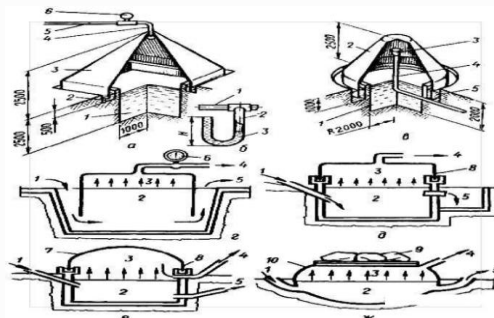
1.2 Анализ конструкции биогазовых установок

1.2.1 Зарубежный опыт использования технологического биогазового оборудования

На сегодняшний день в мире разработаны и применяются биогазовые технологии, основанные на использовании различных температурных режимов, влажности, состава перерабатываемого сырья, длительности брожения биореакций, а также разработаны различные виды биогазовых установок. Биогаз – это смесь метана и углекислого биогаза, который получается водородным или метановым брожением биомассы. Принцип работы всех биогазовых установок одинаков. После подготовки и доведения субстрата до нужной влажности он подается в биореактор. Процесс выхода биогаза и удобрений из субстрата называется сбраживанием. Сбраживание происходит за счет жизнедеятельности микроорганизмов. Полученный биогаз очищают от углекислого биогаза и других незначительных примесей [1]. Обширное развитие биогазовых установок получило в Китае, также активно внедряют в ряде стран Европы, Америки, Азии. В Западной Европе более 10 лет назад начали массово применять малообъемные биогазовые установки.

На территории любой фермы можно оборудовать малообъемную биогазовую установку. Такая биогазовая установка, приведена на Рисунке 1.5-а. Яма облицована железобетонными плитами толщиной 10-15 см и для герметичности покрыта смолой. Из металлического материала сделан колокол высотой 3 м, в верхней части которого будет накапливаться газ. Чтобы защитить от коррозии колокол нужно периодически красить двумя слоями масляной краски. Вокруг ямы-ферментатора предусмотрена бетонная канавка для гидрозатвора (2), которую наполняют водой, и в которую погружают нижний бортик колокола на глубину 0,5 м. Из-за замерзания конденсирующейся воды, чтобы трубка не разрывалась, применяют простое устройство (Рисунок 1.5-б): U – образная трубка (2) присоединена к трубопроводу (1) в самой нижней точке. Конденсат (3) сливается через свободный конец трубки, при этом не происходит утечки биогаза. Во втором варианте биогазовой установки (Рисунок 1.5-в) яму (1) диаметром 4 м и в глубину 2 м охватывают изнутри железом, листы которого плотно сваривают. Внешняя поверхность сварного резервуара покрывается смолой для антикоррозионной защиты. С наружной стороны верхней кромки резервуара из бетона предусмотрена канава в виде кольца (5) глубиной до 1 м, который заливают водой. В нее свободно устанавливается вертикальная часть купола (2), который закрывает резервуар. Таким образом, канава с залитой водой служит гидрозатвором. Газ собирается в верхней части купола и через выпускной патрубок (3) по трубопроводу (4) подается к месту использования. Конструктивные схемы простейших малообъемных биогазовых установок показаны на рисунках 1.5-г, д, е, ж. Стрелками обозначено перемещение исходного биогаза. Купол может быть железным

или пленочным. Железный купол можно сделать с длинной цилиндрической частью для полного погружения в перерабатываемую массу «плавающим» (Рисунок 1.5-г) или вставлять в гидрозатвор (Рисунок 1.5-д). Пленочный купол можно так же вставить в гидрозатвор (Рисунок 1.5-е) или изготовить в виде цельносклеенного большого мешка (Рисунок 1.5-ж). В последнем примере на пленочный мешок складывают тяжесть (9), чтобы пленка не очень раздувалась, а также для образования под пленкой достаточного давления [3]. Биогаз накапливается под куполом или пленкой и поступает по газопроводной трубе к месту использования.



а) с пирамидальным куполом: 1 - яма для сырья: 2 - канава гидрозатвора: 3 - колокол для сбора биогаза: 4, 5 - патрубок для удаления биогаза; 6 - манометр.

б) устройство для удаления конденсата: 1 - трубопровод: 2 - U-образная труба для конденсата; 3 - конденсат.

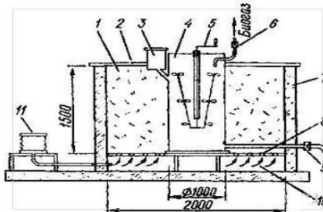
в) с коническим куполом: 1 - яма для сырья: 2 - колокол: 3 - часть патрубка: 4 - труба для удаления биогаза: 5 - гидравлический затвор.

г. д. е. ж) - схемы вариантов простейших биогазовых установок: 1 - подача субстрата: 2 - резервуар для субстрата: 3 - место сбора биогаза: 4 - выпускной патрубок для биогаза: 5 - отвод ила: 6 - манометр: 7 - пленочный купол: 8 - гидрозатвор: 9 - груз: 10 - полиэтиленовый мешок

Рисунок 1.5 – Схемы простейших малогабаритных биогазовых установок

На Рисунке 1.6 приведена биогазовая установка с подогревом сбраживаемой массы с помощью тепла, которое выделяется при разложении навоза в аэробном реакторе. Установка имеет цилиндрическую форму и металлическую емкость с горловиной (3) для заливки и краном (9) для слива, механической мешалкой (5) и патрубком (6) отбора биогаза. Реактор (1) можно сделать из деревянных материалов. Для выгрузки сброженного субстрата боковые стенки сделаны съемными. Пол ферментатора - решетчатый, через технологический канал (10) воздух продувают из воздуходувки (11). Сверху ферментатор закрывают деревянными щитами (2), чтобы уменьшить потери подаваемого тепла, стенки и днище изготавливаются из теплоизоляционного материала (7). Установка работает следующим образом. В реактор (4) через отверстие (3) заливают предварительно подготовленный жидкий субстрат влажностью 85-95 %. Аэробный ферментатор (1) через верхнюю открывающуюся часть заполняется навозом влажностью 60-70 %. При подаче воздуха в

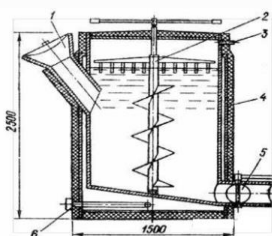
ферментаторе начнет разлагаться органическая масса и выделяться тепло, его достаточно для подогрева содержимого реактора, в результате чего начинает выделяться биогаз. Скопление биогаза происходит в верхней части реактора, и через выпускной патрубок (6) его применяют, в процессе сбраживания массу в биореакторе перемешивает мешалкой (5).



1 – ферментатор; 2 - деревянный щит; 3 - горловина для заливки; 4 – метантанк; 5 – мешалка; 6 - выпускной патрубок биогаза; 7 - теплоизоляционный материал; 8 – решетка; 9 - сливной кран; 10 - канал для подачи воздуха; 11 - воздуходувка

Рисунок 1.6 – Схема биогazовой установки с подогревом

На Рисунке 1.7 представлена индивидуальная биогazовая установка (ИБГУ-1) для семьи, имеющей от 5 до 10 голов скота или 20-50 свиней, или до 300 голов птиц. ИБГУ-1 ежесуточно может перерабатывать до 300 кг органических отходов и производит 100-300 кг экологически чистых биоудобрений и 5-12 куб.м биогаза [2]. Что бы приготовить пищу на семью от трех до четырех человек нужно сжигать 3-4 куб.м биогаза в сутки, а для отопления дома площадью 50-60 кв.м сжигается 10-12 куб.м. биогаза. Такая установка может работать в любой климатической зоне.



1 - горловина для загрузки; 2 - мешалка; 3 - выпускной патрубок для биогаза; 4 - теплоизоляция; 5 - выпускной патрубок с краном для выгрузки органических удобрений; 6 – термометр

Рисунок 1.7 – Схема индивидуальной биогazовой установки (ИБГУ-1)

Влажность используемого субстрата рекомендуется уменьшать зимой до 88—90% и увеличивать летом до 92— 95%, при этом вода, которая используется для разбавления, должна быть теплой. Субстрат загружается порциями, по крайней мере, один раз в сутки. После первой загрузки реактора иногда вырабатывается биогаз, содержащий более 60% углекислого биогаза, и поэтому он не горит. Углекислый газ удаляют в атмосферу, и в течение трех дней установка начнет функционировать нормально.

Энергоснабжение является основной проблемой развития современного технологического общества. Один из первых, кто нуждался в

качественном изменении энергии и развитии альтернативных источников энергии, отметил лауреата Нобелевской премии академика Н.Н. Семенов [1]. В настоящее время поднимается вопрос глобальной энергетической безопасности и реализации антикризисной энергетической политики. Возобновляемые источники энергии играют важную и растущую роль в глобальном энергетическом секторе. Основным стимулом для развития биотопливной промышленности являются экологические преимущества использования биобиогаза. Биотопливо является продуктом восстановления фотосинтеза CO_2 , крупномасштабного производства и использования которого вместо углеводородного биогаза может стабилизировать существующий уровень накопления углекислого биогаза в атмосфере и предотвратить его рост. Постоянное повышение цен на отдельные энергоресурсы привело к значительной заинтересованности в получении энергии с использованием биоконверсионной технологии органических отходов [2].

Биогаз является одним из видов биоэнергетического биогаза. Биогаз - это смесь горючих газов, полученная в результате анаэробного микробиологического процесса (ферментации метана) при разложении органических веществ. Сырьем для производства биогаза является широкий спектр органических отходов - жидкие и твердые отходы агропромышленного комплекса, твердых бытовых отходов, отходов деревообрабатывающей промышленности, сточных вод [2, 3]. Биогаз в основном используется для выработки электроэнергии и тепла (с использованием когенерационной установки). В результате очистки биогаза от двуокиси углерода (CO_2) и сероводорода (H_2S) получается биометан, который является полным аналогом природного биогаза и может быть вприсунут в газопровод. В некоторых странах биогаз используется в небольшом количестве в качестве биогаза для автотранспортных средств (в основном для общественного транспорта). Во всем мире наблюдается увеличение использования биогаза для выработки электроэнергии и тепла. Производство и использование биогаза является наиболее развитым в странах ОЭСР, поскольку именно развитые страны впервые разработали и осуществили программы для перехода на возобновляемые источники энергии и активно поддерживали инициативы, направленные на внедрение новых технологий. Лидерами в производстве биогаза являются страны Европейского Союза. Европейский рынок биогазовых установок в 2012 году оценивался в 2 миллиарда долларов США, по прогнозам он должен увеличиться до 25 миллиардов к 2020 году (сейчас это 14 процентов, доля отапливаемого жилья с помощью ВИЭ в общем объеме строительства увеличилась за 4 года от 5% до 26%). В европейских странах 75% биогаза получают из сельскохозяйственных отходов, 17% - из органических отходов частных домов и предприятий и еще 8% - из сточных вод (установки на очистных сооружениях). Германия занимает первое место по количеству действующих биогазовых установок. Только 7% биогаза, производимого предприятиями, поставляется на газопроводы, остальная часть используется

на собственные нужды завода-изготовителя. Использование биогаза возглавляет Дания: этот вид биогаза обеспечивает почти 20% потребления энергии в стране. Среди других европейских стран с высокими показателями производства биогаза можно выделить Великобританию, Швецию, Норвегию, Италию, Францию, Испанию, Польшу и Украину. В США, по сравнению с Европой, рынок биогаза развивается гораздо медленнее. Несмотря на существование большого количества ферм, на территории страны имеется около 200 биогазовых установок, работающих на отходах сельскохозяйственных комплексов. Производство биогаза в Азии осуществляется с меньшими масштабами (в основном мини-заводы для индивидуального использования: для получения биогаза для приготовления пищи и реже для отопления одного дома). Но темпы развития отрасли в Китае, Вьетнаме, Индии, Непале, некоторых африканских странах растут. В Африке и Азии основная часть биогаза производится из пищевых отходов, а также отходов жизнедеятельности человека (сточных вод). Среди развивающихся стран лидером в использовании биогаза является Китай, где расположено более 20 миллионов биогазовых установок, расположенных на канализационных и полигонах. Весь объем произведенного биогаза расходуется производителями, работы по подключению небольших установок к газопроводу еще не проведены. К 2020 году Китай станет мировым лидером, сохранив темпы роста биогазовой отрасли. В Африке работают около 2 миллионов биогазовых установок, которые обеспечивают газом более 10 миллионов человек. Около 80% твердого остатка, образовавшегося в результате эксплуатации установок, используется в качестве удобрения. По оценкам экспертов, емкость рынка биогаза в Африке составляет 20 миллионов единиц.

Биогаз является сырьем для производства ценного биогаза, так называемого биометана [5]. В результате очистки биологического биогаза от диоксида углерода биометан можно использовать в качестве газообразного биогаза для компрессора внутреннего сгорания, что поможет сократить выбросы токсичных веществ по сравнению с бензином и улучшить экологическую обстановку в стране. Таким образом, выбросы в окружающую среду монооксида углерода снижаются в 5-10 раз, а оксид азота составляет 1,5-2,5. Во многих странах используется большое количество очистных сооружений. Биогазовые установки обеспечивают свои потребности в энергии на 100% летом и на 50% в зимний период. Производительность биоэнергетических комплексов позволяет обеспечивать тепловую и электрическую энергию не только для собственных нужд, но и продавать их другим потребителям. Внедрение и развитие технологий биообработки при очистке сточных вод может решить проблему энергоснабжения, которая экономически выгодна для производителей, а также достигается экологический эффект улучшения окружающей среды.

Еще одной актуальной проблемой, как в Казахстане, так и в мире, является необходимость переработки шлама в очистке сточных вод с целью улучшения экологической и энергетической ситуации. Но решение этой

проблемы возможно благодаря работе научного сообщества и активной поддержке на региональном уровне. Развитие отрасли биопереработки шлама возможно на основе всестороннего анализа генерируемых объемов и территориальной плотности распределения отходов, а также структуры и мощности биоэнергетического и биоэнергетического рынка. В настоящее время общий объем производства в мире первичных топливно-энергетических ресурсов составляет около 13 миллиардов тонн условного биогаза, из которых возобновляемые источники энергии составляют около 3%, в том числе осадки сточных вод [6]. Количество образующегося в мире осадка достигает колоссальных масштабов - вместе с обломками более 85 миллионов тонн углерода попадают в геосферу [7]. В современном городе скопление отходов составляет 250-700 кг на человека. в год. Ежегодно в развитых странах мира эти данные увеличиваются на 4-6%, что в три раза превышает темпы прироста населения. Топливо, полученное из шлама, в соответствии с теплотой сгорания, приближается к низкокалорийным углям, не требует финансовых затрат на производство и может занять достойное место в экономике страны. Самая низкая теплота сгорания биогаза в зависимости от сезона и региона колеблется в пределах 4180-10450 кДж / кг. Утилизация шлама в больших объемах является довольно сложным процессом. Наиболее экономически выгодным вариантом решения этой проблемы является использование технологии переработки шлама с получением альтернативного источника биогаза - биогаза, основными веществами которого являются метан (60-70%) и углекислый газ (30-40%). В качестве инициаторов интенсификации процесса производства биогаза из ила используется очистка сточных вод, что облегчает использование шлама. Соотношение количества ила влияет на максимальный выход биогаза. Основными условиями для процесса ферментации метано-анаэробными бактериями являются рН среды, состав шлама, приведение массы в гомогенное состояние, поддержание постоянной температуры (40-70 градусов Цельсия) и регулярное перемешивание биомассы. Различными способами, включая жидкие или ультразвуковые кавитаторы [8]. Чем мельче частицы органической смеси, тем быстрее процесс ферментации. Использование ферментов приводит к увеличению выхода биогаза и ускорению процесса переработки биомассы. Из одного килограмма сухого сырья на современном биогазовом заводе можно получить 350-500 литров биогаза. В европейских странах традиционными методами сжигания и получения биогаза являются использование комбинированных источников энергии. Например, использование комбинированных схем ТЭС для сжигания природного биогаза и отходов. Опыт показывает, что современная ТЭС, работающая на биогазе, полученном из отходов, является экологически чистым предприятием. Концентрация регулируемых веществ в газообразных продуктах сгорания не превышает нормативных значений, принятых в ЕС [9]. Тепловая электростанция, работающая на биогазе, является одним из самых доступных и экономически рентабельных источников возобновляемой энергии (ВИЭ).

1.2.2 Особенности конструкций установок отечественного производства

В условиях постоянного повышения цен на основные энергоносители, а также истощения углеводородных ресурсов Земли все большее количество стран развивают альтернативные источники энергии. Одним из таких видов является биогаз. Глубокие исследования в этой области, несмотря на известные трудности, проводятся в Республике Казахстан.

Следует отметить, что основным недостатком биогазовой энергетики является значительный вес удельных капитальных затрат (в расчете на единицу мощности), невысокая рентабельность проектов, а также проблемы с организацией сбыта энергии посредством централизованных сетей. Несмотря на это, в Казахстане наблюдается увеличение спроса на биогазовые установки (БГУ), как для малых потребителей (с объемом метантенка 3 – 20 м³), так и для средних (с объемом метантенка 30 – 100 м³).

Комплексный подход в производственной деятельности, когда «отходы», в том числе органические, тепловые, водные, газо-воздушные перерабатываются в технологической цепочке производства, минимально отражается на качестве окружающей среды, на продуктивности зональных экосистем. Комплексный подход, это не что-то новое. В целом «эволюционные» и «революционные» изменения в том числе в сфере энергетики взаимообусловлены, дополняют и нередко сменяют друг друга. Не исключаются и случаи возврата к «старым» техническим решениям на качественно новой технологической базе.

Обычно под биогазовой установкой (станцией) подразумевается комплекс инженерных сооружений, состоящий из устройств:

- подготовки сырья
- производства биогаза и удобрений
- очистки и хранения биогаза
- производства электроэнергии и тепла
- автоматизированной системы управления БГУ.

Метантенк БГУ должен быть герметичен, в него не должно быть доступа кислорода, так, как только при отсутствии кислорода возможна жизнедеятельность метанообразующих бактерий. Оптимальная температура метаногенеза зависит от вида перерабатываемого установкой субстрата (органических отходов). Контрольно-измерительные приборы, устанавливаемые на метантенке, должны обеспечивать контроль уровня субстрата в метантенке, температуры и давления внутри него.

Современные технологии позволяют перерабатывать в биогаз любые виды органического сырья, однако наиболее эффективно использование биогазовых технологий для переработки отходов животноводческих и птицеводческих ферм и сточных вод, так как они характеризуются постоянством потока отходов во времени и простотой их сбора. При этом

навоз и помет должны поступать с ферм и из хозяйств, благополучных по зооантропонозным заболеваниям, общим для животных (птицы) и человека.

Поскольку сырьем для получения биогаза может служить широкий спектр органических отходов, на многих существующих биогазовых установках используется добавка к обрабатываемым отходам, так называемой зеленой массы. Конечно, измельчение зеленой массы приводит к дополнительным затратам энергии.

Активный обмен веществ и высокая скорость биохимических обменных процессов в метантенке достигается, за счет максимального поддержания и непрерывного обновления величин граничных поверхностей между твердой и жидкой фазами. Поэтому твердые материалы, в особенности растительного происхождения, должны быть предварительно подготовлены с помощью режущих, разрывающих или плющильных устройств, чтобы в результате эффективного механического воздействия получить частицы возможно меньшего размера. Доля взвешенных в жидкости твердых частиц в значительной мере зависит от технических средств, которые используются для получения тщательного перемешивания, гидравлического транспортирования субстрата и отделения биогаза. Современный уровень развития БГУ позволяет перерабатывать субстраты с содержанием сухого вещества до 12 %, если размер волокнистых или стеблевых элементов не превышает 30 мм.

В метантенке необходимо организовать периодическое перемешивание субстрата, которое обеспечивает эффективную и стабильную работу БГУ.

Цель перемешивания - высвобождение образованного биогаза, перемешивание свежего субстрата и бактерий (прививка), предотвращение образования корки и осадка, недопущение образования участков разной температуры внутри метантенка, обеспечение равномерного распределения популяции бактерий, предотвращение формирования пустот и скоплений, уменьшающих эффективную площадь метантенка. При выборе метода перемешивания нужно учитывать, что процесс сбраживания представляет собой процесс жизнедеятельности симбиоза различных штаммов бактерий и при разрушении этого сообщества процесс ферментации будет непродуктивным до образования нового сообщества бактерий. Поэтому слишком частое или продолжительное перемешивание вредно. Рекомендуется медленное перемешивание субстрата через каждые 4 – 6 ч.

Оптимальное перемешивание сырья повышает выход биогаза до 50%.

БГУ обеспечивают утилизацию (переработку) органических отходов 3 и 4 класса опасности согласно Постановлению от 12 июля 2003 г. №344, в следующих режимах:

- в психрофильном режиме оптимальная температура в метантенке 15 – 20 °С, но может быть и ниже. В таком режиме отходы перерабатываются 30 – 40 дней. Психрофильный режим обычно используется в летнее время года в случае, когда тепло и количество субстрата (отходов) значительно меньше обычного, например, из-за выпаса скота;

- в мезофильном режиме при температуре 30 – 40 °С органические отходы перерабатываются 7 – 15 дней, в зависимости от вида отходов;

- в термофильном режиме при температуре 52 – 56 °С органические отходы перерабатываются за 5 – 10 дней, при этом качество биогаза и удобрений, по ряду показателей, обычно ниже, чем в мезофильном режиме. Кроме того в термофильном режиме традиционно потребляется больше энергии для обогрева. Такой режим подходит большего всего тем, у кого основная задача — переработать большое количество отходов. При оптимизации работы установки и состава отходов, можно ускорить переработку даже до 3 – 4 дней. Выгода от работы в термофильном режиме в том, что резко снижается стоимость 1 кВт установленной мощности БГУ.

Требования к допустимым пределам колебания температуры субстрата, для оптимального газообразования, тем жестче, чем выше температура процесса ферментации: при психрофильном температурном режиме – ± 2 °С в час; мезофильном – ± 1 °С в час; термофильный – $\pm 0,5$ °С в час.

Поскольку, например, в регионе среднегодовая температура исходного субстрата, составляет около 10 °С, а температура окружающей среды, около 4 °С, то необходимость в системе подогрева субстрата и поддержания его температуры в процессе ферментации очевидна. По данным А.А. Ковалева [1] до 60% полученного биогаза тратится на собственные нужды БГУ. При этом, наиболее энергоемким является процесс нагрева субстрата, суточной дозы загрузки метантенка, на который идет около 95% энергии, расходуемой на собственные нужды установки.

Наиболее распространенной системой подогрева является внешняя система подогрева с водонагревательным котлом (котельной установкой), работающим на биогазе, электричестве или твердом топливе, где теплоносителем является вода с температурой около 60 °С. Более высокая температура теплоносителя, повышает риск налипания взвешенных частиц на поверхности теплообменника — теплообменники рекомендуется располагать в зоне действия перемешивающего устройства.

БГУ должна быть автоматизирована. Объем автоматически выполняемых операций биогазовых установок различного назначения может быть различен. В обязательный объем автоматизации входят:

- для биогазовых установок небольшой мощности:

при срабатывании датчика загазованности (газоанализатора) помещения автоматически включаются системы оповещения персонала (сигнальные лампы, электрические звонки и др.) и происходит аварийное отключение систем БГУ, в частности срабатывает предохранительный клапан, прекрывающий подачу биогаза;

при срабатывании любого теплового реле в цепях питания насосов циркуляционного, водяного или загрузочного включаются системы аварийного оповещения персонала.

По данным И. Егорова, директора биогазовых проектов AEnergy, составляющие положительного денежного потока биогазовых проектов могут быть следующими (таблица 1.1), при гарантированной надежности и

долговечности надежной работы БГУ, за счет использования метантенка из эмалированной стали, в течение 40 лет.

Таблица 1.1 – Составляющие положительного денежного потока биогазовых проектов

Составляющая	Доля в структуре выручки
Продажа электроэнергии	60-75%
Продажа тепловой энергии	10-20%
Снижение платы за технологическое присоединение (для новых и расширяющихся предприятий)	0-50%
Продажа мощности	0-30%
Продажа удобрений	10-30%
Снижение экологических платежей	0-20%
Продажа углеродных квот	0-10%*

*Производство 1000 м куб. биогаза обеспечивает замещение 10 т выбросов CO₂. Средняя рыночная цена 1т CO₂ сегодня составляет 4000 тенге.

Мы рассмотрим традиционную БГУ и метантенк, которой размещен на дне солнечного соляного пруда (ССП) [2]. Сравнительному анализу видов затрат, связанных с сооружением БГУ, будет подвергнуты метантенки этих БГУ и сооружения и оборудование (устройства) непосредственно с ними связанные. В качестве исходных данных для анализа принимаем следующее. В состав биогаза входит, примерно, 55 – 60% биометана и 40 – 45% углекислого биогаза. На этот газ могут работать бытовые газовые приборы, включая газовые водонагреватели, обогреватели воздуха и газогенераторы. Биометан – продукт, получаемый путем очищения биогаза от CO₂, используемый как биотопливо (ГОСТ Р 52808-2007). Биогаз легче воздуха (1,05 – 1,2 кг/м³), поэтому стремится вверх. Все отходы производства и потребления делят на 4 класса опасности: 1 – чрезвычайно опасные, 2 – высоко опасные, 3 – умеренно опасные и 4 - малоопасные. Удобрения (эффлюент), получаемые при термофильном режиме ферментации экологически чистые, лишены нитритов, семян сорняков, болезнетворной микрофлоры, специфических запахов. Оборудование по подготовке и предварительной обработке сырья для: перемешивания субстрата; измельчения; сепарации примесей на входе в реактор; загрузки (подача и дозирование) сбрасывающей суспензии у сравниваемых метантенков условно принимаем одинаковым.

В комплект этого оборудования для традиционной БГУ может входить агрегат для размораживания сырья (навоза). В помещении, где размещен традиционный метантенк, по ГОСТ 53790-2010 должны находиться:

- комплект противопожарного инвентаря;
- диэлектрические перчатки и ковры у щитов управления электроагрегатами;
- газоанализаторы или газосигнализаторы;
- средства индивидуальной защиты;

- взрывобезопасные аккумуляторные фонари;
- аптечка первой доврачебной помощи.

Не допускается нахождение работников и проведение любых работ в помещении метантенка при неработающей вентиляции. Электротехническое оборудование и обслуживающее помещение метантенка должны быть оборудованы резервным электропитанием, чтобы обеспечить постоянную работу вентиляторов с необходимой кратностью воздухообмена. Контролировать концентрацию газов в воздухе помещения метантенка с помощью газоанализаторов. В обслуживаемом помещении метантенка электрическое освещение, электродвигатели, пусковые и токопитающие устройства и аппаратура должны выполняться во взрывозащищенном исполнении в соответствии с классом взрывоопасной зоны (категории помещения). Отвод биогаза от метантенка, устройство и эксплуатация газгольдеров и газовой сети метантенка должны проводиться в соответствии с требованиями Правил безопасности в газовом хозяйстве и Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Оптимальный способ накопления биогаза зависит от того, для каких целей будет использован биогаз. При прямом сжигании биогаза в горелках котлов и двигателях внутреннего сгорания не требуются большие газгольдеры. В этих случаях газгольдеры должны обеспечивать выравнивание неравномерностей газовыделения и улучшения условий последующего горения, в зависимости от типа газгольдера и выдерживаемого им давления объем газгольдера составляет от 1/5 до 1/3 объема реактора. Пластиковые газгольдеры применяют для сбора биогаза в простых, совмещенных установках, где пластиком покрывают открытую емкость, служащую в качестве реактора, или отдельный пластиковый газгольдер соединяют с реактором. Газгольдер должен вмещать суточный объем, вырабатываемого биогаза. Стальные газгольдеры делят на газгольдеры низкого (0,01-0,05 кгс/см²), среднего (8-10 кгс/см²) и высокого (200 кгс/см²) давления. Стальные газгольдеры низкого давления оправданы только в случае большого расстояния (минимум 50-100 м) от установки до использующих биогаз приборов. В других случаях следует рассматривать возможность использования более дешевого пластикового газгольдера.

В газгольдеры среднего и высокого давления газ закачивается с помощью компрессора. Газгольдеры высокого давления используют для заправки автомашин и баллонов. Контрольно-измерительные приборы, устанавливаемые на газгольдеры, должны включать в себя водяной затвор, предохранительный клапан, манометр и редуктор давления. Стальные газгольдеры должны быть заземлены. Привлекательно применение биогаза для факельного обогрева теплиц. Кроме поступления углекислого биогаза из газгольдера происходит образование углекислого биогаза при сгорании биометана, производится освещение теплиц и одновременно образуется вода, увлажняющая воздух. Еще одно направление использования составных компонентов биогаза - утилизация углекислого биогаза, содержащегося в нем в количестве около 40 %. Извлекая углекислый газ путем отмывки (в отличие

от биометана он растворяется в воде), можно подавать его в теплицы, где он служит «воздушным удобрением», увеличивая продуктивность растений.

Поскольку подогрев субстрата в метантенке, размещенном на дне ССП осуществляется от теплоты рассола пруда, то режимы ферментации в нем в течение летнего периода различны. Они зависят от температуры, которой обладает рассол (рисунок 1.16).



а – точка окончания ферментации в термофильном режиме при температуре 53 °С,
б – точка окончания ферментации в мезофильном режиме при температуре 35 °С.

Рисунок 1.16 – Гипотетическое изменение режимов ферментации в метантенке биогазовой установки на базе солнечного соляного пруда в течение летнего периода

Весной при переходе с мезофильного на термофильный режим (левая часть рисунка 1.16), для повышения температуры субстрата в метантенке объемом 20 м³ с 35 до 53 °С требуется около 420 кВт·ч теплоты. При использовании для этой цели теплоты рассола пруда площадью 78,5 м² (диаметр пруда 10 м) температура рассола понизится примерно на 6 °С.

Осенью, когда температура в ССП понижается, для поддержания эффективного температурного режима анаэробной обработки отходов животноводства к ним можно добавлять высокоэнергетические компоненты, увеличивающие выделение экзотермической теплоты при ферментации (сахарный жом, отходы пищевой промышленности с высоким содержанием жиров, силос, клеверозлаковая смесь и т.п.). Положение точек а и б (рисунок 1.16) зависит от экзотермической теплоты ферментации (от деятельности бактерий). То, что работа в термофильном режиме и использование теплоты рассола ССП, вместо биогаза, для поддержания температуры ферментации имеет свои неоспоримые преимущества, подтверждается результатами испытаний БГУ в фермерском хозяйстве Республики Казахстан.

Испытания были проведены сотрудниками Казахского научно-исследовательского института механизации и электрификации сельского хозяйства (КазНИИМЭСХ), Барковым В.И., Токмолдаевым А.Б., Аблинановым В.А. и Сарыбаевым Б.А. [3] Поскольку эти испытания наглядно отражают приведенные выше плюсы и минусы традиционных БГУ, приведем их максимально подробно. Биореактор испытывался в режиме биообработки жидкого навоза КРС, поступающего на обработку из коровника на 40 голов. Технология содержания животных — смешанная (стойлово–выгульная). Результаты испытаний и определения

технологических параметров БГУ приведены на рисунках 1.17 и 1.18. Анализ данных испытаний метантенка показывает, что время нагрева субстрата до мезофильной температуры составляет – 46 часов, а до термофильной температуры – 68 часа.



Рисунок 1.17 – Зависимости параметров метантенка от времени при нагреве в термофильном режиме

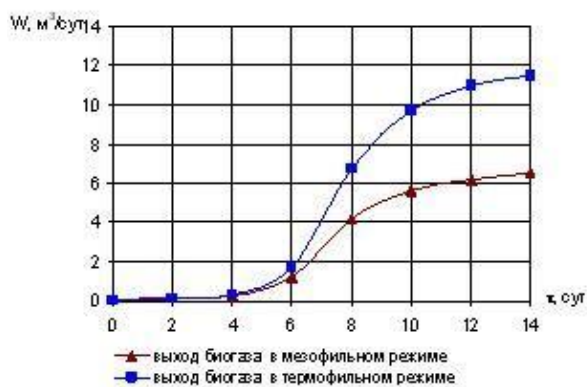


Рисунок 1.18 – Выход биогаза в мезофильном и термофильном режимах

Суточный расход твердого биогаза (кизяка) составляет – 31 кг/сут., КПД топливного котла – 78,5 %. Производительность по навозу составляет 0,5 – 0,7 т/сут., по биогазу – 6,5...11,5 м³/сут. Выход биогаза в мезофильном режиме составляет 6,5 м³/сут., в термофильном режиме – 11,5 м³/сут. (рисунки 2 и 3). При работе гидрозатвора в режиме теплообменника температура теплоносителя в нем колеблется в пределах 49 – 65 °С, температура в загрузочной камере — 34 – 40 °С, а в разгрузочной камере — 32 – 40 °С. Исследования зависимости расхода биогаза при установке в топливном котле факельной и керамической горелок показали, что суточный расход биогаза с факельной газовой горелкой составляет 6,17 м³/сут (0,257 м³/час), а с керамической газовой горелкой – 4,8 м³/сут (0,2 м³/час). Химический анализ проб органического удобрения, отобранных в процессе работы биогазовой установки (проба №1 – исходный навоз с влажностью 90

%, проба №2 – готовое органическое удобрение) показал высокое содержание питательных веществ (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Содержание питательных веществ в органическом удобрении

Проба	рН среды	Содержание, г/кг (%)		
		Азот N _{общ}	Фосфор (P ₂ O ₅)	Калий (K ₂ O)
№1	7,0	21,56 (2,156%)	29,6 (2,96%)	48,0 (4,8%)
№2	7,2	16,52 (1,652%)	23,2 (2,32%)	21,6 (2,16%)

В 1 т сухого органического удобрения содержится: 16,52 кг азота (N), 23,2 кг фосфора (P₂O₅), 21,6 кг калия (K₂O).

Анализ патогенной микрофлоры в органическом удобрении и эффективность обеззараживания, наличие яиц гельминтов и семян сорняков приведены в таблице 1.3. Общее микробное обсеменение исходного навоза (коли-индекс) – 10⁹ КОЕ, после анаэробного сбраживания в биогазовой установке общее микробное обсеменение готового органического удобрения снизилось до 10⁷ КОЕ, таким образом, степень обеззараживания навоза в биогазовой установке составляет 99%. В органическом удобрении отсутствуют яйца гельминтов, а семена сорных растений полностью потеряли всхожесть.

Таблица 1.3 – Анализ патогенной микрофлоры в органическом удобрении и эффективность обеззараживания, наличие яиц гельминтов и семян сорняков

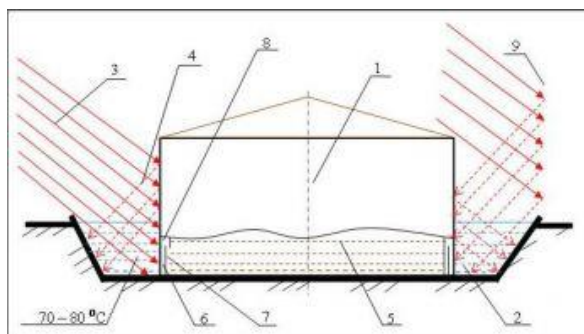
Проба	Бактериальная обсемененность, колоний/см ³	Коли-индекс*, бактерий/дм ³	Коли-титр	Эффективность обеззараживания, %		
				по наличию		
				бактериальной обсемененности	яиц гельминтов, шт/дм ³	семян сорняков, шт/см ³
№ 1	10 ⁹ КОЕ	10 ¹⁰ КОЕ	3x10 ⁵ КОЕ	-	наличие	наличие
№ 2	10 ⁷ КОЕ	10 ⁵ КОЕ	3x10 ³ КОЕ	99	отсутствуют	потеря всхожести

*коли-индекс: количество бактерий группы кишечных палочек в 1 дм³ воды.

В результате испытаний установлено, что биогазовая установка соответствует требованиям ГОСТ 31343-2007. Производительность установки по биогазу составляет — 6,5 – 11,5 м³/сут., по удобрению — 0,5 –

0,7 т/сут., объем биореактора — 5 м³, температура субстрата в биореакторе соответствует термофильному режиму — 52 – 54 °С, расход биогаза на нагрев — 6,2 м³/сут, доза загрузки — 10 %, плотность полученного удобрения — 964,9 кг/м³, массовая доля сухого вещества — 4,7 %, эффективность обеззараживания навоза — 99 %.

По результатам приведенной в Казахстане работы следует, что для БГУ метантенк, которой размещен в ССП, для ускорения начала термофильного режима весной и мезофильного осенью (рисунок 1), снижения времени перерыва в выработке биогаза, целесообразно готовить в термостатированной емкости субстрат с колонией термофильных (мезофильных) бактерий анаэробного вида. Наиболее типичными видами термофильных бактерий являются *Methanobacterium soehngeni* и *Methanobacillus omelianskii*. Термофильные метановые бактерии обычно сопутствуют анаэробным целлюлозным бактериям или культивируются совместно с ними. Энергию солнечного соляного рва (пруда в форме кольца, охватывающего придонную боковую поверхность метантенка) можно использовать для подогрева субстрата и для больших биогазовых установок (рисунок 1.19).



1 – метантенк, 2 – солнечный соляной ров (кольцевой пруд), 3 – прямое солнечное излучение, 4 – отраженное солнечное излучение, 5 – субстрат, 6 – наружный кольцевой зазор между солнечным соляным рвом 2 и внутренним объемом метантенка 1, 7 – внутренний кольцевой зазор между солнечным соляным рвом 2 и внутренним объемом метантенка 1, 8 – теплоизоляция метантенка 1, 9 – отражатель солнечного излучения

Рисунок 1.19 – Схема метантенка большого объема с солнечным соляным рвом

Метантенк 1 (рисунок 1.19) размещен на дне пруда 2, в который поступает прямое солнечное излучение 3 и отраженное от боковой наружной поверхности метантенка 1 солнечное излучение 4.

Поддержание необходимой температуры ферментации в метантенке 1, за счет использования солнечной энергии (теплоты рассола рва 2) обеспечивается следующим образом.

При заполнении наружного 6 и внутреннего 7 кольцевых зазоров водой поступление тепла из солнечного соляного пруда 2 к субстрату 5 в метантенке 1 максимально. Это обеспечивает, при необходимости,

ускоренный нагрев сырья до требуемой температуры ферментации. После нагрева субстрата до требуемой температуры, производится слив воды из наружного 6 или внутреннего 7 зазоров, и их осушение. В результате интенсивность поступления тепла из солнечного соляного пруда 2 через воздушные зазоры 6 и 7 уменьшается в десятки-сотни раз, по сравнению с тем, когда они были заполнены водой. Можно осушать и один из зазоров.

Дальнейшее поддержание температуры субстрата в требуемых пределах можно обеспечивать как за счет синхронного регулирования подачи «горячего» сырья и отвода эффлюента, так и за счет периодического заполнения зазоров 6 и 7 водой и создания в этих зазорах низкого вакуума.

Такая комбинированная установка генерации биогаза может обеспечить работу метантенка 1 в термофильном режиме, в первую очередь в странах с жарким климатом (Кыргызстан, Узбекистан, Таджикистан) без затрат вырабатываемого биогаза на собственные технологические нужды. Это очень актуально, если затем биометан используется в качестве моторного биогаза, для обжига кирпича, освещения, для производства асфальта, выработки пара и для других технологических процессов, где нужна температура, намного превышающая 100 °С. В зазоре 6, при осушенном зазоре 7, в течение всего летнего периода можно подогревать воду для приготовления субстрата. Кроме того, в зазоре 6, при осушенном зазоре 7, можно подогревать воду весной, для использования при поливе в теплицах и парниках, обеспечивая поддержание в них приемлемую температуру не только воздуха, но и грунта, т.к., например, в мае естественная средняя месячная температура почвы на юге Омской области на глубине 0,4 м составляет 8,7 °С, на глубине 0,8 м — 5,1 °С, а на глубине 1,6 м — всего 0,9 °С. При осушенном зазоре 6, прокачкой холодной воды по зазору 7 можно охлаждать субстрат.

Для более эффективного аккумулирования солнечной энергии солнечным соляным рвом, с северной стороны метантенка 1 (рисунок 1.19) надо установить отражатель 9 (концентратор солнечной энергии), который будет направлять отраженное солнечное излучение в северную часть рва (пруда) в наиболее солнечное, полуденное, до и послеполуденное время.

Температурная граница их развития 45 – 69 °С. Особенность этих бактерий — их высокая скорость роста благодаря ускоренному обмену веществ. Наступление неблагоприятной (низкой) температуры переводит их в стадию покоя, в которой они могут пребывать неопределенное время. А мезофильные бактерии, лучше всего растут (их оптимум для роста) в температурных пределах 20 – 45 °С. Свободноживущие мезофилы в холодные сезоны года неактивны. Ниже и выше температуры 20 – 45 °С они находятся в состоянии покоя или смерти в зависимости от видовой принадлежности. Поскольку в соответствии с таблицей 1.2 метантенки рассматриваемых БГУ различны, то различны и устройства (сооружения) непосредственно с ними связанные. Исходя из этого необходимые, для эксплуатации этих различных БГУ, разрешительных документов должны быть различны, как по видам (структуре), так и по стоимости. Исходя из

проведенного анализа, перспективным представляется, более расширенное использования солнечной энергии, аккумулированной солнечным соляным прудом, по сравнению с приведенным в [4].

Использование в технологическом производстве биогаза солнечной энергии позволяет обеспечить его летнее и осеннее производство с наибольшей эффективностью, что особенно важно в районах, отрезанных от крупных энергетических центров из-за разлива рек, бездорожья и т.д.

БГУ такого типа позволят более эффективно обеспечивать, за счет вырабатываемого удобрения поддержание плодородия почв, предотвращать свободную эмиссию биометана в атмосферу. Прибыль от эксплуатации БГУ зависит от многих факторов, включая продажи «побочных» продуктов. Самую значительную прибавку к прибыли от продажи биометана можно получать от реализации жидких удобрений, поскольку это высоколиквидная продукция, пользующая постоянным спросом. Спрос на удобрения есть всегда, поскольку непреложным фактором функционирования аграрной биосистемы является баланс между внесением в почву и выносом из неё энергии в виде питательных веществ: внесение их должно быть не менее выноса. При выработке биогаза использование солнечной энергии для подогрева субстрата в большом метантенке позволит летом и осенью применять термофильный режим ферментации, в этом случае при том же объеме метантенка выход биогаза увеличится в 1,5 – 2 раза. Стоимость БГУ с солнечным соляным прудом значительно ниже стоимости традиционной БГУ, при одинаковых объемах метантенков. При этом использование термофильного режима ферментации в них дополнительно ведет к снижению стоимости 1 кВт их установленной мощности. За летний период эксплуатации БГУ с ССП, при работе большую часть времени в термофильном режиме, можно получать больше товарного биогаза, по сравнению с традиционной БГУ. Поскольку эффективность обеззараживания удобрения у БГУ с ССП выше, то и доход от реализации удобрений будет также выше.

Модернизация с использованием солнечного соляного пруда БГУ, позволит уменьшить вес удельных капитальных затрат в 1,5 – 2 раза (в расчете на единицу мощности) и повысить рентабельность биогазовых проектов. Перспективным представляется использования энергии солнечного соляного рва, пруда — в форме кольца, для подогрева и поддержания температуры ферментации субстрата в БГУ больших размеров.

1.2.3 Классификация биогазовых установок

Рассмотрим основные конструктивные и технологические особенности установок получения и сжигания биогаза, а также режимы работы, конструкции, количество и виды биореакторов, технологии и оборудование для подогрева и перемешивания биомассы. Предложим свою классификацию биогазовых установок, учитывающая влияние барботажного

метода перемешивания на обогрев биореактора. Распространенные в мире типы биогазовых установок классифицируются по методам загрузки сырья, методам сбора биогаза, по используемым для их сооружения материалам, горизонтальному или вертикальному расположению реактора, подземной или наземной конструкции, а также по использованию дополнительных устройств.

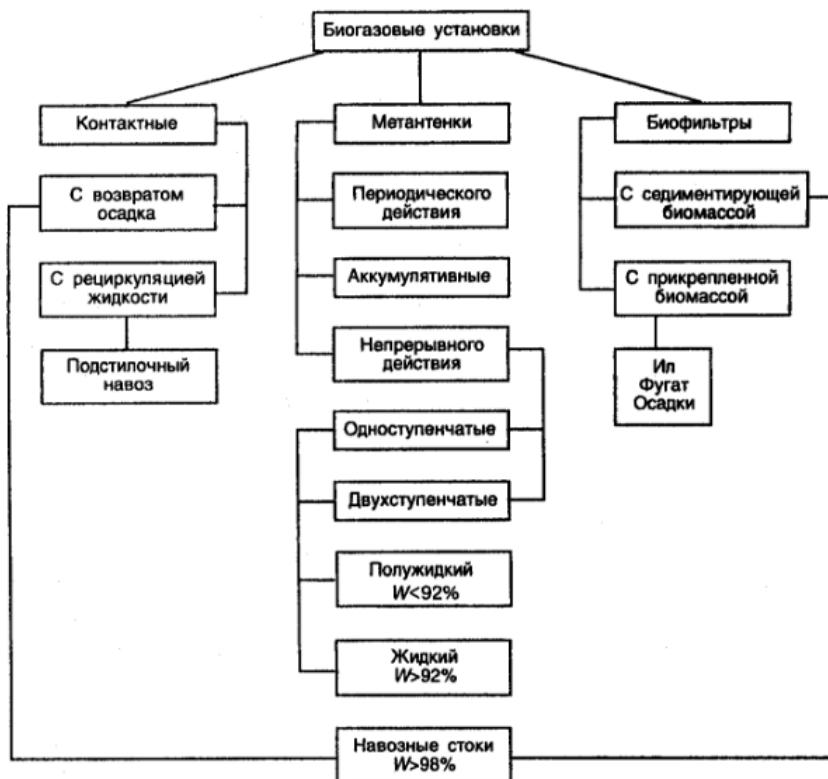


Рисунок 1.20 – Классическая классификация биогазовых установок

В результате проведенного анализа нами предложена оригинальная классификация установок получения биогаза (Рисунок 1.21). Классификация учитывает, как отечественные, так и зарубежные биогазовые комплексы.

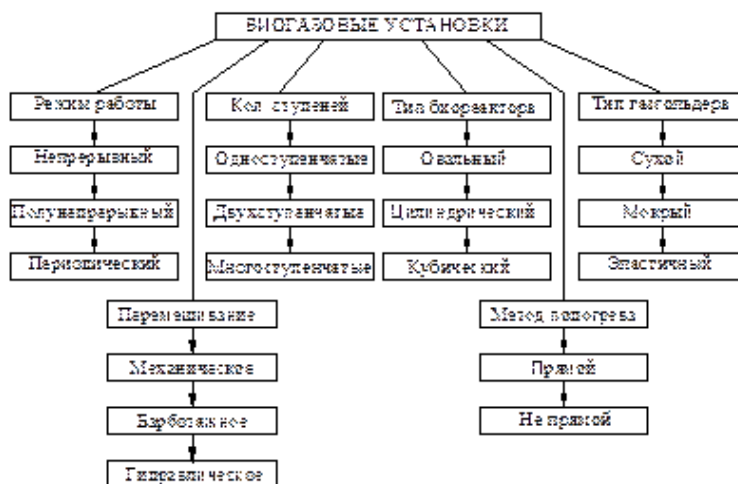
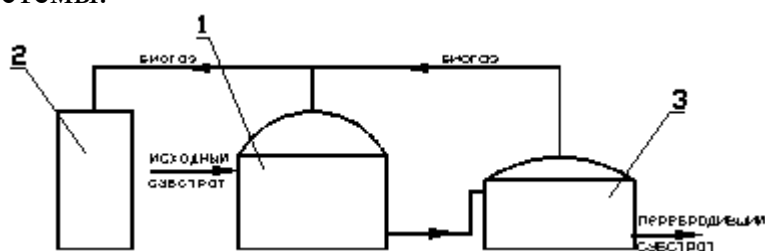


Рисунок 1.21 – Оригинальная классификация биогазовых установок

По количеству ступеней процесса установки бывают одноступенчатыми, двухступенчатыми и многоступенчатыми. Одноступенчатые установки состоят из одного биореактора, в котором происходит полное сбраживание биомассы. В двухступенчатых системах процесс проходит в главном биореакторе брожения и в реакторе окончательного сбраживания и осаждения шлама. Многоступенчатые системы включают различное количество основных бродильных биореакторов и реакторов дображивания.

По режиму работы можно выделить непрерывные, полунепрерывные и периодические системы.

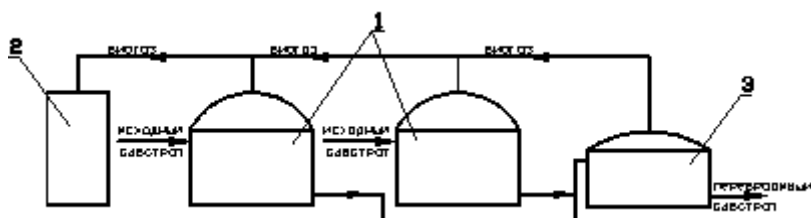


1 – биореактор; 2 – газгольдер; 3 – реактор-дображиватель

Рисунок 1.22 – Схема непрерывной системы

В непрерывной системе субстрат загружают в биореактор непрерывно или через короткие промежутки времени, удаляя при этом соответствующий объем перебродившего субстрата (Рисунок 1.22). При соблюдении требуемых условий производства непрерывные системы стабильны и значительно превышают объемы производства биогаза и биоудобрений по сравнению с другими системами.

Системы полунепрерывного действия характеризуются прерывистым процессом, протекающим не менее, чем в двух одинаковых биореакторах, которые попеременно заполняются свежим субстратом и по истечении заданного времени брожения опорожняются (Рисунок 1.23).

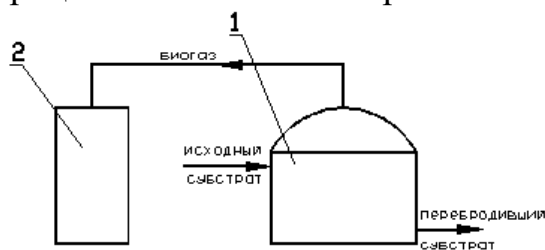


1 – биореактор; 2 – газгольдер; 3 – реактор-дображиватель.

Рисунок 1.23 – Схема полунепрерывной системы

Т.к. при постоянном количестве подаваемого субстрата загрузка рабочего объема в процессе заполнения будет постоянно снижаться по сравнению с оптимальным значением, потенциальная производительность системы будет использоваться не полностью.

Системы периодического действия состоят из одного биореактора, который полностью загружается исходным субстратом, а затем после определенного времени процесса полностью опорожняется (Рисунок 1.24).



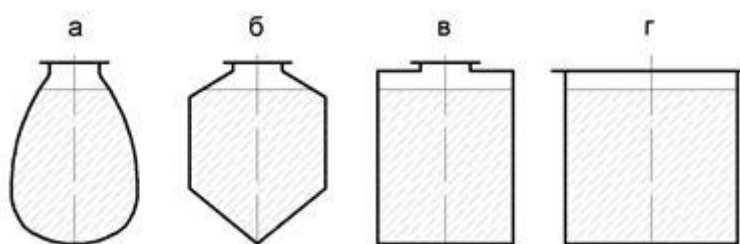
1 – биореактор; 2 – газгольдер.

Рисунок 1.24 – Схема периодической системы

Для увеличения производительности биореакторы не освобождают полностью, а остаток шлама используют для затравки новой порции субстрата. Такие системы просты в обслуживании, но нестабильны и имеют низкую производительность.

По положению биореакторы бывают вертикального горизонтального и наклонного расположения. Выбор расположения реактора зависит от режима работы и наличия свободной территории. Горизонтальные установки больше используют в непрерывных системах и при наличии достаточного места для их расположения. Наклонное расположение облегчает стекание перебродившей массы по направлению к патрубку слива готового удобрения. Но наиболее широко применяются вертикальные биореакторы, позволяющие уменьшить занимаемую территорию.

В биогазовых установках используют биореакторы овальной, цилиндрической и кубической формы (1.25). Биореакторы овальной формы изготавливают небольших объемов, в качестве материала используют стеклопластик, т.к. применение других материалов весьма проблематично ввиду сложности изготовления и высокой стоимости. В таких реакторах создаются условия для перемещения жидкого субстрата, отвода осадков и разрушения плавающей корки при достаточно высокой прочности.



а – овальнный, б – цилиндрический-конусный, в – цилиндрический, г - кубический

Рисунок 1.25 – Формы биореакторов

По сравнению с овальными, цилиндрические резервуары не создают таких условий, что ведет к увеличению расхода энергии на перемешивание. Но они просты в изготовлении и сооружаются из различных материалов – стальные, бетонные и др., что позволяет использовать их в биогазовых установках самых крупных размеров. Биореакторы кубической формы используют в простых небольших установках, т.к. для интенсивного перемешивания биомассы и разрушения плавающей корки требуются значительные затраты энергии. По способу загрузки биореакторы бывают с верхним, боковым и нижним подводом исходного субстрата. Наибольшее распространение получили биореакторы с боковым входным патрубком, расположенным в верхней части резервуара. Также биогазовые установки различают по способу подвода теплоты и способу перемешивания.

Не прямой метод осуществляется через теплообменные нагревательные устройства, расположенные внутри биореактора или в его стенках. При внутреннем подогреве нагревательные элементы должны быть достаточно прочными, чтобы не повредиться при движении биомассы в реакторе. Внешний подогрев с помощью теплообменников, расположенных на стенках реактора менее эффективен из-за потерь теплоты с ее поверхности, но при этом внутри реактора ничто не препятствует передвижению бродильной массы. Перемешивание бродильной массы может осуществляться следующими основными способами:

- гидравлическим – перекачиванием биомассы из верхней зоны реактора в нижнюю;
- механическим с помощью мешалок;
- барботажным - пропусканием биогаза через толщу сырья;

Анализ конструктивных решений биогазовых установок показал, что большинство из них имеют одноступенчатый реактор цилиндрической формы вертикального исполнения, работают в непрерывном режиме с механическим перемешиванием и подогревом через нагревательные элементы.

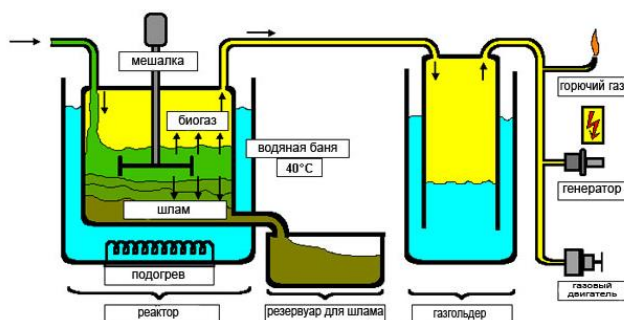


Рисунок 1. 26 – Типовая биогазовая станция

1.2.4 Анализ существующих и перспективных технологических решений систем сжигания биогаза

В настоящее время наиболее перспективными являются когенерационные электростанции, работающие на базе микротурбинного оборудования [10]. Повышенный интерес к таким установкам обусловлен их уникальными техническими свойствами, одним из которых является их способность работать без подготовки биогаза на различных видах биогаза. Микротурбинное оборудование, работающее в режиме когенерации, позволяет повысить топливную эффективность на 20% и вдвое сократить эксплуатационные расходы по сравнению с газопоршневыми устройствами. Перспективной и экономически выгодной разработкой следует считать получение электричества из биологического биогаза с использованием топливных элементов. В данном оборудовании происходит прямое преобразование биогаза в электроэнергию, не требующее его сжигания. Помимо более высокой экологической чистоты процесса достигается более высокий его КПД. Топливные элементы в данном технологическом процессе представляют собой простые ячейки (своеобразные аккумуляторы), в которых идут химические реакции окислителя с горючими веществами. Вследствие этих реакций вырабатывается электричество. Однако до конца задача эффективного использования биогаза в топливных элементах пока не разрешена. Это связано с тем, что мембраны подвержены разрушению ввиду воздействия содержащихся в биологическом газе веществ. В связи с ежегодным ростом тарифов на электроэнергию и увеличивающимися экологическими платежами биогазовые проекты показывают высокую рентабельность и быструю окупаемость. Развитие технологии получения электроэнергии из биогаза непосредственно связано с улучшением экологической обстановки в стране. Реализация комплекса мероприятий, связанных с ужесточением контроля над выбросами и утилизацией отходов, способствует увеличению объемов выработки электроэнергии из биологического биогаза. Развитие индустрии биотехнологической переработки отходов позволяет решать такие проблемы, как обеззараживание отходов, получение высококачественных удобрений, производство топливного биогаза, биометана и электроэнергии, обеспечение занятости населения при производстве, строительстве и эксплуатации биоустановок и биоэнергетических комплексов.

Типовая биогазовая станция состоит из двух частей: реактор для проведения пиролиза, в котором образуется биогаз, и факельная установка (топочная камера), в которой биогаз сжигают. Факельная установка в лабораторных условиях предназначена для временного или периодического полного сжигания биогаза, вырабатываемого биогазовыми установками при отсутствии возможности его полезного использования в качестве энергоносителя. Сжигающая система состоит из горелки и дополнительных узлов. Горелка сконструирована по принципу инжекционного сжигания и состоит из сопла, инжектора с системой контроля подачи воздуха, трубы

защиты пламени, штуцера и системы управления горелкой. Система сжигания биогаза сделана из нержавеющей стали. Несущая конструкция держит горелку и вертикально установленный штуцер. Система управления горелки установлена в шкафу, который монтируется на несущей конструкции системы сжигания, и содержит все элементы для контроля и управления зажиганием и пламенем. Исследования факельных процессов проводятся на натуральных котлах и стендовых установках связаны с изучением влияния на технические, экологические характеристики схем. Показано, что структура факела, его скоростные и температурные поля во многом определяют степень надёжности оборудования. Проведем детальный анализ особенностей протекания внутритопочных процессов, газодинамика, поля температуры и скорости в топках с фронтальной компоновкой горелок. В таких топках факел смещен к задней стене и движется вдоль нее к выходному окну в полосе шириной 0,4-0,5 ширины топки. Неравномерность параметра по ширине восходящей ветви факела связана с неравномерным характером ввода в топку реагентных потоков. Возможность использования установленных горелочных устройств для сжигания биогаза оценивается предварительно. В отечественной практике возможность взаимозаменяемости горючих газов в основном определяется расчетом с последующей реконструкцией и стендовыми исследованиями опытных образцов горелок. Это трудоемкий способ.

В мировой практике оценка возможной взаимозаменяемости газов производится следующими способами:

1) экспериментально, путем сжигания биогаза в опытных эталонных горелках (Отто, Сако-Шака, Газ де Франс и др.), сравнивают характеристики пламени различных сжигаемых газов и оценивают влияние свойств этих газов на горение;

2) аналитически, путем определения и сопоставления шести критериев взаимозаменяемости: теплопроизводительности (число Воббе); уровней рабочих давлений; пределов отрыва пламени; пределов проскока пламени; образования продуктов химического и механического недожога. Иногда число Воббе включается в руководящие указания как самостоятельный показатель взаимозаменяемости газов. Определяют число Воббе из выражения:

$$W_H = \frac{Q_H^p}{\sqrt{\bar{d}_T}}; \left(\bar{d}_T = \frac{c_T}{c_B} \right) \quad (1.1)$$

Различают высшее W_B и низшее W_H число Воббе в зависимости от того, какая, высшая или низшая, теплота сгорания биогаза принята при его вычислении. По физическому смыслу число Воббе - это удельная теплопроизводительность горелки постоянных конструктивных размеров ($f_\mu = \text{const}$) при постоянном режиме эксплуатации ($gc_T/c_1 = \text{const}$). С помощью числа Воббе удобно контролировать комплексное влияние теплоты сгорания и плотности биогаза на теплопроизводительность горелки;

3) графически, при помощи диаграммы заменяемости Дельбурга, построенной для большого количества уже исследованных горючих газов.

К горелкам для сжигания биогаза предъявляются следующие требования:

- создание условий для полного сгорания биогаза с минимальным избытком воздуха и выходом вредных веществ в продуктах сгорания;
- обеспечение максимального использования теплоты сжигаемого биогаза;
- возможность регулирования в пределах изменения нагрузки теплоагрегата;
- отсутствие шума;
- простота конструкции, удобство эксплуатации и ремонта;
- возможность применения средств автоматизации и безопасности;
- современный дизайн.

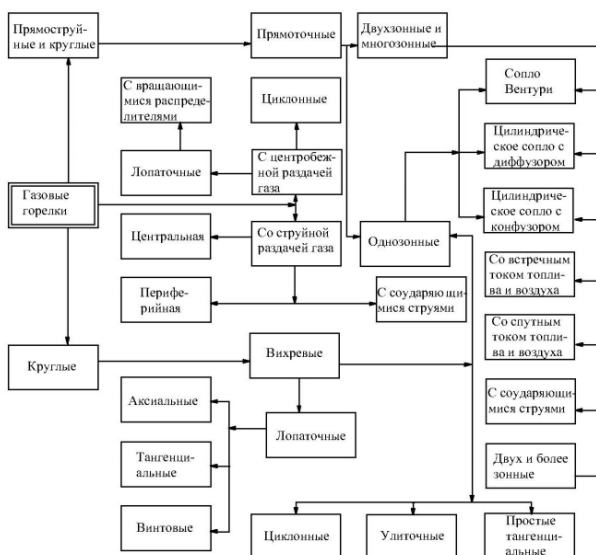
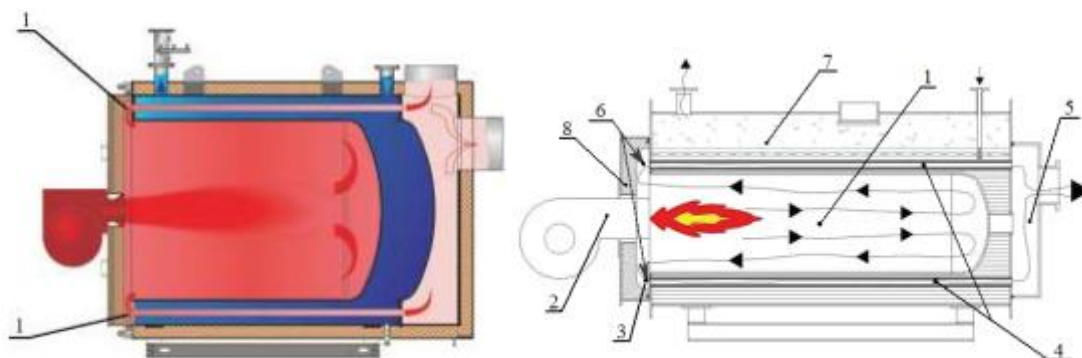


Рисунок 1.27 – Классификация газовых двухпроводных горелок



1 – топочная камера; 2 - горелка; 3 - поворотная камера; 4 - конвективный пучок дымогарных труб; 5 - сборный дымовой короб; 6 - точки замера температуры (места установки термпар); 7 - водяной объем; 8 – крышка

Рисунок 1.28 – Конструктивная схема топочной камеры

Применение автоматизированных горелочных устройств, оснащенных встроенными дутьевыми вентиляторами, делает возможным функционирование котла с регулированием параметров горения при переменных нагрузках. Однако практика конструирования топочных камер не имеет четкой нормативно-расчетной базы. Попытки расчета факельной установки малой мощности по нормативному методу [1] дают недопустимо большую погрешность, поскольку метод разрабатывался для расчетов крупных (энергетических) котельных агрегатов и требует задания ряда эмпирических поправок, известных только для отработанных типов котлов.

Ввиду отсутствия единой методики расчета для решения задач конструирования факельных установок все чаще применяется математическое моделирование. В процессе работы устройства газ и воздух поступают в камеру смешивания, откуда с помощью горелочного устройства поступают в камеру каталитического горения, в которой происходит процесс окисления с выработкой тепла. Затем уходящие газы, двигаясь по теплообменнику, отдают теплоту, выделяющуюся при горении. Затем, проходя через распределительные трубопроводы, они поступают в барботажное устройство и бар-ботируются через толщу субстрата, отдавая всю заключенную в них теплоту. В результате субстрату полностью передается теплота уходящих газов, а так же создается циркулирующий поток внутри биогазовой установки [9,10].

Традиционные устройства факельного сжигания биогаза используются в процессах получения биогаза для утилизации излишков биогаза. В процессе работы биогазовых установок бывают аварийные ситуации, связанные с повышением давления биогаза в резервуарах выше допустимого, или технологические ситуации, связанные с необходимостью технического обслуживания заполненных биогазом систем, при которых необходимо удалять биогаз. Однако непосредственное удаление биогаза в атмосферу невозможно из-за высокой степени парникового воздействия метана, основной составляющей биогаза. Для сокращения вредного воздействия удаляемого биогаза его сжигают с помощью факельных установок. Особенности каталитических устройств сжигания позволяют создавать новые технические решения устройств, применяемых для процессов получения биогаза. При создании биогазовых установок совокупность узлов и систем для обеспечения технологического процесса размещаются в специальных помещениях. Причем при создании малых биогазовых установок в большинстве случаев они полностью размещаются в специальных помещениях. При размещении узлов и систем газопроводов и газораспределительных систем в помещениях возможны ситуации накопления биогаза в помещениях. Непосредственное проветривание помещений приводит к загрязнению атмосферы сильным парниковым газом - метаном. В таких ситуациях эффективным является использование каталитических устройств для полного низкотемпературного окисления горючих компонентов биогаза. Процесс горения на поверхности каталитического наполнителя начинается с концентрации метана 0,5%

объема, что приблизительно в 9 раз ниже взрывоопасной концентрации. Это позволяет производить утилизацию скопившегося в помещении биогаза при периодическом проветривании помещений через каталитические устройства сжигания. При этом будет выделяться теплота, которая может быть использована для обогрева проветриваемых помещений, причем подогретые после процесса каталитического горения уходящие газы являются безопасными и могут быть возвращены в помещение.

1.3 Особенности синтеза и технологии процесса сжигания биогаза

Установки сжигания биогаза, или факельные установки, используются на различных предприятиях и промышленных объектах для бездымного сжигания образовавшегося биогаза (соединения метана и диоксида углерода) в результате нарушения технологического процесса или в соответствии с технологическим процессом на производстве. Автоматизация установки сжигания биогаза гарантирует безопасную работу всей системы. Основная задача автоматизации факельных установок - это обеспечение надежной работы горелки за счет применения отказоустойчивых датчиков, системы взаимоблокировок и исполнительных механизмов.

Все процессы, начиная с запуска факельной системы, контролируются автоматикой:

- розжиг горелок
- возможные утечки биогаза
- заполнение сепарирующей емкости
- подача и расход биогаза
- анализ химического состава биогаза
- температура и давление биогаза
- пуск и остановка насосов и компрессоров

Оборудование КИПиА устанавливается в отдельно стоящем шкафу автоматики, возможно с теплоизоляцией и обогревом.

Система автоматизации оснащена современным оборудованием с использованием взаимоблокировок и отказоустойчивых систем для пуска и остановки факельной установки. Основная горелка запускается только тогда, когда она получает сигнал для запуска дежурных горелок. В случае неисправности установки для сжигания биогаза (утечки биогаза или прекращения горения), система предупреждения информирует о проблеме, а исполнительные механизмы блокируют поток биогаза к горелке. Кроме того, для обеспечения пожарной безопасности используется автоматическая система пожаротушения со световой и звуковой сигнализацией. Все технологические процессы, происходящие во время работы факельного блока, должны пройти обязательную регистрацию с выводом информации в центральную диспетчерскую. Для того, чтобы биогазовая установка работала с максимальной эффективностью, в силу ее конструктивных параметров, необходимо провести ряд мероприятий по ее оптимизации. Это достигается

путем последовательного изменения всех факторов, влияющих на процесс производства биогаза, с целью определения оптимального уровня их сочетания. Для этого, во-первых, необходимо будет определить соотношение между фактическими и требуемыми параметрами его работы. После этого формулируются задачи и планы по реализации мер по их решению, которые учитывают возможные последствия для других областей деятельности.

Биогазовая установка позволяет решать следующие задачи:

1) Тепловая энергия. Первым применением биогаза является сжигание для получения тепловой энергии. В биогазе и природном газе сжигается метан в этих биогазах. Следовательно, энергия, выделяемая при сгорании этих газов, пропорциональна содержащемуся в них метану. Природный газ содержит 92-98% метана, а в биогазе - 55-75%. Возьмите среднее значение - 95% и 65%. Соотношение метана в этих биогазах составляет $65/95 = 0,68$. Это около двух третей. Таким образом, для выполнения тех же тепловых работ биогаз нуждается в 1,5 раза больше, чем природный газ.

2) Электричество. Для выработки электроэнергии необходимо установить когенерационную тепловую электростанцию (оборудование для комбинированного производства электроэнергии и тепла, они используют газопоршневые двигатели внутреннего сгорания).

3) Топливо для автомобилей. Для заправки автомобилей требуется установка дополнительной системы обогащения биогаза (удаление CO₂). После такой очистки полученный газ близок к природному газу по своим физическим свойствам и химическому составу (90-95% метана CH₄). Разница только в ее происхождении.

Технологическая оптимизация биогазовой установки направлена на максимальное сокращение простоев оборудования и обеспечение его бесперебойной работы. С этой целью сначала получают статистику, касающуюся регистрации общего времени работы и часов полной загрузки, а также периодов простоя оборудования и их причин. Анализируя их, можно выявить технологически слабые места в процессе эксплуатации биогазовой установки и наметить меры по их устранению. Как правило, они включают регулярное профилактическое обслуживание оборудования, установку датчиков, которые фиксируют сбои в работе, а также своевременное обслуживание ремонтных работ и комплектного оборудования склада запасных частей, что особенно важно. Кроме того, желательно использовать оборудование с низким износом с минимальным количеством подвижных частей. В дополнение к технической оптимизации, можно повысить эффективность биогазовой установки на основе анализа ее спроса на энергию и определить способы ее снижения. Для этого необходимо определить затраты энергии, которые идут на разные этапы работы станции. Мы должны начать с определения их при приготовлении субстрата, для чего необходимо сравнить их с его качеством, количеством, подачей его в реактор и качеством силосования растительного сырья. Также определяются потери в силосовании, включая его качество, подачу, срезанные участки и количество силосной жидкости. Важным моментом является процесс

ферментации, характеристикой которого являются интервалы между подачей частей субстрата, степенью его разложения, удельным объемом добытого биогаза и его качественным составом, а также составом субстрата, Концентрации кислоты и стабильности реактора. Следует рассмотреть так же термический и электрический коэффициент полезного действия биогаза при использовании его на блочной теплоэлектростанции, а также определить потери метана и места возможных его утечек, кроме того и имеющиеся настройки компрессора внутреннего сгорания, и периодичность их профилактического обслуживания. Затем необходимо обратить внимание на имеющийся потенциал по биогазу у остатков от брожения и степень его использования. Важным моментом является определение потоков энергии, идущих на собственные нужды установки для получения биогаза, для чего следует разделить потребителей электроэнергии в зависимости от того, для питания каких систем они используются – перемешивания, подачи субстрата, обогрев реактора, питание блочной теплоэлектростанции. Оптимизация процесса в этом случае должна проводиться путем подстройки интенсивности и периода работы установок для перемешивания в зависимости от свойств конкретного субстрата и условий сбраживания, а также с помощью предварительной подготовки субстрата перед подачей.

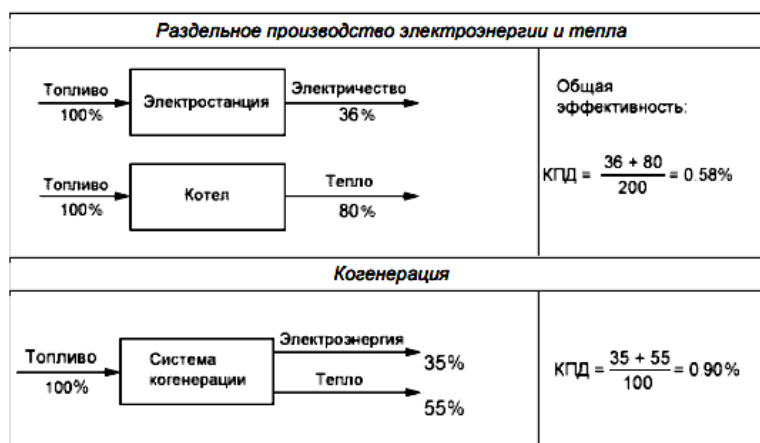


Рисунок 1.29 – Сравнение энергетических потоков при раздельной и комбинированной выработке энергии (когенерация)

К основным преимуществам когенерационных установок относятся: - повышение эффективности использования биогаза за счет повышения эффективности; - сокращение вредных выбросов в атмосферу по сравнению с отдельным производством тепловой и электрической энергии; - Снижение затрат на передачу электроэнергии, т. Когенерационные установки расположены в местах потребления тепловой и электрической энергии, потери в сетях практически отсутствуют; 3 - возможность работы на биотопливе и других альтернативных видах биогаза; - Бесшумность и экологичность оборудования; - обеспечение собственных нужд котельной в электроэнергетике [3]. В целом, для эффективного устранения биогаза и в

соответствии с рабочими параметрами, определенными на этапе проектирования, следует контролировать взаимосвязь между функционированием всех его систем и типом используемого сырья. Кроме того, для достижения оптимальных параметров установки биогаза также необходимо своевременное профилактическое обслуживание оборудования и мониторинг основных параметров процесса, главным из которых является выход и качественный состав биогаза, а также эффективность его использования. Задачи исследования: анализ технологического процесса как объекта контроля; разработка математической модели процесса сжигания биогаза; проведение экспериментальных исследований; параметрическая идентификация математической модели; вывод уравнений управления и оценка их динамических характеристик; статистический анализ динамических характеристик объекта; разработка структуры и алгоритмов управления системой автоматизации; разработка алгоритмов для диагностики сжигания биогаза; тестирование автоматизированной системы диагностики и управления процессами сжигания биогаза.

1.4 Методы, алгоритмы, модели, применяемые при исследовании процесса сжигания биогаза

Несмотря на большое количество исследований, до настоящего времени измерение и прогнозирование масштабов образования биогаза и, особенно, метана на объектах утилизации городских отходов остается нерешенной задачей. Динамика хода процессов разложения отходов во времени с развитием и прерыванием метановой фазы не изучалась. Методы прогнозирования выбросов метана не были разработаны для изменения состава отходов и, как следствие, скорости разложения органического вещества. Для определения этих значений могут быть использованы следующие методы:

- теоретические, основанные на стехиометрических расчетах процессов минерализации органических компонентов твердых отходов, приводящих к образованию биогаза, а также использование моделей биологического разложения;
- расчет запаса потоками биогаза на поверхности полигона путем измерения эмиссии биогаза с поверхности полигона;
- расчет резерва на газогенерирующую способность полигонов при исследовании проб в лабораторных условиях;
- расчет резерва углеродного потенциала твердых отходов, путем пирометрического сжигания полигона в специальных установках.

На сегодняшний день разработано значительное число упрощенных математических моделей, целью которых является определение выбросов биогаза (метана) в зависимости от различных исходных параметров. Они не отражают всех сложностей многоступенчатого процесса брожения метана и

описывают его отдельные стадии в относительно короткий промежуток времени. Ниже приведен краткий обзор существующих моделей расчета.

Модель I (Tabasarana-Rettenberger, 1987) позволяет определить удельный объем биогаза на тонну отходов и общее количество, сформированное в определенный момент времени.

$$G_e = 1,868C \cdot (0,014T + 0,28), \text{ м}^3/\text{т} \quad (1.2)$$

где G_e - удельная эмиссия биогаза ($\text{м}^3/\text{т}$ отходов);

1,868 – количество биогаза, образующегося из 1 кг органического углерода, $\text{м}^3/\text{кг}$; C - общий органический углерод ($\text{кг}/\text{т}$ отходов) (колеблется, в зависимости от морфологического состава, времени и способа хранения отходов в широких пределах, для организованных полигонов находится в диапазоне 150-220 $\text{кг}/\text{т}$); T - температура отходов, $^{\circ}\text{C}$.

Установлено, что скорость деструкции органических веществ описывается уравнением:

$$R = (1 - 10^{-kt}), \text{ 1/год}, \quad (1.3)$$

где k - константа разложения ТБО, характеризующая долю органической массы ТБО, полностью разложившуюся в течение года (согласно имеющимся экспериментальным данным, значения коэффициента находятся в диапазоне от 0,035 до 0,045);

t - время с момента захоронения, годы.

Следовательно, удельная эмиссия биогаза, выделяемого одной тонной свалочных масс к определенному времени (году) с момента захоронения:

$$Q_e = 1,868 \cdot C \cdot (0,014T + 0,28) \cdot (1 - 10^{-kt}), \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{год}) \quad (1.4)$$

Таким образом, количество биогаза определяется путем умножения величины удельных выбросов на объем захороненных отходов в тоннах. Эта модель широко используется в европейских странах для предварительной оценки выбросов биогаза с полигонов твердых бытовых отходов, характеризующихся однородным составом мусора [33].

Модель II (LandGEM), разработанная Агентством по охране окружающей среды (EPA), представлена в качестве программы LandGEM, реализованной на основе MS Excel (рисунок 1.30). Рекомендуются EPA оценить загрязнение воздуха вблизи свалок мусорных свалок, провести инвентаризацию выбросов парниковых газов (ПГ) и оценить энергетический потенциал свалок. Первичным расчетным значением программы LandGEM является образование метана, выброс углекислого биогаза и других газов в атмосферу рассчитывается на основе желаемого состава биогаза и коэффициента окисления метана. Модель проектирования содержит ряд параметров, значения которых зависят от состава твердых отходов и условий их разложения. Они требуют проверки применимости для конкретных условий и выбора значений параметров.

Программа LandGEM рассчитывает среднегодовые значения образования и выбросов газов. В дополнение к основным четырем продуктам газообразных выбросов: метан, диоксид углерода, неметановые органические компоненты (НМОС), программа также позволяет рассчитать выбросы 48 загрязняющих веществ, включенных в свалочный газ, на основе данных о характеристических значениях От их концентрации. Также возможно дополнить список загрязняющих веществ другими компонентами и изменить концентрации веществ, перечисленных в списке, с более точными данными для места испытания.

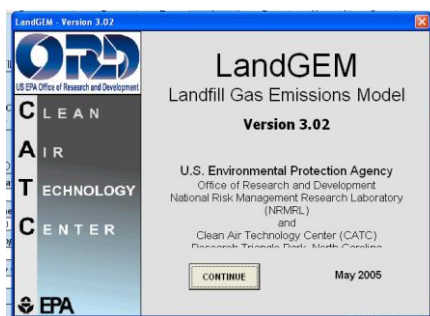


Рисунок 1.30 – Стартовое окно программы LandGEM ver. 3.02

Расчет образования метана основан на следующих основных предположениях:

1) Анаэробное разложение ТБО, с образованием метана, начинается только после окончания года, в течение которого ТБО поступали на полигон. Таким образом, учитывается задержка (лаг-фаза) начала стадии активного метаногенеза.

2) Скорость образования метана за счет разложения органической составляющей ТБО, поступивших за один год (M_i), описывается уравнением:

$$G_{iCH_4}(t) = L_0 k M_i e^{-kt} \quad [M^3 CH_4 / год], \quad (1.5)$$

где L_0 – потенциал образования метана - объем метана, образующегося при полном разложении тонны отходов:

$$L_0 = \frac{\int_0^{\infty} G_i(t) dt}{M_i} \quad [M^3 CH_4 / mTBO] \quad (1.6)$$

Значение L_0 зависит от состава и условий разложения ТБО:

$$L_0 = K_1 K_2 K_3 F_{CH_4}, \quad (1.7)$$

где K_1 – объем биогаза, образующегося при анаэробном разложении единицы массы углерода [M^3/T], K_2 – доля органического углерода в составе

ТБО до начала их разложения [т С/т ТБО], K_3 – доля органического углерода, разлагающегося анаэробно, F_{CH_4} – доля метана в составе образующегося биогаза.

k – коэффициент скорости разложения ТБО, который показывает, какая часть органического углерода разлагается на полигоне за единицу времени (считается не зависящим от времени):

$$k = -\frac{1}{M_c} \frac{dM_c}{dt} = \text{const} [1/\text{год}], \quad (1.8)$$

где M_c – общая масса органического углерода на ПТО.

Величина k связана с более наглядной характеристикой - периодом полуразложения:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,69}{k}, \quad (1.9)$$

Коэффициент k зависит от состава ТБО и ряда внешних факторов: влажности, температуры, кислотности среды. Высокая скорость разложения характерна для ТБО с высокой влажностью и высоким содержанием пищевых отходов, низкая – для сухих ТБО с высоким содержанием бумаги и древесины. Интенсивность выхода биогаза (в данном случае –метана) напрямую зависит от скорости разложения ТБО (в интерфейсе программы коэффициент k называется «Methane Generation Rate», т. е. «коэффициент образования метана»).

t - время поступления ТБО, годы.

3) Скорость образования метана за счет разложения ТБО, поступивших за N лет, предшествующих времени t , находится путем суммирования образования метана из ТБО, поступивших за каждый предшествующий год:

$$G_{CH_4}(t) = \sum_{i=1}^{i=N} G_{CH_4 i}(t) \quad (1.10)$$

Основное уравнение, используемое программой для расчета количественной эмиссии метана:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right)^{-kt_j}, \quad (1.11)$$

где Q_{CH_4} - годовой выход метана за расчетный период ($\text{м}^3/\text{год}$);

i - порядковый номер года;

n - общее количество лет (разность расчетного года и начального года);
 j - 0,1 года (расчетного);
 k - коэффициент образования метана, или скорости разложения ТБО, 1/год;

В LandGEM предусмотрен автоматический выбор значений параметров k и L_0 , принимаемых для различных условий, если нет дополнительной информации. Это наиболее типичные значения, взятые из нормативных документов США [34].

Модель III (Вибе, 1990) позволяет определить удельное количество биогаза на тонну отходов, образовавшееся к определенному моменту времени.

$$G_t = 1.868 \cdot C_T \cdot f_{ao} \cdot f_o \cdot f_a \cdot (1 - 10^{-kt}), \quad (1.12)$$

где C_T – общий органический углерод (кг/т отходов);
 f_{ao} - коэффициент, учитывающий биогазовую продуктивность в первые полгода после заложения отходов;

f_o – коэффициент оптимизации - отношение преобразовавшегося в газ углерода в реальных условиях свалки к оптимальным свалочным условиям;

f_a - коэффициент разложения - отношение превратившегося в газ углерода при оптимальных условиях к общему углероду;

k - коэффициент разложения отходов;

t – время с момента захоронения отходов (годы).

Модель используется для предварительной оценки эмиссии биогаза, учитывает технологию складирования мусора [33].

Модель IV (“Scholl Canyon”) для расчета газовой эмиссии

Модель описывается следующим уравнением:

$$Q = 2 L_o R (e^{-kc} - e^{-kt}), \quad (1.13)$$

где Q - ежегодное образование свалочного биогаза (m^3);

L_o - потенциальное количество образующегося метана из отходов (m^3/t);

R - среднее ежегодное количество отходов, захораниваемых на полигоне (т/год)

k - коэффициент образования метана ($m^3/год$);

c - время с момента закрытия полигона (годы);

t - время с момента открытия полигона (годы) [36].

Модель V (“EMCON”) для расчета газовой продуктивности

Модель позволяет оценить максимальный объем метана при разложении сырой массы отходов и описывается уравнением:

$$C_i = k \cdot k' \cdot W_i \cdot P_i (1 - M_i) \cdot V_i \cdot E_i, \quad (1.14)$$

где k – постоянный коэффициент, учитывающий эмиссию метана при разложении органического углерода (л/кг);

k' – учитывающий состав вещества;

W_t – общая масса влажных отходов;

P_i – фракция компонента i от общей массы отходов, по сырому весу;

M_i – фракционное содержание влажности компонента i , по массе;

V_i – фракционная изменчивость состава отходов компонента i , по сухому весу; E_i – доля сухого изменчивого вещества биоразлагающейся компоненты I ;

C_i – объем метанового биогаза от компонента отходов i .

Модель используется для предварительной оценки эмиссии биогаза при разложении отходов и характеризуется большой погрешностью при проведении расчетов.

Модель VI (АКХ им. Памфилова). Эмиссия биогаза оценивается зависимостью:

$$Q_t = \frac{1.85 \cdot G_0 (1 - 10^{-kt})}{\left[\frac{59 - W}{13} \right]^4}, \quad (1.15)$$

где Q_t – удельный выход биогаза, m^3/t отходов на момент времени t ;

G_0 – удельная эмиссия биогаза, m^3/t отходов;

t – время с момента открытия полигона (годы);

W – естественная влажность отходов, %.

Недостатком модели является то, что она не может быть использована для отходов, имеющих среднюю влажность, что наиболее часто встречается на практике.

Модель VII (Усовершенствованная модель АКХ), рекомендованная для определения эмиссии метана.

Для действующего полигона скорость образования метана ($nm^3/год$) определяется с использованием зависимости:

$$V = (1 - W) \cdot L_0 \cdot M \cdot \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot \tau}{k_2 - k_1} \cdot (e^{-k_1 \tau} - e^{-k_2 \tau}), \quad (1.16)$$

Соответственно объем образующегося метана составляет:

$$Q = (1 - W) \cdot L_0 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot e^{-k_1 \tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} \cdot e^{-k_2 \tau} \right), \quad (1.17)$$

где W – влажность отходов, поступающих на полигон, доли ед.;

L_0 – потенциал генерации метана (nm^3/t сухих отходов), учитывающий только органические разлагаемые фракции;

M – масса отходов на текущий год эксплуатации полигона;

k_1 – константа разложения отходов в фазе ацетоногенеза;

k_2 – константа разложения отходов в фазе метаногенеза; τ – время разложения ТБО.

Применение данной модели требует большого количества достаточно точных экспериментальных данных, в частности, по морфологическому составу каждой фракции бытовых отходов, что крайне затрудняет ее применение на практике [35].

Модель VIII (ЕРА)

$$G_0 = L_0 \frac{2K}{K(T_p - T_L) + 2}, \quad (1.18)$$

где G_0 – количество биогаза; L_0 – потенциал генерации метана; K – константа разложения; T_p – время пикового уровня биогаза; T_L – время хранения отходов [30].

Расчет выбросов биогаза проводился в трех расчетных моделях - Tabasaran-Retenberger (модель I) и LandGEM (модель II), Vibe (модель III), которые в настоящее время используются для оценки выбросов от мусорных свалок в Европе и США, а также Достоверность оценок Результаты для условий регионов их применения считаются достаточно высокими.

Адаптация к реальным условиям в Казахстане, в частности, к рассматриваемой очистной установке в Астане, должна осуществляться путем выбора проектных параметров на основе результатов полевых наблюдений и лабораторных экспериментов. В качестве основного метода исследования выбран теоретико-эмпирический, основанный на теоретических и эмпирических исследованиях, включая системный анализ и системную инженерию, математическое и компьютерное моделирование, экспериментальные исследования и функционально-стоимостный анализ. В качестве форм системного анализа используется диагностика, которую следует понимать, как совокупность взаимосвязанных исследовательских работ аналитического характера, которые позволяют определить влияние одних факторов на другие и их связи с целью выявления технических сбоев Объекта и их последующего устранения. Экспериментальные исследования содержат лабораторные тесты с использованием специальных испытательных стендов и контрольно-измерительных приборов, и производственных исследований. Проведение экспериментального сжигания не может полностью определить существующие зависимости процесса сжигания от качества биогаза и физико-химических закономерностей процессов сжигания биогаза. В результате численное моделирование важно для разработки и совершенствования технологий сжигания биогаза. Математическое моделирование печных устройств является сегодня одним из наиболее важных способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и общем теплообмене. Несмотря на большие успехи, достигнутые в развитии численного эксперимента, большое разнообразие, совершенно неизученная структура биогаза и сложные химические процессы, возникающие при сгорании биогаза, не позволяют создать универсальные модели. Поэтому остается проблема

поиска математических моделей с использованием существующих экспериментальных данных по биогазу и создания на их основе интегрированной модели расчета камеры сгорания, которая позволит нам более точно описать процессы горения в топочных камерах. Математическое моделирование сжигания биогаза в камере сгорания с вихревой горелкой было выполнено с использованием пакета FLUENT CFD ver.14 [2]. Был выбран объект проектного исследования - камера сгорания с вихревой горелкой [1]. Форма и размеры камеры сгорания показаны на рисунке. Основываясь на проведенных исследованиях сходимости сетки, размер сетки был выбран равным 1 миллиону клеток. Мониторинг и регулирование эффективности и выбросов загрязняющих веществ при промышленном сжигании биогаза является одной из наиболее серьезных проблем, с которыми сталкивается общество в связи с использованием органических видов биогаза и, соответственно, изменением климата.

Существуют различные методы регулирования сжигания биогаза:

- предварительное определение теплотемкости химического состава биогаза и соотношения воздух-топливо;
- мониторинг сжигания биогаза на объекте с помощью оптических датчиков и своевременное регулирование соотношения воздух-топливо;
- измерение концентрации таких газов, как кислород, монооксид углерода или диоксид углерода, на выхлопных биогазах и осуществление регулирования.

Важную роль в поддержании оптимального режима в печи играют автоматические устройства, которые поддерживают постоянное соотношение количества поступающего воздуха и биогаза. А когда сжигается биогаз, управление процессом сгорания и поддержание заданного режима значительно облегчается за счет использования горелок, имеющих важное свойство автоматического регулирования, то есть поддержания согласованности воздушно-газовой смеси при нагрузке горелки меняются (Рисунок 1.31).

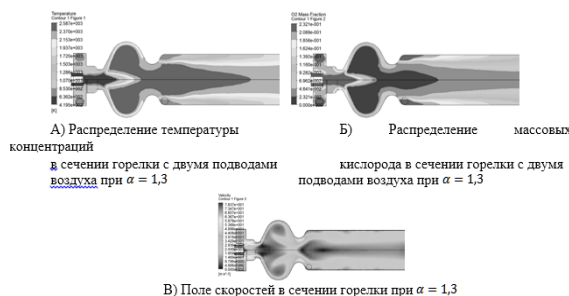


Рисунок 1.31 – Распределение температуры в сечении горелки

Энергия, получаемая в процессе сжигания биогаза, может быть использована для подогрева воды, выработки тепла для технологических нужд и отопления, для обеспечения автономного электроснабжения. Переработанная биомасса может быть использована в качестве экологически чистого удобрения (рисунок 1.32, 1.33).

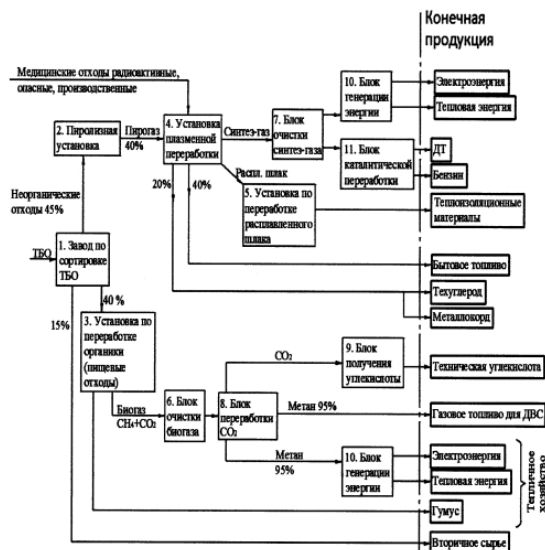


Рисунок 1.32 – Система получения и сжигания биогаза

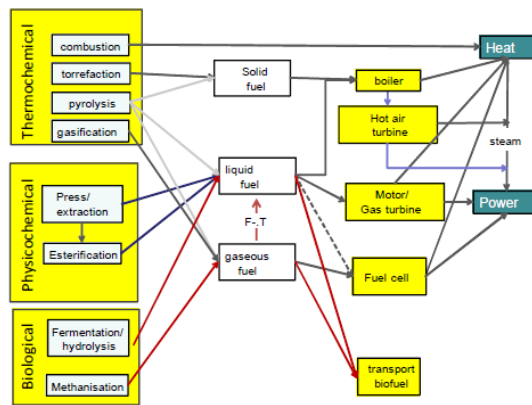


Рисунок 1.33 – Различные пути для превращения биогаза в энергию

Решить эту достаточно сложную задачу можно методами математического моделирования. В качестве исходных уравнений исследования принимаются следующие:

$$\left. \begin{aligned}
 U_z &= r_z i_z + \frac{d\psi_z}{dt} \\
 M_z &= \text{Re } j(\psi_z i_z) + J \frac{d\Omega}{dt} \\
 U_f(t) &= k_u U_z + k_i i_z \\
 n &= f[\omega(t)] \\
 M_m &= f[\omega(t), \Delta B] \\
 Z_3 &= \frac{Z_n (2^N - 1)}{2^N + Z_n (n - 1) / n = 0 \div (2^N - 1)} \\
 U_z &= (R_3 + j X_3) i_z + x_z \frac{d i_z}{dt}
 \end{aligned} \right\}$$

В предлагаемой математической модели процесса сжигания предполагаются следующие предположения:

- воздушно-топливная смесь делится бесконечно тонким фронтом пламени в зону сгоревшей смеси и в зону несгоревшей смеси;
- рабочая жидкость в обеих зонах является идеальным газом;
- химический состав рабочего тела в зонах различен, поэтому его теплофизические характеристики различны;
- давление в обеих зонах одинаковое;
- внутри каждой зоны нет градиентов параметров рабочего тела по координатам, однако температуры между зонами различаются;
- характеристика тепловыделения рассчитывается с использованием зависимости Π Vibe;
- Показатель и эффективные параметры двигателя определяются методом И. И. Вибе с учетом переменного показателя характера сгорания и продолжительности горения биогаза;
- Показатели токсичности рассчитываются по методу В. А. Звонова [5-6].

Одним из наиболее распространенных и наиболее точно описывающих характеристики рассеивания тепла математических моделей является модель процесса сжигания Π Vibe, которая наиболее широко используется. Основное предположение, на котором строится математическая модель процесса сжигания Π Vibe, заключается в усреднении температур в цилиндре двигателя, что, в свою очередь, снижает точность расчета индексов токсичности. Повышение точности и эффективности использования этого математического инструмента возможно благодаря введению двухзонной модели для расчета процесса сжигания, что позволяет нам точно оценить токсичность выхлопных газов [23-24]. В работе используется двухзонная модель процесса сжигания, в которой модель Π Vibe используется для определения характеристик рассеивания тепла и продолжительности горения. Кроме того, эти расчетные модели адаптированы для изучения процесса сжигания в двигателе сжигания ископаемого биогаза на дизельном двигателе. Схема расчета используемой двухзонной математической модели процесса сжигания представлена на Рисунок 1.34.

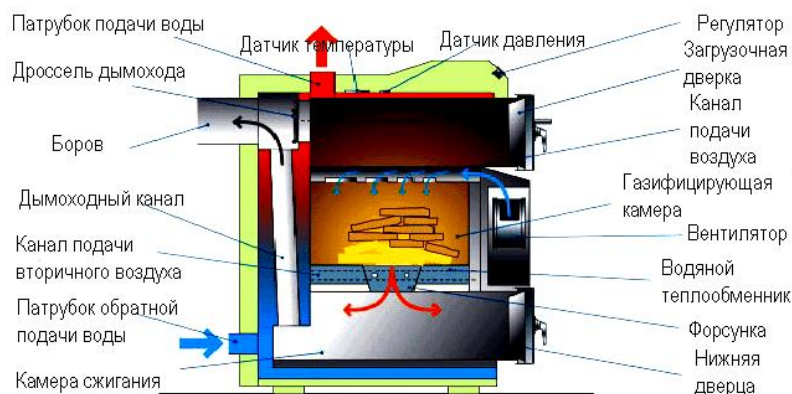


Рисунок 1.34 – Схема двухзонной математической модели процесса сжигания

В течение четырех последних лет ведутся исследования биогазовых технологий с целью получения скоростной технологии переработки биомассы в биогаз. При этом неожиданно быстро были получены результаты, которые были высоко оценены польскими экспертами из научного сообщества. Не смотря на кажущуюся простоту установок в польской лаборатории ЛПУ (г.Люблин, Польша), которые сделаны своими руками, на них были сделаны сотни экспериментов по исследованию биогазовых процессов. Фактические же данные по концентрации газов, контролингу, логгированию были получены на самом современном оборудовании, к примеру, с использованием СКР-газоанализа.

1.5 Использование комплексного термического анализа для исследования свойств биогаза

Термический анализ объединяет целый ряд физико-химических методов, в которых физические свойства вещества при его нагревании измеряются как функция температуры, задаваемой и контролируемой программой. Значительное распространение получили следующие методы термоанализа: термогравиметрия (ТГ), дифференциальный термический анализ (ДТА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и дилатометрия [9]. В рамках настоящей работы дилатометрия рассматриваться не будет.

Термогравиметрия – метод термического анализа, при котором регистрируется изменение массы образца в зависимости от температуры. Можно выделить три вида термогравиметрии:

1. Статическую – когда масса измеряется на протяжении некоторого времени при постоянной температуре;
2. Квазистатическую – когда образец нагревается при каждой из ряда возрастающих температур до достижения постоянного значения массы;
3. Динамическую – когда температура среды, окружающей нагреваемый образец, изменяется по заданному закону.

Метод дифференциального термического анализа основан на сравнении термических свойств образца исследуемого вещества и химически инертного вещества, принятого в качестве эталона. Чаще всего при небольших навесках до 100 мг в качестве эталона выступает пустой тигель. Если навеска больше 100 мг, необходимо использовать инертное вещество, что позволит уравновесить тепловые потоки. Регистрируемым параметром является разность температур образца и эталона, измеряемая при их нагревании или охлаждении с постоянной скоростью, которая может быть представлена в виде функции температуры образца, эталона или нагревателя.

Помимо процессов внешнего нагрева, изменения температуры образца отражают физические и химические процессы, обусловленные изменением энтальпии. К ним относятся: фазовые переходы, плавление, перестройка кристаллической структуры, кипение, реакции дегидратации, диссоциации и

разложения, окисления. Дифференциальная сканирующая калориметрия представляет собой схожий метод с ДТА. Принципиальная разница между ними заключается в том, что в ДТА контролируется разность температур между эталоном (пустым тиглем) и исследуемым образцом, а в методе ДСК контролируется поток тепла. Это достигается особой конструкцией держателей для этих методов. ДТА имеет точечный контакт между термопарой и тиглем, а в ДСК термопара имеет контактную площадку (рисунок 1.35).

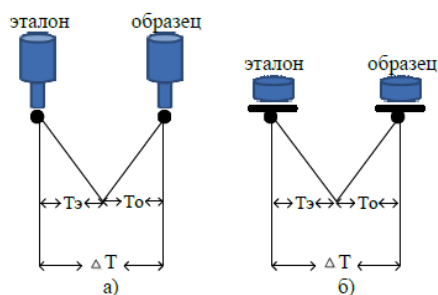


Рисунок 1.35 – Внешний вид

а) ДТА системы ($T_{\text{э}}$ – температура эталона, $T_{\text{о}}$ – температура образца, ΔT – разность температур эталона и образца), б) ДСК системы

Метод ДСК обладает более высокой чувствительностью к регистрации тепловых эффектов по сравнению с ДТА, но при этом используемая масса навески намного ниже и составляет 20 – 50 мг в зависимости от насыпной плотности исследуемого образца. ДСК также позволяет определить удельную теплоемкость [10]. В настоящее время распространение получил синхронный термический анализ (СТА), который сочетает в рамках единой установки термогравиметрический (ТГ), дифференциально-термический анализ (ДТА), либо дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК), что позволяет напрямую сравнивать результаты измерений ТГ и ДСК/ДТА, при этом устраняя влияние неоднородности материала, пробоподготовки, условий измерений [11]. Кроме того, установка может быть дополнена приборами физико-химического анализа газообразных соединений, выделяющихся в результате разложения образцов. Главным условием проведения такого анализа является существование технической возможности для одновременной фиксации термоаналитических измерений и регистрации выделяющихся газов. Только соблюдение данного условия позволяет корректно интерпретировать получаемые результаты [12]. Такими методами являются ИК-Фурье-спектроскопия [13], хроматографические методы анализа [14], оптическая спектроскопия [15] и масс-спектрометрия [16]. Благодаря экспрессности и полноте измерения, наибольшее применение получили для определения состава и динамики выделяющихся газов ИК-Фурье-спектроскопия и масс-спектрометрия. В первом случае идентификация происходит по колебательным спектрам соединений, во втором – по массовым числам молекулярных ионов и фрагментов молекул.

ИК-Фурье-спектроскопия позволяет определять компонентный состав сложной газовой смеси, что практически невозможно в случае масс-спектрометрии. Интерпретация масс-спектров при термохимической конверсии твердого биогаза значительно затруднена в силу того, что массовые числа ряда компонентов газовой смеси и их фрагментов совпадают.

Например, массовое число 28 характеризует как CO, так и N₂, и чтобы их разделить, необходимо провести специальные процедуры, что не всегда возможно. В связи с этим, исследователи зачастую определяют лишь качественный состав газовой смеси при горении топлив [17, 18]. Для определения количества выделившихся газообразных продуктов термический анализ должен быть дополнен блоком импульсного термического анализа (Pulse TA), который позволяет точно откалибровать сигнал соответствующего газоанализатора. Схема импульсного термического анализа представлена на рисунке 1.36.

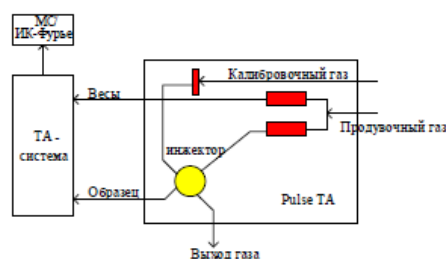


Рисунок 1.36 – Устройство импульсного термического анализа

Калибровка выполняется путем введения в газ-носитель известного количества определяемого биогаза, который поступает в систему ТА-Газоанализатор. Далее рассчитывается отношение между количеством биогаза и интенсивностью сигнала масс-спектрометра по молекулярному иону. Блок термического анализа и газоанализатор соединены, как правило, через кварцевый капилляр, поэтому интенсивность и форма сигнала газоанализатора зависят от многих факторов – парциального давления газов, вида газовой среды, температуры, вязкости и плотности биогаза. В связи с этим, калибровку необходимо проводить по возможности в тех же условиях, в которых исследуется образец [19]. Таким образом, для количественного определения индивидуальных компонентов газовой смеси, например, в случае применения масс-спектрометра в качестве газоанализатора, достаточно точно откалибровать сигнал масс-спектрометра по соответствующему массовому числу. Стоит отметить, что соотношение массовых чисел в масс-спектре обладает высокой воспроизводимостью и определяется силой электронного удара, который, как правило, равен 70 eV, поэтому существуют библиотеки масс-спектров различных соединений, по которым происходит идентификации индивидуальных соединений, например, библиотека масс-спектров NIST.

В современных научных исследованиях термический анализ представляет собой большой интерес, как инструмент исследования

различных материалов и процессов в различных газовых средах, в вакууме и под давлением, в диапазоне температур от -190 – до 2400°C , при скоростях нагрева от $0,1$ – до $106^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, при автоматической регистрации изменения физико-химических свойств веществ и (или) продуктов его реакции) [20]. Анализ состава газовой смеси, образующейся при горении топлив, дал возможность дополнить термоаналитические исследования информацией об образовании газовых продуктов в зависимости от внешних условий. Значительное количество работ направлено на изучение зависимостей выхода продуктов гетерогенного горения топлив различной природы от таких условий, как скорость нагрева, газовая среда, присутствие химических реагентов и т.д. В данном случае под термином «гетерогенное горение топлив» понимают процесс взаимодействия твердого биогаза с разными газифицирующими агентами (воздух, пар, углекислота), а также разложение топлив в вакууме и в инертной атмосфере (азот, гелий, аргон). В результате накоплен богатый эмпирический материал, который был изложен во многих статьях, (из них можно выделить несколько работ [21 - 24]), и систематизирован в монографиях и обзорах [25, 26]. Так, в работе [27] авторы исследовали потенциал использования несъедобных масличных культур ятрофы (*Jatropha curcas*) и каранджи (*Pongamia pinnata*) в качестве твердого биогаза в процессах термохимической конверсии. Образцы этих культур предварительно разделяли на составляющие – кожуру, сердцевину и семя, а затем обезжиривали гексаном. Подготовленные таким образом, образцы подвергали пиролизу со скоростью нагрева $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Анализ термограмм показал стандартное разложение лигноцеллюлозных топлив. Выдвинуто предположение, что пиролиз таких топлив последовательно проходит через стадии разложения гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина из состава исследуемых культур в соответствующих температурных интервалах. Это предположение было основано на данных ИК-Фурье-спектроскопии. В качестве критерия достоверности исследованы литературные данные разложения ксилана, как типичного представителя гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина.

В работе [28] исследована применимость биогаза в качестве добавки к каменному углю для сжигания в поточных реакторах на ТЭС Южной Кореи. Посредством термического анализа были установлены температуры начала воспламенения и максимальной потери веса образцом, а также температура окончания процесса сжигания; время горения и максимальные скорости потери веса для исходного торфа и каменного угля, и их смесей в соотношениях от $0,1 - 1$ до $0,5 - 1$ соответственно (рисунок 1.37). Из термограммы видно, что процесс горения исходного торфа происходит в три стадии, что отражено тремя пиками на дифференциальной кривой – первый пик обусловлен сушкой образца, второй – разложением слабых периферийных связей в структуре торфа, третий пик сопровождается разрывом прочных связей углеродного скелета с образованием CO_2 . Образец Design C&A представляет собой уголь, который применяется по проекту в ТЭС. Для данного образца основной процесс горения происходит в одну

стадию. В зависимости от добавки торфа в уголь меняется механизм горения, что отражается стадийностью процесса.

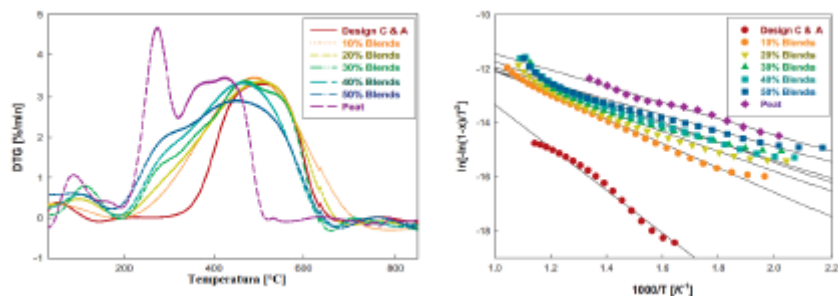


Рисунок 1.37 – Дифференциальные термогравиметрические кривые зависимости, полученные при сжигании образцов со скоростью нагрева 10°С/мин

Показано, что определяемые характеристики, которые перечислены выше, линейно уменьшаются с увеличением доли торфа в составе смеси по сравнению с исходным углем. Также были рассчитаны кинетические коэффициенты процесса сжигания, при предположении о первом порядке реакции. Показано, что скорость процесса сжигания исходного торфа и его смеси с углем понижается в зависимости от добавки угля (рисунок 1.38).

Полученные данные в этом исследовании были использованы для теплотехнических расчетов угольных экспериментов в программе VESTA. Она позволяет рассчитать эффективность процесса сжигания различных топлив в котлах мощностью до 500 МВт. Данная программа была разработана в Корейском научно-исследовательском институте (Korea Electric Power Corporation's Research Institute).

В другом исследовании [29] также изучают особенности горения смесевых твердых топлив, состоящих из трех видов турецкого низкокачественного бурого угля и биомассы (щепа дуба) в различных соотношениях. Показано, что с увеличением доли биомассы увеличивается содержание летучих, а температура воспламенения топливной смеси уменьшается, приближаясь к температуре воспламенения исходной биомассы. Наибольшей реакционной способностью обладает топливная смесь с самым большим содержанием биомассы, независимо от вида угля. При этом максимальная скорость горения достигается при низких температурах. Также был исследован процесс горения оливковой семечки и скорлупы фундука, как перспективного биогаза для энергетического комплекса в Турции. Анализ показал, что данные образцы ведут себя при нагревании аналогично другим лигноцеллюлозным биогазам.

Qiao и др. [30] изучали процесс гетерогенного горения угля, соломы и илистых донных отложений в атмосфере с различным содержанием кислорода в составе. Установлено, что температуры начала выхода летучих, максимальной потери веса и окончания процесса сжигания уменьшаются по

мере увеличения концентрации кислорода в составе газовой атмосферы. Стоит отметить, что данное исследование характеризует реакционную способность исследуемых топлив. При этом эффекты, связанные с диффузией и теплопередачей, пренебрежимо малы, т.к. используются частицы размером до 2 мм, образующие монослой. В работе [31] исследовались три типа образцов: целлюлоза, как модельное соединение; солома; солома, подвергнутая обработке раствором KCl («мытая солома»). При этом варьировали массу навески от 2 до 20 мг. В случае пиролиза целлюлозы показано, что с ростом массы навески максимальная скорость потери веса образцом смещается в сторону более высоких температур и выход огарка возрастает в пять раз.

При пиролизе соломы и «мытой» соломы варьировали массу навески. Показано, что изменение массы навески не сказывается на механизме пиролиза. Процесс пиролиза этих образцов различается суммарным тепловым эффектом - в случае пиролиза целлюлозы и «мытой» соломы незначительно преобладает эндотермический эффект, при пиролизе соломы – экзотермический. При этом ДСК-пик для соломы слишком мал, поэтому определить величину теплового эффекта не представляется возможным, для пиролиза целлюлозы величина теплового эффекта равна 630 – 710 кДж/кг для образцов массой 2 – 5 мг, и около 560 кДж/кг для образцов массой 10 – 20 мг. Это различие может быть частично объяснено разным выходом огарка.

При термохимической конверсии твердого биогаза происходит разложение органической массы в узком интервале температур с одновременным выделением значительного числа низкомолекулярных продуктов в газовую фазу, особенно это характерно в условиях недостатка окислителя. Сочетание методов термического анализа с физико-химическими методами определения газового состава позволяет проводить технический анализ топлив, который дает информацию о зольности, влажности, выходе летучих, низшей теплоты сгорания, а также сведения об элементном составе.

Технические характеристики биогаза являются важнейшей исходной информацией при расчёте энергетического оборудования, выполнении энергетических обследований предприятий и установок. Справочные значения технических характеристик имеются для многих топлив. Вместе с тем, естественная изменчивость свойств топлив в пределах отдельного месторождения и освоение новых месторождений, делают список справочных значений пригодным только для ориентировочных инженерных расчетов. В справочной литературе также отсутствуют данные о технических характеристиках низкосортных и композитных твердых топлив, полученных из биомассы, смесей углей, торфов, сланцев либо из промышленных отходов, в том числе и муниципальных твердых бытовых отходов. В настоящее время определение технических характеристик регламентируется Государственными стандартами Казахстана и национальными бюро стандартизации, например, Европейское общество стандартизации (ISO), Американское общество стандартизации (ASTM). Так, определение различных технических характеристик различных углей, например, выход

летучих, проводят согласно ГОСТ 6382-2001 Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ.

Древесной биомассы – ГОСТ 32990-2014 Биотопливо твердое. Определение выхода летучих веществ. Биогаза, произведенного из отходов – ГОСТ 33508-2015 Топливо твердое из бытовых отходов. Определение выхода летучих веществ. Как правило, в стандартах для определения необходимых величин прописано использование методов теплофизического анализа. Так влажность биогаза определяют по убыли массы в результате высушивания образца в сушильном шкафу при 105°C (ГОСТ Р 52911-2013.

Топливо твердое минеральное. Методы определения общей влаги.); зольность биогаза определяют по минеральному остатку после полного сгорания образца в муфельной печи (ГОСТ 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности.). Выход летучих веществ также определяют с использованием муфельной печи. Низшую теплоту сгорания биогаза определяют с помощью классического метода сжигания образца в токе кислорода в калориметрической бомбе (ГОСТ 147-2013. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания.). Элементный состав биогаза определяют с использованием элементных анализаторов согласно стандарту (ГОСТ Р 53355-2009. Топливо твердое минеральное.

Элементный анализ.). Данные стандарты используются независимо друг от друга и не предусматривают комплексное исследование топлив. В случае комплексного исследования свойств биогаза лаборатория должна быть оснащена большим количеством оборудования, поэтому в мире распространена практика, когда исследователи отдают образцы биогаза в специализированные центры [32]. Это делает актуальным поиск универсального и экспрессного метода определения технических характеристик биогаза. Одним из таких методов может служить комплексный термический анализ, который позволяет в одном эксперименте определить практически все технические характеристики биогаза. Для определения выхода летучих необходимо проведение дополнительного измерения в инертной атмосфере.

Комплексный термический анализ твердого биогаза объединяет в рамках единого комплекса синхронный термический анализ и масс-спектрометрический газоанализатор, что позволяет наряду с суммарными характеристиками процесса нагрева навески биогаза (убыль массы, величина тепловых эффектов) получать также динамику выделения газообразных продуктов (CO, CO₂, CH₄, NO₂, H₂O и др.).

Обычное применение термического анализа для проведения технического анализа носит рекомендательный характер, ввиду высокого разнообразия изучаемых топлив, к исследованию которых необходимо подходить индивидуально [33]. Рекомендательный характер использования термического анализа для определения технических характеристик обусловлен несколькими факторами:

- 1) систематическим занижением при определении влажности биогаза;

2) величина определяемого теплового эффекта по ДСК-кривой не соответствует теплоте сгорания биогаза, т.к. выделяющиеся летучие вещества выносятся из реакционного пространства печи, либо сгорают в газовом объеме, что не отражается на ДСК-кривой [34].

Систематическое занижение влажности связано со спецификой метода, т.к. происходит подсыхание биогаза, при котором не учитывается снижение веса пробы, обусловленное тем, что температура начала эксперимента составляет 35 – 40°C. Другим примером использования термического анализа является исследование механизмов и кинетики процессов гетерогенного горения твердых топлив. Большое количество видов топлив и разветвленный характер протекания индивидуальных стадий при разложении сформировали направления исследования твердых топлив с помощью термического анализа, который получил название – кинетический анализ твердых топлив.

Термический анализ используется для определения температуры начала и максимума интенсивного разложения, технических характеристик твердого биогаза, которые ограничиваются определением зольности, влажности и выхода летучих. В случае определения элементного состава топлив исследования носят качественный характер.

Позволяет определить реакционные свойства исследуемых топлив, влияние внешних факторов, таких как скорость нагрева, среда, масса навески на механизм термохимической конверсии топлив. Полученные с помощью термического анализа данные используются в теплотехнических расчетах с использованием программных комплексов (ThermoFlow, VESTA, ASPEN), в расчетах топочных устройств и реакторов (ANSYS, ThermoFlow, СМПП, МЭПС).

1.6 Постановка задачи исследования

Выделены следующие задачи исследования:

- анализ технологического процесса как объекта управления;
- разработка математической модели процесса сжигания биогаза;
- проведение экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях;
- проведение параметрической идентификации математической модели процесса сжигания биогаза;
- вывод уравнений управляющих каналов и оценка их динамических характеристик;
- статистический анализ динамических характеристик объекта управления;
- разработка структуры и алгоритмов управления автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза;
- разработка алгоритмов диагностики процесса сжигания биогаза;
- проведение испытаний автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза.

Автоматизация установки сжигания биогаза гарантирует безопасную работу всей системы. Основная задача автоматизации предприятия - обеспечить надежную работу горелки с помощью отказоустойчивых датчиков, взаимоблокировок и исполнительных механизмов. Все процессы контролируются автоматизацией: зажигание горелок; Возможные утечки биогаза; Заполнение разделительного сосуда; Поставка и потребление биогаза; Анализ химического состава биогаза; Температура и давление биогаза; Запуск и остановка насосов и компрессоров. Оборудование КИП устанавливается в отдельном шкафу автоматизации, возможно с теплоизоляцией и обогревом. Система автоматизации оснащена современным оборудованием с использованием взаимоблокировок и отказоустойчивых систем для пуска и остановки факельной установки. Основная горелка запускается только тогда, когда она получает сигнал для запуска дежурных горелок. В случае неисправности установки для сжигания биогаза (утечки биогаза или прекращения горения), система предупреждения информирует о проблеме, а исполнительные механизмы блокируют поток биогаза к горелке. Кроме того, для обеспечения пожарной безопасности используется автоматическая система пожаротушения со световой и звуковой сигнализацией. Все технологические процессы, происходящие во время работы факельного блока, должны пройти обязательную регистрацию с выводом информации в центральную диспетчерскую. Для того, чтобы биогазовая установка работала с максимальной эффективностью, в силу ее конструктивных параметров, необходимо провести ряд мероприятий по ее оптимизации. Это достигается путем последовательного изменения всех факторов, влияющих на процесс производства биогаза, с целью определения оптимального уровня их сочетания. Для этого, во-первых, необходимо будет определить соотношение между фактическими и требуемыми параметрами его работы. После этого формулируются задачи и планы по реализации мер по их решению, которые учитывают возможные последствия для других областей деятельности [3].

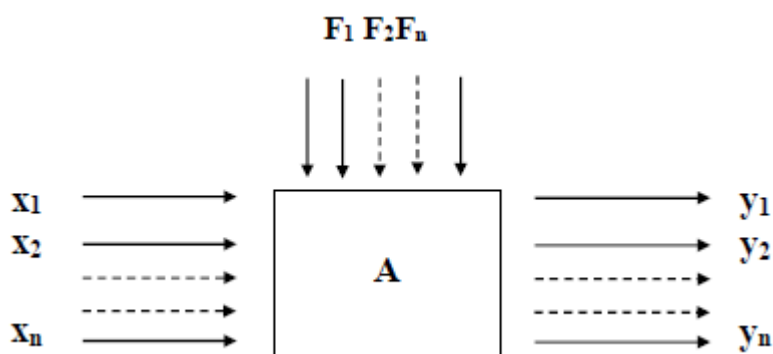


Рисунок 1.39 – Модель функционирования БГУ

БГУ, являясь примером динамической системы, работает в условиях изменяющихся внешних воздействий, обусловленных многочисленными и

разнообразными факторами. Такими факторами являются: температура, влажность, физико-механические свойства навоза, содержание органического вещества и т.д. Технологические параметры БЭУ делятся на входные и выходные. Входные параметры бывают внешние и внутренние. Внешние параметры описывают условия функционирования установки, а внутренние параметры характеризуют элементы установки (объем, дополнительные рабочие органы, конструкцию частей, свойства сбраживаемого субстрата и др.) и состояние биомассы в установке (изменения температуры и влажности биомассы, скорости развития, деятельности и концентрации анаэробных микроорганизмов, кинетику анаэробного сбраживания и т.д.).

Рассматривая функционирование БГУ как реакцию на входные воздействия и обозначив через $\bar{Y} = y_1, y_2, \dots, y_n$ – вектор выходных параметров, а через $\bar{X} = x_1, x_2, \dots, x_n$ и $\bar{F} = F_1, F_2, \dots, F_n$ соответственно векторы внешних и внутренних параметров, представим модель функционирования БЭУ в виде (рисунок 1.39) [99].

Операторная форма математической модели имеет вид:

$$\bar{Y} = \mathbf{A}(\bar{F})\bar{X} \quad (1.19)$$

Моделирование процесса сжигания биогаза заключается в определении вида оператора определяющего алгоритм преобразователя внешних воздействий \bar{X} в выходные параметры \bar{Y} .

Потери тепла при ферментации лимитируют степень эффективности всего процесса, КПД которого составляет 50-60%. Наибольшее практическое применение нашли два температурных режима, при которых обычно осуществляется процесс сбраживания: мезофильный и термофильный. За рубежом в основном применяется менее энергоемкий мезофильный режим, хотя термофильный выглядит предпочтительнее с точки зрения скорости прохождения процесса и гигиенических свойств сброженного остатка – эффлюента (отсутствия контаминирующих и токсичных веществ), который может использоваться для получения фосфорных и азотных биоудобрений. В настоящее время разработаны и находят все более широкое применение специально разработанные биореакторы для вторичной переработки метанобразующими бактериями отработанных технологических растворов и сточных вод (так называемые “биореакторы для анаэробной биологической очистки сточных вод”).

В работе предложен новый тип высокоэффективных экологически чистых энергоустановок небольшой мощности, использующих в качестве биогаза сочетание таких возобновляемых видов энергоносителей, как биогаз и природный газ. Этот подход базируется на эффективном методе сжигания биогаза с использованием технологии «быстрого реактора», а также новой технологии экологически чистого сжигания низкокалорийных видов биогаза в объемных матричных горелочных устройствах.

Окисление в суспензии происходит в волне горения в высокотемпературном реакторе при давлениях до 100 атм и температурах 2

500 - 3 000 °С с отдельной генерацией водорода и энергетического пара. На первой стадии происходит горение суспензии стехиометрического состава с образованием водорода. На второй стадии после отбора водорода в реактор подается дополнительное количество воды, превращающейся при взаимодействии с биогазом в высокопотенциальный пар. После удаления оксида биогаза процесс может быть повторен. При этом удается избежать попадания мелкодисперсных частиц в энергоустановку. В качестве устройства для сжигания низкокалорийного биобюгаза используется объемная матричная горелка. Возможность устойчивого горения низкокалорийного биогаза в такой гибридной энергоустановке обеспечивается как особенностями горелочного устройства на основе объемной матрицы, так и подачей в него водорода, генерируемого при горении суспензии. Таким образом, данная комбинированная энергоустановка позволяет совместить процессы горения двух различных типов возобновляемых энергоносителей в единый энергетический процесс, в котором образующийся при окислении водород поддерживает устойчивое горение в матричном горелочном устройстве низкокалорийного биогаза, обеспечивая тем самым экологически чистое производство энергии из возобновляемых энергоносителей для распределенной энергетики.

Во время прохождения исследовательской практики разработана система управления процессом совместного сжигания биогаза и природного биогаза. В процессе совместного сжигания газов вырабатывается электро и теплоэнергия. Обработка осадков является одним из сложных и энергоемких процессов в комплексе очистки сточных вод. Стоимость обработки осадков составляет в среднем 30-40% общих затрат на очистку сточных вод. В то же время осадки, образующиеся в процессе очистки сточных вод и продукты их переработки, в первую очередь биогаз, являются существенными потенциальными источниками энергии в системах водоотведения. Газ, полученный в результате сбраживания осадков в метантенках, можно использовать в теплоэнергетическом хозяйстве очистных станций и на близрасположенных объектах. Предложены математическая модель и метод, позволяющие в процессе сжигания такого биогаза определить его состав и обеспечить оптимальные параметры процесса сжигания. Современная технология связана с потреблением значительных количеств электрической и тепловой энергии. В условиях острого энергетического кризиса проблема снижения указанных энергозатрат за счет использования нетрадиционных источников энергии, имеющих на самих очистных сооружениях и постоянно возобновляющихся, является остро актуальной. В работе как объект управления рассматривалась установка по совместному сжиганию биогаза и природного биогаза. Предложены математическая модель и метод, позволяющие в процессе сжигания такого биогаза определить его состав и обеспечить оптимальные параметры процесса сжигания. Разработаны математические модели процесса адсорбции биогаза и природного биогаза.

1.7 Выводы по главе

По результатам проведённых в первом разделе исследований можно сделать следующие выводы:

1 Целью настоящей работы является разработка и промышленные испытания алгоритмов управления процессом сжигания биогаза и оперативной диагностики технического состояния горелок.

2 Проведён тщательный анализ литературы и станционной документации по технологии получения и сжигания биогаза и существующей практике управления процессом сжигания биогаза.

3 Дана характеристика процесса сжигания биогаза как объекта управления.

4 Предложена структура автоматизированной системы оптимального управления и оперативной диагностики.

5 Поставлены задачи исследования.

6 Результаты исследований, представленных в первом разделе, опубликованы нами в [66, 48, 74, 75].

2 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ БИОГАЗА

2.1 Математическое моделирование процесса сжигания биогаза

Для разработки новых, экологически чистых технологий получения и переработки биомассы нужно сначала разработать основы этих процессов. Хотя биомасса в качестве источника энергии известна на протяжении многих веков, она по-прежнему вызывает интерес инженеров и ученых в области как экспериментальных [1-3], так и теоретических исследований [4-6]. Поэтому разработка математических моделей и процесса сжигания биогаза является интересной задачей, которая часто проводится исследователями [7-12]. Численное моделирование является привлекающим внимание, недорогим и быстрым методом анализа проблем и приводит к пониманию механизмов, управляющих данным процессом. Но численное моделирование должно предшествовать созданию математической модели, описывающей изучаемые явления. В зависимости от сложности рассматриваемых задач, математическая модель может описывать исследуемый процесс с различной степенью достоверности. Таким образом, численное моделирование следует сочетать с экспериментальными исследованиями, чтобы сравнить и оценить обоснованность модели. Ниже будет представлена математическая модель процесса газификации биомассы. Затем, на основании результатов экспериментальных исследований с целью проверки правильности разработанной математической модели будет проведено численное моделирование процесса газификации биомассы.

Процесс сжигания биогаза является сложным процессом гетерогенного и гомогенного сгорания. Горючие газы - в основном CO , H_2 , CH_4 - которые, наряду с другими негорючими биогазами, такими как CO_2 , H_2O , N_2 , выделяются в окружающее газовое оточение частицы во время дебиогазации, - подвержены гомогенному сгоранию. Горючие компоненты твердого материала, в основном уголь, оставшийся в частице, так называемый карбонизат, после процесса дебиогазации подвержены гетерогенному сгоранию.

Из-за сложности процессов, происходящих в процессе гомогенно-гетерогенного сгорания, принято, что математическая модель процесса сжигания биогаза будет описывать процесс в упрощенном виде, то есть с помощью метода Эйлера-Лагранжа, который в настоящее время является стандартным методом, используемым для численного моделирования процессов сжигания биогаза и частиц или капель горючего материала [13-17]. В модели предполагается, что частица биомассы будет рассматриваться как дискретная лагранжиан частица, которая своим присутствием создает граничные условия для газообразной среды, рассматриваемой как среда Эйлера. По аналогии с газообразной средой, эволюция частицы описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии.

Процесс гомогенного сгорания горючих летучих компонентов описывается с помощью дифференциальных уравнений, которые выражают основные законы сохранения массы, импульса и энергии, а именно:

- уравнение сохранения массы.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.1)$$

где ρ - плотность, u - скорость жидкости.

- уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (2.2)$$

где p - давление (нормальное напряжение), τ - тензор тангенциальных напряжений, g - гравитация.

- уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u e) = -\nabla \cdot (p u) + \nabla \cdot (\tau u) - \nabla \cdot q + \rho u \cdot g + q_r \quad (2.3)$$

где

$$e = \frac{1}{2} |u|^2 + c_p T \quad (2.4)$$

полная энергия на единицу массы, T - температура, c_p - удельная теплоемкость при постоянном объеме. Тензор тангенциальных напряжений определяется основным уравнением,

$$\tau = \mu [\nabla u + (\nabla u)^T] + \lambda \nabla \cdot u \quad (2.5)$$

где μ и λ являются соответственно динамическим и объёмным коэффициентами вязкости.

Тепловой поток Q определяется следующим образом:

$$q = -k \nabla T \quad (2.6)$$

где k - коэффициент теплопроводности, который учитывает только теплопроводность, а уравнение

$$p = RT \sum_g \frac{\rho_g}{M_g} \quad (2.7)$$

является уравнением состояния, в котором $p_g = p Y_g$ и массовая доля Y_g -го компонента биогаза определяется уравнением:

$$\frac{\partial \rho Y_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_g) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_g) + \dot{\rho}_g \quad (2.8)$$

выражающим закон сохранения массы g -го компонента биогаза и

$$\rho = \sum_{g=1}^{g=Ns} \rho_g \quad (2.9)$$

Так как коэффициенты бинарной диффузии $D_{i,j}$ сравнимые, то есть $D_{O_2,CO_2} = 0,139 \text{ см}^2 / \text{с}$, $D_{CO_2, H_2O} = 0,138 \text{ см}^2 / \text{с}$, $D_{CO_2, H_2O} = 0,137 \text{ см}^2 / \text{с}$, $D_{O_2, CO} = 0,185 \text{ см}^2 / \text{с}$, определенные при температуре 273 К и давлении 1 атм [18], далее принято общий эффективный коэффициент диффузии D для всех компонентов биогаза. Величина коэффициента диффузии D определяется следующим образом:

$$D(T(t, x)) = D_0 \left(\frac{T(t, x)}{T_0} \right)^{1.75} \quad (2.10)$$

где

$$D_0 = 3,294 \cdot \frac{10^{-4} \text{ м}^2}{\text{с} T_0} = 1573 \text{ К}$$

r – химическая реакция, происходящая в газовой среде, символически представлена в следующем виде



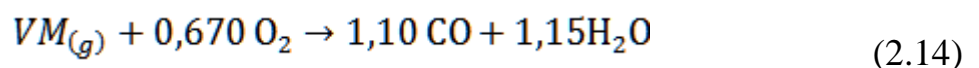
где X_g представляет собой 1 моль g -го компонента биогаза, a_{gr} и b_{gr} – безразмерные стехиометрические коэффициенты для r -той реакции. Скорость r -той реакции ω_r , контролируется кинетикой, определяемой уравнением

$$\dot{\omega}_r = k_r \prod \left(\frac{\rho_g}{M_g} \right)^{a_{g,r}} \quad (2.12)$$

где

$$k_r = A_r e^{-E_r I(RT)} \quad (2.13)$$

в котором r -той является константой скорости, $a_{g,r}$ определяет порядок реакции. В этом исследовании рассматриваются две реакции: сгорание летучих компонентов и окиси углерода:





где $\text{VM}_{(g)}$ представляет все летучие вещества, выделенные из частицы, для которых принято $M_{\text{vm}(g)} = 30$ кг / кмоль. Значения стехиометрических коэффициентов в уравнении (5.14) берут из элементного анализа биомассы. Для расчетов принято следующие значения кинетических параметров: $A_1 = 2,6 \cdot 10^{11}$ 1/с, $E_1 = 166$ МДж / кмоль, $a_{\text{VM},1} = 0,7$, $a_{\text{O}_2,1} = 0,8$, $A_2 = 1,6 \cdot 10^{11}$ 1/с, $E_2 = 127$ МДж / кмоль, $A_{\text{CO}_2,2} = 1$, $a_{\text{O}_2,2} = 0,25$, $a_{\text{H}_2\text{O},2} = 0,5$.

Средний член в уравнении (5.8) имеет следующий вид.

$$\dot{\rho}_g = M_g \sum_r \dot{\omega}_r (b_{gr} - a_{gr}) \quad (2.16)$$

$$q_r = \sum_r Q_r \dot{\omega}_r \quad (2.17)$$

где Q_r - теплота r -той реакции: положительная для экзотермических реакций или отрицательная для эндотермических реакций.

2.2 Разработка методики расчета параметров процесса сжигания биогаза

В предлагаемой математической модели процесса сжигания предполагаются следующие предположения:

- воздушно-топливная смесь делится бесконечно тонким фронтом пламени в зону сгоревшей смеси и в зону несгоревшей смеси;
- рабочая жидкость в обеих зонах является идеальным газом;
- химический состав рабочего тела в зонах различен, поэтому его теплофизические характеристики различны;
- давление в обеих зонах одинаковое;
- внутри каждой зоны нет градиентов параметров рабочего тела по координатам, однако температуры между зонами различаются;
- характеристика тепловыделения рассчитывается с использованием зависимости II Vibe;
- Показатель и эффективные параметры двигателя определяются методом И. И. Вибе с учетом переменного показателя характера сгорания и продолжительности горения биогаза;
- Показатели токсичности рассчитываются по методу В.А.Звонова [5-6].

Одним из наиболее распространенных и наиболее точно описывающих характеристики рассеивания тепла математических моделей является модель процесса сжигания II Vibe, которая наиболее широко используется. Основное предположение, на котором строится математическая модель процесса сжигания II Vibe, заключается в усреднении температур в топочном

пространстве, что, в свою очередь, снижает точность расчета индексов токсичности. Повышение точности и эффективности использования этого математического инструмента возможно благодаря введению двухзонной модели для расчета процесса сжигания, что позволяет нам точно оценить токсичность газов [23-24]. В работе используется двухзонная модель процесса сжигания, в которой модель II Vibe используется для определения характеристик рассеивания тепла и продолжительности горения. Схема расчета используемой двухзонной математической модели процесса сжигания представлена на Рисунок 2.1.

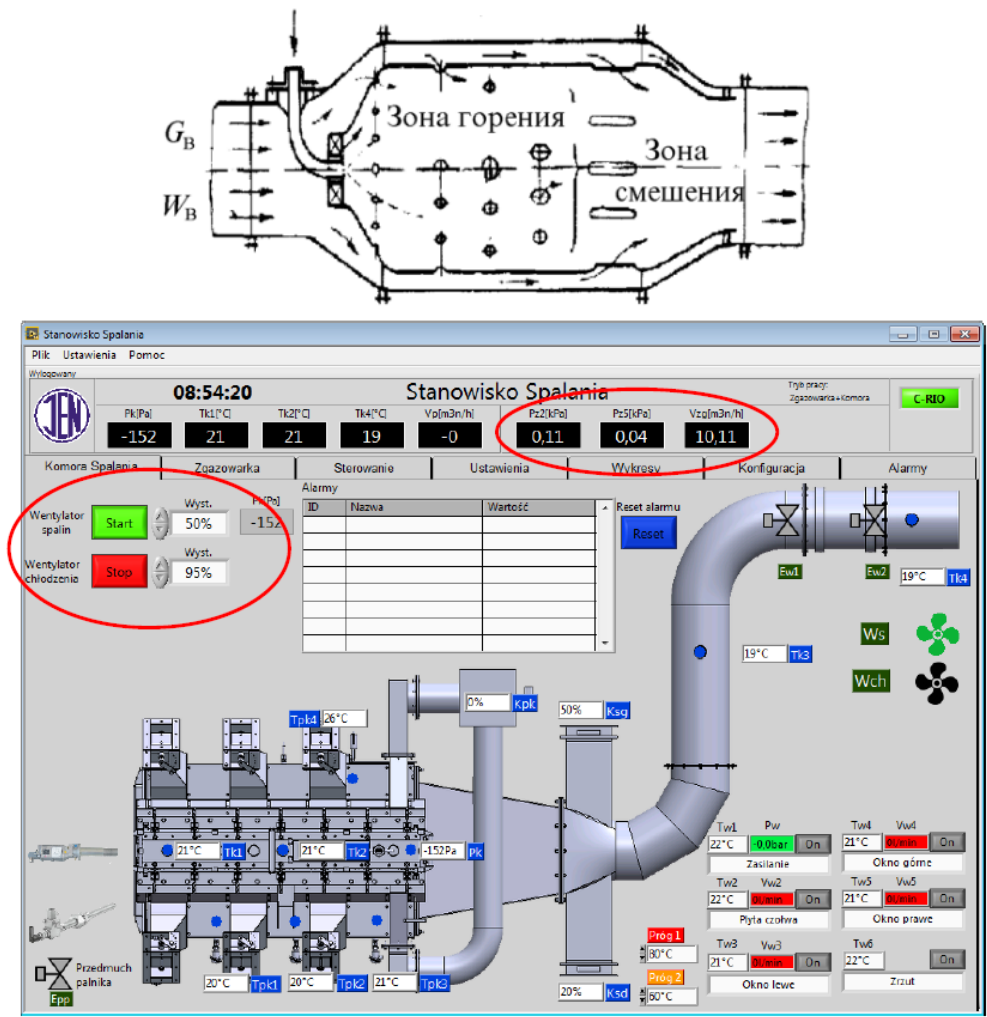


Рисунок 2.1 – Схема двухзонной математической модели процесса сжигания

В течение четырех последних лет ведутся исследования биогазовых технологий с целью получения скоростной технологии переработки биомассы в биогаз. При этом неожиданно быстро были получены результаты, которые были высоко оценены польскими экспертами из научного сообщества. Не смотря на кажущуюся простоту установок в польской лаборатории ЛПУ (г.Люблин, Польша), которые сделаны своими руками, на них были сделаны сотни экспериментов по исследованию

биогазовых процессов. Фактические же данные по концентрации газов, контролю, диагностики были получены на самом современном оборудовании, к примеру, с использованием СКР-газоанализа.

Для численного решения представленных выше уравнений был использован метод ICE (*Implicit Continuous-fluid Eulerian*) [18, 20], который был оригинально изменен путем изменения граничных условий, определяющих поверхность пламени, и дополнен уравнениями сохранения массы и энергии для горения. Для упрощения рассматриваемых задач предполагается, что процесс является нестационарным одномерным процессом, что позволяет численно решать уравнения сохранения в сферических координатах.

2.3 Моделирование установки в компьютерной программе MathLab

Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений используется алгоритм Рунге-Кутты второго порядка. Для того, чтобы подтвердить правильность предположений и параметров было проведено моделирование экспериментов, выполненных на газификаторе 800 кВт. Результаты моделирования для измерения № 1 показаны на Рисунке 2.5. На графиках показаны: температура твердых веществ и биогаза, массовый поток твердых веществ и биогаза, мольные доли, рассчитанные на сухой газ, и массовые доли для всех компонентов. Вертикальные пунктирные линии указывают на начало сужающегося элемента газификатора (и точка дозирования воздуха) и горла газификатора.

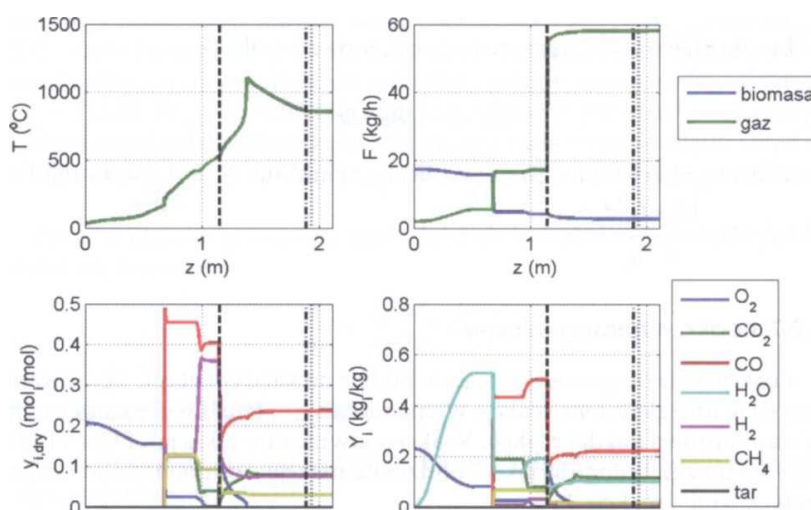


Рисунок 2.5 – Профиль температуры и концентрации компонентов для кинетической модели. Измерение № 1 [6]

Первым этапом сушки является сушка добавленной биомассы. Из-за высокой влажности добавленной биомассы (18%), этот процесс происходит

на длине около 0,5 м газификатора. Когда температура слоя достигает 170 °С, начинается процесс пиролиза. Быстро выделяются СО, СО₂ и СН₄, а когда температура превышает 422 °С начинается выделение Н₂. Небольшое количество СН₄ и Н₂ может сгореть, потребляя кислород, добавленный в газификатор вместе с биомассой. После добавления остальной части воздуха в горле газификатора начинается процесс горения Н₂ и дожигания СО в СО₂.

Параллельно происходят реакции газификации на поверхности карбонизата, из которых расходуется СО₂ и Н₂О. Равновесие в анализируемом газификаторе устанавливается на длине около 1,5 м. Выход получаемого биогаза хорошо согласуется с результатами измерений. Слишком медленно происходит сжигание СН₄ и его концентрация на выходе больше, чем во время измерений. Кислород, подаваемый через горло газификатора, потребляется в основном для дожигания СО и в реакциях на поверхности карбонизата. Равновесие в реакции СО + Н₂О ↔ СО₂ + Н₂ перемещается вправо, что приводит к увеличению концентрации Н₂. Тем не менее, в случае кинетической модели различия между измерениями и моделированием намного меньше, чем для термодинамических моделей.

Таблица 2.1 – Примеры условий для проведения измерений, средние температуры в камере и состав сухого биогаза на выходе

Единицы		Значение
Поток биомассы	кг/ч	3,23
Поток воздуха	кг/ч	3,88
X	-	0,21
Температура воздуха перед входом	°с	200
Температура перед горлом	°с	768
Температура за горлом	°с	760
Температура над решёткой	°с	736
Температура биогаза на выходе биогаза	°с	213
СО	% моль,сухой	17,4
СО ₂	% моль,сухой	12,4
СН ₄	% моль,сухой	2,5
О ₂	% моль,сухой	1,0
Н ₂	% моль,сухой	8,3

Результаты моделирования для тестового измерения приведены на Рисунок 2.6. На начальном этапе процесса начинается сушка биомассы. Затем выделяют летучие вещества, соответственно СО₂, Н₂О, СО, СН₄, и Н₂. Небольшое количество воздуха, который попадает в систему вместе с биомассой, потребляется для после дожигания СО к СО₂. В небольшой степени происходит процесс газификации образованного карбонизата с помощью СО₂ и Н₂О. Перед добавлением воздуха в горле газификатора молярный состав биогаза после пиролиза и частичного окисления следующий: СО = 41%_{mol}, Н₂ = 31%_{mol}, Н₂О = 10%_{mol} СН₄ = 6,7%_{mol}, СО₂ = 2%_{mol}. После добавления воздуха наступает частичное дожигание СО до СО₂

и H_2 до H_2O . Одновременно начинаются реакции сгорания и газификации карбонизата, и образуются CO и H_2 . На выходе из камеры состав сухого биогаза выглядит следующим образом: $CO = 27-28\%$ мол, $CO_2 = 8-9$ моль%, $CH_4 = 5$ моль%, $H_2 = 10-12\%$ моль%. В выходном газе нету не вступившего в реакцию кислорода. Выходной газ содержат ок. 18% водяного пара. Рассчитанная несгоревшая часть горючих веществ составляет 17-18%. На Рисунок 2.6. графики показывают, соответственно, массовую долю газовых компонентов, температуры биогаза (T) и слоя биомассы (T), мольные доли компонентов биогаза, массовые потоки биогаза (F) и биомассы (F_s), мольные доли газовых компонентов в пересчёте на сухой газ и массовые потоки разных компонент биогаза в зависимости от высоты слоя (z). Синяя вертикальная линия обозначает конец сушки биомассы, а зеленая - конец дебиогазации биомассы.

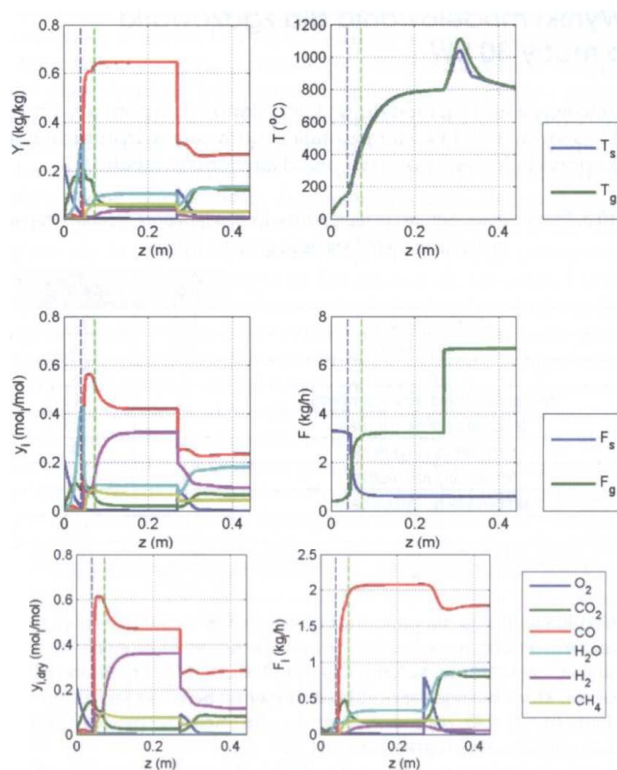


Рисунок 2.6 – Примеры результатов моделирования для измерения в условиях, описанных в таблице 2.1.

Сравнивая результаты расчета экспериментов, можно заметить повышенные уровни CO и CH_4 .

Рассчитанное содержание CO_2 ниже на прибл. 20%. Достигнуто хорошее совпадение концентрации H_2 с результатами измерения. Это подтверждает правильность реализуемой модели, но полученные результаты сильно зависят от правильности принятых параметров в моделях единичных процессов.

2.4 Этапы имитационного моделирования при исследовании сложной проблемной ситуации

Моделирование системы управления проводится с использованием системного (структурного) анализа сложных АСР со следующим итеративным подбором параметров передаточных функций объектов управления.

Особенностью данного способа, является малый исходный объём информации и относительно меньшая трудоёмкость. Структурный анализ используют на ранних стадиях создания системы управления для выявления свойств системы, которые определяются её структурными особенностями.

Моделирование системы управления процессом сжигания биогаза с использованием структурного анализа разбиваем на этапы:

- 1) Выделение границ технологического объекта и его подсистем;
- 2) Построение графа подсистем;
- 3) Разработка имитационной модели подсистем;
- 4) Проверка адекватности модели каждой из подсистем;
- 5) Объединение моделей подсистем в модель объекта.
- 6) Проверка адекватности модели объекта.

Принятые допущения:

- 1) Исходное сырьё является идеальным газом.
- 2) Потери материальных и энергетических потоков при транспортировке, нагревании, охлаждении равна нулю.
- 3) Имитационные модели элементов системы описываются идеальными динамическими звеньями.

Основная идея метода имитационного моделирования заключается в том, что исследуемый объект подвергается определенным воздействиям, характеристики которых заранее известны. Последующая статистическая обработка входных и выходных величин объекта позволяет установить статистическую взаимосвязь между его входом и выходом. Аналитическое выражение этой взаимосвязи и есть имитационная или статистическая модель объекта. Очевидно, при имитационном моделировании используется экспериментальный подход к построению математической модели. Методологические принципы построения математических моделей изложены в работах [1-6]. В соответствии с этим подходом выделяются следующие три основных этапа его проведения:

1. На входе объекта формируется случайная величина или процесс в виде числового или временного ряда с заранее заданными вероятностными характеристиками (при активном эксперименте используют специальные генераторы случайных величин, при пассивном эксперименте используются естественные шумы объекта). Регистрируется реакция объекта на эти случайные входные воздействия.

2. Производится статистическая обработка входных и выходных величин объекта с целью получения его имитационной или статистической

модели, характеристики которой должны соответствовать результатам эксперимента или статистических испытаний.

3. Осуществляется проверка адекватности полученной модели экспериментальным данным [7, 8].

В зависимости от того, каким образом организуется воздействие на объект, возможно получение статической или динамической имитационной модели. В том случае если на входе объекта значения случайной величины изменяются через достаточно большие не обязательно равные промежутки времени, то, регистрируя выходную величину объекта после окончания переходного процесса, можно рассчитать его статическую характеристику. Так как рассчитанная в таком эксперименте статическая характеристика не зависит от времени, то ее расчет осуществляется по значениям числового ряда, подаваемого на вход объекта и представляющего собой выборку случайной величины. Для получения статистически значимых характеристик статической имитационной модели случайная величина должна иметь заранее заданные статистические характеристики, к которым в первую очередь относятся математическое ожидание, дисперсия и закон распределения случайной величины. При расчете статических (но не статистических) характеристик используются методы теории вероятностей, математической статистики, теории планирования эксперимента.

Исследуемый объект имеет два входа (подача биогаза и подача воздуха) и один выход (температура топочных газов), возмущением является отбор пара. Построим имитационную модель, используя корреляционный метод идентификации для определения времени запаздывания, и приложение MATLAB System Identification Toolbox для построения многомерных имитационных моделей. На рисунках 2.7 и 2.8 показаны взаимные корреляционные функции топливного и воздушного каналов регулирования.

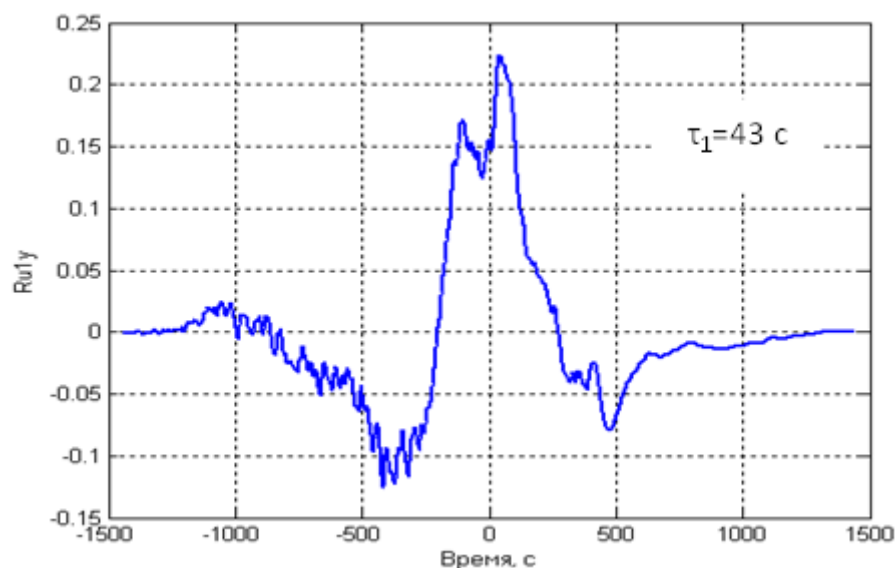


Рисунок 2.7 – Взаимная корреляционная функция топливного канала

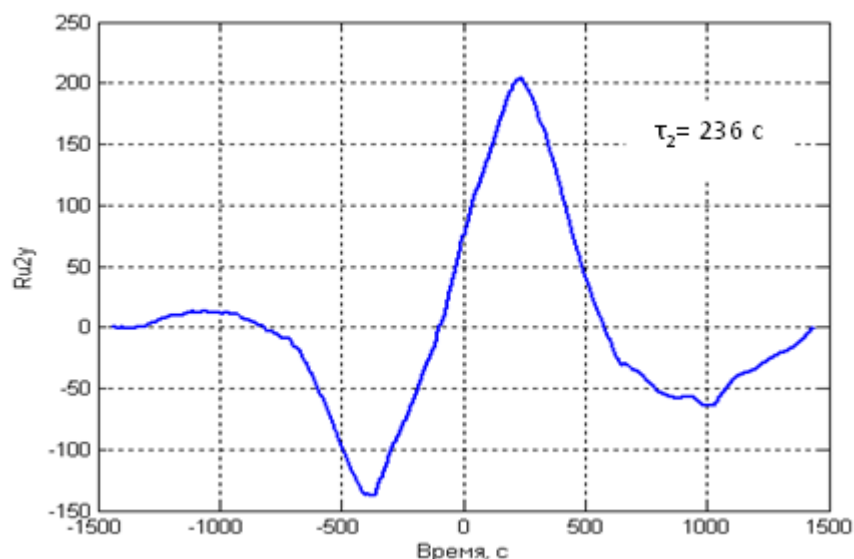


Рисунок 2.8 – Взаимная корреляционная функция воздушного канала

На рисунке 2.9 приведены результаты идентификации топливного тракта.

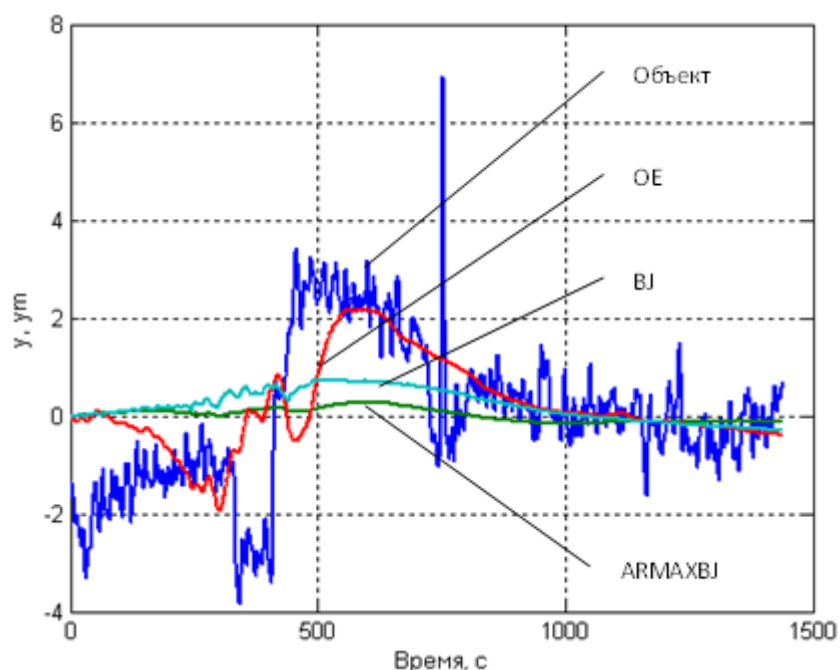


Рисунок 2.9 – Выходные сигналы моделей и объекта

Как видно по осциллограммам выходных сигналов наименьшую ошибку дает OE – модель.

По параметрам модели была получена дискретная передаточная функция топливного тракта

Для моделирования процесса горения в реальном времени была получена дискретная модель в пространстве состояний.

На рисунке 2.10 показана ошибка моделирования, возникающая при расчете выходного сигнала. Как видно эта ошибка пренебрежимо мала.

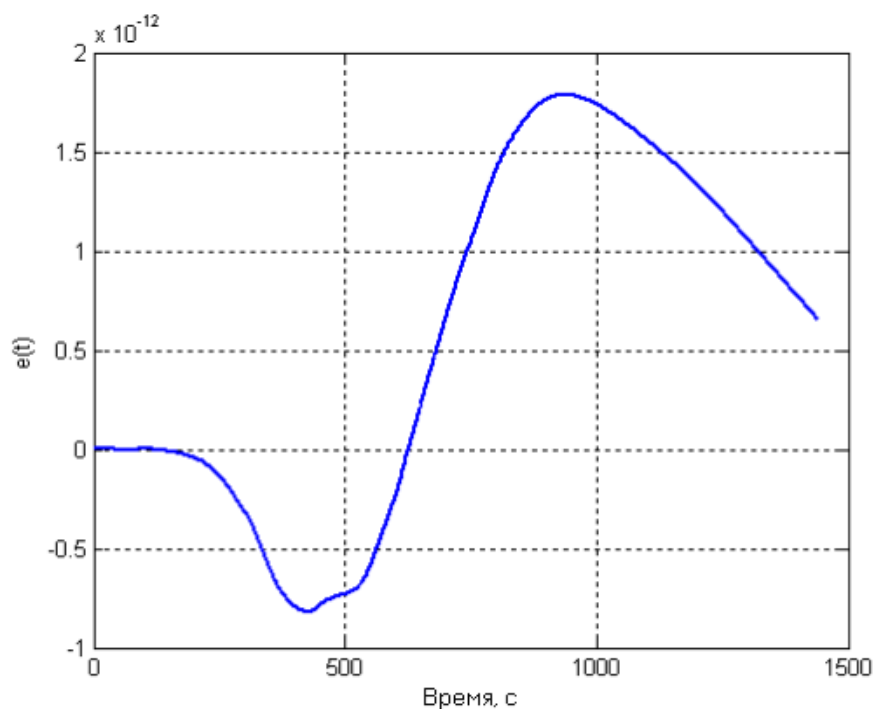


Рисунок 2.10 – Ошибка моделирования

На основе полученной модели топливного тракта была построена зависимость «температура – топливо – воздух» (рисунок 2.11) хорошо совпадающая с аналогичной экспериментальной зависимостью.

В процессе моделирования в результате многократного подбора был выбран шаг поиска равный 48, 3 м³/час. Как видно из рисунка 2.11, использование разработанного алгоритма обеспечивает устойчивую работу системы в области максимальных значений температуры.

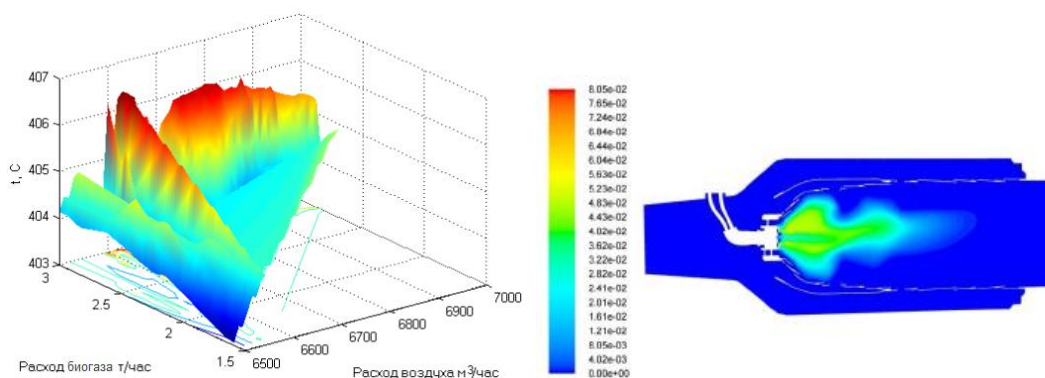


Рисунок 2.11 – Расчетная зависимость температуры топочных газов от подачи биогаза и воздуха

Рассмотренный алгоритм имитационного моделирования процесса горения в топке котла, основан на корреляционном методе идентификации для определения времени запаздывания, и реализован в приложении MATLAB System Identification Toolbox для построения многомерных имитационных моделей, связывающих вход и выход системы.

Доказано, что оценку параметров этих моделей, а, следовательно, и оценку технического состояния функциональных подсистем целесообразно производить с использованием ОЕ-моделей. Проверка предложенного алгоритма имитационного моделирования процесса горения в топке котла проводилась на реальном теплоэнергетическом объекте (подсистема газорегуляторного пункта). Сравнительный анализ переходных характеристик моделей ГРП и результатов имитационного моделирования процесса горения в топке котла позволяет определить оптимальные параметры функционирования газораспределительного оборудования и управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивую работу системы в области максимальных значений температуры.

С этой точки зрения была сделана попытка разработать горелочное устройство, небольшой мощности (от 10-100 кВт), использующее особенности вихревых закрученных течений, отличающееся простой конструкцией и позволяющей сжигать пылевидное топливо.

За прототип была выбрана вихревая горелка, разработанная Ш.А. Пиралишвили и Р.И. Ивановым, хорошо зарекомендовавшая себя для работы на газообразном топливе (рисунок 2.12).

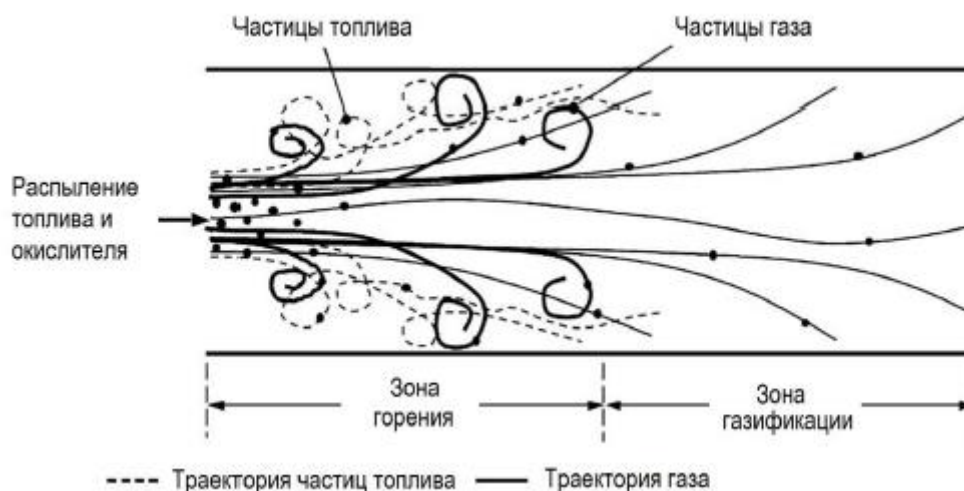


Рисунок 2.12 – Принцип работы БГУ (газификатора) с вдуваемым потоком биогаза

Проведено численное моделирование аэродинамических процессов в горелочном устройстве с учетом химических реакций.

Моделировались следующие процессы и явления: турбулентность в реагирующей среде, горение биогаза, движение частиц газообразного биогаза и лучистый теплообмен. Моделирование газовой фазы (летучие, кислород) проводилось в приближении Эйлера, а расчет траекторий движения твердых частиц выполнен в Лагранжевой постановке.

Проведенные исследования показали возможность организации процесса сжигания биогаза в предложенном устройстве. На основании

результатов расчета геометрия горелки изменялась с учетом недостатков предыдущих моделей:

- увеличены объем области горения и выходное сечение устройства, что привело к появлению области возвратных течений и зоны установившегося горения, в целом повысив полноту сгорания биогаза до 60%;

- выполнено перераспределение подвода окислителя до и после области горения, позволившее увеличить полноту сгорания на 18-22% %

- организован тангенциальный ввод воздуха в камеру смешения, обеспечивший стабильное попадание биогаза в зону горения и отсутствие проскоков частиц в камеру подвода окислителя.

В конечном итоге удалось разработать вихревое горелочное устройство, полнота сгорания биогаза в котором на основе результатов моделирования достигает 95%.

Результаты расчета конечного варианта горелочного устройства представлены на рисунках 2.13-2.15.

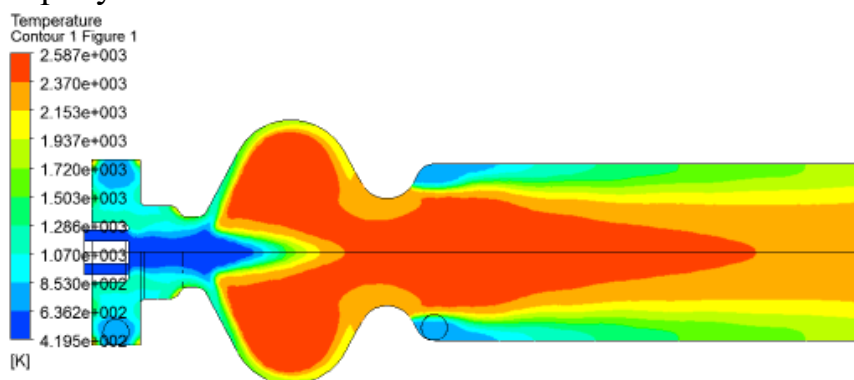


Рисунок 2.13 – Распределение температуры в сечении горелки с двумя подводами воздуха при $\alpha = 1,3$

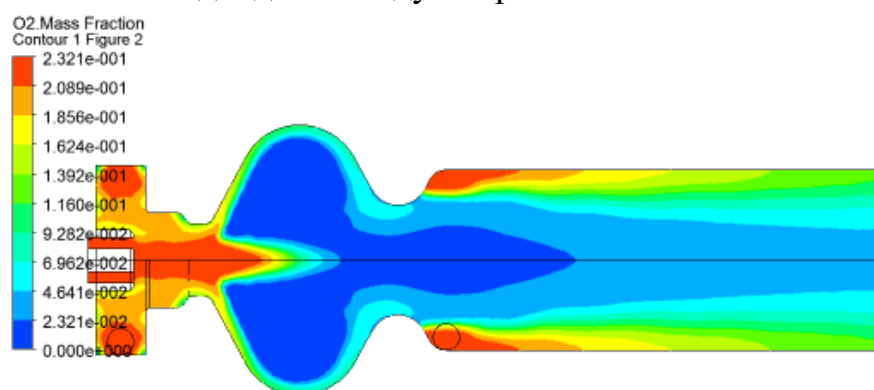


Рисунок 2.14 – Распределение массовых концентраций кислорода в сечении горелки с двумя подводами воздуха при $\alpha = 1,3$

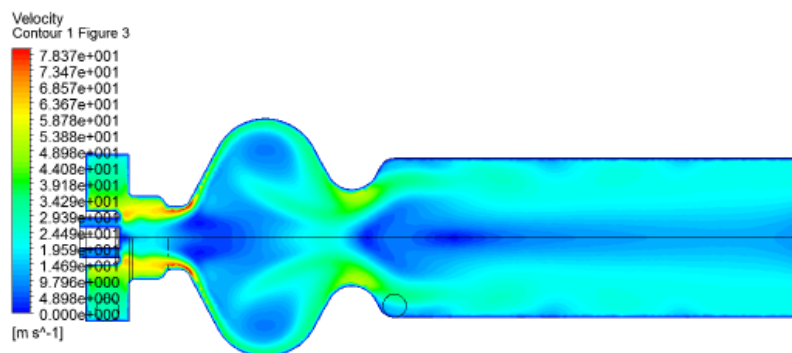


Рисунок 2.15 – Поле скоростей в сечении горелки при $\alpha = 1,3$

Оценка полноты сгорания в разработанном устройстве проведена для подаваемого биогаза. Для выделяющегося в процессе сжигания биогаза проанализирована картина концентраций биогаза и ее динамика.

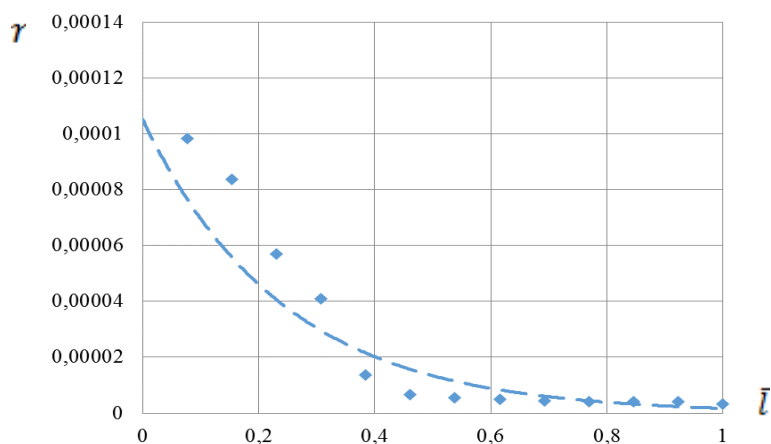


Рисунок 2.16 – Объемная доля биогаза по длине горелочного устройства

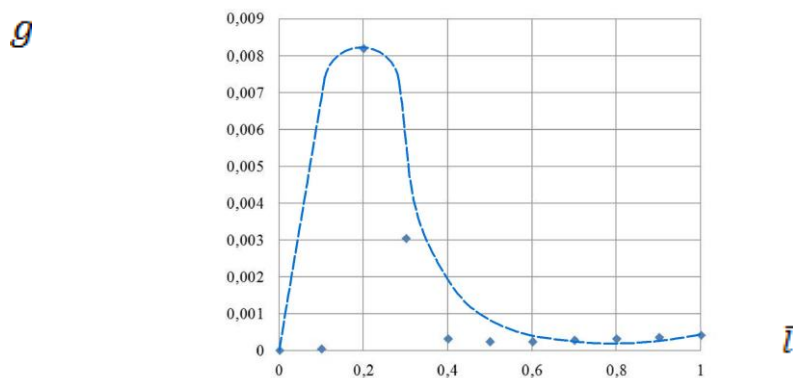


Рисунок 2.17 – Массовая доля выделяющегося горючего биогаза по длине горелочного устройства

Для разработанного горелочного устройства по результатам расчетов полнота сгорания биогаза составляет $\eta_{\text{ТЭ}} = 0,94 \dots 0,96$.

Вычислительная гидродинамика (CFD - Computational Fluid Dynamics) позволяет рассчитать процессы потока биогаза, теплообмена, химических

реакций и другие явления, которые происходят в однородной среде, или между фазами. CFD может быть использована для исследования новых концепций и геометрии газификатора и оптимизации, и модернизации существующих решений [45]. В литературе есть много материала об использовании CFD расчётов для моделирования работы газификатора. Большинство авторов предлагают упрощенные модели (2D), охватывающее только восстановительную часть камеры [46] или модель с произвольно выделенными объёмами вычислений, охватывающими последовательно зоны нагрева слоя, сушку биомассы, пиролиз, окисление и восстановление карбонизата [47]. В программе Fluent существует несколько многофазных моделей, которые потенциально могут быть использованы для стимулирования процесса газификации. В газогенераторе наблюдается большая разница в продолжительности пребывания слоя твёрдого вещества и биогаза, а весь процесс должен происходить в стационарном состоянии. Процесс газификации, также, как и горение, состоит из сложного комплекса физико-химических явлений. Математическое моделирование представляет собой попытку описания этого процесса, выделяя следующие элементы: поток биогаза через пористый слой (биомассу), поток дисперсной фазы (угольных частиц), взаимодействие между фазами, гомогенные реакции в газовой фазе, процессы сгорания твердых веществ (дебиогазация, поверхностные реакции).

2.5 Оптимизация теплового режима в биогазовых установках

Биогаз является продуктом обмена веществ бактерий, образующимся вследствие разложения ими органического субстрата. Биогазовые установки обеспечивают переработку органических осадков сточных вод в биогаз (горючий газ). Наряду с биогазом биогазовые установки производят высокоэффективное дорогостоящее жидкое органическое удобрение [3].

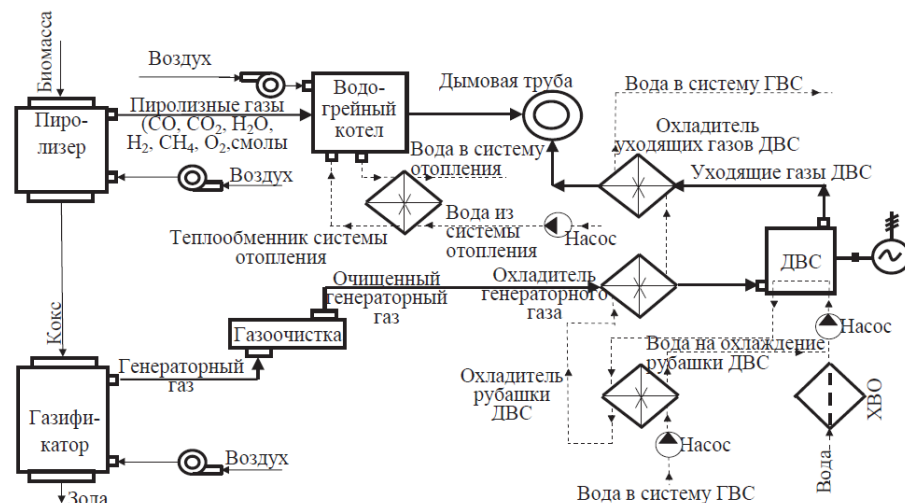


Рисунок 2.18 – Технологическая схема рассматриваемой БГУ

Скорость процесса брожения очень сильно зависит от температуры. Принципиально важной является закономерность: чем выше температура, тем быстрее происходит разложение и тем выше производство биогаза. Таким образом сокращается время разложения (рисунок 2.19). При возрастании температуры снижается содержание метана в биогазе. Это связано с тем, что при высоких температурах растворенная в субстрате двуокись углерода интенсивнее переходит в газообразную фазу (в биогаз), таким образом, что относительное содержание метана сокращается. Количество биогаза, которое можно извлечь, будет одинаковым при достаточном количестве времени брожения [2].

Для обеспечения наибольшего выхода биогаза в биогазовой установке должен поддерживаться оптимальный для данной установки температурный режим – важнейший фактор процесса сбраживания.

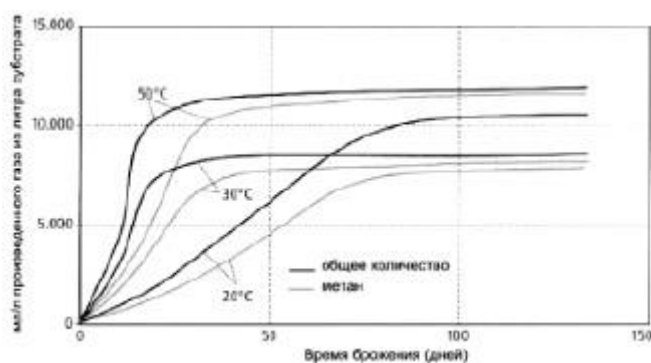


Рисунок 2.19 Влияние температуры брожения и времени брожения на количество произведенного биогаза

С учетом оптимизации процесса переработки органических отходов для получения биогаза выделяют три температурных режима:

- 1) психрофильный – до 20–25 °С;
- 2) мезофильный – 25–40 °С;
- 3) термофильный – свыше 40 °С.

Оптимальная температура метаногенеза зависит от вида перерабатываемого установкой сырья – органических отходов [5]. Процесс осуществляется в условиях термофильного брожения сырья в биотермических реакторах в анаэробных условиях. Энергонезависимый процесс переработки отходов осуществляют в закрытой системе. Качество процесса определяется косвенными параметрами.

Образовавшийся в результате анаэробного сбраживания биогаз поступает в фильтр-осушитель для удаления остаточной влаги из биогаза. Осушенный и очищенный биогаз поступает в группу газгольдеров для сглаживания пиков при производстве и потреблении биогаза.

Из газгольдера биогаз поступает в фильтр очистки от CO₂ и осушитель от конечной влаги. В фильтре очистки от CO₂ биогаз очищается до содержания метана в газе 93 %, преобразовываясь в биометан, который

может быть использован в качестве биогаза для компрессора внутреннего сгорания и поступает в группу газгольдеров биометана. Из газгольдеров биогаз также направляется через фильтр очистки от меркаптановой серы в газовый котел для выработки тепловой энергии и на газопоршневую генераторную установку для выработки электрической энергии, которая используется для поддержания температурного режима в реакторе и других нужд. Процесс нагрева происходит путем теплопередачи регенеративными теплообменниками, в которых теплоносителем является вода. Для небольших реакторов с перемешивающими устройствами вполне подходят теплообменные нагревательные аппараты (шланги, цилиндрические или плоские теплообменники), через которые прокачивается горячая вода (более 60 °С) и которые можно вынимать из реактора при его очистке [1].

Дополнительный резерв энергии – в той теплоте, которая заключена в удаляемом из реактора шламе; по возможности следует использовать эту теплоту на подогрев загружаемого субстрата и компенсации потерь в реакторе. Простейшую возможность такой утилизации энергии представляет непосредственный перенос теплоты, когда поступающий в реактор жидкий субстрат подогревается в теплообменнике (в котором теплоносителем служит удаляемая из реактора жидкая масса; последняя пропускается через трубки аппарата либо омывает их). Также подогрева загружаемой в реактор массы путем вторичного использования запасенной отводимым субстратом теплоты можно добиться посредством теплового насоса, оснащенного конденсатором или испарителем, конструкция которого должна обуславливаться в каждом конкретном случае свойствами субстрата. Энергия, необходимая для процесса брожения, расходуется на подогрев субстрата от температуры подаваемого в реактор жидкого навоза до температуры брожения, а также на компенсацию потерь, вызванных радиацией и теплопроводностью. Энергия, которой следует располагать для подогрева массы, загружаемой в реактор, до температуры процесса, зависит от массы субстрата, его средней удельной теплоемкости, разности между температурой процесса и температурой загружаемого материала.

Таким образом, одной из важнейших задач повышения эффективности работы биогазовых установок является задача сокращения потребления ТЭР при эксплуатации биогазовых установок, в том числе за счет оптимизации условий поддержания температурного режима, что является предметом наших дальнейших исследований.

Целью моделирования параметров теплообменных аппаратов системы теплоснабжения биогазовых установок является оценка параметров и условий работы теплообменников и компрессора применительно к различным температурным режимам работы биогазовой установки, суточным дозам загрузки и физическим свойствам обрабатываемого субстрата и хладагента.

Основные расчетные зависимости:

$$N_{\kappa} = f(\text{параметров}), \quad (2.18)$$

$$F_{\text{то бп}} = f(\text{параметров}), \quad (2.19)$$

$$F_{\text{то отс}} = f(\text{параметров}), \quad (2.20)$$

Первая основная расчетная зависимость в таком случае будет выглядеть как: $N_k = f$ (физические свойства хладагента; $V_n; t_n$; $G_{бп}$; $G_{ц1}$; $G_{ц2}$; тип ТО; физические свойства субстрата), где N_k – мощность компрессора, кВт; физические свойства хладагента – физические свойства хладагента, включающие в себя теплоемкость, вязкость, критические температура и давление; V_n – суточная доза загрузки биореакторов, м³/сут; t_n – температура анаэробного процесса; V_p – объем реактора, м³; $G_{бп}$ – подача насоса загрузки, м³/ч; $G_{ц1}$; $G_{ц2}$ – подача насосов циркуляции теплоносителя, м³/ч; тип ТО – типы теплообменных аппаратов в баке преднагрева и отстойнике эффлюента; физические свойства субстрата – физические свойства субстрата, включающие в себя теплоемкость, вязкость и плотность.

$$V_n = f(t_n; V_p), \quad (2.21)$$

$$G_{бп} = f(V_n), \quad (2.22)$$

$$G_{ц1} = f(d_1; Q_n; t_n), \quad (2.23)$$

$$G_{ц2} = f(d_2; Q_o; t_n), \quad (2.24)$$

при $W_{\text{опт}}$ – оптимальной скорости в трубопроводе равной 1 м/с;

где d_1 – диаметр трубопровода к теплообменнику бака преднагрева, м; Q_n – расход энергии на предварительный нагрев субстрата до температуры брожения, Вт; d_2 – диаметр трубопровода к теплообменнику отстойника эффлюента, м; Q_o – расход энергии, отбираемой от эффлюента, Вт.

Вторая основная расчетная зависимость в таком случае будет выглядеть как:

$$F_{\text{то бп}} = \frac{Q_n}{k_{\text{то бп}} * \Delta t_1}, \quad (2.25)$$

где $F_{\text{то бп}}$ – площадь теплообменника бака преднагрева, м²; $k_{\text{то бп}}$ – коэффициент теплопередачи теплообменника бака преднагрева, Вт/м²К; Δt_1 – средний температурный напор через стенку теплообменника бака преднагрева, °С.

$$Q_n = f(V_n; t_n; t_1), \quad (2.26)$$

где t_1 – температура исходного субстрата, °С.

$$\Delta t_1 = f(t_H), \quad (2.27)$$

$k_{\text{ТО бп}} = f(G_{\text{бп}}; G_{\text{бп}}; \text{тип ТО}; \text{физические свойства субстрата})$

Третья основная расчетная зависимость в таком случае будет выглядеть как:

$$F_{\text{ТО отс}} = \frac{Q_o}{k_{\text{ТО бп}} * \Delta t_2}, \quad (2.28)$$

где $F_{\text{ТО отс}}$ – площадь теплообменника отстойника эффлюента, м²; $k_{\text{ТО отс}}$ – коэффициент теплопередачи теплообменника отстойника эффлюента, Вт/м²К; Δt_2 – средний температурный напор через стенку теплообменника отстойника эффлюента, °С.

$$Q_o = f(V_H; t_H; t_{\text{ох}}), \quad (2.29)$$

где $t_{\text{ох}}$ – температура, необходимая для прекращения остаточного газовыделения, °С.

$$\Delta t_2 = f(t_H), \quad (2.30)$$

$k_{\text{ТО бп}} = f(G_{\text{ц2}}; \text{тип ТО}; \text{физические свойства субстрата})$

Из теплового баланса:

$$Q_o = Q_H - N_K + Q_{\text{пот1}} + Q_{\text{пот2}} + Q_K, \quad (2.31)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – потери теплоты от трубопроводов в окружающую среду, Вт; Q_K – теплота, используемая для компенсации теплопотерь в окружающую среду от ограждающих поверхностей биореактора, Вт.

Поскольку в предложенной схеме для уменьшения эксплуатационных затрат на производство выбран тип теплообменного аппарата для бака преднагрева и отстойника соответствующий типу теплообменного аппарата в блочно-модульном реакторе – коаксиальный теплообменник.

При этом функции, зависящие от типа теплообменников примут следующий вид:

$$N_K = f(\text{физические свойства хладагента}; V_H; t_H; G_{\text{бп}}; G_{\text{ц1}}; G_{\text{ц2}}; \text{физические свойства субстрата}), \quad (2.32)$$

$$k_{\text{ТО бп}} = f(G_{\text{бп}}; G_{\text{ц1}}; \text{физические свойства субстрата}), \quad (2.33)$$

$$k_{\text{ТО отс}} = f(G_{\text{ц2}}; \text{физические свойства субстрата}), \quad (2.34)$$

Выражения, используемые в макрокинетических моделях для описания локальных потоков тепла q , основываются на предположении об аддитивности вкладов различных механизмов в процессы переноса. Транспортные феноменологические уравнения включают молекулярный перенос в форме законов Фурье и конвективный перенос, величина которого в каждой точке среды пропорциональна локальной скорости \vec{v} движения среды как целого:

$$q(r,t) = -\lambda \cdot \text{grad}T + c_p \cdot \rho \cdot \vec{v} \cdot T, \quad (2.35)$$

где r – радиус-вектор рассматриваемой точки; t – время, с; c_p – теплоемкость, кДж/кг*К; λ – теплопроводность, Вт/м*К; ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К.

Интегрируя (2.35) по поверхности, можно вычислить переносимые через рассматриваемую поверхность полные потоки тепла Q . Существенно, что для решения задачи необходимо знать гидродинамическую структуру, т.е. поле скоростей среды $\vec{v}(r, t)$.

Внутренняя и внешняя задачи. Определение поля скоростей среды $\vec{v}(r, t)$ во многих практически важных случаях наталкивается на непреодолимые трудности вследствие многих причин: сложной геометрии и системы, неустойчивого характера течения. При теоретическом анализе структуры потоков в макрокинетических моделях, описывающих транспортные явления с участием твердых тел и флюидов, можно выделить две принципиально разные задачи:

- внутренняя задача; типичный пример - течение флюида в трубе, когда между длиной трубы L и диаметром d имеет место соотношение $L/d \gg 1$;

- внешняя задача; типичный пример - обтекание флюидом твердого тела, характерный размер которого d значительно уступает характерному размеру области набегающего потока.

Отличие двух задач имеет геометрическую природу:

- во внутренней задаче естественный характерный масштаб системы - это диаметр трубы, т.е. размер области течения ограничен;

- во внешней задаче естественный характерный масштаб системы - это размер тела, а размер области течения неограничен.

Различие в геометрии обуславливает различие в характере течений.

Во внутренней задаче реально существуют два режима течения, между которыми имеется резкая граница. Ламинарный режим течения, когда существует аналитическое решение и поле скоростей в трубе подчиняется известному закону Пуазейля. Турбулентный режим, когда область течения можно разбить на две характерных подобласти – тонкий слой, прилегающий к поверхности твердого тела, внутри которого происходит основное изменение скорости течения, и ядро потока, внутри которого скорость остается практически постоянной. Смена одного режима течения другим при изменении параметров течения происходит практически скачкообразно (это явление получило название кризис течения).

Во внешней задаче тоже говорят о ламинарном и турбулентном режимах течения, но в этом случае речь идет о понятиях, используемых при теоретической интерпретации асимптотического поведения математического описания течения в области малых и больших значений числа Рейнольдса (о числе Рейнольдса речь пойдет ниже). Конечно, деление гидродинамических задач на внешние и внутренние в определенной мере условно и не отражает все многообразие явлений, встречающихся в технологической практике. Например, поведение текущего внутри трубы потока флюида на начальном участке трубы больше похоже на поведение потока, набегающего на твердую пластину. Только, когда поток пройдет в трубе расстояние в несколько калибров (диаметров), установится режим течения, рассматриваемый во внутренней задаче. Часто приходится иметь дело с задачами, когда структура потока обусловлена неоднородной геометрией среды. В этих явлениях присутствуют черты как внешней (обтекание потоком флюида элемента пористой среды, частицы катализатора, пузырька биогаза), так и внутренней задач (фильтрация в элементарной поре, между частицами катализатора или между газовыми пузырьками). Эти задачи отличает соизмеримость характерных размеров твердого тела (частицы сорбента, зерна катализатора) или газового включения (пузырька, поры) и области течения, оказывающей непосредственное влияние на процессы переноса между флюидом твердой частицей или между жидкостью и пузырьком биогаза. Именно в этом одна из причин затруднений при теоретическом анализе многих практически важных систем. Другая причина заключается в переходе на макроскопический уровень описания, т.е. в выборе масштаба осреднения закономерностей течения, полученных при анализе проблемы на масштабе отдельного пузырька, элементарной поры, частицы катализатора. Наконец, характеристики рассматриваемой системы во многих практически важных случаях испытывают флуктуации, величина которых соизмерима с осредняемой величиной. В качестве примера сошлемся на структуру газового потока и потока взвешенных частиц в псевдооживленном слое, структуру потоков биогаза и жидкости в барботажном слое. Конечно, современные вычислительные комплексы и продвинутые методы решения уравнений отодвигают границы возможностей количественного анализа в сторону все более сложных геометрии и характера течения среды, но принципиальные трудности остаются теми же самыми.

Постановка задачи. Рассмотрим процесс адсорбции, протекающий в аппарате, называемом адсорбером и изображенном в виде упрощенной схемы на рисунке 2.20. Процесс характеризуется поглощением сорбата (поглощаемое вещество) из биогаза за счет впитывающих свойств и поверхностного натяжения поверхностного слоя твердых тел, называемых сорбентом (поглощающим телом). Сорбент на рисунке изображен в виде затемненной области. Мы будем рассматривать аппарат вертикального типа, где газ поступает в верхнюю часть колонны с начальной концентрацией примесей C_0 и на выходе аппарата, после прохождения сорбента, имеет

концентрацию примесей $C_n < C_0$. Результаты, полученные ниже, аналогичны для адсорберов горизонтального типа.

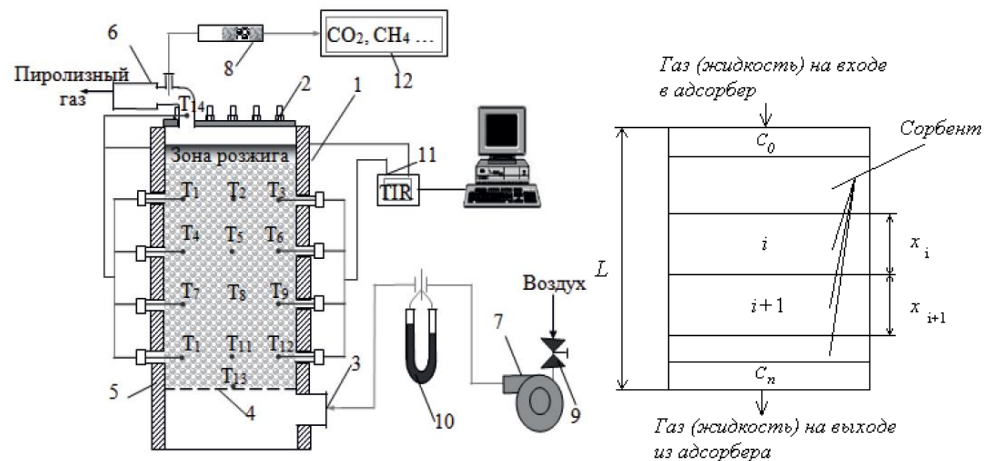


Рисунок 2.20 – Упрощенная схема адсорбера

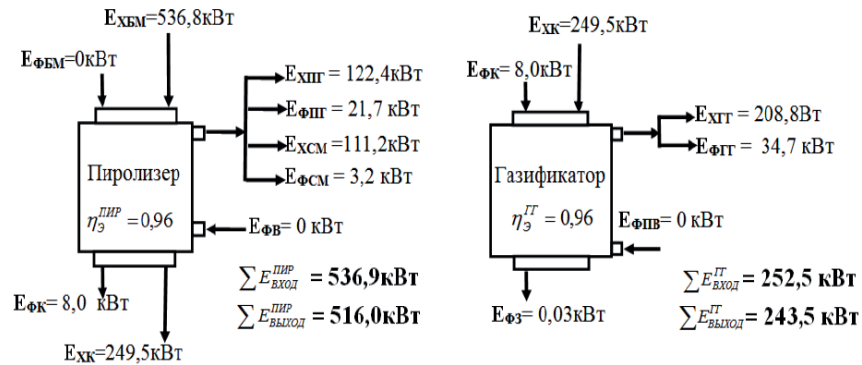
Как технологический объект, адсорбер характеризуется степенью осушки биогаза от сорбата. Дополнительно повлиять на уменьшение концентрации сорбата, без учета физикохимических и геометрических параметров аппарата, можно путем введения управляющего воздействия. Так, за счет изменения давления или расхода вещества на входе в адсорбер можно дополнительно уменьшить концентрацию примесей в газе на выходе из аппарата. Однако для создания качественной системы управления необходимо достаточно точное знание поведения объекта управления, поэтому целью работы являлось получение математической модели процесса адсорбции, удобной для дальнейшей разработки системы управления.

Уравнения балансов для процесса адсорбции. Из-за накопления сорбата на поверхности сорбента свойства последнего постоянно меняются, вследствие чего процесс в целом является нестационарным. Поскольку концентрация сорбата меняется по длине слоя сорбента, уравнение баланса можно записать только для элементарного объема за элементарное время для неподвижной и подвижной фаз. В общем случае получим уравнения частных производных: материального баланса по сорбату и теплового баланса для каждой из фаз. Если предположить, что для подвижной фазы можно пользоваться моделью с продольным перемешиванием, то для этой фазы справедливы соотношения:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial(vC_i)}{\partial x} + D_{iL} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + w, & i = \overline{1, n}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{S_{pc}} * \frac{\partial(G*T)}{\partial x} + \frac{\lambda_L}{c_p} * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{c_p} q_{пр} w + \frac{1}{c_p} k_T \frac{F}{V} (T_{вн} - T), \end{cases} \quad (2.36)$$

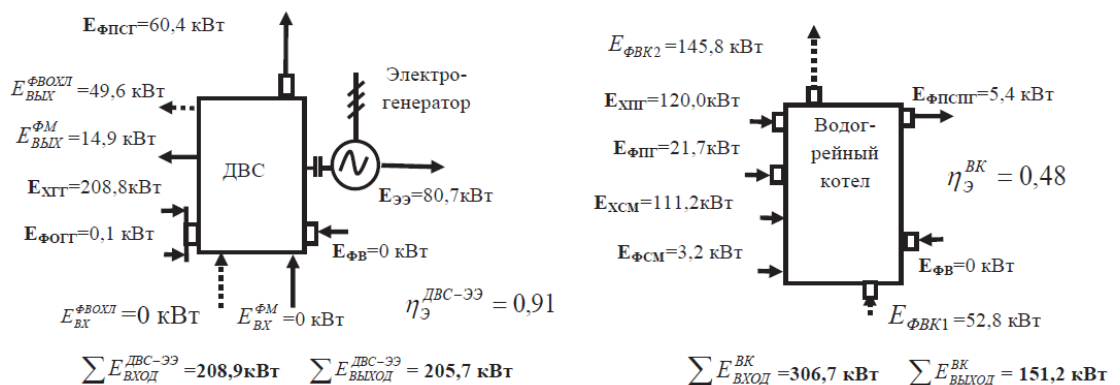
где C_i – концентрация компонента в i -й элементарной зоне; n – количество зон разбиения; w – скорость массопередачи; x – расстояние по оси потока; v – скорость потока через поперечное сечение площадью S ; D_{iL} –

параметр, характеризующий перемешивание; T – температура в рассматриваемом участке x ; c – теплоемкость потока; ρ – плотность потока; $G = S\rho v$; λ_L – коэффициент теплопроводности; $q_{пр}$ – теплота процесса; k_T – общий коэффициент теплопередачи; F – поверхность теплопередачи; V – объем системы; $T_{вн}$ – температура, передаваемая от внешней среды (температура внешнего потока).



$E_{ХБМ}$ – химическая эксергия биомассы; $E_{ФБМ}$ – физическая эксергия биомассы; $E_{ФВ}$ – физическая эксергия воздуха; $E_{ХК}$ – химическая эксергия кокосового остатка; $E_{ФК}$ – физическая эксергия кокосового остатка; $E_{ХПГ}$ – химическая эксергия пиролизных газов; $E_{ФПГ}$ – физическая эксергия пиролизных газов; $E_{ХСМ}$ – химическая эксергия смолы; $E_{ФСМ}$ – физическая эксергия смолы; $E_{ФВ}$ – физическая эксергия подогретого воздуха; $E_{ХГГ}$ – химическая эксергия генераторного биогаза; $E_{ФГГ}$ – физическая эксергия генераторного биогаза; $E_{ФЗ}$ – физическая эксергия золы

Рисунок 2.21 – Эксергетические балансы пиролизера и газификатора



$E_{ФОГГ}$ – физическая эксергия охлажденного генераторного биогаза; $E_{ФПСПГ}$ – физическая эксергия продуктов сгорания генераторного биогаза на выходе из ДВС; $E_{ФВОХЛ ВХ E}$ – физическая эксергия воды на входе в систему охлаждения (рубашку) ДВС; $E_{ФВОХЛ ВЫХ E}$ – физическая эксергия воды на выходе из системы охлаждения (рубашки) ДВС; $E_{ФМ ВХ E}$ – физическая эксергия масла на входе в ДВС; $E_{ФМ ВЫХ E}$ – физическая эксергия масла на выходе из ДВС; $E_{ФПСПГ}$ – физическая эксергия продуктов сгорания пиролизного биогаза на выходе из водогрейного котла; $E_{ФВК1 E}$ – физическая эксергия воды на входе в водогрейный котел; $E_{ФВК2 E}$ – физическая эксергия воды на выходе из водогрейного котла

Рисунок 2.22 – Эксергетический баланс блока «ДВС-электрогенератор»

Краевые и начальные условия для этой системы могут быть заданы различным образом. Но в любом случае как аналитическое, так и численное решения оказываются затруднительными, в связи с чем наиболее обстоятельно исследованы математические описания изотермического процесса. В этом случае в математическое описание войдут уравнения материального баланса сорбата для подвижной и неподвижной фаз:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial(vC)}{\partial x} - \beta_c(C - C^*), \\ \gamma_n \frac{\partial y}{\partial t} = \beta_c(C - C^*), C^* = \eta(C), \end{cases} \quad (2.37)$$

Здесь $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент внутренней диффузии; γ_n – насыпная плотность сорбента; β_c – коэффициент скорости массопередачи; y – содержание сорбата в долях (масс.) от сорбента; C^* – величина, определяемая из второго уравнения (2.38). И, как отмечалось в, расчетные кривые достаточно близки к экспериментальным. Однако в уравнении (2.38) выходная величина – концентрация, а входная величина в явном виде отсутствует. Скорость молекул биогаза, или, если обобщить, скорость биогаза, не является удобной входной величиной, поэтому следующий раздел посвящен приведению уравнений системы (2.38) к форме Коши и выражению средней скорости биогаза в адсорбере через расход или перепад давления вещества на входе в аппарат.

Приведение уравнения материального баланса к форме Коши

Рассмотрим первое уравнение материального баланса системы (2.38) в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial v}{\partial x} C - \frac{\partial C}{\partial x} v - \beta_c(C - C^*) \quad (2.38)$$

Для управления технологическими процессами часто используются такие величины, как изменение давления или расхода. Согласно, связь расхода с давлением задается выражением:

$$q_m = r\sqrt{\Delta P}, q_0 = q_m/p$$

где q_r – массовый расход; r – коэффициент, зависящий от коэффициента скорости входа, плотности самого вещества и диаметра прохода; ΔP – перепад давления; q_0 – объемный расход. Поскольку перепад давления явно зависит от расхода, то достаточно установить связь между перепадом давления в аппарате ΔP и концентрацией C . Для этого будем рассматривать полное уравнение Бернулли. Воспользуемся уравнением баланса кинетической энергии для его совместного решения с уравнениями материального и теплового балансов с целью определить поле давления. Пренебрежем работой подъема биогаза и представим изменение давления как следствие

действия сил гидравлического сопротивления – трения. При однофазном потоке через трубку изменение давления ΔP на элементарном участке dx зависит от коэффициента трения f , плотности потока ρ , линейной скорости потока v и диаметра трубы d :

$$dP = -f \frac{1}{d} * \frac{\rho v^2}{2g} dx$$

где g – ускорение свободного падения. Если пренебречь для поллой трубки длиной L , изменением плотности и скорости потока, найдем, что

$$|\Delta P| = L f_T \frac{\rho v^2}{2g} \quad (2.39)$$

Здесь коэффициент f_T определяют на основании экспериментальных исследований с помощью метода анализа размерностей.

Существует также множество зависимостей изменения давления от скорости, однако все они эквивалентны и используются в различных формах для удобства инженерных расчетов.

Следующим и очень существенным условием реализации реальных систем является то, что влияние изменения перепада давления на концентрацию сорбата в газе происходит не мгновенно, а через некоторое время запаздывания h_i для каждого элементарного i -го участка. Если рассмотреть весь адсорбер, то время запаздывания можно взять для всей системы из условия $h = \max (h_i; i=1, n)$, ввиду того, что в реальных условиях весьма трудно измерить время запаздывания для i -го участка. Это означает, что при изменении давления скорость молекул биогаза изменится только через промежуток времени h . Следовательно, уравнение перепада давления (2.39) теперь переписется как:

$$L f_T \frac{\rho v^2}{2g} = |\Delta P(t - h)| \quad (2.40)$$

Теперь, учитывая выражение (2.42), уравнения (2.39) можно записать в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} * \frac{2g}{L f_T \rho} \sqrt{|\Delta P(t - h)|} - \\ - C \frac{2g}{L f_T \rho} \frac{\partial \sqrt{|\Delta P(t - h)|}}{\partial x} - \beta_c (C - C^*), \\ \gamma_H \frac{\partial y}{\partial t} = \beta_c (C - C^*), C^* = \eta(C), \end{cases} \quad (2.41)$$

Достоинство уравнений теплового и материального балансов в том, что их решения можно рассматривать независимо. Рассмотрим решение первого уравнения системы (2.41). Очевидно, что математическая модель процесса

представлена в виде дифференциального уравнения в частных производных. Следовательно, получить решения данного уравнения или получить зависимость $C(\Delta P)$ в явном виде можно лишь в частном случае при задании удобных краевых условий, поэтому будем искать приближенные решения методом конечных разностей или методом сеток. Для этого область непрерывного изменения аргумента заменим дискретным множеством точек, или узлов, называемых сеткой или решеткой. Тогда функция непрерывного аргумента преобразуется в функцию дискретного аргумента, определенную только в узлах сетки. Производные функции и граничные условия заменяются разностными производными, а граничные условия, представленные в виде дифференциальных уравнений, заменяются системой линейных или нелинейных алгебраических уравнений.

Наиболее распространенным методом приближенного решения дифференциальных уравнений является метод конечных разностей Зейделя.

Простейшим разностным оператором является оператор дифференцирования сеточной функции, который порождает разностные производные. Воспользуемся нисходящей конечной разностной производной первого и второго порядков вида

$$\frac{dC_i}{dx_i} \approx \frac{C_i - C_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, \quad \frac{d^2C_i}{dx_i^2} \approx \frac{C_i - 2C_{i-1} + C_{i-2}}{x_i - x_{i-1}} \quad (2.42)$$

$$\frac{d\sqrt{|\Delta p_i(t-h)|}}{dx_i} \approx \frac{\sqrt{|\Delta p_i(t-h)|} - \sqrt{|\Delta p_{i-1}(t-h)|}}{x_i - x_{i-1}}, \quad i = \overline{1, n},$$

Нисходящая конечная разность выбрана потому, что концентрация и перепад давления в i -м участке зависят в большей степени от концентрации в $i-1$ участке, чем в $i+1$ -участке, особенно если расход адсорбируемого вещества существенно больше.

Итак, разобьем колонну на n участков, как показано на рисунке, где затемненная область характеризуется наличием сорбента для осуществления процесса адсорбции. Рассмотрим первое уравнение системы (2.42) на каждом из участков, полагая, что на 0-м участке концентрация C_0 практически не изменяется ввиду отсутствия сорбента. Конечная концентрация C_n определяется на выходе из колонны. Предполагается, что только ее мы и можем измерять.

Далее, применим разностные уравнения только к пространственной координате x , поскольку в сечении концентрация влаги практически одинакова из-за того, что процесс адсорбции есть процесс с продольным перемешиванием.

Итак, применив нисходящие конечные производные (2.41) к первому уравнению системы (2.42) для i -го участка, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} &= D_{\text{эф}} \frac{C_i - 2C_{i-1} + C_{i-2}}{\Delta x_i} - \beta_c(C_i - C^*) - \\ &- \frac{2g}{Lf_{\text{TP}}} \left[\frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x_i} \sqrt{|\Delta p_i(t-h)|} + C_i \frac{\sqrt{|\Delta p_i(t-h)|} - \sqrt{|\Delta p_{i-1}(t-h)|}}{\Delta x_i} \right], \\ \gamma_H \frac{\partial y_i}{\partial t} &= \beta_c(C_i - C_i^*), C_i^* = \eta(C_i), \end{aligned}$$

где $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$, $i = \overline{0, n}$.

Запишем уравнения для каждого участка, заменяя частную производную в первом уравнении системы (2.42) на полную производную:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1}{\partial t} &= D_{\text{эф}} \frac{C_1 - C_0}{\Delta x_1} - \beta_c(C_1 - C_1^*) - \\ &- \frac{2g}{Lf_{\text{TP}}} \left[\frac{C_1 - C_0}{\Delta x_1} \sqrt{|\Delta p_1(t-h)|} + C_1 \frac{\sqrt{|\Delta p_1(t-h)|} - \sqrt{|\Delta p_0(t-h)|}}{\Delta x_1} \right] \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} &= D_{\text{эф}} \frac{C_2 - 2C_1 + C_0}{\Delta x_2} - \beta_c(C_2 - C_2^*) - \\ &- \frac{2g}{Lf_{\text{TP}}} \left[\frac{C_2 - C_1}{\Delta x_2} \sqrt{|\Delta p_2(t-h)|} + C_2 \frac{\sqrt{|\Delta p_2(t-h)|} - \sqrt{|\Delta p_1(t-h)|}}{\Delta x_2} \right] \\ \frac{\partial C_n}{\partial t} &= D_{\text{эф}} \frac{C_n - 2C_{n-1} + C_{n-2}}{\Delta x_n} - \beta_c(C_n - C_n^*) - \\ &- \frac{2g}{Lf_{\text{TP}}} \left[\frac{C_n - C_{n-1}}{\Delta x_n} \sqrt{|\Delta p_n(t-h)|} + C_n \frac{\sqrt{|\Delta p_n(t-h)|} - \sqrt{|\Delta p_{n-1}(t-h)|}}{\Delta x_n} \right] \end{aligned}$$

Полученные уравнения перепишем в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} \dot{c}(t) &= D_{\text{эф}} A_1 X_1 c(t) - 2\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 - B_1(c(t) - c^*) + C_0(t) D_{\text{эф}} B_2 + \\ &+ C_0(t) B_3 \sqrt{|\Delta p(t-h)|} + \sqrt{|\Delta p_0(t-h)|} B_3 c(t), c_n = Lc \quad (26) \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} B_1^T &= \beta_c I, B_2^T = [\Delta x_1^{-1}, \Delta x_2^{-1}, 0, \dots, 0], B_3^T = \frac{2g}{Lf_{\text{TP}}} \text{diag}[\Delta x_1^{-1}, 0, \dots, 0], \\ L &= [1, 0, \dots, 0], c^T = [C_1, C_2, \dots, C_n], \Delta p^T = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n], \\ c^* &= [C_1^*, C_2^*, \dots, C_n^*], \varphi_1 = \text{diag}(c) A_2 X_2 \sqrt{\Delta p(t-h)}, \\ \varphi_2 &= \text{diag}(c) A_3 X_2 \sqrt{\Delta p(t-h)}, \varphi_3 = \left[\sqrt{\Delta p(t-h)}^T A_3 \text{diag}(c) X_2 \right]^T, \end{aligned}$$

$$X_1 = \text{diag}\{\Delta x_1^{-1}, \Delta x_2^{-1}, \dots, \Delta x_n^{-1}\}, X_2 = \frac{2g}{Lf_{Tp}} X_1,$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & -1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где I – единичная матрица соответствующего порядка.

Если осуществить замены вида $A = D_{\text{зф}} A_1 X_1 - B_1$, то уравнение (2.42) можно преобразовать к виду:

$$\dot{c}(t) = Ac(t) - 2\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 + B_1 c^*(t) + C_0(t) D_{\text{зф}} B_2 + \\ + C_0(t) B_3 \sqrt{|\Delta p(t-h)|} + \sqrt{|\Delta p_0(t-h)|} B_3 c(t), c_n = Lc \quad (2.43)$$

Очевидно, что при $\beta_c I > D_{\text{зф}} X_1$ матрица A – гурвицева, а значит, при ограниченном и достаточно малом входном и ограниченном возмущающем воздействии процесс адсорбции будет устойчивым. Если же $\sqrt{|\Delta p_0(t-h)|} B_3 > \beta_c I - D_{\text{зф}} X_1$, то объект управления потеряет устойчивость из-за появления правых корней у характеристического многочлена матрицы A .

Согласно, если характеристический многочлен $A(s) = \det(sI - A)$ совпадает со своим минимальным многочленом, то матрицу A можно преобразовать к форме Фробениуса с матрицей перехода T :

$$\tilde{x}(t) = T^{-1} c(t), \tilde{A} = T A T^{-1}, \tilde{B}_1 = T B_1, \tilde{B}_2 = D_{\text{зф}} T B_2, \\ \tilde{B}_3 = T B_3, \tilde{L} = L T^{-1}, \tilde{X}_2 = T X_2, \varphi = -T^{-1} (2\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$$

Здесь вид матрицы перехода T не приводится ввиду громоздкости записи в общем виде. Тогда уравнения (2.45) можно преобразовать, например, к наблюдаемой канонической форме:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A} \tilde{x}(t) + \varphi + \tilde{B}_1 c^*(t) + C_0(t) \tilde{B}_2 + \\ \sqrt{|\Delta p(t-h)|} C_0(t) \tilde{B}_3 + \sqrt{|\Delta p_0(t-h)|} \tilde{x}(t) \tilde{B}_3, c_n = L \tilde{x} \quad (2.44)$$

Если принять, что средняя скорость молекул биогаза по всей длине адсорбера приблизительно одинакова, значит, в первом уравнении системы (2.42) и тогда уравнения (2.44) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A}\tilde{x}(t) - \tilde{\varphi} + \tilde{B}_1 c^*(t) + \tilde{B}_2 C_0(t) + \sqrt{|\Delta p(t-h)|} C_0(t) \tilde{B}_3, \\ c_n &= L\tilde{x} \end{aligned} \quad (2.45)$$

где $\tilde{\varphi} = -T^{-1}(\varphi_1 + \varphi_2)$. И если предположить, что колебание концентрации на входе в адсорбер C_0 квазистационарное или близкое к квазистационарному, то систему (2.45), в силу структур матриц B_1 и B_2 , можно привести к виду

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{\varphi} + \sqrt{|\Delta p(t-h)|} C_0(t) \tilde{B}_3 + f(c_0, c^*), \quad c_n = L\tilde{x}, \quad (2.46)$$

$$\text{где } f(c_0, c^*) = \tilde{B}_2 C_0(t) + \tilde{B}_1 c^*(t) \cong \text{const.}$$

Итак, в результате для процесса адсорбции получены нелинейные модели с запаздыванием во входной величине, описываемые дифференциальными уравнениями (2.41), (2.42) или (2.43) в зависимости от указанных выше предположений.

В статье получена математическая модель для процесса адсорбции на основе уравнений материального и теплового балансов и метода сеток. Если средняя скорость молекул по длине адсорбера не изменяется, то дифференциальное уравнение (2.44) сводится к уравнению (2.46). Если, дополнительно, концентрация на входе в адсорбер изменяется гораздо медленнее, чем скорость самого процесса адсорбции, то уравнение (2.46) можно преобразовать к виду (2.47).

Математическая модель определения условной формулы сжигаемого биогаза произвольного состава. При известных массовых или объемных долях составных частей биогаза записывается условная формула биогаза в виде

$$A_{b_{1T}}^{(1)} A_{b_{2T}}^{(2)} \dots A_{b_{iT}}^{(i)} \quad (2.47)$$

где $A^{(i)}$ - символ i -го химического элемента; b_{iT} - количество атомов i -го химического элемента в условной молекуле биогаза.

Метод предполагает, что все расчеты выполняются на основе условной формулы биогаза (2.47). Количество атомов каждого химического элемента в случае неопределенного состава углеводородного горючего неизвестно.

Определение этого количества и состава продуктов, образующихся при его сгорании, является целью решения расширенной задачи.

Основу метода составит модель, необходимая дополнить замыкающими уравнениями, позволяющими найти новые дополнительные неизвестные $iT b$.

Уравнение сохранения вещества имеет вид

$$\sum_q (a_{in} * n_q) = b_{iT} \quad (2.48)$$

где q - количество веществ в продуктах сгорания; a_{in} - количество атомов этого же вещества в q -ом веществе в продуктах сгорания; n_q - количество молей q -го вещества в продуктах сгорания.

Уравнение химического равновесия, использует уравнение сохранения вещества в виде:

$$\sum (a_{in} * P_q) = M_T * b_{iT} \quad (2.49)$$

В уравнении (2.48), в отличие от (2.49), в расчетах учитывается M_T молей биогаза, количество которых выбирается таким образом, чтобы количество молей (n_q) q -го вещества в продуктах сгорания было равно его парциальному давлению P_q . В таком случае M_T является неизвестной величиной и дополнительно подлежит определению.

С учетом (2.49) закон химического равновесия по парциальным давлениям записывается как:

$$\frac{\prod P_i^{a'_{ij}}}{P_j} = k_j^0 \quad (2.50)$$

где P_j, P_i - парциальные давления веществ в продуктах сгорания, соответственно зависимых j и независимых i , из которых зависимые могут быть образованы; a'_{ij} - стехиометрический коэффициент в реакции химического равновесия; k_j^0 - константа химического равновесия по парциальным давлениям.

Уравнений (2.49) и (2.50) достаточно для нахождения q парциальных давлений газов, входящих в продукты сгорания. Для определения величины M_T используется закона Дальтона:

$$\sum_q P_q = P \quad (2.50)$$

где P - давление смеси газов продуктов сгорания в топке.

Модель в выражениях (2.48), (2.49), (2.50) решает прямую задачу в случае известной условной формулы биогаза (2.50). Рассмотрим решение расширенной задачи для распространенной формы биогаза, горючее и окислитель которого находятся в газообразном состоянии: окислитель известного состава, горючее – газ или смесь газов неизвестного состава.

Дополнительно к (2.48), (2.49), (2.50) запишем замыкающие соотношения. Для газообразного состояния мольные объемы любых идеальных веществ одинаковы. В силу этого отношения объемных расходов горючего и окислителя равны мольным отношениям в рассматриваемых реакциях горения. Дополнительное балансовое уравнение для биогаза и продуктов сгорания с учетом (2.50) имеет вид:

$$(I_{\Gamma} + \alpha * x_0 * I_o) * M_{\Gamma} = \sum_q I_q * P_q \quad (2.51)$$

Здесь α - коэффициент избытка окислителя; x_0 - мольный стехиометрический коэффициент соотношения компонентов; I_{Γ} , I_o , I_q - мольные энтальпии горючего, окислителя и газов в смеси продуктов сгорания.

Чтобы применить уравнение (2.51) для нахождения нескольких дополнительных переменных, необходимо использовать работу экстремального регулятора. При одном из шагов его работы замеряются объемные расходы окислителя и горючего $(1)V_o$, $(1)V_{\Gamma}$, а также температура продуктов сгорания $(1)T$, соответствующая этим расходам (верхний индекс (1)). При этом в уравнении (2.51) осуществим следующую замену:

$$\alpha * x_0 = (1)V_o / (1)V_{\Gamma} \quad (2.52)$$

где V_o , V - объемные расходы окислителя и горючего, а температуре $(1)T$ будут соответствовать энтальпии веществ $(1)I_q$, входящих в продукты сгорания и их парциальные давления.

Перечень химических элементов, из которых состоит горючее ($b_{i\Gamma}$), должен быть известен. Это является ограничением рассматриваемой модели, которое не представляется очень строгим. Так учет даже ограниченного количества атомов веществ, например [C],[H],[O],[S],[N], позволяет смоделировать почти все органические соединения, горящие в воздушной атмосфере.

Если горючее состоит из (n) элементов, то количество новых неизвестных составляет $(n+1)$, так как кроме количества атомов элементов в условной формуле горючего необходимо определить и его энтальпию I_{Γ} . Для этого необходимо записать $(n+1)$ уравнений вида (2.51). Каждому такому уравнению соответствует свое измерение величин $(1)V_o$, $(1)V_{\Gamma}$, $(1)T$ при пробном сжигании биогаза и варьировании величины $(1)V_o$. При принятом количестве газов в продуктах сгорания (q) для каждого уравнения (2.51) необходимо записать $(q+1)$ уравнения основной модели (2.48), (2.49), (2.50) и с учетом количества новых неизвестных $(n+1)$ всего $((q+1)+1)*(n+1)$ уравнений. Так, например, при использовании углеводородного горючего, состоящего из $n=2$ элементов (углерода [C] и водорода [H]) с использованием в качестве окислителя кислорода [O], в качестве продуктов сгорания можно рассматривать $q=9$ веществ:

$$[\text{CO}], [\text{CO}_2], [\text{NO}], [\text{OH}], [\text{H}], [\text{O}], [\text{H}_2], [\text{O}_2], [\text{C}] \quad (2.53)$$

Для решения прямой задачи необходимо решить систему уравнений из $(q+1)=10$ уравнений и добиться соблюдения баланса в уравнении (2.53). При решении расширенной задачи потребуется решить систему из $((9+1)+1)*(2+1)=33$ уравнений.

Работоспособность модели прямой расширенной задачи и изучение особенностей, возникающих в процессе вычислений, проверялось на топливной паре $\text{C}_{11.956}$ (керосин) + O_2 , так как его условная топливная формула близка к условной формуле топочного мазута, с одной стороны, используемого в печах установки.

Были предложены следующие данные для расчета:

- выбиралась произвольная величина коэффициента α , рассчитывалось соответствующее ему мольное отношение кислорода и керосина, которое в тестовом расчете принималось в качестве замеренного отношения $^{(1)}V_{\text{O}}/^{(1)}V_{\text{T}}$;
- находилась температура T , приведенная для камеры сгорания, соответствующая выбранному α , которая в тестовом расчете принималась в качестве измеренной температуры в камере сгорания $^{(1)}T$.

Горючее в тестовой паре состоит из $n=2$ элементов: $[\text{C}]$ и $[\text{H}]$. Это должно быть известно до начала расчетов. В этом случае в реальной ситуации необходимо выполнить $n+1=3$ измерения технологических параметров при любом расходе кислорода. Поэтому было подготовлено 3 комплекта исходных данных V_{O} , V_{T} , T для различных α . Целью расчета является определение количественного состава горючего (величин b_{T}) и его энтальпии. Результатом расчетов тестового варианта должно быть значение количества атомов в условной формуле $b_{\text{C}}=1$, $b_{\text{H}}=1.956$, и энтальпия горючего $I_{\text{T}}=-1948$ кДж/кг $=-27237,7$ кДж/кмоль.

Молекулярная масса керосина, используемая для пересчета, принята равной $\mu=13,9824$ кг/моль. На первом этапе тестирования решалась прямая задача на основе уравнений (2.51), (2.52), (2.53). Замыкающим выступает уравнение баланса энтальпий биогаза и продуктов сгорания. Сравнение вычисленных энтальпий при $T=3000$ К для рассматриваемых продуктов сгорания дает несколько другие величины, как по абсолютной, так и по относительной величине. Результаты сравнения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнение результатов расчетов энтальпий продуктов сгорания

	CO	CO ₂	H ₂ O	OH	H ₂	O ₂	H	O	C
$\Delta=I_{\text{П}}-I_{\text{T}}$, кДж/моль	-5.25	-9.54	-	-8.80	-8.29	-	-4.23	-4.24	-2.59
$\delta=\frac{I_{\text{П}}-I_{\text{T}}}{I_{\text{T}}} * 100\%$	+45.2	+4.1	+12.5	-6.4	-8.5	-29.2	-1.5	-1.4	-0.3

Достигнутая точность, а, следовательно, и момент окончания расчетов, назначался погрешностью определения состава продуктов сгорания (парциальных давлений). При этом не проводился анализ оставшегося количественного дисбаланса по энтальпиям биогаза и продуктов сгорания. В предлагаемой модели для расчета неизвестного состава горючего соблюдение баланса энтальпии является основным требованием. Для выбранной топливной пары были выполнены расчеты при различных соотношениях компонентов, результаты которых, приведены в таблице 2.

По соблюдению баланса энтальпий расчеты выполнялись до достижения относительной погрешности вычислений $\sim 10^{-4}$. Данные приведены для давления в камере сгорания $P_{КС}=1$ бар. Парциальные давления также измеряются в барах. Расчет выполнен таким образом, чтобы парциальные давления были равны мольным долям продуктов сгорания. Расход продуктов сгорания через камеру сгорания составляет 1 кмоль/сек. Сравнение результатов показывает, что при $\alpha=0,4$ рассчитанная температура и энтальпия продуктов сгорания близки величинам. При $\alpha = 0.7$ и $\alpha = 2.0$ отклонения температур также незначительны и составляют соответственно $\Delta T=16\text{K}$ и $\Delta T=40\text{K}$ при относительной погрешности $\varepsilon \approx 0,5\%$ и $\varepsilon \approx 1,4\%$. Энтальпии же продуктов сгорания имеют значительный дисбаланс с энтальпиями биогаза: при $\alpha = 0.7 \approx 20\%$, а при $\alpha = 2.0 \approx 46\%$. Несмотря на это, парциальные давления газов, входящих в продукты сгорания, в обоих случаях приблизительно одинаковы.

Были выявлены следующие особенности модели для решения прямой расширенной задачи:

— оценка работоспособности рассматриваемой модели и точности, полученных на ее основе результатов расчетов должны проводиться по уточненным данным температуры;

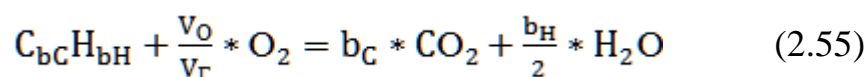
— данные могут рассматриваться как ориентировочные для контроля рассчитанного состава продуктов сгорания;

— высокая чувствительность энтальпии продуктов сгорания к их температуре может привести к неустойчивости при решении составленной на основе рассматриваемой модели системы нелинейных уравнений.

Для решения расширенной задачи взяты точки, соответствующие $\alpha = 0.4; 0.7; 1.0$. Вычислены отношения объемных расходов (2.53). Решены прямые задачи и уточнены соответствующие им температуры и составы продуктов сгорания. При математической корректности рассматриваемой модели, численное решение, полученное при решении системы уравнений, оказалось плохо устойчивым, зависимым от начальных приближений. Для повышения устойчивости решения необходимо было найти жесткую связь между определяемыми величинами, не изменяющуюся в процессе вычислений состава продуктов сгорания. Была предложена связь между количеством атомов [С] и [Н] в горючем при $\alpha = 1$ (стехиометрическом соотношении компонентов). С одной стороны, из (2.53) при $\alpha = 1$ следует

$$\frac{V_O}{V_{\Gamma}} = \alpha * X_0 = X_0 \quad (2.54)$$

С другой стороны, при стехиометрическом соотношении количество максимальных валентностей окислительных элементов равно количеству максимальных валентностей восстановительных элементов. Поэтому, применительно, например, к углеводородам и кислороду можно записать такой баланс:



а из него баланс по атомам кислорода:

$$2 * \frac{V_O}{V_{\Gamma}} = 2 * b_C + \frac{b_H}{2} \quad (2.56)$$

Для решения расширенной задачи уравнение (2.56) можно использовать в качестве замыкающего вместо одного из уравнений баланса энтальпий (2.53). При этом отпадает необходимость в уравнениях для расчета состава продуктов сгорания одного из замеров, что для керосина с кислородом составляет 10 уравнений и общее количество уравнений в этом случае уменьшается с 33 до 23. В производственных условиях при работе экстремального регулятора отношение объемных расходов горючего и окислителя, соответствующее стехиометрическому соотношению может быть определено следующим образом:

- замеренные объемные расходы при найденной максимальной температуре;

- по нескольким замерам строится аппроксимационная зависимость температуры от отношения объемных расходов горючего и окислителя и по ней определяется максимальная температура и соответствующее ей отношение объемных расходов;

- сочетание первого и второго способа с усреднением найденных отношений в случае их различия.

Проверочный расчет выполнялся для двух отношений объемных расходов $V_o^{(1)}/V^{(1)}=0.5956$ и $V_o^{(2)}/V^{(2)}=1.0423$, соответствующих $\alpha^{(1)}=0.4$ и $\alpha^{(2)}=0.7$, а также температурам $T^{(1)}=2125K$ и $T^{(2)}=3081K$ (табл. 2.2). Отношение объемных расходов при стехиометрическом соотношении принято $V_o^{(стех)}=V_{\Gamma}^{(стех)}=1,489$.

Выбор из q индивидуальных веществ смеси газов продуктов сгорания m независимых компонентов, с помощью которых можно записать l независимых реакций образования, оставшихся зависимых $(q-m)$ веществ, является наиболее существенным для формы записи уравнений (2.51).

Наиболее просто, удобно и единообразно рассматривать диссоциацию всех молекулярных компонентов только на атомы. При решении рассматриваемой тестовой задачи из 9-ти возможных компонентов продуктов

сгорания списка (8) выбраны независимые [H], [O], [C], т. е. $m=3$. С их помощью записаны $l=6$ независимых реакций (4) образования оставшихся зависимых веществ [CO], [CO₂], [H₂O], [OH], [H₂], [O₂].

Конечная система уравнений содержит:

- двадцать уравнений на основании (2.48), (2.49), (2.50), соответствующих двух измерений температур и объемных расходов кислорода и керосина. Эти уравнения содержат 18 неизвестных парциальных давлений (2.56) и два M_T молей биогаза, соответствующих определенным замерам;

- два уравнения (2.55), соответствующих этим же измерениям;

- уравнение (2.56).

Получена система 23-х алгебраических уравнений, многие из которых нелинейные. Решение было найдено в численном виде.

В качестве неизвестных были приняты не сами определяемые величины, а их логарифмы.

Логарифмическая форма позволяет не опасаться «исчезновения» определяемых неизвестных в процессе решения при любых значениях температур и давлений. Кроме того, такая запись исключает возможность появления в процессе расчета отрицательных значений парциальных давлений, не имеющих физического смысла.

Это повышает устойчивость численного решения, которое было найдено с помощью метода Ньютона путем разложения уравнений системы в ряд Тейлора по степеням, не выше первой. Производные были найдены не по определяемым неизвестным, а по их логарифмам.

Поправки также определяются для логарифмов неизвестных.

Для повышения устойчивости численного решения приняты специальные меры. При поиске нового приближения к предыдущему прибавляется только часть найденной поправки.

Величина этой части определяется коэффициентом нижней релаксации. Он подбирается опытным путем, находится в интервале [0...1], задается перед началом расчетов $k=0.4$. Давление $P_{\Sigma}=1$ бар.

Проанализируем результаты расчета, приведенные в таблице 2.3. В первом столбце приведены парциальные давления P (бар) и количество кмоль топлив в реакции для получения 1 кмоль продуктов сгорания M_T , ⁽¹⁾, ⁽²⁾ – верхние индексы показывают номер замера, к которому относится рассматриваемый параметр; b_H , b_C – количество атомов водорода и углерода в формуле горючего; I_T – энтальпия горючего (кДж/кмоль).

В столбце 2 приведены начальные приближения. В столбцах (3 – 6) — данные расчета при решении расширенной задачи через 5, 10, 15, 20 шагов соответственно. В столбце 7 — уточненные данные, полученные при решении прямой задачи (табл. 2.3), используемые для оценки точности решения рассматриваемой задачи (эталон). В столбце 8 приведены результаты расчета при решении расширенной задачи с исходными данными (температурами).

Таблица 2.2 – Сравнение с результатами решения прямой задачи при уточнении баланса по энтальпиям

Коэф. избытка окислителя		$\alpha-0,4$		$\alpha-0,7$		$\alpha-2,0$	
		[12]	расчет	[12]	расчет	[12]	расчет
Энтальпии, кДж/кмоль		IT - -17588		IT - -18523		IT - -17112	
		I _{ПС} - -7625	I _{ПС} - -7584	I _{ПС} - -22195	I _{ПС} - -18520	I _{ПС} - -25000	I _{ПС} - -17096
Температура T, К		2124	2125	3065	3081	2855	2895
Парциальные давления	P _{CO}	0,4868	0,4869	0,3458	0,3440	0,0618	0,0594
	P _{CO2}	0,0181	0,0181	0,1108	0,1131	0,2036	0,2031
	P _{H2O}	0,0783	0,0784	0,2744	0,2761	0,2127	0,2047
	P _{OH}	-	-	0,0551	0,0592	0,0660	0,0778
	P _{H2}	0,4143	0,4143	0,1124	0,1094	0,0090	0,0082
	P _{O2}	-	-	0,0180	0,0130	0,3952	0,3783
	P _H	0,0023	0,0022	0,0645	0,0638	0,0094	0,0098
	P _O	-	-	0,0189	0,0213	0,0422	0,0587
	P _C	-	-	-	-	-	-
	P _{Mт}		0,505		0,4571		0,2625

Сравнение данных из столбцов 6 и 7 показывает, что решение получено с высокой степенью математической точности, т.е. модель не дает каких-либо искажений, связанных с допущениями или неточностью численных расчетов. Незначительные расхождения в результатах (в 4-м знаке) могут быть объяснены тем, что эталонные данные (столбец 7) были получены с такой же точностью.

Быстрая сходимость результатов расчетов (столбцы 3 - 6) позволяет, хотя и косвенным образом, судить о высокой устойчивости численного решения. Пробные расчеты и сравнение результатов (столбцы 7 и 8) показывают высокую чувствительность и значительную погрешность в определении количественного состава условной формулы горючего и его энтальпии. Но погрешности в определении состава продуктов сгорания не столь велики и в данном случае не превосходят половины разряда второй значащей цифры, что соответствует относительной погрешности $\sim 0,05$ (допустимой инженерной точности).

Математическая модель на основании уравнений вида (2.51) - (2.54), (2.56) для газообразного биогаза позволяет определить количественный состав его условной формулы, энтальпию биогаза, состав продуктов сгорания при использовании в качестве исходных данных величин замеренных технологических параметров (расходов компонентов биогаза, соответствующих им температур в камере сгорания), известного элементного (качественного) состава биогаза ([C], [H], [O]).

Таблица 2.3 – Результаты расчета по расширенной модели с использованием уравнения (2.56)

Состав продукто в сгорания	Нач. прибл .	5 шагов расчет а	10 шагов Расчет а	15 шагов расчет а	20 шагов расчет а	Точн.реш . (прям. задача)	Данны е по работе
1	2	3	4	5	6	7	8
$P^{(1)}_{CO}$	1.0	0.6005	0.4944	0.4872	0.4867	0.4869	0.4432
$P^{(1)}_{CO_2}$	1.0	0.0314	0.0190	0.0182	0.0181	0.0181	0.0203
$P^{(1)}_{H_2O}$	1.0	0.1393	0.0828	0.0789	0.0786	0.0784	0.1011
$P^{(1)}_{OH}$	0.1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
$P^{(1)}_{H_2}$	0.1	0.5003	0.4208	0.4149	0.4145	0.4143	0.4332
$P^{(1)}_{O_2}$	0.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$P^{(1)}_H$	0.1	0.0035	0.0023	0.0022	0.0022	0.0022	0.0023
$P^{(1)}_O$	0.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$P^{(1)}_C$	0.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$M^{(1)}_T$	1.0	0.5498	0.5082	0.5051	0.5049	0.5050	0.4910
$P^{(2)}_{CO}$	1.0	0.4037	0.3480	0.3441	0.3438	0.3440	0.3172
$P^{(2)}_{CO_2}$	1.0	0.1322	0.1144	0.1132	0.1131	0.1131	0.1042
$P^{(2)}_{H_2O}$	1.0	0.3353	0.2807	0.2767	0.2763	0.2761	0.3043
$P^{(2)}_{OH}$	0.1	0.0622	0.0594	0.0592	0.0592	0.0592	0.0584
$P^{(2)}_{H_2}$	0.1	0.1316	0.1111	0.1096	0.1095	0.1094	0.1213
$P^{(2)}_{O_2}$	0.1	0.0128	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0117
$P^{(2)}_H$	0.1	0.0730	0.0645	0.0639	0.0638	0.0638	0.0641
$P^{(2)}_O$	0.1	0.0221	0.0214	0.0213	0.0213	0.0213	0.0191
$P^{(2)}_C$	0.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$M^{(2)}_T$	1.0	0.4854	0.4591	0.4572	0.4571	0.4571	0.4464
b_H	1.0	2.0158	1.9631	1.9578	1.9574	1.9560	2.1808
b_C	1.0	0.9773	0.9976	0.9995	0.9996	1.0000	0.9438
I_Γ	- 12000	-79699	-7223	-6567	-6517	-27238	-30527

Математическая точность модели позволяет использовать полученные на ее основе данные для оценки чувствительности результатов расчетов с учетом погрешностей измерительных каналов: температуры продуктов сгорания и расходов горючего и окислителя.

2.6 Нейронные сети в области моделирования и управления

Существует богатая литература по идентификации объектов и систем управления. Большинство этих позиций значительно сосредотачивается на описании моделей и контроля за помощью линейных уравнений, и

отличается они различными качествами. В настоящее время все больше и больше исследований обработки распространяют различные подходы к идентификации и контролю нелинейных систем, среди которых ключевую роль играет использование искусственных нейронных сетей проблемы. Они отличаются среди других методов, так как, поскольку он упрощает процесс моделирования и даёт использовать единый инструмент для разработки широкого спектра классов систем управления.

Основы нейронных сетей. Большинство типов нейронных сетей может быть определена следующим образом: это система простых элементов обработки - нейронов, соединенных между собой в сеть через набор весов (синапсов). Функция, выполняемая нейронной сети, определяется ее архитектурой, шкалы ценностей и функций, выполняемых нейронами.

Нейрон или узел является процессорным элементом, чтобы реализовать сумму, важно ввести ϕ_j , который является аргументом, тогда одномерная функция f называется функцией активации в соответствии с формулой [20], [28]:

$$y_i = f_i(h_i) = f_i\left(\sum_{j=1}^n \phi_j w_{i,j} + w_{i,0}\right)$$

где $w_{i,j}$ означает вес. Схематично операция нейрона показано на Рисунок 2.23.

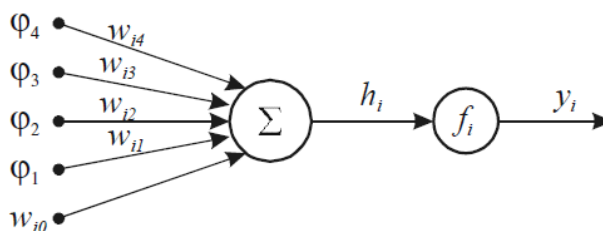


Рисунок 2.23 – Нейрон [28].

Активация может быть в любой форме, мы будем в дальнейшем использовать только две функции: линейные и гиперболического тангенса.

Многослойный перцептрон. Нейроны могут быть соединены друг с другом во многих отношениях.

Самой популярной структура, тем не менее, многослойный перцептрон MLP (анг. Многослойный перцептрон).

Сеть подобного типа строится путем соединения нейронов в слое, изготовленном таким образом, что входные нейронные слоя связаны только с выходами предыдущих слоев нейрона и входом первого слоя с внешними входами.

Последний слой называется Выходной слой. Слои, которые не имеют внешние входы и выходы называются скрытыми. Такие сети часто называются однонаправленными [28], [29]. Математическое действие MLP можно описать следующим образом:

$$\hat{y}_i(t) = g_i[\varphi, \theta] = F_i \left[\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} \cdot f_j \left(\sum_{l=1}^{n_\phi} w_{j,l} \cdot \varphi_l + w_{j,0} \right) + W_{i,0} \right]$$

где g функция реализуется перцептроном, φ - входной вектор, θ является вектором, содержащим параметры сети - вес $\{W_{i,j}, W_{j,l}\}$ f и F означает, что функции активации соответствуют первого и второго слоёв, n_ϕ указывает размер входного слоя, а n_h размер скрытого слоя.

Пример сети MLP показано на рисунок 2.24.

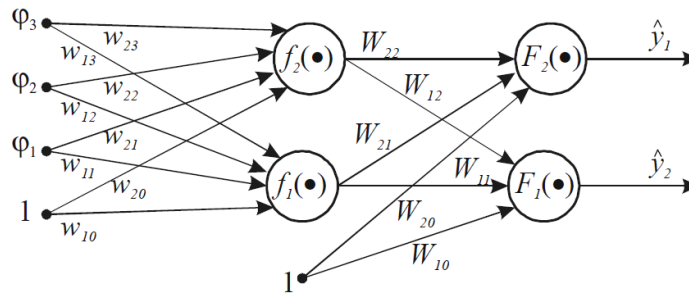


Рисунок. 2.24 – Перцептрон курсируют с тремя входами и двумя выходами [28]

Для определения веса значений необходимы наборы входных значений и соответствующих выходных значений. Порядок определения весов в хорошо известных обоих наборов называется обучение или сеть обучения с указателем. Сеть обучения в основном оценивается типичной задачей, где веса оцениваются во множество выходных значений, которые имеют наименьшую ошибку по отношению к набору стандартных, согласно определённому критерию.

Архитектура нейронных сетей. Перед тем как вы начнёте обучать сеть, нужно обратить внимание на следующие вопросы:

- в каком виде и зависимости способен выучить перцептрон?
- сколько должно быть скрытых слоёв и сколько должны обладать нейроны?
- какие функции активации должны обладать нейроны?

К сожалению, из этих вопросов нет очевидного ответа. Как было показано [7], что каждый может смотреть на непрерывную функцию приблизительно, что может стать желаемой точности с точки зрения единых стандартов по нейронной сети с одним скрытым слоем, содержащим нейроны с сигмовидной или гиперболической функции активации и линейный выходной слой. Есть соображения лань, [3] относительно точности функций аппроксимации достаточно гладких для помощи сети, различного числа скрытых нейронов, но вряд ли практически используется результаты для определения размера скрытого слоя. На самом деле, что в большинстве случаев более используют целесообразно архитектуру месторождений с солью. Тем не менее, существует класс функций, для которых в сети большее количество скрытых слоёв, или гибридные сети, они могут значительно

повысить точность аппроксимации. Таким образом, выбор зависит от требований к точности и условий реализации.

Моделирование динамических систем. Сеть MLP может применяться к дискретным временем моделирования нелинейных динамических систем [20], [28].

Предположим, что выход $y(t)$ такая система может быть описана с помощью функцией S , и зависит от m предыдущих входов $u(t)$ и n выходов предыдущей системы:

$$y(t) = S[y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-1), \dots, u(t-m)]$$

Функция S может быть аппроксимирована с помощью сети MLP, в котором на каждой записи отдельные входы (ϕ_1, ϕ_2, \dots) будут даны n предыдущие выходы и входы в m предыдущую систему:

$$\hat{y}_i(t|\theta) = g_i[\theta, \varphi(t)] = \sum_{j=1}^{n_h} W_{ij} f_j \left(\sum_{l=1}^{n_\phi} w_{i,l} \cdot \phi_l + w_{j,0} \right) + W_{i,0}$$

Идентификация динамического объекта состоит в нахождении математическое описания, модели, на основе серии измерений. Моделирование и идентификация динамических объектов является одним из основных проблем многих эффективных методов синтеза систем управления. Несмотря на то, что все объекты существенно нелинейны, развита теория относительности идентификации, прежде всего, линейные статические и динамические объекты.

Объект входа $u(t)$ и выхода $y(t)$ вы можете назвать линейной, если можно найти модель в виде [4], [25]:

$$y(t) = G(q^{-1})u(t) + H(q^{-1})e(t)$$

где: $e(t)$ является белым шумом с некоторой функцией плотности вероятности, независимо пу входного сигнала; G и H являются функциями передачи; q^{-1} означает смещения корректора оператора:

$$q^{-d} x(t) = x(t-d)$$

где d является точным кратным периодом выборки.

В случае многомерных объектов (так называемый ММО = с несколькими входами, несколькими выходами) и (t) , $y(t)$ и $e(t)$ являются векторы и G и H матрицы. Если объект является линейным, и чтобы определить хорошее ли назначение, (в смысле некоторого критерия) оценивается передаточная функция G и H . Для дальнейшего рассмотрения

будут приняты критерий, которые означают способность модели для определения одной ошибки прогнозирования на минимальной дисперсии.

Одно предсказание минимальной дисперсии задается следующим образом [25]:

$$\hat{y}(t|t-1) = H^{-1}(q^{-1})G(q^{-1})u(t) + [1 - H^{-1}(q^{-1})]y(t)$$

Такая модель символов иногда называют формой предсказателей.

Общее уравнение может быть в равной степени и записывается в виде [25], [28]:

$$A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$$

где A, B, C, D, и F является полиномы вида:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_kq^{-k}$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_lq^{-l}$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_rq^{-r}$$

В большинстве случаев мы использовали более простую структуру модели. Упрощение зависит относительно возмущений спектральной плотности и влияния режимов работы на объекте. В более поздней части будут обсуждаемой наиболее важные из них, это модель с конечной импульсной характеристикой. Самая простая модель, в которой функции передачи данных, являются следующие:

$$G(q^{-1}, \theta) = q^{-d}B(q^{-1}) \quad H(q^{-1}, \theta) = 1$$

Предиктор имеет вид:

$$\hat{y}(t|\theta) = q^{-d}B(q^{-1})u(t)$$

Балансирование на фигуре регрессии задается следующим образом:

$$\hat{y}(t|\theta) = \phi^T(t)\theta$$

где $\phi(t)$ вектор регрессии определяется следующим образом:

$$\phi(t) = [u(t-d), \dots, u(t-d-m)]^T$$

Соответственно, вектор параметров θ имеет вид:

$$\theta = [b_0 \dots b_m]^T$$

Объект без полюсов может быть описываться моделью FIR конечной строки. Это, однако, если объект является стабильным, и ответ на него, затухание импульса достаточно быстро, что достаточно хорошо описана модель FIR [4], [25].

Модель авторегрессии с внешним входом ARX(n, m, d) (анг. Авторегрессионный внешний вход). Передаточные функции ARX модели описывается следующим образом:

$$G(q^{-1}, \theta) = q^{-d} \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad H(q^{-1}, \theta) = \frac{1}{A(q^{-1})}$$

Далее принимает следующий вид:

$$\hat{y}(t|\theta) = q^{-d} B(q^{-1})u(t) + [1 - A(q^{-1})]y(t) = \varphi^T(t)\theta$$

в котором регрессионный вектор:

$$\varphi(t) = [y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m)]^T$$

$$\theta = [-a_0, \dots, -a_n, b_0, \dots, b_m]^T$$

Хотя G теперь имеет полюсов, в зависимости между выходом модели и предыдущих входов, и выходов, измеренных алгебраическим путем. Поэтому предсказатель всегда будет устойчивым даже если сам объект является неустойчивым. Это очень важно, чтобы отличать модели структуры ARX. Эта модель также называется серийной моделью [4], [25]. Модель авторегрессии и скользящего среднего значения с внешним входом ARX (п, т, к, d) (анг. Авторегрессионными, скользящая средняя, внешний вход).

Развитие теории искусственных нейронных сетей и может технологические возможности их практической реализации (многопроцессорные системы, VLSI Technology) создали новый, эффективный и универсальный инструмент, с помощью которого решается целый ряд задач и проблем в совершенно разных областях. Могут ли широкие возможности применения нейронных сетей в автоматизации определяют, прежде всего, их характеристики и собственности. Группы важных преимуществ нейронных сетей с точки зрения автоматизации приложений включают в августе [7], [25], [28]:

- может аппроксимировать любую возможность цветопередача нелинейной

- параллельность обработки информации,
- Может возможность обучения и адаптации,
- обработка сигналов с несколькими входами и несколькими выходами генерации (многомерные системы).

С точки зрения теории управления, наиболее важным свойством нейронных сетей является их способность приближаться любым нелинейностям. Это создаёт возможность решения ряда сложных и неразрешимых вопросов нелинейной системы. Кроме того, отсутствие общей и систематической теории проектирования нелинейных систем управления является важной причиной, почему попытки создать его с помощью теории искусственных нейронных сетей.

В случае идентификацией нелинейной динамической задачи выбора соответствующей структуры модели становится ещё сложнее. Известно, что многослойный персептрон хорошо подходит для изучения нелинейной зависимой системой с набором данных [7], [28], он кажется таким естественным использовать его для идентификации нелинейных объектов. Выбор модели структуры упрощает, таким образом, два вопроса:

- выбор входов сети
- выбор внутренней архитектуры сети.

Общий подход заключается в одних и тех же векторах регрессии, как линейной и однонаправленной модели, типа многослойной сети персептрона [25], [28].

Такой подход имеет много преимуществ, например:

- Это является естественным продолжением хорошо известных структур линейных моделей,
- внутренняя архитектура может быть расширена в зависимости с целью достижения большей гибкости и более верности нелинейного комплекса.
- решения, о структуре которых должен принять дизайнер относительно упрощённой,
- подходит для проектирования систем управления.

Нелинейные двойники имеют следующий вид [20], [28]:

$$y(t) = g[\varphi(t, \theta), \theta] + e(t)$$

или в форме с прогнозированием:

$$\hat{y}(t|\theta) = g[\varphi(t, \theta), \theta]$$

где вектор регрессии представляет собой вектор, содержащий параметры сети (вес), и g является функция, выполняемая нейронной сети. Предполагается, что это представляет собой сеть односторонней (без оборудования собственной обратной связи). В зависимости выбора вектора регрессии возникают различная структура модели. Нелинейные модели, построенные на основе нейронных сетей, как правило, обозначаются

префиксом NN (анг. Нейросети). Модели NNFIR (б, г) и NNARX (а, б, г). Как и в случае их линейных аналогов, предсказатели всегда устойчивы, потому что в зависимости NOSC между выходом модели и предыдущих входов, и выходов, измеренных от чисто алгебраической. Это особенно важно в случае нелинейных моделей, когда проблемы стабильности являются гораздо более сложными, чем для линейных моделей. На рисунке 2.25 показаны структуры этих моделей и их переносчиков модели регрессии для этих данных являются следующие:

$$\text{NNFIR: } \varphi(t) = [u(t-d), \dots, u(t-b-d+1)]^T$$

$$\text{NNARX: } \varphi(t) = [y(t-1), \dots, y(t-a), u(t-d), \dots, u(t-b-d+1)]^T$$

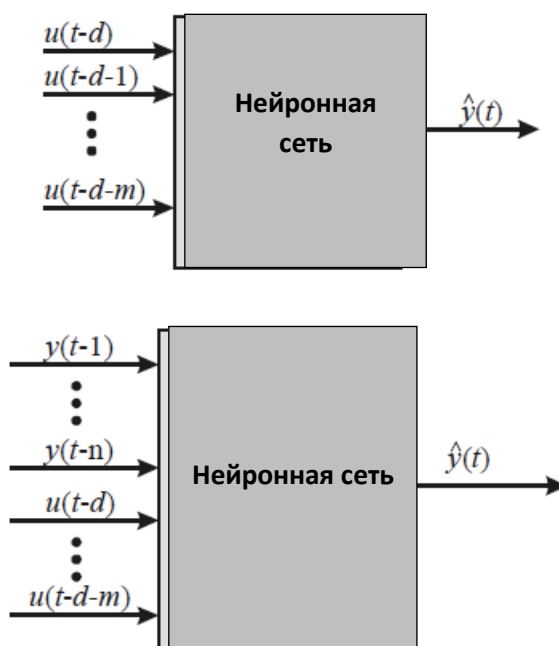
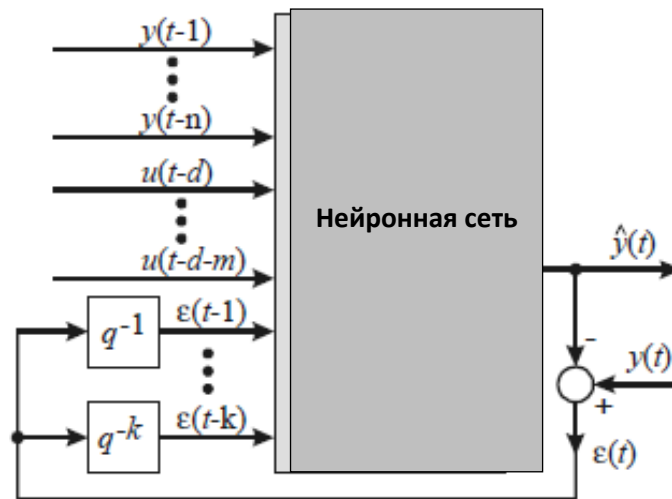


Рисунок 2.25 – NNFIR модель структуры (слева) и NNARX (справа)[28]

Если объект является детерминированным или уровень помех на пропуски [20], [28]. Модель NNARMAX (п, т, к, d). Функция реализуется сетью односторонней предсказателя в модели NNARMAX будет иметь обратную связь аппаратных компонентов. Вектор регресс в этой модели имеет следующий вид:

$$\varphi(t) = [y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m+1), \varepsilon(t-1, \theta), \dots, \varepsilon(t-k, \theta)]^T$$

Предыдущие ошибки прогнозирования зависит от выходной модели эффекта, образуют сцепления компонентов обратной связи, как показано на рисунке 2.26. Сеть с оборудованием, представившего ее поворота часто называют сеть рекурсивного [28].



Анализ устойчивости структуры модели довольно сложно. Большинство предполагается стабильность как местной собственности. Может случиться так, что Модель NNARX стабильна в определённых областях деятельности, а не в других [28]. Часть вектор регрессионной модели предсказания NNOE включены в предыдущие состояния выход, который одинаково модель с оборудованием подачи ее возвращения. Они возникают в так проблемы устойчивости, как и в модели NNARMAX.

На рисунке 2.26 показаны структура модели NNOE, и его вектор регрессии задаётся следующим образом:

$$\varphi(t) = [\hat{y}(t-1|\theta), \dots, \hat{y}(t-r|\theta), u(t-d), \dots, u(t-d-m+1)]^T$$

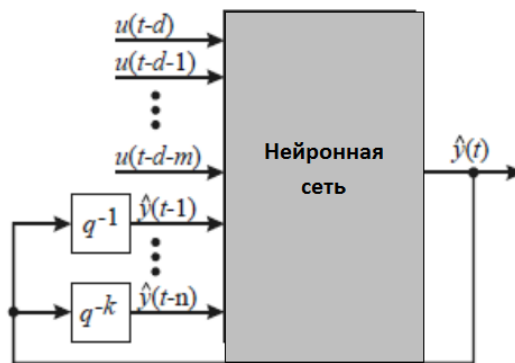


Рисунок 2.26 – Структура модели [28].

В некоторых случаях предлагаемые варианты или комбинации этих структур и моделей, например: гибридные линейно-нейронные. Также встречается структура не имеющих линейных аналогов. Знание процесса также может быть использована в изменении регрессии вектора, например, могут быть введены функции других переменных этого вектора [20], [28].

Выбор сетевой архитектуры и модели выбора строки.

Выбор оптимальной структуры модели требует два основных решения:

- выбор составляющих вектора регрессии

- выбор сетевой архитектуры, которая, в свою очередь, означает необходимость выбора числа скрытых нейронов.

Обычной практикой является отделить рассмотрение этих вопросов [28]. Во-первых, выбор сделан структуру вектора регрессии (модель и правительства), а затем определили лучшую сетевую структуру для этого вектора. Если есть возможность неограниченно (достаточно большой) набор данных, выбор структуры сети вы можете ограничить сеть, связанную полностью, что означает только выбрать количество нейронов в скрытом слое. Простейшим способом является постепенное увеличение количества исследования и Репрографический для каждого случая. Оптимальный размер скрытого слоя достигается при увеличении не приносит уже значительного улучшения. Оптимальный размер скрытого слоя, однако, менее важно, чем соответствующий выбор *prężestrzeni* задержки или модельный ряд. Слишком низкое значение может быть неточным представлением динамики моделируемого объекта, слишком высокая может привести к появлению нежелательного? Компонента Адан постоянного тока или тренда. Это? Если вы не можете определить, есть возможности для модельного ряда, основанного на знании физических свойств объекта, в случае детерминированных систем с относительно гладкими характеристиками, могут быть применены к описанным ниже способом [14].

Это одно из действий, предшествующих конструкции нелинейного объекта управления неизвестного математического описания. Контроль таких объектов является одной из основных областей применения нейронных сетей. Возможны два подхода к разработке контроля - косвенные и прямые [28], [20].

В методах прямого регулятора, непосредственно реализуется нейронная сеть, которая должна пройти подготовку в качестве управления отвечающей соответствующим критериям сети. Нейронный регулятор является хорошим решением там, где возможно применение стандартного комплексного контроля в режиме реального времени. Реализация проста, однако, строительство и настройка сложна, и каждый раз предполагает обучения сети, когда оно меняет критерии проектирования. Часто обучение должно быть онлайн - непосредственно на рабочем месте. Структура регулирования такого рода в большинстве случаев включает в себя модель объекта. Этот класс решений относится, например, прямого контроля инверсии, регулированию внутренней модели, линеаризацию связи, управлению с обратной связью "перед" обратной модели и оптимального управления.

Идея прямых методов заключается в использовании традиционных методов управления и использования нейронных сетей в качестве модельного объекта. Этот класс решений принадлежит нелинейным прогностическим методам управления и местной (временной) линеаризации, например, минимальное регулирование дисперсии или приближенному прогностическому регулированию.

Когда нейронные сети были предложены для управления неизвестными объектами нелинейности, одним из первых методов было, третируя сеть, чтоб был разворот объекта и служение в качестве регулятора.

Пусть объект управления на входе u и выходе y будет описана следующим образом:

$$y(t+1) = g(y(t), \dots, y(t-n+1), u(t), \dots, u(t-m))$$

где g является некоторой функцией.

В связи с этим целесообразно нейронная сеть будет один, который извлекает протекторное связывания объекта управления $u(t)$ вида:

$$\hat{u}(t) = g(y(t+1), y(t), \dots, y(t-n+1), u(t-1), \dots, u(t-m))$$

Создавая, получим в некотором роде такую сеть. Для того, чтобы контролировать объект можно по электронной материнской плате путем замены $y(t+1)$ - выход в момент времени $t+1$ при $r(t+1)$ - уставки (опорный сигнал). Это сеть является точной поворот объекта на его выходе (t) будет sterowało объект так, что его выход в момент времени $t+1$ будет равна значению, установленному в тот же момент $r(t+1)$. Такая система управления можно интерпретировать как регулятор типа мертвой такт (с конечной импульсной характеристикой), [5], в котором объект вывода будет точно дать A_0 для входа в качестве ссылки с задержкой на один период дискретизации.

На рисунке 2.27 показано расположение первой строки, которая действует в соответствии с этим принципом.

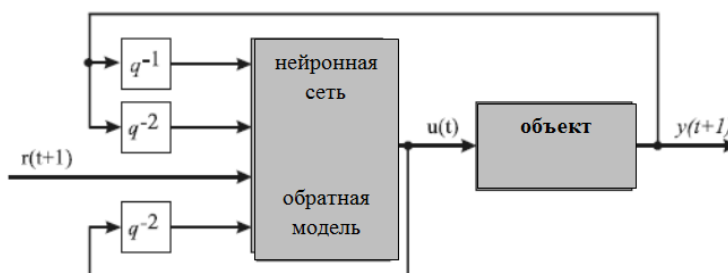


Рисунок 2.27 – Прямое управление инверсией [28]

Есть два возможные модели регулятора обучения - общие и специализированные. Общая подготовка осуществляется в автономном режиме, минимизируя следующий критерий:

$$J(\theta) = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N [u(t) - \hat{u}(t|\theta)]^2$$

где N означает длина серии стажера, θ вектор весов сети, а u выходное значение сети. Такой способ обучения регулятора выделяется, тем, что не

содержит прямой модели объекта. Недостатком такого подхода является то, что минимизировано ошибка контроля и нет объекта вывода ошибки.

Специализированное обучение, в свою очередь, он-лайн процедура аналогична процедуре адаптивной настройки эталонной модели. Здесь минимизировано объект вывода ошибок, который является критерием в следующем виде:

$$J(\theta) = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N [y_m(t) - y(t)]^2$$

где $y_m(t)$ означает выход модели эталонного процесса.

$$y_m(t) = \frac{q^{-1}B_m(q)}{A_m(q)} r(t)$$

Точная модель напротив получаются, когда $A_m=B_m=1$, однако, часто является предпочтительным характеристики низких частот.

Обучения таким критериям, делает систему управления описанного типа очень внимательно отслеживающим ссылочную траекторию. Это особенность противопожарной защиты в области робототехники. Принцип специальной подготовки показан на рисунке 2.28.

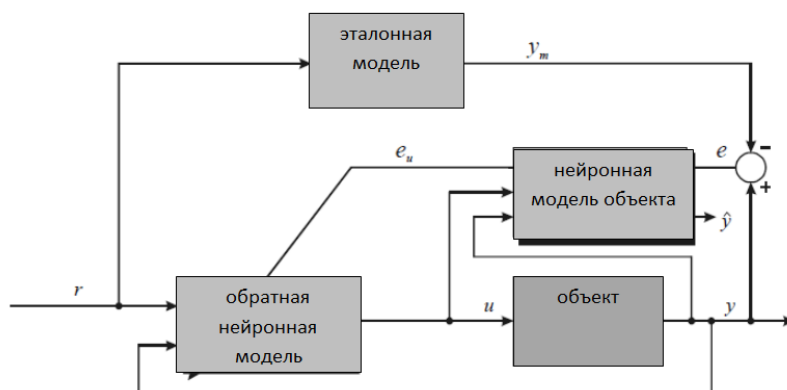


Рисунок 2.28 – Обучение модели

Перед началом обучения регулятора, нужно создать эталонную модель, которая будет служить для оценки объекта $\frac{\partial y(t)}{\partial u(t-1)}$ Якобиану. Затем начать обучение соответствующе регулятору. Для того, чтобы избежать неустойчивости и потенциально опасности системы управления, превышающей рабочую область объекта, вы можете обучить противоположную модель предварительно в автономном режиме, и только после этого присоединиться к обучению онлайн. По той же причине, что они не подходят для медленного обучения градиентных алгоритмов.

2.7 Управление на основе прогнозирования

Общий принцип прогнозирующего управления заключается в определении величины в заданном временном горизонте в каждой итерации алгоритма с динамической объектной модели, измерения выходных переменных y и контроля объекта u , известно или предполагается это траектория заданного значения r [37]. Контроль определяется таким образом, чтобы свести к минимуму J в качестве критерия:

$$J(t, U(t)) = \sum_{i=N}^{N_2} [r(t+i) - \hat{y}(t+i)]^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_u} [\Delta u(t+i-1)]^2$$

N_u условия будущего контроля стоимости:

$$U(t) = [u(t), \dots, u(t+N_u-1)]^T$$

ограничивая при этом:

$$\Delta u(t+i) = 0, N_u \leq i \leq N_2 - d.$$

N_1 и N_2 означает соответственно начало и конец горизонта прогнозирования, N_u длина управляющего горизонта, \hat{y} значения выходной модели, ρ затухание контроля изменчивости в зависимости от отклонения и d задержки известного объект.

В случае линейных систем, чтобы свести к минимуму, задачу можно решить аналитически, однако для решения нелинейных систем требуется применения итерационных методов. Точность алгоритма в то же время не самое главное - достаточно того, что находится на уровне разрешения A / D преобразователя в системе управления, но он должен обладать рядом характеристик, таких как:

- быстро сходимость;
- решение должно быть найдено в определённое время, т.е. должно быть максимальное время, чтобы найти решение;
- численная устойчивость.

Методы чисто градиента не всегда соответствует первым двум требованиям, необходимо использовать второй метод порядка

Предположим, если нелинейный объект моделируется нейронной сетью для выполнения функции g , тогда прогнозирование будет иметь характер:

$$\hat{y}(t) = \hat{y}(t|t-1) = \hat{g}_1[y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m)]$$

где d является объектом задержки.

Множественные прогнозы достигается за счёт сдвига вперёд выражений выше и замены значения измерений соответствующими прогнозами. Исходя из предположения о составе, доступное время наблюдения $t-1$ заменяется следующим предсказанием символов:

$$\hat{y}(t+k) = \hat{y}(t+k|t) = \hat{g}_1[\hat{y}(t+k-1), \dots, \hat{y}(t+k-\min(k,n)), y(t-1), \dots, y(t-\max(n-k,0)), u(t+k-d), \dots, u(t+k-d-m)]$$

Обозначение " $t + k$ " означает обозначение в t моменте, размер прогнозируемого на момент $t + k$.

Если сеть реализуется с функцией g , не являясь архитектурой MLP n_h нейронов гиперболической функции активации в скрытом слое, то получим линейный выходной нейрон:

$$\hat{y}(t+k) = \sum_{j=1}^{n_h} (W_j \cdot f(h(k, j)) + W_0)$$

где

$$f(x) = \tanh(x)$$

и

$$h(k, j) = \sum_{i=0}^{\min(k, n)} w_{j,i} \hat{y}(t+k-i) + \sum_{i=\min(k, n)+1}^n w_{j,i} y(t+k-i) + \sum_{i=0}^m w_{j, n+i+1} u(t+k-d-i) + w_{j,0}$$

Вместо формы рекурсивных вы можете обучить $N_2 - N_1 + 1$ сеть, которая непосредственно реализует свой прогноз к первому шагу. Это решение, однако, неудобно для длинного горизонта прогнозирования, потому что требует огромного сбора подготовки, чтобы гарантировать точность.

Критерий управления может быть преобразован в следующую форму:

$$J(t, U(t)) = [R(t) - \hat{Y}(t)]^T [R(t) - \hat{Y}(t)] + \rho U^T(t) U(t) = E^T(t) E(t) + \rho U^T(t) U(t)$$

где

$$\begin{aligned} R(t) &= [r(t+N_1) \dots r(t+N_2)]^T \\ \hat{Y}(t) &= [\hat{y}(t+N_1|t) \dots \hat{y}(t+N_2|t)]^T \\ E(t) &= [e(t+N_1|t) \dots e(t+N_2|t)]^T \\ U(t) &= [\Delta u(t) \dots \Delta u(t+N_u-1)]^T \end{aligned}$$

и

$$e(t+k|t) = r(t+k) - \hat{y}(t+k|t) \quad \text{для } k = N_1, \dots, N_2.$$

Общий алгоритм итеративного поиска по критерию минимума управления имеет вид:

$$U^{(i+1)} = U^{(i)} + \mu^{(i)} f^{(i)}$$

где $U^{(i)}$ представляет собой последовательность будущих управлений в i -тей итерации, $\mu^{(i)}$, размер шага и $f^{(i)}$, направление поиска (kierunek poszukiwania.) (разведочных работ).

Как уже было приведено вышеупомянуто, алгоритм должен быстро сходиться и находить решения в определённое время.

Методы чистого градиента не всегда соответствует установленным требованиям, необходимо методы второго ряда. Одним из таких способов является модифицированный алгоритм Левенберга-Марквард на основе метода Ньютона [28]. Направление поиска найдено по формуле:

$$\left(H[U^{(i)}(t)] + \lambda^{(i)} I \right) f^{(i)} = -G[U^{(i)}(t)]$$

где λ является поиском параметров, а I означает единичную матрицу. Вектор градиента G и матрица Гессе H определяются из формул:

$$G[U^{(i)}(t)] = \frac{\partial J(t, U(t))}{\partial U(t)} \Big|_{U(t)=U^{(i)}(t)}$$

$$H[U^{(i)}(t)] = \frac{\partial^2 J(t, U(t))}{\partial U(t)^2} \Big|_{U(t)=U^{(i)}(t)} = \frac{\partial}{\partial U(t)} \left(\frac{\partial \hat{Y}(t)}{\partial U(t)} E(t) \right) + 2\rho \frac{\partial U^T(t)}{\partial U(t)} \frac{\partial U(t)}{\partial U(t)} \Big|_{U(t)=U^{(i)}(t)}$$

Второй компонент Гессиан всегда определяется положительно, но может случиться, что, первый может не определится. Выбираем достаточно большой весовой коэффициент ρ , первый компонент Гессиан становится положительно определённой, но на практике это не является надёжным, из-за свойств регулятора.

В модифицированном алгоритме Левенберга - Марквард основанный на методе Ньютона [28], как показано на рисунке 2.28, эта проблема решается за счет надлежащего выбора ставки λ таким образом, что матрица H была идентифицирована. Эта операция выполняется в первом цикле алгоритма, пытаюсь выполнить Холецкого факторизации, которые можно выполнить только для симметричной положительно определенной матрицы.

Матрицы в результате успешной факторизации служат чтобы определить направление поиска. Изменение соотношения λ зависимого график степени критерия снижения в виде:

$$r^{(i)} = 2 \frac{J(U^{(i)}) - J(U^{(i)} + f^{(i)})}{\lambda (f^{(i)})^T f^{(i)} - (f^{(i)})^T G[U^{(i)}]}$$

Размер 0,25 и 0,75, связанный с изменением соотношения были предложены в оригинальном алгоритме, и их небольшое изменение не влияет на исходящий алгоритм [28]. Алгоритм завершает работу, когда следующая итерация не меняет вектор, чем заданный размер, или, когда первое условие не существовало в указанное максимальное число итераций. Это последнее условие продиктовано необходимостью нахождения решений в течение определённого времени, периода выборки.

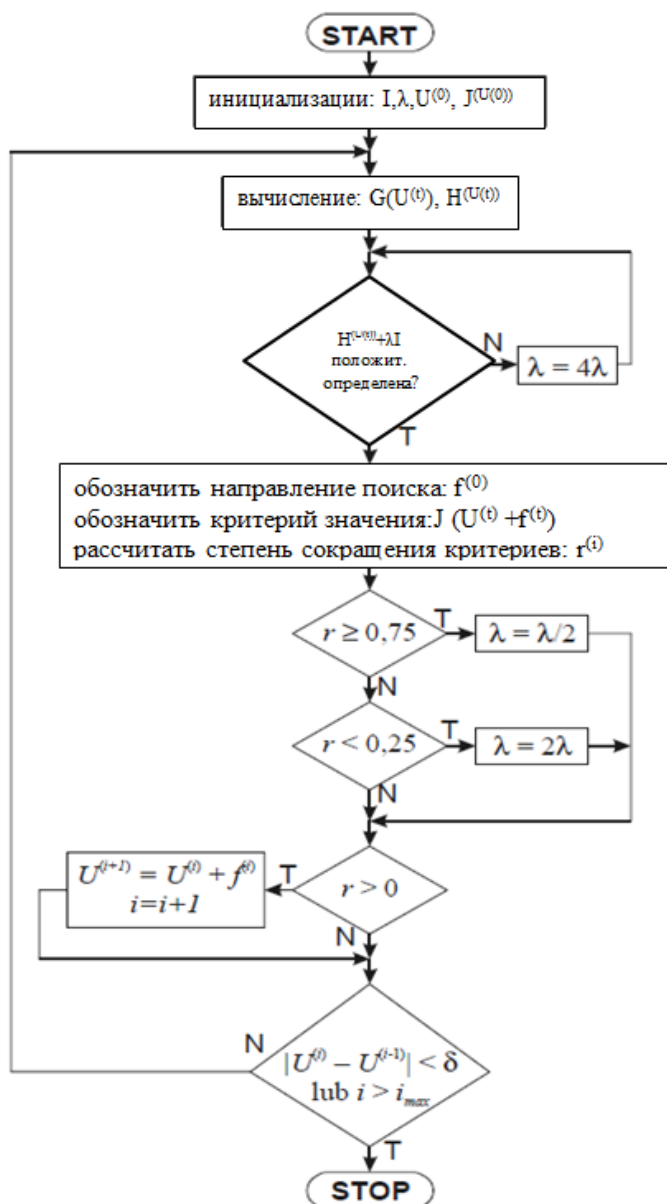


Рисунок 2.28 – Интеллектуальный алгоритм управления

$$J(t, U(t)) = \sum J_m$$

- стабилизация значений на выходе:

$$J_1 = \sum_{i=N_1}^{N_2} [r(t+i) - \hat{y}(t+i)]^2$$

- ограничение контроль изменения скорости:

$$J_2 = \rho \sum_{i=1}^{Nu} [\Delta u(t+i-1)]^2$$

- уменьшение значения наблюдаемого размера входных данных:

$$J_2 = \rho_1(\varepsilon + 0,5\varepsilon^n)$$

Настройка внутренней модели тесно связана с прямой обратной связью управления. Он был использован в основном для управления химическими процессами, но теперь становится широко используемой. Ограничения, накладываемые на процесс в этом случае очень быстрые, однако регулятор этого типа имеет несколько ценных свойств, например: он может компенсировать искажение ожидаемого ненулевого значения. Регулятор с внутренней модели требует, как нормальную модель процесса (вход), и его моделью обратной связи (выход). Первый обученный это может быть любой из методов идентификации, приведённые в разделе 5.2, а другой, для непосредственного управления инверсией. На рисунке 2.29. показано диаграмма, иллюстрирующая работу системы управления внутренней модели.

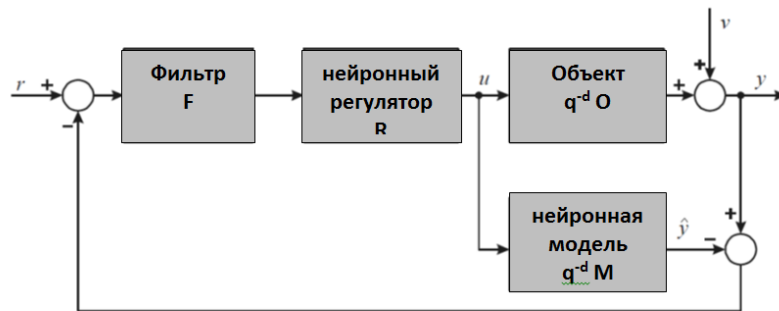


Рисунок 2.29 – Принцип работы газификатора внутренней модели [28]

В отличие от прямого управления перевёрнутой оппозиции сигнала представляют обратная связь, непосредственно не выводится из объекта, но разность между ним и выходного сигнала, зависит от модели объекта. Если модели объекта совершенны и не действуют на него в значительной оппозиции, то сигнал помехи возврата вниз равен нулю. Система управления выход будет иметь значение в точности равно значению опорного сигнала. Для того, чтобы объяснить принцип работы данного типа системы управления будет тщательно исследовать функционирование его линеаризованной формы. Предположим, что передаточные функции фильтр (F), регулятор (R), модель (M) и объект (O) являются функциями сдвига оператора q^{-1} , а задержка, пополняемая объект d .

Тогда:

$$y(t) = \frac{q^{-d} FRO}{1 + q^{-d} FR(O - M)} r(t) + \frac{1 - q^{-d} FRM}{1 + q^{-d} FR(O - M)} v(t) =$$

$$= v(t) + \frac{q^{-d} FRO}{1 + q^{-d} FR(O - M)} [r(t) - v(t)]$$

и

$$u(t) = \frac{FR}{1 + q^{-d} FR(O - M)} [r(t) - v(t)]$$

Конечно, при условии глобальной системы в замкнутой петле стабильность является объектом управления, как его обратная модель. Другим ограничением является требование, чтобы система была стабильной, как в открытом цикле. В идеальном случае $M = P$ и $C = P^{-1}$, то есть, уравнение сводится к следующему виду:

$$u(t) = \frac{R}{O} [r(t) - v(t)]$$

$$y(t) = q^{-d} Fr(t) + [1 - q^{-d} F]v(t)$$

Фильтр, конечно, в равной степени влияет на свойства системы управления - по точности слежения модели и устойчивость к помехам. Эти требования, предъявляемые к ним, таким образом, они должны быть стабильными и обладают единичное усиление в устойчивом состоянии, чтобы обеспечить отслеживание ввода ссылки; выбор сетевой архитектуры и выбор модельного ряда; прямое управление инверсией.

Когда нейронные сети были предложены для управления нелинейных неизвестных систем объекты, одним из первых методов в том, что сеть служит для реверсирования объекта и в качестве регулятора. Пусть объект управления на входе и выходе u будет описана следующим образом:

$$y(t+1) = g(y(t), \dots, y(t-n+1), u(t), \dots, u(t-m))$$

2.8 Выводы по главе

Применение численного метода для изучения процесса сжигания биогаза является привлекательным, быстрым и дешевым методом, который дает возможность детального анализа процесса. Численные результаты описывают исследуемый процесс сжигания биогаза качественно и количественно. В ходе экспериментальных исследований была измерена средняя температура частицы биомассы, значения которой соответствуют значениям, полученным при численном моделировании. Получение численных результатов, согласованных с экспериментальными данными, подтверждает правильность разработанной математической модели и правильность реализации численной модели.

Разработанный численный алгоритм, используемый в нестационарном численном моделировании одномерных областей (зон), может быть

использован для решения сложных нестационарных многомерных задач, решения которых включают в себя более сложные явления и наблюдаются в ходе экспериментальных исследований.

Результаты моделирования системы автоматического регулирования работы агрегата подтвердили работоспособность разработанной модели. Полученная модель экстремального регулирования процесса сжигания в топке позволяет улучшить энергетические показатели работы путем поддержания оптимального значения КПД. Доказано работоспособность разработанной имитационной модели экстремального регулирования при изменении сигнала задания, то есть поддержание КПД котла на одном уровне с заданной точностью.

Современная технология очистки городских сточных вод связана с потреблением значительных количеств электрической и тепловой энергии. В условиях острого энергетического кризиса проблема снижения указанных энергозатрат за счет использования нетрадиционных источников энергии, имеющихся на самих очистных сооружениях и постоянно возобновляющихся, является остро актуальной.

В работе как объект управления рассматривалась установка по совместному сжиганию биогаза и природного биогаза. Предложены математическая модель и метод, позволяющие в процессе сжигания такого биогаза определить его состав и обеспечить оптимальные параметры процесса сжигания. Разработаны математические модели процесса адсорбции биогаза и природного биогаза.

В результате проведенных во второй главе исследований можно сделать следующие выводы:

1 Проведенный анализ известных математических моделей процесса сжигания биогаза показал, что на сегодняшний день не создано достаточно адекватного математического описания этого сложного объекта с распределенными параметрами.

2 Предложено для разработки алгоритмов управления процессом сжигания биогаза использовать методы теории искусственного интеллекта.

3 Вместо математических моделей технологического процесса предлагается синтезировать интеллектуальную модель процесса управления объектом, основанную на использовании знаний, опыта и интуиции операторов-технологов ТЭЦ и очистных сооружений.

4 На основе опроса операторов-технологов и ИТР сформирована матрица ПФЭ с результатами 81 «мысленного» эксперимента.

5 На основе матрицы ПФЭ синтезированы модели управления четырьмя методами: планирование эксперимента, нечеткие алгоритмы, нейронные сети и нейро-нечеткие сети.

6 Проведены исследования интеллектуальных моделей управления на однозначность, чувствительность, устойчивость и адекватность.

7 Результаты исследования, приведенных в третьем разделе, были опубликованы нами [66, 69, 47, 76, 78].

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Общая методика экспериментального исследования

Целью экспериментальных исследований является подтверждение и уточнение разработанных теоретических положений, а также соответствие параметров и режимов функционирования технических средств по сжиганию биогаза. Программой экспериментальных исследований предусмотрен сбор необходимой статистической информации для решения оптимизационной задачи, обоснования оптимальных параметров работы технических средств биогазовой установки.

При этом основными задачами экспериментальных исследований являлись:

- верификация теоретических принципов и утверждений, определяющих характер и структуру процессов проектирования;

- оценка адекватности разработанных моделей при оптимизации параметров предложенных технических решений и экспериментальное подтверждение их эффективности.

Независимо от способа представления объекта, вида и характера его изменения основным при оптимизации систем является выбор наиболее подходящего решения. Для решения таких сложных задач необходимо применение методологии системного подхода, которая направлена на комплексное изучение объектов и процессов.

Характерной особенностью указанной методологии является применение моделирования систем и замещения на время анализа реального объекта подобной ему моделью. При проектировании моделей необходимо придерживаться некоторых принципов, соблюдение которых позволит получить адекватное и точное отображение исследуемого процесса. Теоретические основы проектирования следует строить не столько «снизу» за счет индуктивного обобщения полученных инженерной наукой и практикой, сколько «сверху» по отношению к ним, то есть на основе сформулированных фундаментальных принципов целой системы более конкретных утверждений, раскрывающих структуру и содержание проектных операций синтеза, оптимизации и выбора решений.

На основе сформулированного принципа полученные утверждения имеют иерархическое строение, которое характеризует наличие нескольких уровней. Утверждения последнего уровня при помощи алгоритма определяют не только единственный вариант оптимального решения задачи, но и рациональный путь, к нему ведущий. Исследования проводились в лаборатории кафедры «Автоматизация и управления» ИИТТ КазНУ имени К.И.Сатпаева, в лаборатории Люблинского технического университета г. Люблин, Польша, а также в промышленных условиях ГКП «Астана Су Арнасы» (г.Астана, Казахстан), ТЭЦ Мегатерм, Польша.

3.2 Описание лабораторной установки для проведения экспериментов

3.2.1 Экспериментальная установка в лабораторных условиях Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)

С целью исследования производимого биогаза в качестве биогаза для производства электрической и тепловой энергии использовался лабораторный стенд, закупленный Вузом партнером – Институт электроники и информационных технологий, Люблинский технический университет г. Люблин, Польша (рисунок 3.1).

Характеристика объекта управления. Экспериментальная установка состоит из пяти аппаратов: загрузочный бункер, биореактор, фильтр, охладитель, камера сжигания. Каждый аппарат снабжен замкнутой воздушной рубашкой, в аппарат герметично введены змеевик и электрический нагреватель. Нагреватель-змеевик служит для проведения тарировочных опытов, для быстрого подогрева исследуемого образца до начальной температуры в аппарате, для работы в изотермическом режиме и для ускоренного охлаждения содержимого аппарата. Змеевик в зависимости от условий проведения опыта подключается либо к термостату, либо к линии сжатого воздуха и служит для охлаждения содержимого аппарата. Подача воды в змеевик осуществляется включением и выключением насоса термостата, подача воздуха включением и выключением электромагнитного клапана Z1. Аппарат помещен в цилиндрическую камеру с электрообогревом.

При измерении газовой выделенной газообразные продукты реакции разложения поступают из аппарата на два клапана Z поочередно перераспределяющих поток биогаза на правую и левую половины датчика измерения объема биогаза. Разгерметизация и сброс продуктов разложения в специальную емкость обеспечивается пневмоклапаном, перемещающим вверх приемный штуцер емкости.



Рисунок 3.1 – Внешний вид лабораторной установки для технологического процесса сжигания биогаза

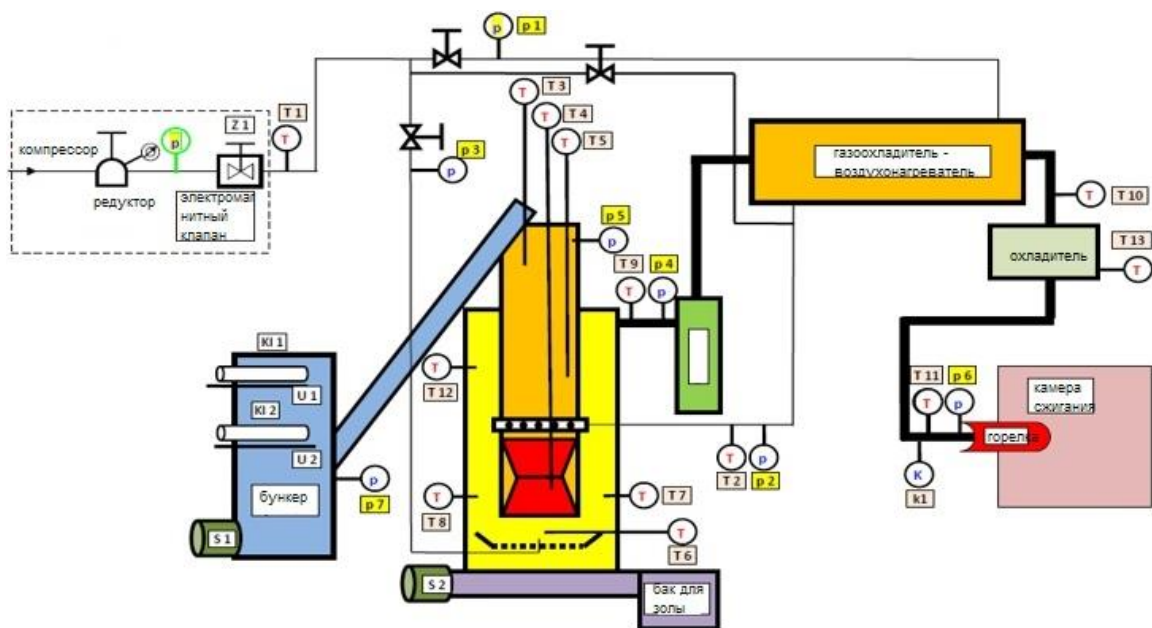


Рисунок 3.2 – Технологическая схема процесса сжигания биогаза в лабораторной установке



Рисунок 3.3 – Факел пламени, полученный при сжигании биогаза в лабораторной установке



Рисунок 3.4 – Двухуровневая структура автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза в лабораторных условиях Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)

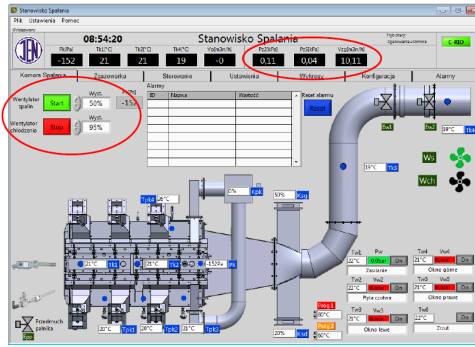


Рисунок 3.5 – Видеокадр «Камера сжигание биогаза»

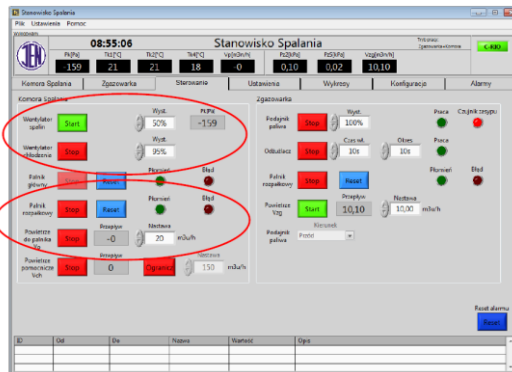


Рисунок 3.6 – Видеокадр «Управление»

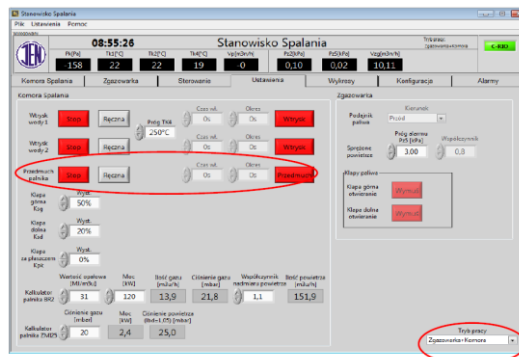


Рисунок 3.7 – Видеокадр «Уставки»

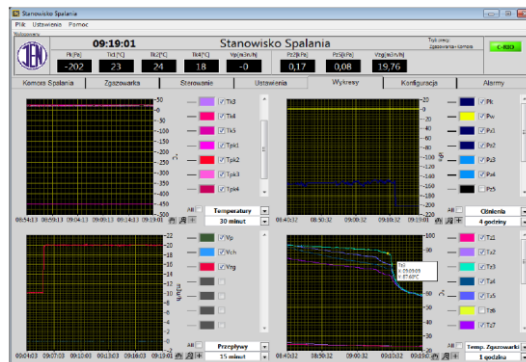


Рисунок 3.8 – Видеокадр «Тренды/графики»

Результаты влияния разных моделей турбулентности на распределение температур по сечениям топочной камеры показаны рисунке 3.9. Видно, что результаты расчётов с тремя разными моделями турбулентности относительно хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными. При этом сравнение по пульсациям скорости показали, что наилучшее согласование с экспериментом наблюдается при использовании модели рейнольдсовых напряжений. Результаты расчетов и сравнение с экспериментальными данными показали, что выбранная математическая модель на основе RANS подхода и численные методы ее решения позволяют правильно описать процессы тепломассобмена и горения биогаза в топочной камере с вихревой горелкой с точностью достаточной для инженерных задач.

Для обработки данных полученных в ходе экспериментов была использована программа OPUS позволяющая строить графики спектров и импортировать их в точечный рисунок. (Рисунок 3.9)

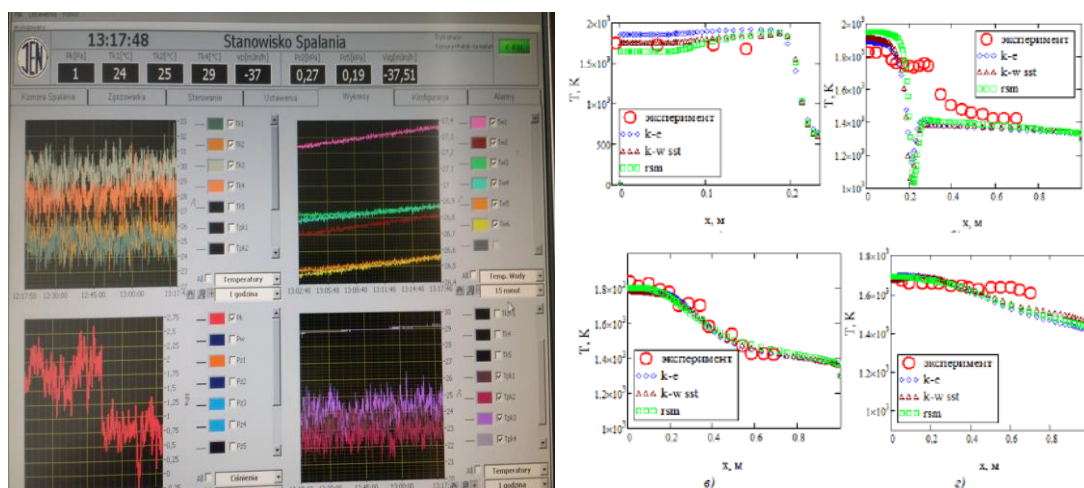


Рисунок 3.9 – Профиль температуры в сечениях топочной камеры (а – $z=0$, б – $z=0.25$, в – $z=0.85$, г - $z=1.95$)

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном оборудовании, конструкции которых обеспечивали получение оценочных показателей рабочих процессов биогазовых установок при различных режимах анаэробного сбраживания. Мы предлагаем применить психрофильный периодический режим работы БГУ с метантенком малого объема – от 1-го м 3 и меньше - по следующим существенным причинам: выпускаемые в данное время установки работают в мезофильном режиме, оснащены высокоточной автоматизированной системой; отсутствие технологий по механизации трудоемких процессов и переработке производимого биогаза; засорение окружающей среды, повышение уровня опасного воздействия на здоровье человека.

Высокие температуры требуют установки специальных систем автоматизации и точного управления работой биогазовой установки. Когда речь идет о полной интеграции биогазовых установок в повседневную работу предприятия, психрофильный режим создает меньше сложностей.

3.2.2 Экспериментальная установка в промышленных условиях ТЭЦ МEGATEM (г.Люблин, Польша)



Рисунок 3.10 – Промышленная установка по сжиганию биогаза на ТЭЦ МEGATEM (г.Люблин, Польша)

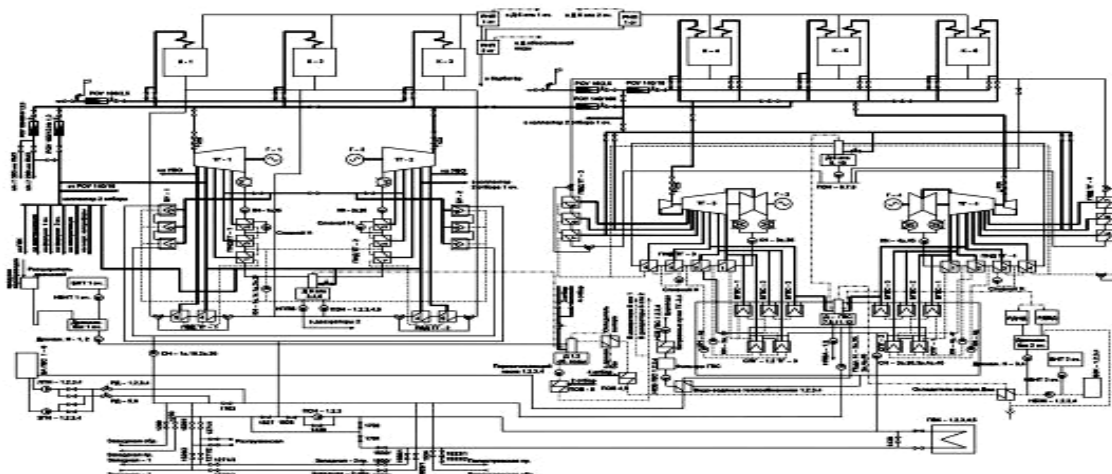


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема ТЭЦ МEGATEM (г.Люблин, Польша)

Контроль сгорания неизвестной теплотворной способности может быть обеспечен с помощью крайнего регулятора. При заданном расходе биогаза

путем изменения расхода окислителя (воздуха) обеспечивается стехиометрическое соотношение, соответствующее максимальной температуре продуктов сгорания. Максимальная температура достигается при коэффициенте избытка воздуха α , равном 1,0. Максимальная температура достигается при коэффициенте избытка воздуха α , равном 1,0. Альтернативой этому методу может быть определение состава биогаза с неизвестной теплотворной способностью с помощью газоанализатора. Этот метод имеет ряд недостатков: ресурсоемкий, громоздкий, имеет длительное время инерции и, как следствие, отставание. Поэтому такой способ трудно интегрировать в автоматизированную систему управления. Для газоанализаторов требуются данные о перечне газов в смеси. Использование газоаналитических устройств осложняется тем, что такие газы содержат нежелательные компоненты, которые приводят к ускоренному износу первичных устройств и их разрушению. Стоимость системы увеличивается с увеличением этого списка. Целесообразно рассмотреть подходы к моделированию и результаты полевых и численных экспериментов в ряде исследований, которые были получены при изучении образования сажи, на самом деле углерода. При автоматизации работы парового котла большое внимание уделяется сокращению трудовых и энергетических затрат на производство пара. В литературе описано множество способов, которые позволяют снизить затраты на энергию. Одна из них - системы, которые включают в себя экстремальные регуляторы, где критериями качества, то есть крайностями, могут быть эффективность, производительность, стоимость оборудования и эксплуатационные расходы. Однако для парового котла наиболее эффективным параметром, обеспечивающим управление процессом, является значение эффективности. Используя известные эксплуатационные зависимости коэффициента полезного действия от соотношения топливо-воздух и применяя экстремальное управление, можно оптимизировать систему автоматического управления процессом сгорания в топке парового котла. Современные компьютерные технологии, а также создание приложений позволяют создавать модели экстремальных автоматических систем управления (SAR) на этапе исследований и проектирования.

Цель. Улучшение энергетических характеристик парового котла в процессе его эксплуатации за счет поддержания оптимальной эффективности.

Задача. Цель может быть достигнута путем создания и использования имитационной модели системы экстремального регулирования, которая позволяет определить ее работоспособность, выполнить анализ и синтез на этапах проектирования и настройки ОВД.

Основной материал исследования. В настоящем проекте была сделана попытка создать и изучить имитационную модель системы для экстремального регулирования работы парового котла с использованием пакета MATLAB. Для создания и изучения системы экстремального регулирования с целью достижения и поддержания оптимального

соотношения топливоздушной смеси, обеспечивающих наибольшую эффективность парового котла, была разработана функциональная схема модели системы управления, отражающая происходящие процессы Место в двух контурах управления: газ и воздух, а также с учетом их взаимосвязи (Рисунок 3.12). На диаграмме: REG-PID-регулятор; ПП - пусковое устройство (бесконтактный пускатель); VM - исполнительный механизм; РО - регулирующий элемент (клапан, затвор); ОП - объект регулирования (труба, печь); D1 - датчик кислорода; D2 - датчик температуры.

На основе функциональной схемы модели ATS ее структурная схема была скомпилирована в пакете Simulink программы MATLAB (рисунок 2.12), который также состоял из двух контуров управления.

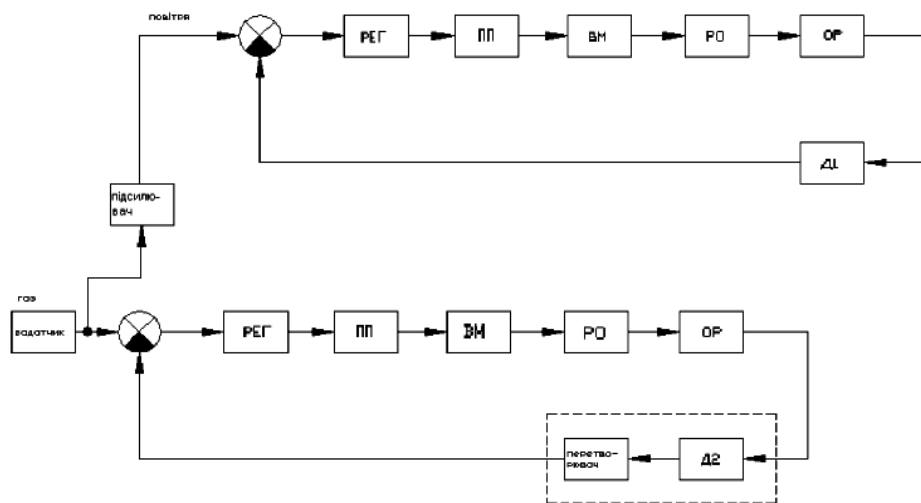


Рисунок 3.12 – Функциональная схема модели САР соотношения топливо-воздух

Первый контур регулирования подачи биогаза, то есть регулирования температуры (нижний контур), включает: блок задания подачи биогаза в топку (Step), контроллер (PID Controller 1), бесконтактный пускатель (Relay 1), исполнительный механизм (Transfer Fcn 1, Integrator), регулирующий орган, (клапан, Gain), объект регулирования, (топку, Transfer Fcn 4, Transport Delay 1), датчик температуры, (термопара Transfer Fcn 3, Transport Delay 2), а также элемент сравнения и усилители сигналов. Второй контур (верхний) САР включает: блок задания подачи воздуха в топку (Step), второй канал контроллера (PID Controller), бесконтактный пускатель (Relay), исполнительный механизм (Transfer Fcn, Integrator), регулирующий орган, заслонку (Gain 1, Transport delay), датчик кислорода (Transfer Fcn 2), а также элемент сравнения, сумматор и усилители сигнала.

При определении передаточных функций элементов САР принимались рекомендации, приведенные в литературе, а их динамические параметры рассчитывались с помощью методик, взятых на основе технических характеристик элементов, приведенных в справочниках. Переходной процесс модели САР, приведенный на рисунке 2.13, показывает, что необходимая

задача достигается, то есть содержание кислорода в дымовых биогазах не превышает 2 %, температура пара в барабане котла поддерживается 194⁰С и она может быть оптимизирована по требованиям, предъявляемым к качеству переходного процесса, но без поддержания наивысшего КПД котла. Чтобы устранить этот недостаток ниже была разработана имитационная модель, содержащая экстремальный регулятор.

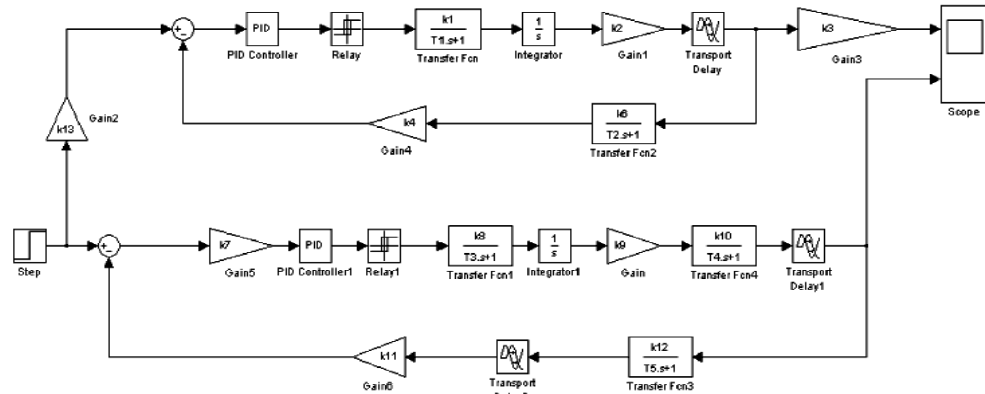


Рисунок 3.13 – Структурная схема модели САР в пакете Simulink программы MATLAB

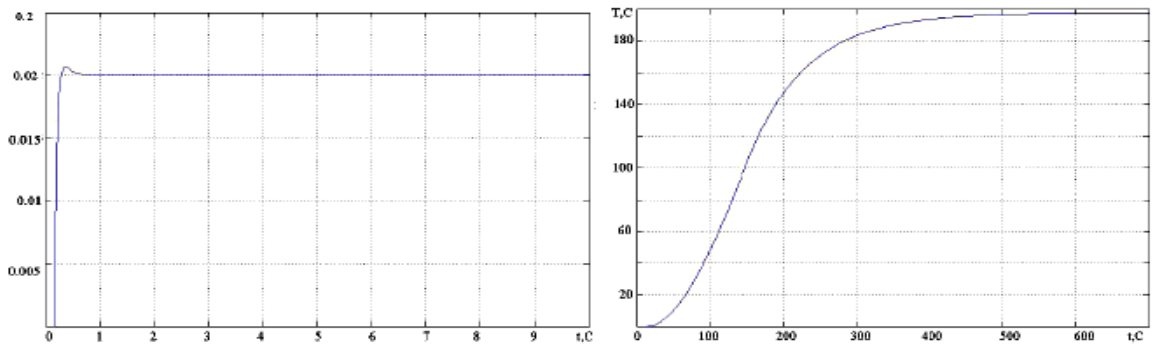


Рисунок 3.14 – Осциллограммы переходных процессов САР

Достижение и поддержание оптимального соотношения «топливо-воздух» при наивысшем КПД парового котла представляется возможным при помощи применения экстремального регулирования, то есть нахождения экстремума статической характеристики объекта регулирования (построенной по экспериментальным данным), на который действуют различные возмущения, меняющие положение экстремума в пространстве управляющих действий. Статическая характеристика объекта регулирования в общем виде может быть записана по формуле 3.1:

$$N = f(k_1, k_2, \dots, k_m), \quad (3.1)$$

где N – показатель экстремума, то есть КПД котла (η); k_i – коэффициент избытка воздуха.

Указанную зависимость можно получить либо, проведя аналитические исследования поведения объекта, либо используя экспериментально полученные характеристики, выражая их затем эмпирической зависимостью в виде многочлена.

Ниже приведена зависимость, полученная на основании экспериментальных данных зависимости КПД от коэффициента избытка воздуха. Используя программу Microsoft Excel была построена линия Тренда зависимости $N=f(k_1, k_2, \dots, k_m)$ и найдены коэффициенты аппроксимирующей функции, то есть $y=f(x)$ (рисунок 3.15):

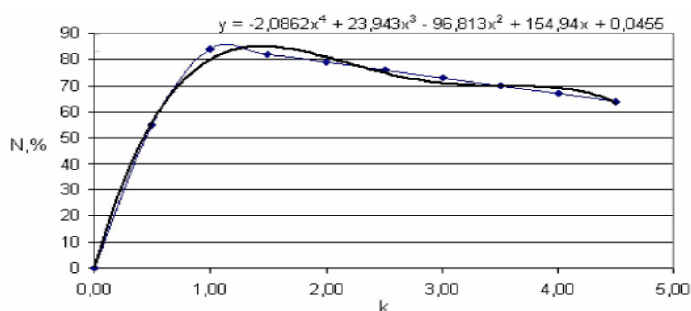


Рисунок 3.15 – Линия тренда кривой зависимости КПД от коэффициента избытка воздуха, построенная по экспериментальной характеристике

Модель экстремального регулятора, разработанная с использованием пакета MATLAB, приведена на рисунке 3.16.

Структурная схема модели САР работы котла после включения в нее экстремального регулятора выглядит следующим образом (рисунок 3.17).

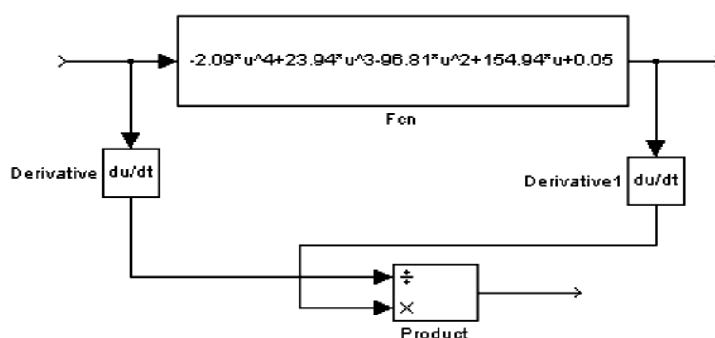


Рисунок 3.16 – Модель узла экстремального регулятора, выполненная в программе MATLAB

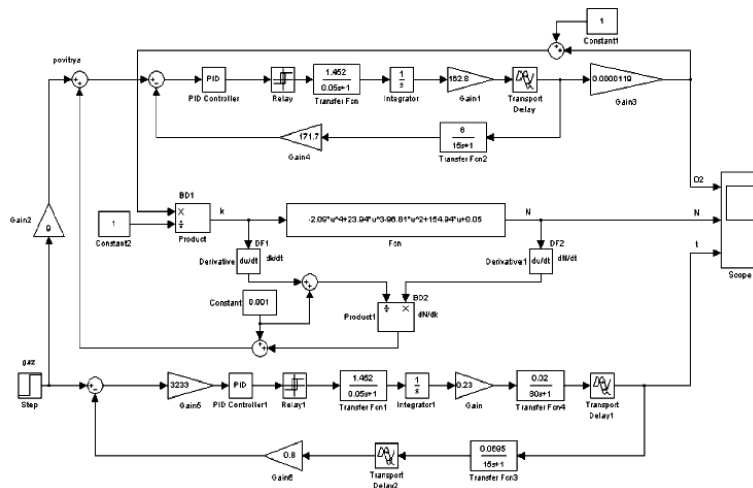


Рисунок 3.17 – Структурная САР работы парового котла в программе MATLAB

Температура пара котла регулируется по сигналу датчика температуры с последующим воздействием на исполнительный механизм подачи биогаза.

Расход воздуха регулируется по сигналу газоанализатора, который измеряет концентрацию кислорода в выходящих биогазах и подает сигнал на элемент сравнения регулятора, последний в свою очередь подает управляющий сигнал на исполнительный механизм подачи воздуха с учетом заданного соотношения «топливо-воздух».

При этом с помощью блока BD1 находится коэффициент избытка воздуха, т. е. процентное отношение действительного количества поступившего воздуха к теоретически необходимому по условиям реакции горения.

В разработанном экстремальном регуляторе используется метод измерения производной.

Экстремальный регулятор по производной $d\eta/dk$, которая меняет свой знак во время прохождения через экстремум, определяет направление движения к нему.

При равенстве производной нулю достигается экстремум.

Нахождение производной $d\eta/dk$ осуществляется делением с помощью блока BD2 производной $d\eta/dt$ на производную dk/dt (блоки DF2 и DF1). Результат вычисления суммируется с заданием погрешности (блок “Constant”) и подается в контур подачи воздуха.

Таким образом, исполнительный механизм корректирует подачу воздуха, при этом поддерживая новое задание на расход биогаза постоянным, а система, в свою очередь, поддерживает значение КПД котла на оптимальном уровне.

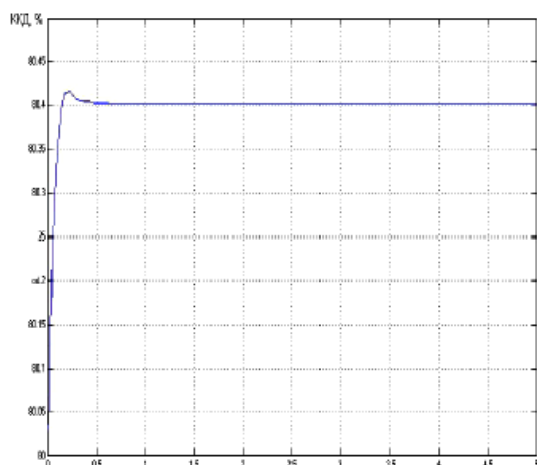


Рисунок 3.18 – Переходной процесс системы при экстремальном регулировании КПД котла

Для более наглядного представления работы экстремального регулятора на рисунке 3.19 показан график изменения КПД котла во времени. Из графика видно, что модель экстремального регулятора, в отличие от обычной системы регулирования, позволяет поддерживать КПД работы котла при изменении нагрузки на паровой котел с заданной погрешностью. Подтверждением этого служит переходный процесс, представленный на рисунке 3.20, для системы, где задание уменьшено в 3 раза.

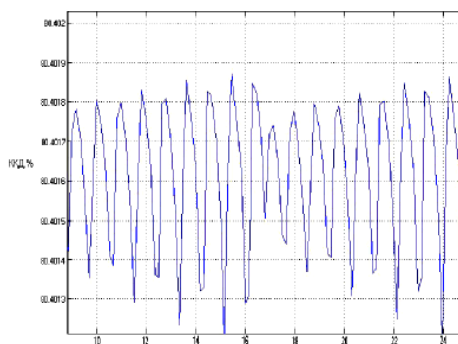


Рисунок 3.19 – График изменения КПД котла во времени

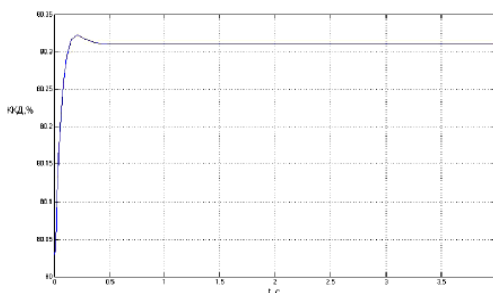


Рисунок 3.20 – График изменения КПД котла во времени при уменьшении сигнала задания в 3 раза

Результаты моделирования системы автоматического регулирования работы парового котла подтвердили работоспособность разработанной модели. Полученная модель экстремального регулирования процесса сжигания в топке парового котла позволяет улучшить энергетические показатели работы котла путем поддержания оптимального значения КПД. Доказано работоспособность разработанной имитационной модели экстремального регулирования при изменении сигнала задания, то есть поддержание КПД котла на одном уровне с заданной точностью.

3.2.3 Экспериментальная установка в промышленных условиях очистных сооружений ГКП «Астана Су Арнасы» (г.Астана, Казахстан)

В современном мире интенсивно развивается использование энергии биогаза и природного биогаза. Получение электро- и теплоэнергии возможно путем совместного сжигания природного биогаза и биогаза, полученного из биологической переработки. А также в настоящее время все большее значение в Казахстане приобретают вопросы экономии материалов и топливно-энергетических ресурсов, охраны окружающей среды. В этих условиях развитие коммунального хозяйства немислимо без освоения нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ). Преимущества их в том, что они неисчерпаемы и экологически чистые. Осадки, образующиеся в процессе очистки сточных вод и продукты их переработки, в первую очередь биогаз, являются существенными потенциальными источниками энергии в системах водоотведения. Газ, полученный в результате сбраживания осадков в метантенках, используют в теплоэнергетическом хозяйстве очистных станций и на близрасположенных объектах. Современная технология очистки городских сточных вод связана с потреблением значительных количеств электрической и тепловой энергии. Только на коммунальных очистных сооружениях ежегодно затрачивается свыше 735 млн. кВт·ч электроэнергии и около 1 млн. Гкал тепла. В условиях острого энергетического кризиса проблема снижения указанных энергозатрат за счет использования нетрадиционных источников энергии, имеющихся на самих очистных сооружениях и постоянно возобновляющихся, является остро актуальной. Направление, охватывающее все методы получения и использования энергии и биогаза из органического сырья (осадков), получило название биоэнергетика. Разработка этого направления приведёт к значительной экономии традиционных видов биогаза. Не менее важен и природоохранный аспект, так как энергетическая переработка органических отходов значительно уменьшит загрязнение окружающей среды. Для эффективного решения проблемы обработки осадков разработан проект, целью которого является снижение отрицательного влияния осадков сточных вод на окружающую среду, усовершенствование их транспортирования, обезвоживания и утилизации; создание самоокупающейся, экологичной и

энергосберегающей технологии. Реализация проекта предусматривается путем создания комплекса сооружений обработки осадков сточных вод, включающего их анаэробное сбраживание в метантенках, использование биогаза для получения электроэнергии в двигатель-генераторах с рекуперацией сбросного тепла для подогрева осадков и механическое обезвоживание всего объема осадков с использованием флокулянтов. При этом сложность методов прямых полевых измерений и их высокая стоимость являются причиной того, что такого рода исследования малочисленны. Разнообразие местных условий, разнородность объектов исследования, их изменчивость во времени затрудняет получение статистически достоверных результатов и требует проведения многолетних исследований. В связи с этим высокоинформативные натурные эксперименты являются единичными, особенно в отечественной практике. Поэтому основным инструментом исследований остается использование современного математического аппарата и математического моделирования процессов метаногенеза во времени. Моделирование должно рассматриваться с одной стороны в качестве приблизительного индикатора ожидаемых тенденций образования биогаза, с другой использоваться шире и более гибко в зависимости от поставленных задач.

Биогаз - это смесь метана и углекислого биогаза, образующаяся в процессе анаэробного сбраживания в биологических реакторах — метантенках. Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90% той, которой обладает исходный материал.

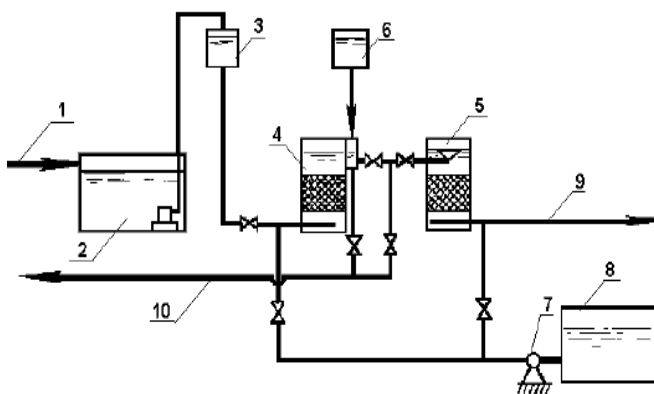
Представляет интерес возможность сбора биогаза, продуцируемого на в процессе анаэробного сбраживания в биологических реакторах, и его использование в качестве энергетического сырья. Ежегодная эмиссия метана в мире ценного энергетического компонента биогаза, превышает 1 млрд. м³/год. Этот потенциал в настоящее время практически не используется. Большой вклад в изучение состояния процесса сбора и сжигания биогаза, процессов разложения осадков сточных вод, газовых эмиссий, разработку технологий сбора и утилизации биогаза, решение сопутствующих экологических проблем внесли работы Г.А.Заварзина, В. В. Елистратова, Ю.М.Лихачева, А.Б.Лифшица, Е.Е.Мариненко, А.Н.Мирного, А.Н.Ножевниковой, Е.С.Панцхава, В.В.Разнощика, Г.С.Розенберга, Е.Г.Семина, М.П.Федорова, Б.Вебера, Р.Коссу, О.Табасарана, Р.Штегманна, М.П.Федорова, В.И.Масликова, Е.Р.Лиллепярк, А.В.Черемисина, С.С.Нуркеева и других. Результаты их исследований подготовили теоретические и практические основы для моделирования процессов разложения осадков сточных вод, создали предпосылки для оценки биогаза в качестве энергетического сырья. [3]

Практическое использование биогаза требует определения реального энергетического потенциала, величина которого зависит от множества факторов. Казахстанским очистным сооружениям присущи специфические особенности, связанные с составом осадков сточных вод, технологией складирования, природно-климатическими условиями, что

требует конкретизации накопленных знаний, уточнения математических моделей для прогнозирования эмиссии биогаза и содержания в нем метана, в том числе с использованием лабораторных экспериментов.

Очистная станция предназначена для очистки сточных вод и обработки осадков, сбраживания отходов в метантенках, добычи биогаза и дальнейшего сжигания для получения тепловой и электрической энергии. Она комплектуется из комплексов очистных и вспомогательных сооружений, связанных между собой инженерными коммуникациями в единую технологическую схему [1]. На рисунке 1 приведена технологическая схема до очистки бытовых сточных вод на отдельно стоящих безнапорных фильтрах. Для гашения напора перед сооружениями установлена приемная камера. Из камеры стоки по лоткам поступают на решетки, далее насосами подаются в распределительную камеру песколовок. После песколовок стоки попадают в распределительные чаши первичных отстойников. После отстаивания стоки направляются на биологическую очистку.

Система сконструирована таким образом, что в целом достигается высокий коэффициент полезного действия. Реализованное в ней сочетание электроэнергии, тепла и холода обеспечивает высокий выход электрической энергии в то время, как остаточное тепло используется для всего технологического процесса. Тепловая энергия отработанных газов двигателя используется для получения перегретой воды, а отходящее тепло двигателя — для получения горячей воды.



- 1 – вода после сооружений очистки; 2 – приемный резервуар с насосами; 3 – распределительная камера; 4 – песчаный фильтр;
 5 – сорбционный фильтр; 6 – хлораторная; 7 – промывной насос;
 8 – резервуар чистой воды; 9 – сброс очищенной воды; 10 – сброс грязной промывной воды

Рисунок 3.21 – Технологическая схема очистки сточных вод
 ГКП «Астана Су Арнасы»

Энергия отработанных газов из системы обогрева канала удаления газов отбирается через теплообменник и используется для предварительного подогрева воздуха, участвующего в процессе горения. Отводимое тепло,

кроме этого, в зависимости от места расположения установки, может использоваться и другими потребителями. Получение откорректированных уравнений переменного показателя характера сгорания биогаза m_{var} и продолжительности сгорания φ_z основывалось на результатах предварительно проведенных экспериментальных исследований.

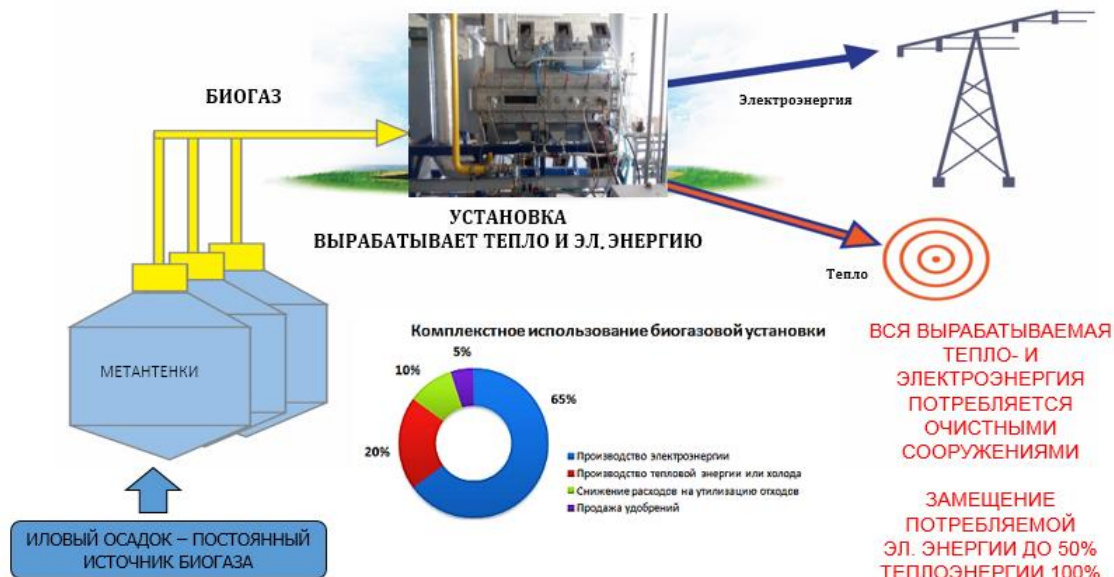


Рисунок 3.22 – Схема производства и использования биогаза на очистном сооружении ГПП «Астана Су Арнасы»

Исследования проводились во всем диапазоне изменения скоростных и нагрузочных режимов работы объекта, а также при разных составах биогаза.

Верификация разработанной математической модели процесса сжигания биогаза осуществлялась сравнением расчетных и экспериментальных характеристик тепловыделения и графиков зависимостей переменного показателя характера сгорания от относительной продолжительности процесса сжигания.

Проверка математической модели осуществлялась на двадцати режимах работы объекта по скоростной и нагрузочной характеристикам в диапазоне изменения воздействующих параметров.

При этом оценивались индикаторные показатели рабочего цикла и эффективные показатели исследуемого объекта управления.

Математическая точность модели позволяет использовать полученные на ее основе данные для оценки чувствительности результатов расчетов с учетом погрешностей измерительных каналов: температуры продуктов сгорания и расходов горючего и окислителя (рисунок 3.23).

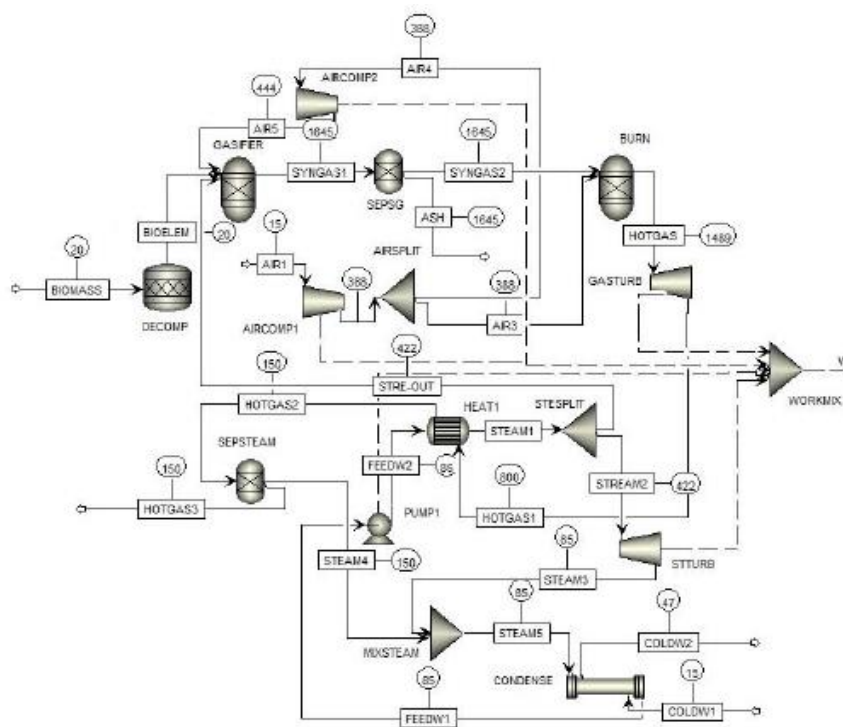


Рисунок 3.23 – Моделирование схемы управления в программе Aspen Plus

Результаты моделирования системы автоматического регулирования работы агрегата подтвердили работоспособность разработанной модели. Полученная модель экстремального регулирования процесса сжигания в топке позволяет улучшить энергетические показатели работы путем поддержания оптимального значения КПД (рисунок 2.24). Доказано работоспособность разработанной имитационной модели экстремального регулирования при изменении сигнала задания, то есть поддержание КПД котла на одном уровне с заданной точностью. Современная технология очистки городских сточных вод связана с потреблением значительных количеств электрической и тепловой энергии. В условиях острого энергетического кризиса проблема снижения указанных энергозатрат за счет использования нетрадиционных источников энергии, имеющих на самих очистных сооружениях и постоянно возобновляющихся, является остро актуальной.

Разработана и верифицирована методика моделирования тепловых процессов в камере сгорания малой мощности с использованием современных пакетов проектирования и инженерного анализа (CAD/CAE – технологий). Решение данной проблемы является одной из важнейших инженерных задач в области расчетов камеры сгорания. Целью моделирования тепловых процессов является наглядное представление принципа работы топочной камеры посредством ее трехмерной модели. Моделирование протекания тепловых процессов внутри осуществляется с помощью программы ANSYS Fluent. КПД зависит от совокупности сложных процессов, а именно: подачи топливных компонентов, подготовки

топливозоздушной смеси, горения биогаза и процесса выпуска продуктов сгорания и т.д. Исследования, проводимые с помощью газодинамического моделирования на первых этапах проектирования, помогают оптимизировать каждый из этих процессов. Сложности процесса моделирования связаны с построением модели расчетной сетки, которая должна двигаться в полном соответствии с тем движением, которое совершается внутри топочной камеры [8]. Данная методика может использоваться для получения полей распределения основных термодинамических параметров в цилиндрической группе с помощью программы ANSYS Fluent, а также позволяет получить навыки работы с движущимися расчетными сетками.

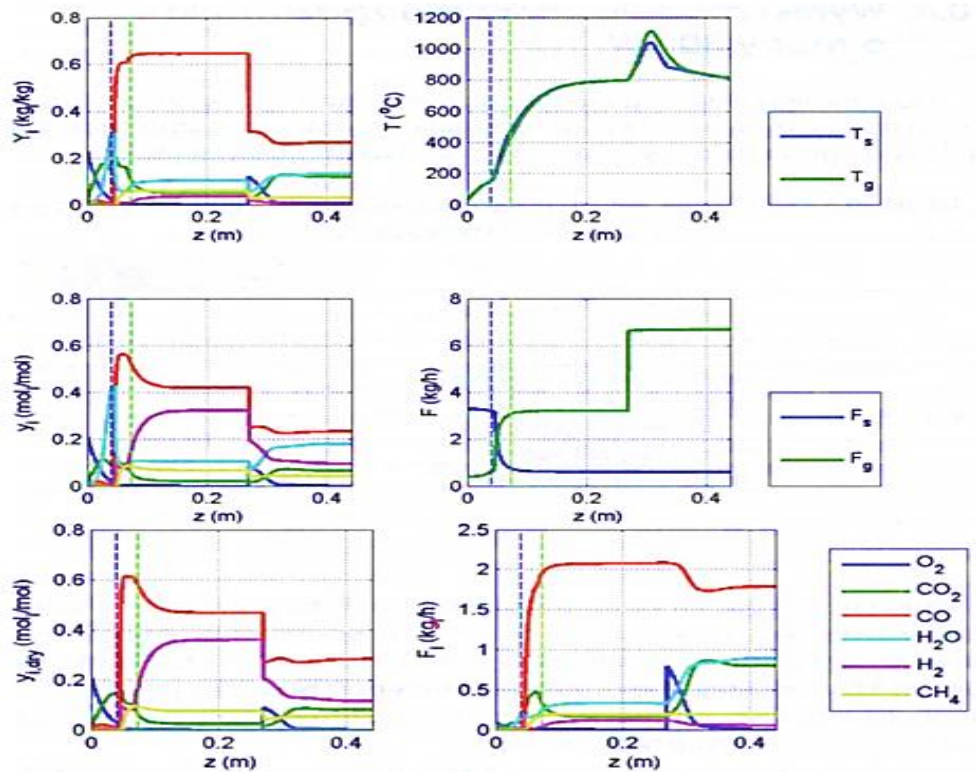


Рисунок 3.24 – Расчетные кривые, характеризующие стационарное состояние процесса газификации: а - температурные профили, б - состав биогаза (% об.), в - степень конверсии биогаза, г - источники теплоты (в % от теплотворной способности биогаза). По оси абсцисс - расстояние от фурм

В работе как объект управления рассматривалась установка по совместному сжиганию биогаза и природного биогаза. Предложены математическая модель и метод, позволяющие в процессе сжигания такого биогаза определить его состав и обеспечить оптимальные параметры процесса сжигания. Разработаны математические модели процесса адсорбции биогаза и природного биогаза.

3.3 Методика экспериментальных исследований системы управления и диагностики процесса сжигания биогаза на очистных сооружениях

Оптические методы исследований являются одними из первых методов исследования процесса сгорания биогаза.

Изменяя конфигурацию камеры сгорания, состав биогаза и другие параметры исследователь непосредственно наблюдал за характером изменения процесса сгорания. В настоящее время в качестве огнеупорного прозрачного материала чаще используется специальное органическое стекло, а в качестве приемников излучения применяются фотоэлектрические датчики [6].

Спектральный состав излучения испускаемого, поглощаемого или рассеиваемого в пламени несет информацию о протекающих химических реакциях, позволяет определить состав и количество промежуточных и конечных продуктов горения, их температуру, давление и пространственное распределение [7-9].

Для исследования процессов горения в цилиндрах ДВС применяются следующие оптические методы: высокоскоростная фото-регистрация, методы, основанные на просвечивании пламен [10-17], методы основанные на рассеивании излучения при прохождении через пламя [18-25], спектроскопия пламен (УФ-спектроскопия, ИК-спектроскопия пламен) [26-39], пирометрия, теневой метод, метод Теплера (шлирен-метод), интерференционный метод, методы зондирования с применением лазерных анемометров, методы измерения скоростей основанные на использовании эффекта Доплера.

Наибольшее распространение получили пирометрические методы. В них используется закон Стефана - Больцмана для энергии полного излучения нагретого тела (3.2):

$$E_T = S\epsilon_T\sigma T^4, \quad (1.1)$$

Пирометрический метод применим для диагностики БГУ. Оптические методы являются бесконтактными, малоинерционными, высокочувствительными и высокоинформативными. В тоже время необходимость применения дорогостоящих оптических элементов, а также их загрязнение в ходе длительной работы, не позволяют положить метод в основу работы. Сигнал чувствительного элемента оптической системы является сложно интерпретируемым, для интерпретации требуется привлечение больших вычислительных мощностей. В силу данных обстоятельств широкое применение методы оптического контроля сгорания получили только при разработке и наладке новых моделей.

3.4 Тарировка датчиков и измерение параметров процесса средствами автоматизации

В результате анаэробной очистки органические соединения разлагаются до метана и углекислого биогаза (биогаз). Биогаз, содержащий 75-80% метана безопасно сжигается на факельной установке ТЭЦ (котельной). Существует возможность использования биогаза для получения пара, горячей воды или электроэнергии. Биогаз из пункта управления газгольдерами направляется в помещение компрессорной, где давление биогаза повышается до 5 кгс/см². В результате компримирования биогаза его температура увеличивается до 100°С. Так как температура биогаза на входе в электроагрегат не должна быть выше 25°С, то после компрессоров предусмотрена установка для охлаждения биогаза, состоящая из теплообменников. Из них охлажденный компримированный биогаз подается в двигатель-генератор, который вырабатывает трехфазный ток напряжением 6,3 кВ, частотой 50 Гц, мощностью не менее 1000 кВт, подаваемый через распределительное устройство 6,3 кВ потребителям электроэнергии станции биологической очистки. Утилизация сбросного тепла электроагрегата осуществляется следующим образом. Вода после охлаждения двигателя догревается в теплообменниках «КС» отходящими от двигателя выхлопными биогазами и подается в теплообменники, где происходит подогрев осадка, загружаемого в метантенки. Охлажденная в этих теплообменниках вода возвращается в систему двигателя [3]. Теплообменники «КС» установлены вблизи глушителя выпуска выхлопных газов двигателя. В теплообменники «КС» подается вода из системы охлаждения двигателя с температурой 58,5°С, а отводится от теплообменников с температурой 65,5°С и насосами подается в теплообменники для подогрева осадка, подаваемого в метантенки, до температуры 44°С. К теплообменникам «КС» подводятся выхлопные газы температурой 300°С. Охлажденные выхлопные газы (120°С) выводятся в атмосферу через глушитель выхлопа. Теплообменники для подогрева осадка и насосы непрерывной загрузки осадка в метантенки должны быть установлены вблизи существующих метантенков. Таким образом, анаэробное сбраживание осадков городских сточных вод с последующим использованием образующегося биогаза в качестве моторного биогаза для двигатель-генераторов позволит решить комплекс важнейших задач, а именно: технологических, обеспечивающих получение стабилизированного незагнивающего осадка; энергетических, дающих возможность компенсировать значительную часть электрической и тепловой энергии, расходуемой на работу воздуходувных машин и технологический нагрев осадка, подаваемого на сбраживание в метантенки; экологических, снижающих загрязнение атмосферы метаном и ликвидирующих дурнопахнущие запахи, выделяющиеся при перегнивании нестабилизированных осадков сточных вод. Смесь биогаза с воздухом может быть взрывоопасной. Но взрывоопасна она в гораздо более узком диапазоне соотношений воздуха и биогаза, чем для смеси природного биогаза и

воздуха. Поэтому вероятность взрыва смеси биогаза с воздухом при утечке намного меньше, чем при утечках природного биогаза. Средняя плотность биогаза составляет примерно 1,13 кг/м³, то есть, в среднем он легче воздуха, плотность которого при комнатной температуре составляет около 1,2 кг/м³. Это значит, что при утечке биогаз будет улетучиваться вверх. Но биогаз также будет расслаиваться. Поэтому если биогаз улетучивается в помещении без сквозняков, то возле пола скопится углекислый газ, а возле потолка – метан. Поэтому применение для биогаза – сжигание для получения тепловой энергии. Сжигание такое производится в обычных газовых котлах или горелках, которые используются для сжигания природного биогаза или пропан-бутана. Но, как было сказано, для оптимального сжигания биогаза желательно регулировать состав газовой-воздушной смеси, если образование такой смеси перед сжиганием предусмотрено конструкцией горелки. Однако, если горелки рассчитаны и на природный газ и на пропан-бутан, это обозначает, что такая регулировка возможна, либо не нужна, поскольку для природного биогаза тоже нужна разная дозировка воздуха. Теплотворную способность биогаза можно выразить в калориях или джоулях. Более понятным будет сравнение биогаза по теплотворной способности с природным газом. И там, и там сгорает метан, содержащийся в этих биогазах. Значит энергия, выделяемая при сгорании этих газов, пропорциональна количеству содержащегося в них метана. В природном газе содержится 92-98% метана, а в биогазе – 55-75%. Возьмем средние величины – 95% и 65%. Соотношение метана в этих биогазах получается $65/95=0,68$. Это примерно две трети. Значит, для выполнения одной и той же тепловой работы (нагрева помещения, приготовления пищи) биогаза надо в полтора раза больше, чем природного биогаза.

Контроль основных параметров процесса сжигания биогаза в экспериментальном стенде осуществлялся при помощи специальных приборов и датчиков, регистрирующих основные параметры процесса. В разработанном экспериментальном стенде контролируемые и измеряемые параметрами являются: расход и температура низкопотенциального пара, получаемого в парогенераторе; расход горючей смеси, получаемой в электролизере; температура перегретого пара, образованного смешением низкопотенциального пара и высокопотенциального пара; температура газопаровой смеси в слое материала и после него; количество получаемого биогаза; объем образующегося конденсата; объемная концентрация компонентов биогаза (H₂, CO, CO₂, O₂, CH₄) в газовой смеси. Измерение расхода низкоэнтальпийного пара из парогенератора осуществлялось при помощи сужающего устройства и дифференциального датчика давления, имеющего линейную зависимость выходного напряжения от расхода в диапазоне температур окружающей среды 0...85°С. Паровая магистраль имела электрический обогрев по всей длине. В камеру смешения рабочего участка поступал перегретый пар с температурой 125-135°С. Для определения зависимости выходного напряжения дифференциального датчика давления от расхода низкопотенциального пара была произведена

тарировка датчика весовым методом. Массовый расход воды пересчитывался на объемный расход пара с учетом известных физических характеристик пара и жидкости. Контроль температуры водяного пара в паровой магистрали осуществлялся при помощи стандартной хромель-копелевой термопары. Для существующего экспериментального стенда, была произведена тарировка электролизной установки «Лига-02» с целью определения расхода кислородно-водородной смеси. Тарировка осуществлялась при помощи газового барабанного счетчика ГСБ-400 (внесен в государственный реестр средств измерений) следующим образом. На электролизной установке устанавливался заданный расход горючей смеси. Полученная смесь газов направлялась в газовый счетчик, для которого фиксировалось количество проходящего через него биогаза и время, за которое эта смесь прошла. Далее производили пересчет на объемный получаемый водяной пар в парогенераторе поступал в паровую магистраль, затем после дросселирования поступал в теплообменник, где конденсировался. Далее полученная вода собиралась в мерном цилиндре. Фиксировался объем полученной жидкости и время, за которое он образовался. Расход полученной смеси. Пределы измерения барабанного счетчика (до 5 л/мин) по газу соответствовали максимальному расходу электролизной установки. В рабочем участке предусмотрено наличие трех термопар, контролирующих температуру до слоя исходного углеродсодержащего материала, в слое и после него. Для контроля и измерения температуры использовались хромель-алюмелевые термопары, подключенные к автоматизированной системе сбора и обработки информации. Для проверки материального баланса процесса газификации производились измерения количества получаемого конденсата и количества получаемого биогаза. Измерение объема конденсата производилось следующим образом. Перед началом экспериментов в сборник конденсата заливался определенный объем жидкости, позволявший создать гидрозатвор, являющийся индикатором наличия биогаза при барботаже. Объем жидкости отмерялся мерным цилиндром и фиксировался. По окончании экспериментальных исследований, конденсат сливался в мерный цилиндр и фиксировался его объем. Затем по разности начального и конечного значений определяется количество образованного конденсата. Измерение количества получаемого биогаза осуществлялось при помощи двух измерительных устройств: газового барабанного счетчика (ГСБ-400) и перистальтического насоса Zalimp pp 1-05. Перистальтический насос с регулируемым расходом отбирал из газовой магистрали часть получаемого биогаза и направлял его на анализ в газоанализатор «Тест-1», измеряющий объемную концентрацию CO, H₂, CO₂, O₂, CH₄ в потоке газовой смеси. Другая часть получаемого биогаза направлялась в газовый барабанный счетчик, который фиксировал объем биогаза прошедший через него. Для разработанного экспериментального стенда реализован автоматизированный сбор и обработка следующих экспериментальных данных:

1. Контроль расхода низкопотенциального пара производился на базе вторичного прибора дифференциального датчика давления (mrx5100dp).

Выходной сигнал (мВ) с дифференциального датчика давления поступал на аналоговый модуль ввода контроллера, где обрабатывался с учетом полученной ранее зависимости расхода низкопотенциального водяного пара от выходного напряжения;

2. Измерение температуры хромель-алюмелевыми термопарами, подключенными к аналоговому модулю ввода контроллера;

3. Измерение концентраций компонентов биогаза в смеси газоанализатором Тест-1;

4. Остальные параметры процесса газификации (температура низкопотенциального пара, количество получаемого биогаза и конденсата) регистрировались в журнале по текущим значениям фиксируемых величин.

КПД газовых котлов обычно составляет 90-95%. При работе газового котла на биогазе КПД может получиться меньшим из-за неточных настроек газо-воздушной смеси. Еще одним способом получения тепла является когенерация. Когенераторы – устройства для получения из биогаза (и не только) одновременно нескольких видов энергии, обычно электрической и тепловой. Бывают поршневые и газотурбинные когенераторы. В первом случае работает классический двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием, топливом для которого служит биогаз. Иногда это может быть дизельный двигатель, работающий на смеси солярки и биогаза. Тепловая энергия снимается с такого когенератора в виде горячей воды температурой около 750С, циркулирующей через теплообменник когенератора и нагревающейся там. А теплообменник, в свою очередь, может греться теплоносителем, охлаждающим рубашку двигателя, маслом картера и выхлопными биогазами. Тепловой КПД при этом может достигать 35-40%. Это неплохо, учитывая еще электрический КПД 30-33%. Во втором случае работает газовая турбина на биогазе. Тепловая энергия снимается тоже в виде горячей воды, циркулирующей через теплообменник. Таким образом, утилизация тепла, выработанного из биогаза, зависит от вида нагретого рабочего тела. Горячую воду направляют циркулировать по различным трубам и батареям отопления. Попросту говоря, применение биогаза для получения тепловой энергии ничем кардинально не отличается от применения для этих же целей природного биогаза или сжиженного пропан-бутана. Важным преимуществом такой технологии является также возможность обеспечения автономным энергообеспечением станций биологической очистки при аварийных режимах в энергосетях. Таким образом, предложенный комплекс сооружений по получению и утилизации биогаза позволяет решить проблему снижения энергозатрат при очистке сточных вод за счет использования постоянно возобновляющихся нетрадиционных источников энергии, имеющих на очистных сооружениях [4]. Управление сжиганием горючего неизвестной теплотворной способности может быть обеспечено экстремальным регулятором. При заданном расходе горючего путем изменения расхода окислителя (воздуха) обеспечивается стехиометрическое соотношение, что соответствует максимальной температуре продуктов сгорания. Максимальная температура достигается

при коэффициенте избытка воздуха α , который равен 1,0. Максимальная температура достигается при коэффициенте избытка воздуха α , который равен 1,0. Альтернативой такому методу может служить определение состава биогаза неизвестной теплотворной способности с помощью газоанализатора. Такой метод обладает рядом недостатков: ресурсоемкий, громоздкий, имеет большое время инерции и, как следствие, запаздывание. Поэтому такой метод трудно интегрируется в автоматизированную систему управления. Для газоанализаторов требуются данные по перечню газов в смеси. Применение газоаналитических приборов усложняется тем, что такие газы содержат в своем составе нежелательные компоненты, которые приводят к ускоренному износу первичных приборов и выходу их из строя.

3.5 Выводы по главе

Разработанный экспериментальный стенд позволяет исследовать процесс сжигания биогаза.

Использованные средства по автоматизации сбора экспериментальных данных обеспечивают непрерывный контроль и регистрацию основных параметров процесса. Использованные стандартные методики измерения параметров процесса и свойств исходных материалов, а также применяемые приборы для этого обеспечивают необходимую достоверность получаемых результатов.

Потери тепла при ферментации лимитируют степень эффективности всего процесса, КПД которого составляет 50-60%. Наибольшее практическое применение нашли два температурных режима, при которых обычно осуществляется процесс сбраживания: мезофильный и термофильный. За рубежом в основном применяется менее энергоемкий мезофильный режим, хотя термофильный выглядит предпочтительнее с точки зрения скорости прохождения процесса и гигиенических свойств сброженного остатка – эффлюента (отсутствия контаминирующих и токсичных веществ), который может использоваться для получения фосфорных и азотных биоудобрений. В настоящее время разработаны и находят все более широкое применение специально разработанные биореакторы для вторичной переработки метанобразующими бактериями отработанных технологических растворов и сточных вод (так называемые “биореакторы для анаэробной биологической очистки сточных вод”).

В работе предложен новый тип высокоэффективных экологически чистых энергоустановок небольшой мощности, использующих в качестве биогаза сочетание таких возобновляемых видов энергоносителей, как биогаз и природный газ. Этот подход базируется на эффективном методе сжигания биогаза с использованием технологии «быстрого реактора», а также новой технологии экологически чистого сжигания низкокалорийных видов биогаза в объемных матричных горелочных устройствах.

Окисление в суспензии происходит в волне горения в высокотемпературном реакторе при давлениях до 100 атм и температурах 2 500 - 3 000 °С с отдельной генерацией водорода и энергетического пара. На первой стадии происходит горение суспензии стехиометрического состава с образованием водорода. На второй стадии после отбора водорода в реактор подается дополнительное количество воды, превращающейся при взаимодействии с газом в высокопотенциальный пар. После удаления оксида биогаза процесс может быть повторен. При этом удается избежать попадания мелкодисперсных частиц в энергоустановку. В качестве устройства для сжигания низкокалорийного биоброгаза используется объемная матричная горелка. Возможность устойчивого горения низкокалорийного биоброгаза в такой гибридной энергоустановке обеспечивается как особенностями горелочного устройства на основе объемной матрицы, так и подачей в него водорода, генерируемого при горении суспензии. Таким образом, данная комбинированная энергоустановка позволяет совместить процессы горения двух различных типов возобновляемых энергоносителей в единый энергетический процесс, в котором образующийся при окислении водород поддерживает устойчивое горение в матричном горелочном устройстве низкокалорийного биоброгаза, обеспечивая тем самым экологически чистое производство энергии из возобновляемых энергоносителей для распределенной энергетики.

В результате проведенных во втором разделе исследований можно сделать следующие основные выводы:

1 Для нормального функционирования системы оптимального управления и диагностики (средний уровень иерархии) необходимо согласовать её работу с программным комплексом АСУТП нижнего уровня.

2 Информация для среднего уровня АСУТП поступает от датчиков нижнего уровня, а найденные оптимальные режимы ведения процессов реализуются с помощью контроллеров управления нижнего уровня (см. рисунок 2.1).

3 Однако для реализации алгоритмов управления и диагностики требуется обеспечить соответствующие подсистемы среднего уровня необходимой для них информацией.

4 Определён перечень необходимой для подсистем управления и диагностики информации, предложены алгоритмы её обработки.

5 Разработано программное и техническое обеспечения подсистемы контроля.

6 Результаты представленных выше исследований опубликованы нами [66, 67,68] работе.

4 СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ БИОГАЗА

4.1 Автоматизация процессов сжигания биогаза

Оптимизация процессов горения (поддержание оптимального соотношения топливо-воздух) приведёт к снижению ПДВ, снимается проблема перерасхода биогаза, повышается безопасность процесса выработки тепловой энергии.

Существует два способа решения данной проблемы: полная автоматизация процесса выработки тепловой энергии, на источниках, включая насосное и вспомогательное оборудование (АСУ ТП) или частичная (только котлоагрегаты) автоматизация (АСУ ТП). На малых котельных можно рекомендовать установку блочных горелочных устройств с автоматическим регулированием процесса сжигания биогаза.

Всё управление технологическими процессами на источниках происходит автоматически при помощи программируемого устройства контроллера (нижний уровень АСУ ТП), контроль над технологическим процессом осуществляется обслуживающим персоналом с пульта управления через персональный компьютер с мнемосхемой управления процессом (верхний уровень АСУ ТП). Обслуживающий персонал только даёт команды на «пуск» или «стоп» того или иного оборудования или вносит свои корректировки в технологический процесс работы источника тепловой энергии. Также используются автоматические корректирующие газоанализаторы.

Оптимизация процессов горения может осуществляться в котельных на любом виде биогаза, но наиболее эффективна при новом строительстве или модернизации котельной. Большинство современных котлов выпускается с системами автоматического управления. При использовании нескольких котлов в котельной, для выбора оптимальной загрузки котлоагрегатов требуется выполнять проект по автоматизации.

АСУ ТП позволяет решать следующие задачи:

- автоматическая подготовка котлоагрегата к розжигу;
- автоматический розжиг горелок котла с переходом в режим минимальной мощности;
- управление нагрузкой и оптимизация соотношения топливо-воздух каждой из горелок котла;
- управление тепловым режимом котла;
- регулирование температуры сетевой воды на выходе из котельной в зависимости от температуры наружного воздуха;
- защита, сигнализация и блокировка работы котла при неисправностях;
- управление с операторских станций технологическим оборудованием (дымосос, вентиляторы, задвижки);

- обеспечение оперативно-технологического персонала информацией о параметрах теплового режима и состоянии технологического оборудования;

- регистрация в режиме реального времени параметров технологического процесса и действий оперативного персонала;

- протоколирование и архивирование информации;

- представление архивной информации и результатов расчетов.

Управляющие и информационные функции системы реализуются соответствующими подсистемами и схемами, выделенными по функциональным признакам:

1. Формулировка проблемы по рассматриваемому методу (технологии) повышения энергоэффективности; прогноз перерасхода энергоресурсов, или описание других возможных последствий в масштабах страны при сохранении существующего положения. Отсутствие автоматизации процессов горения (поддержание оптимального соотношения топливо-воздух) приводит к перерасходу биогаза и повышенным выбросам вредных веществ.

2. Наличие методов, способов, технологий и т.п. для решения обозначенной проблемы. Существует два способа решения данной проблемы: полная автоматизация процесса выработки тепловой энергии, на источниках, включая насосное и вспомогательное оборудование (АСУ ТП) или частичная (только котлоагрегаты) автоматизация (АСУ ТП). На малых котельных можно рекомендовать установку блочных горелочных устройств с автоматическим регулированием процесса сжигания биогаза.

3. Краткое описание предлагаемого метода, его новизна и информированность о нём, наличие программ развития; результат при массовом внедрении в масштабах страны. Всё управление технологическими процессами на источниках происходит автоматически при помощи программируемого устройства контроллера (нижний уровень АСУ ТП), контроль над технологическим процессом осуществляется обслуживающим персоналом с пульта управления через персональный компьютер с мнемосхемой управления процессом (верхний уровень АСУ ТП). Обслуживающий персонал только даёт команды на «пуск» или «стоп» того или иного оборудования или вносит свои корректировки в технологический процесс работы источника тепловой энергии. Также используются автоматические корректирующие газоанализаторы.

4. Прогноз эффективности метода в перспективе с учётом:

- роста цен на энергоресурсы;

- роста благосостояния населения;

- введением новых экологических требований;

- других факторов.

Внедрение данных методов позволит сэкономить до 5% используемого биогаза.

5. Перечень групп абонентов и объектов, где возможно применение данной технологии с максимальной эффективностью; необходимость проведения дополнительных исследований для расширения перечня. Данные

методы могут быть применимы на любых объектах коммунальной теплоэнергетики.

6. Обозначить причины, по которым предлагаемые энергоэффективные технологии не применяются в массовом масштабе; наметить план действий, для снятия существующих барьеров. Массовое применение данного метода в Российской Федерации не производится как правило по трем причинам:

- Физически и морально устаревшее основное оборудование;
- Наличие технических ограничений и сложностей при внедрении метода;
- Отсутствие финансирования.

7. Наличие технических и других ограничений применения метода на различных объектах; при отсутствии сведений по возможным ограничениям необходимо их определить проведением испытаний. Причина, по которой данный метод не может быть внедрён это моральное устаревание и техническая изношенность оборудования на теплоисточнике. В этом случае целесообразней произвести полную реконструкцию оборудования источника теплоснабжения.

8. Необходимость проведения НИОКР и дополнительных испытаний; темы и цели работ. Необходимости проведения НИОКР и дополнительных испытаний в рамках рассматриваемого мероприятия нет.

9. Существующие меры поощрения, принуждения, стимулирования для внедрения предлагаемого метода и необходимость их совершенствования. Существующие меры поощрения и принуждения внедрения данного метода отсутствуют. Стимулировать внедрение данного метода может заинтересованность в снижении потребления биогаза и выбросов в атмосферу.

10. Необходимость разработки новых или изменения существующих законов и нормативно-правовых актов. Возможно, необходимо принятие правовых актов, запрещающих ввод в эксплуатацию топливоиспользующих установок без применения АСУ ТП.

11. Наличие постановлений, правил, инструкций, нормативов, требований, запретительных мер и других документов, регламентирующих применение данного метода и обязательных для исполнения; необходимость внесения в них изменений или необходимость изменения самих принципов формирования этих документов; наличие ранее существовавших нормативных документов, регламентов и потребность в их восстановлении

Применение данного метода в нормативно-правовой базе отражено только в рамках промышленной безопасности.

12. Наличие внедрённых пилотных проектов, анализ их реальной эффективности, выявленные недостатки и предложения по совершенствованию технологии с учётом накопленного опыта

В настоящее время существует несколько проектов которые уже реализованы как в плане автоматизации процесса сжигания биогаза на существующих источниках, так и постройка новых источников с полной автоматизацией технологического процесса (АСУ ТП).

13. Возможность влияния на другие процессы при массовом внедрении данной технологии (изменение экологической обстановки, возможное влияние на здоровье людей, повышение надёжности энергоснабжения, изменение суточных или сезонных графиков загрузки энергетического оборудования, изменение экономических показателей выработки и передачи энергии и т.п.)

Внедрение данных методов позволяет улучшить экономические показатели выработки и передачи тепловой энергии, повысить надёжность и безопасность работы теплоисточника, а так как автоматизация процесса сжигания ведёт к снижению вредных выбросов в атмосферу то, безусловно, положительное влияние данного метода на экологическую обстановку.

14. Наличие и достаточность производственных мощностей в Казахстане и других странах для массового внедрения метода

В Казахстане и других странах достаточно производственных мощностей для массового внедрения данных методов.

15. Необходимость специальной подготовки квалифицированных кадров для эксплуатации внедряемой технологии и развития производства

Есть необходимость в профильном образовании и дополнительном узкопрофильном обучении специалистов для эксплуатации внедряемой технологии и развития данных технологий.

16. Предполагаемые способы внедрения:

- 1) коммерческое финансирование (при окупаемости затрат);
- 2) конкурс на осуществление инвестиционных проектов, разработанных в результате выполнения работ по энергетическому планированию развития региона, города, поселения;
- 3) бюджетное финансирование для эффективных энергосберегающих проектов с большими сроками окупаемости;
- 4) введение запретов и обязательных требований по применению, надзор за их соблюдением;
- 5) другие предложения.

4.2 Существующая практика диагностики процесса сжигания биогаза

4.2.1 Методы диагностики и их возможности

В процессе диагностирования авиационной техники при ее эксплуатации по состоянию можно выделить три основных этапа (рисунок 4.1.). Первый из них - оперативная диагностика, задача которой заключается в определении, можно ли продолжать нормальную эксплуатацию данного объекта («система исправна») или этот объект должен быть подвергнут до очередного простоя каким-либо процедурам обслуживания («система не - исправна»).

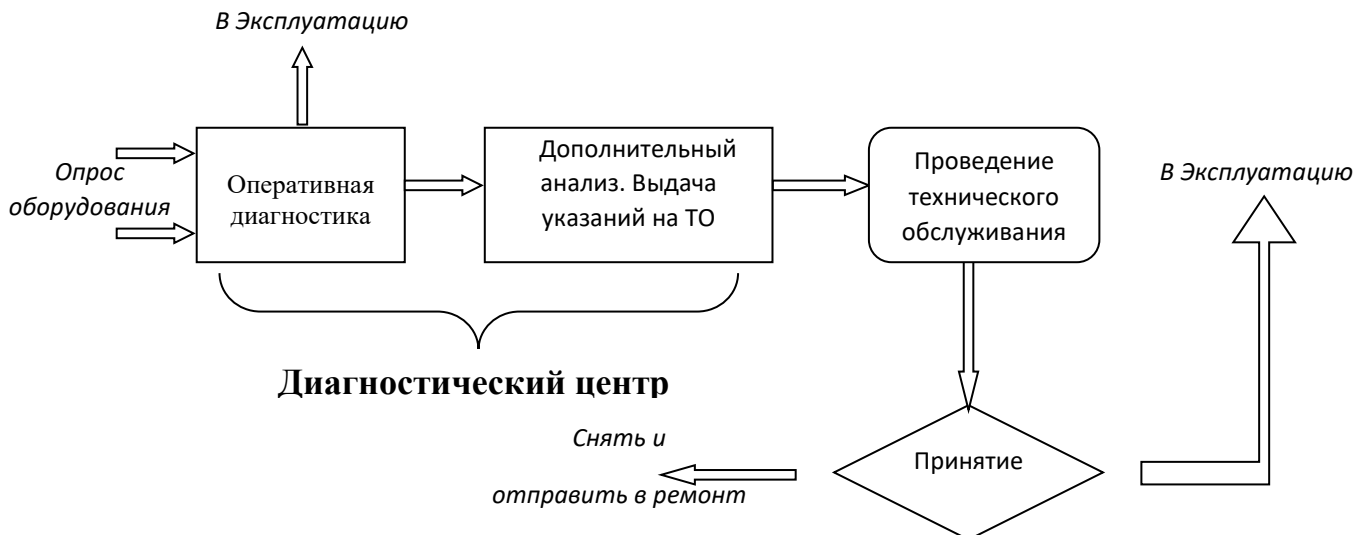


Рисунок 4.1 – Общая схема эксплуатационной диагностики

Такая задача в том или ином объеме для всех наблюдаемых объектов должна решаться, как правило, в конце каждого дня, «на завтра». Оперативность достигается надлежащей организацией потока информации и применением компьютерной техники для ее обработки.

Второй этап - дополнительный диагностический анализ, результатом которого является перечень процедур обслуживания элементов и систем, признанных неисправными, без снятия их с топочной камеры.

Третий этап — выполнение указанных процедур обслуживания, после чего принимается решение о дальнейшей эксплуатации объекта или снятии его с работы и направлении в ремонт.

В настоящее время широко распространены и значительно развиты методы и средства диагностики, основанные на различных физических принципах, позволяющие охватить контролем наиболее ответственные узлы, агрегаты и системы. В качестве примера остановимся на методах диагностики газовых горелок (рисунок 4.2), являющихся наиболее ответственными объектами. Условно их можно разделить на методы прямых измерений структурных диагностических параметров, определяющих техническое состояние горелок, и методы безразборной (оперативной) диагностики по косвенным параметрам. В качестве косвенных используют диагностические параметры, содержащие информацию об изменении структурных характеристик состояния горелок. Эти методы [23] позволяют получить достаточно точные результаты оценки, например, износа отдельных элементов. Однако их применение затруднено низкой технологичностью горелок и в большинстве случаев вызывает необходимость разборки топочной камеры. Это снижает достоверность контроля, поскольку состояние любого технического объекта после разборки не адекватно его состоянию до этих процедур. Необходимо отметить также, что в процессе эксплуатации разборка горелок в большинстве случаев не представляется возможной.

Методы оперативной диагностики по косвенным параметрам лишены перечисленных недостатков, хотя в настоящее время они не всегда позволяют локализовать место дефекта. Использование методов измерений структурных характеристик может оказаться необходимым в случае невозможности применения методов оперативной диагностики или для уточнения результатов контроля.

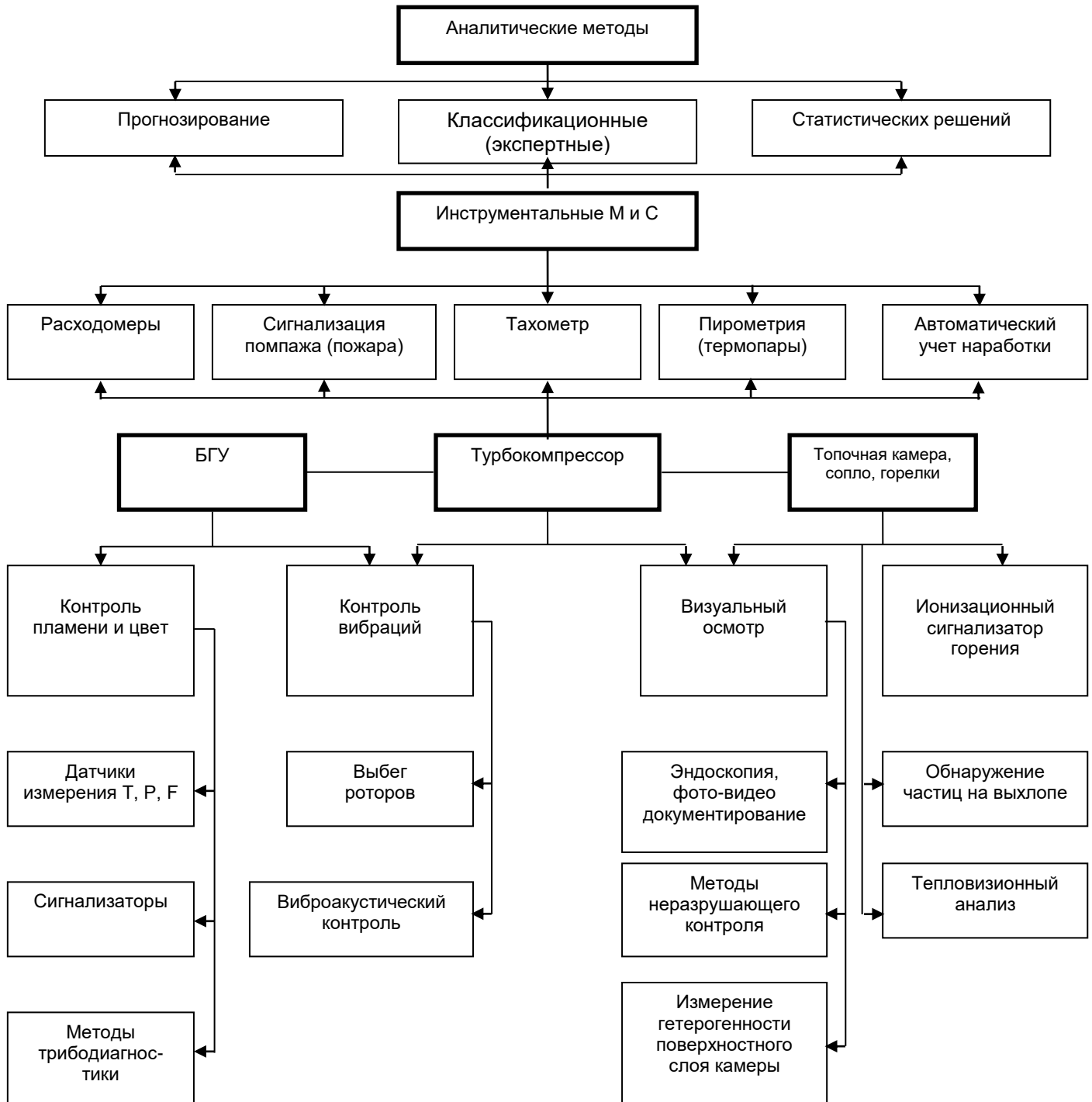


Рисунок 4.2 – Методы и средства диагностики БГУ

К основным из используемых и перспективных методов оперативной диагностики БГУ относят:

- диагностику по результатам анализа термогазодинамических параметров;
- диагностику по тепловым параметрам;
- по виброакустическим параметрам;
- трибодиагностику;
- оптико-визуальную диагностику;
- анализ продуктов сгорания;
- измерение выбега ротора.

Применение каждого из методов осуществляется с помощью диагностического оборудования. Так, например, для анализа состава примесей в газе используют различные по сложности и принципам действия средства - от простейших магнитных пробок до сложных спектроанализаторов.

Диагностика неисправностей по тепловым параметрам предусматривает получение информации как от термодатчиков (термопреобразователей), так и от фотоэлектрических пирометров и тепловизоров, в последнее время успешно внедряемых в диагностической практике.

Контроль виброакустических параметров предполагает применение различных типов вибропреобразователей и сигнальной аппаратуры. Разрабатываются методы оценки напряженности конструктивных элементов с помощью голографических установок (создание т.н. «вибропортретов») [21].

Подчас обнаружение неисправностей упомянутыми методами требует создания достаточно сложного математического аппарата, позволяющего идентифицировать признаки с конкретными дефектами.

Относительное многообразие методов объясняется тем, что ни один из них не позволяет учесть все требования, предъявляемые к формированию диагноза со 100% достоверностью, поскольку они несут специфическую информацию *разной ценности*. Ни один из методов не позволяет оценить состояние БГУ с достаточной степенью детализации. С помощью сочетания ряда методов можно осуществить более глубокий контроль, однако это часто требует специальных условий и продолжительного времени.

Итак, для диагностики БГУ целесообразно использовать параметры, обладающие максимальной информативностью, дополняющие и уточняющие друг друга. Таким образом, задача оценки информационного потенциала параметров, используемых для целей диагностики БГУ, является на сегодняшний день очень актуальной.

4.2.2 Анализ методов технической диагностики БГУ с позиций информативности

Сравнительный анализ информативности методов диагностики БГУ, представленный ниже, основан на общепризнанном подходе, выдвинутом М.Бонгардом о величине функции вероятности приближения к цели («адресу» дефекта) при регистрации значений параметра [5]. Правда, каких-либо количественных характеристик упомянутой функции в этой главе пособия не приводится. Эта взаимосвязь (информативность – метод) подтверждена практикой эксплуатации, где косвенным критерием информативности служит безошибочность диагноза при проявлении признака, регистрируемого данным методом.

Тепловые методы и их эффективность. Одними из наиболее информативных методов оценки состояния БГУ являются методы контроля тепловых параметров [9]. В настоящее время их использование в полете ограничивается контролем температуры в различных точках, например, проточной части двигателя, и сравнением ее с допустимыми значениями. Большое развитие тепловые методы нашли при стендовых испытаниях горелок. Основным достоинством их является возможность получения информации без существенной разборки авиадвигателя. При термометрировании рабочих лопаток турбины на них устанавливают термопары и общий токосъемник. Это влечет за собой неудобства для формирования диагноза вследствие ограниченного количества точек контроля.

Методы бесконтактного термометрирования обладают некоторыми преимуществами [33]. Объектами бесконтактной термометрической диагностики могут являться как двигатель в целом, так и отдельные его агрегаты, и детали. Система контроля преобразует инфракрасное изображение в видимое так, чтобы распределение видимой яркости было пропорционально инфракрасной яркости объекта, т.е. пространственному распределению температуры $T(y,z)$ или коэффициента излучения $\varepsilon(y,z)$. Это преобразование обычно осуществляют путем последовательного анализа различных точек объекта элементарным радиометрическим полем зрения, образующем на теле объекта площадь S . Мгновенное поле выбирают малым и быстро перемещают его по объекту. Распределение инфракрасной яркости $L(y,z)$ объекта при сканировании его площадкой S формирует в приемнике сигнал $S(t)$, амплитуда которого изменяется во времени в соответствии с изменением визируемой яркости. Сигнал $S(t)$ после усиления преобразуется в видимый сигнал. Воспроизведение инфракрасного изображения путем строчного анализа позволяет получить тепловую карту наблюдаемой зоны (связь между теплообменом в среде и ее строением).

Одним из информативных методов обнаружения дефектов труднодоступных узлов является метод инфракрасной термографии [9]. Его разделяют на активный и пассивный методы. Активный предполагает предварительный нагрев объекта. Наблюдения тепловых явлений на по-

верхности в результате распространения тепла по материалу могут дать информацию о его внутренней структуре. Используемый при этом источник тепла служит для создания в материале т.н. термоудара, а приемная термографическая система анализирует рассеяние и распространение тепловых волн.

Ограничения сферы применения метода связаны с тем, что наблюдения могут проводиться только в переходном режиме, когда определяются относительные скорости распространения теплового потока внутри материала. По достижении температурного равновесия тепловые контрасты уже не наблюдаются. К тому же такие объекты имеют большую контролируемую поверхность, и осуществить их равномерный нагрев представляется затруднительным. Это касается и других функциональных систем – гидравлической, топливной и др. Сложности в применении метода объясняются тем, что он зависит от большого числа параметров, которые должны быть учтены для каждого применения. К ним относятся:

- коэффициент излучения испытуемого материала;
- тип инфракрасного приемного устройства;
- поле зрения и размещение приемного устройства;
- скорость перемещения приемного устройства относительно объекта;
- природа и интенсивность нагрева (с помощью обычных источников или лазеров);
- фокусировка теплового потока;
- расстояние между источником тепла и испытуемым объектом;
- расстояние между источником тепла и инфракрасной приемной системой.

Существенным недостатком активного метода при оценке состояния функциональных систем можно считать возможность контроля только тех деталей, которые находятся на поверхности (корпусе). Доступ к остальным агрегатам требует их детальной разборки.

Более широкими возможностями в этом отношении обладает пассивный метод. Он заключается в использовании естественного тепла, выделяющегося в процессе функционирования БГУ, и в наблюдении с помощью пассивного приемного инфракрасного устройства распределения температур во времени и в пространстве. Сравнение с идеальной моделью рассеяния тепла позволяет определить все отклонения температуры, важные для процесса функционирования объекта. Разность температур отдельных зон характеризует условия теплоотвода от них, тем самым, физико-химический состав, толщину, структуру, наличие дефектов и т.д. Пассивный метод представляется более перспективным и может быть использован для определения наиболее информативных точек на поверхности БГУ с целью установки в этих зонах встроенной системы контроля (термодатчиков).

Тепловая диагностика предполагает использование широкого спектра дорогостоящих средств [46]. При визуальном контроле для параллельного съема информации используют электронно-оптические преобразователи -

эвапографы, эджеографы, приборы с жидкими кристаллами и фоточувствительными пленками, тепловизоры (рисунок 4.3.) и т.п.

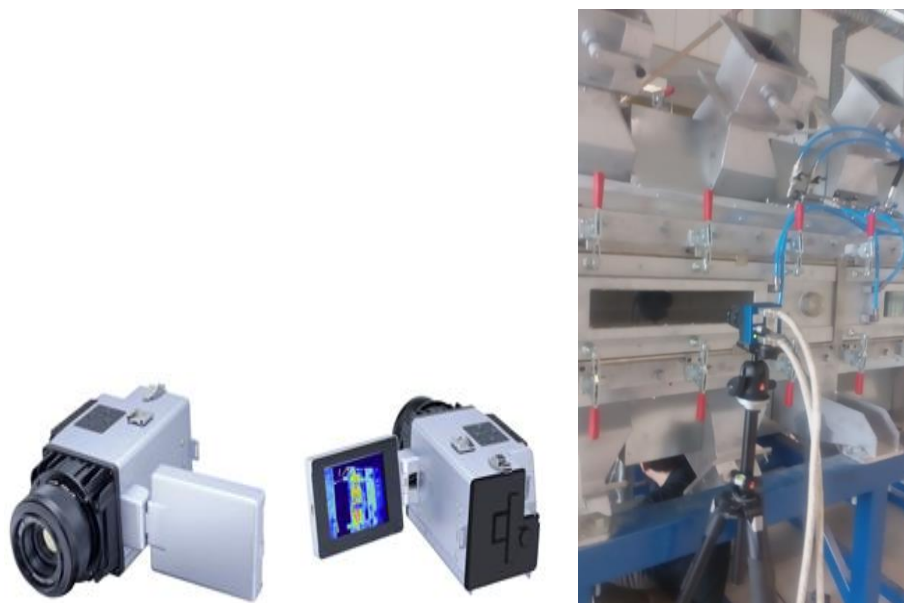


Рисунок 4.3 – Тепловизор TVS-200 (внешний вид, установка на объекте)

Несмотря на это, бесконтактная тепловая диагностика является весьма перспективной в силу высокой информативности. Важно, что разработанные средства диагностики позволяют напрямую обнаруживать дефекты и прогнозировать их развитие в процессе испытаний ЛА и АД. Существующие методы обработки инфракрасного термометрирования дают возможность прогнозировать конкретные неисправности.

Возможности виброакустических методов оценки состояния БГУ. Виброакустическая диагностика БГУ также в достаточной мере информативна. Она базируется на общих принципах распознавания состояний технических систем по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале. В качестве диагностических признаков здесь используют характеристики виброакустического сигнала, сопровождающие функционирование горелок [13]. Как правило, уровень вибраций двигателя контролируется с помощью вибропреобразователей, которые сигнализируют о возможной неисправности в полете, но не позволяют определить конкретное место ее развития. При стендовых испытаниях для получения информации о вибронпряженности и колебаниях лопаток рабочих колес компрессора используют бесконтактные дискретно-фазовые методы. Их применение требует жесткого закрепления двигателя на стенде и установки на корпусе и роторе компрессора специальных вибропреобразователей. В настоящее время разрабатываются перспективные устройства и методы виброакустического анализа [20], не дошедшие пока до стадии массового эксплуатационного применения. Как упоминалось, голографические и акустические методы могут позволить определить наиболее информативные точки на корпусе двигателя (амплитуда, частота и фазовые характеристики

вибрации, которые связаны с состоянием отдельных узлов и деталей). При обработке информации совокупность упомянутых параметров связывают с состоянием объекта $W(t)$ в момент (период) времени t [12]. При этом множество возможных состояний объекта делят на два подмножества. Подмножество W^* представляет собой совокупность работоспособных состояний, которые обладают запасом работоспособности, определяющим близость объекта к предельно допустимому состоянию. Подмножество W^{**} включает все состояния, соответствующие появлению отказов в работе двигателя. Для постановки диагноза все возможные состояния разбиваются на некоторое число классов W_i , $i=1,2, \dots, n$, подлежащих распознаванию. Но если число классов в подмножестве W^{**} определяется числом возможных отказов, то практически осуществить классификацию по степени работоспособности в подмножестве W^* не представляется возможным в силу непрерывности изменения этих состояний в пространстве диагностических признаков и времени. Кроме того, такая классификация затруднена многопараметричностью объекта, каким и является газотурбинный двигатель.

Если дефект сопровождается повышенной виброактивностью, то важным здесь является локализация источников повышенного уровня колебательной энергии. При этом различают два возможных варианта: источники шума независимы либо статистически связаны. Уровень трудностей, обусловленный необходимостью разделения влияния источников, в значительной степени снижает информативность вибродиагностики БГУ. К мерам, повышающим ее информативность относят следующие:

- детальный опыт доводки в эксплуатацию с целью выявления наиболее уязвимых мест, четкое разбиение на конечное множество классов состояний, подлежащих распознаванию - $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$;
- обоснование эталонных значений вибропараметров;
- выбор средств измерения и мест их размещения на основе протекающих в БГУ физических процессов;
- локализация источников излучения повышенной колебательной энергии в исследуемом компрессоре;
- определение динамических характеристик отдельных узлов, агрегатов и двигателя в целом для построения диагностической модели;
- разработка алгоритмов определения текущего состояния БГУ.

Важным моментом является формирование эталонов, представляющих собой усредненные для данного класса значения признаков. С помощью набора классифицирующих функций производится распознавание параметров виброакустического сигнала. В подсистеме принятия решения определяется фактическое состояние объекта контроля по текущим значениям параметров, которые могут быть использованы в качестве исходных при построении алгоритмов прогноза возможных отказов.

Несмотря на перечисленные меры, все же значительные трудности вызывает решение задачи локализации источников излучения повышенной

виброактивности [17]. В последнее время при вибродиагностике БГУ начал находить применение метод оптической голографии [21], обладающий повышенной информативностью. Условием его эффективного использования также является создание эталонов (библиотеки вибропортретов дефектных состояний БГУ). Сначала получают эталонный вибропортрет исправного двигателя, а затем, вводя известные характерные дефекты, получают вибропортреты, соответствующие конкретным дефектным состояниям. Сравнение последних с эталонным может позволить определить информативные точки на поверхности двигателя, чувствительные к определенным дефектам. Для постановки диагноза достаточно идентифицировать вибропортрет исследуемого двигателя с набором, имеющимся в библиотеке. Однако этот метод пока не достаточно практически отработан и обеспечен аппаратурой.

Менее информативной, но более доступной считается диагностика БГУ на основе построения диагностических моделей, т.е. связей между пространством состояний и пространством диагностических признаков. При этом не придается значения, в какой форме представлена эта связь. Считают, что диагностическая модель отвечает своему назначению, если она позволяет выполнить следующие условия:

- сформулировать принципы разбиения множества W на два подмножества - работоспособных W^* и неработоспособных W^{**} состояний;
- определить критерий для оценки степени работоспособности объекта и его принадлежности к одному из классов в подмножестве W^* ;
- установить признаки возникших отказов (различить состояния в подмножестве W^{**}).

В качестве диагностических моделей обычно используют дифференциальные и алгебраические уравнения, логические соотношения, матрицы узловых проводимостей, функциональные, структурные, регрессионные и другие модели, позволяющие связать параметры технического состояния с виброакустическим состоянием объекта. К основным типам моделей можно отнести [31]: структурно-следственные; динамические; регрессионные. Структурно-следственная модель диагностируемого объекта создается на основе инженерного изучения его устройства и функционирования, статистического анализа показателей надежности и диагностических параметров. Она должна давать наглядное представление о наиболее уязвимых и ответственных элементах, а также связи структурных параметров с диагностическими признаками. Эту задачу необходимо решать при построении модели любого типа. Она решается на основе статистического анализа, что требует значительных затрат времени. При построении динамической модели диагностирования объект рассматривают как многомерную систему с p входами и n выходами. Уравнение связи вектора входных воздействий:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$$

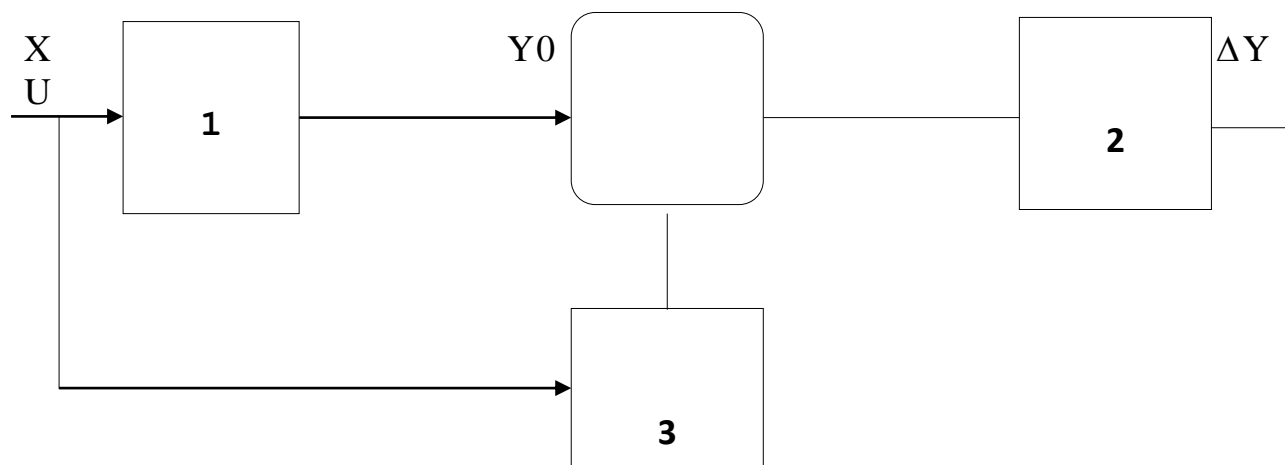
и вектора выходных сигналов

$$Y(t) = \{ y1(t), y2(t), \dots, yn(t) \}$$

записывают в операторном виде $Y(t) = BX(t)$, где B - оператор системы, содержащий в неявном виде данные о параметрах технического состояния Z_i системы. На рисунке 4.4. показана простейшая модель "черного ящика". Изменение параметров технического состояния может вызвать изменение оператора при неизменном $X(t)$. В качестве критерия работоспособности динамического звена принимают степень соответствия действительного оператора B_i оператору нормального функционирования механизма B_0 , которую можно оценить значением невязки в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.5., где X - возмущающее воздействие, Y_0 - реакция номинальной модели исследуемого динамического звена, ΔY - невязка, U - диагностический признак.



Рисунок 4.4 – Модель «черного ящика»



1 - динамическое звено объекта контроля; 2 - формирующее звено; 3 - номинальная математическая модель

Рисунок 4.5 – Простейшая схема динамического звена

С помощью уравнений идентификации можно сформировать модель «черного ящика», диагностические признаки, представляющие собой значения собственных частот, декремент колебаний и т.д. Однако их

конкретизация зависит от понимания физики процессов, порождаемых развивающимся дефектом. К этому можно добавить, что использование сложного математического аппарата, необходимого при построении моделей данного типа, для решения практических задач часто представляется затруднительным.

Наиболее эффективным считают метод построения регрессионной модели, базирующийся на использовании математического аппарата планирования эксперимента [3]. С помощью этого метода ищут «характерный» диагностический признак, однозначно связанный с каким-либо параметром технического состояния. Задача моделирования сводится к нахождению коэффициентов регрессии и оценке адекватности модели в соответствии с определенными правилами. В процессе обработки результатов эксперимента оценивают следующие величины: дисперсию функции отклика по результатам параллельных опытов; дисперсию воспроизводимости функции отклика по результатам всех опытов; однородность дисперсий по F - критерию Фишера (коэффициенты регрессии; доверительный интервал коэффициентов регрессии; адекватность модели).

В результате анализа определяют характерный диагностический признак, являющийся функцией одного аргумента. Следует отметить, что несмотря на значительный уровень развития вибрационных диагностических моделей и алгоритмов построения диагностических процессов в целом, в большинстве случаев получают оценки состояния типа "норма - не норма", что в ряде случаев является недостаточным.

При решении задач локализации источников вибрации (повышения информативности), а также установления связей между структурными параметрами и параметрами сигнала, важное место отводится расшифровке последнего. Виброакустический сигнал любого механизма имеет сложную структуру, зависящую от динамики функционирования и набора комплектующих узлов. В настоящее время получен ряд зависимостей изменения характеристик виброакустического сигнала от возникающих дефектов типовых элементов различных механизмов, в том числе и применяющихся в авиационных двигателях [17]. Спектры вибрации измеряют на нескольких режимах работы БГУ для более надежного сопоставления расчетных частот с реальным частотным спектром вибрации. При обнаружении в некоторой полосе частот источника интенсивной вибрации место его расположения определяют по пространственному распределению уровня вибраций конструкции.

Для некоторых рабочих процессов была найдена определенная связь режимных и виброакустических параметров. Например [13], в компрессорах вихревой шум пропорционален 3,5-5-й степени относительной скорости потока среды на лопатке, а сплошной шум подшипников качения в значительно меньшей степени зависит от нагрузки и частоты вращения ротора. Поэтому, если в данном механизме при изменении скоростного режима интенсивность шума нарастает пропорционально, например, 4-й степени частоты вращения ротора, то можно сделать вывод о его аэродинамическом

происхождении. В ряде случаев [32] для выявления источников определяют форму колебаний, т.е. измеряют амплитуду и фазу, а также распределение возбуждающих сил.

Таким образом, методы виброакустической диагностики БГУ базируются на общих принципах диагностики технических систем по косвенным (в целом малоинформативным) параметрам. К тому же область их применения ограничена возможностью доступа к двигателю, а также несовершенством средств диагностирования и математических моделей, связывающих структурные параметры с диагностическими признаками. Тем не менее в ряде случаев можно получить количественную оценку запаса работоспособности узлов двигателя по результатам измерения виброакустических сигналов, что позволяет прогнозировать величины остаточных ресурсов элементов БГУ.

4.2.3 Эффективность трибодиагностики элементов БГУ

Процесс разрушения изнашиваемых деталей, как правило, начинается с разрушения поверхностного слоя материала под действием высоких динамических напряжений, что проявляется в виде отрывов частиц материала [14]. Это приводит к повышенной концентрации напряжений в местах отрыва и как следствие к дальнейшему развитию процесса разрушения. Разрушение в данном случае является носителем информации о состоянии трущихся пар. Как показывает опыт, отрезок времени от начала процесса разрушения поверхностного слоя до момента полного разрушения детали, как правило, достаточно велик, что дает возможность обнаруживать неисправности уже на начальном этапе процесса изнашивания.

Количество и форма продуктов износа, зависит от скорости накопления частиц износа. Наиболее распространенными методами трибодиагностики являются: магнитный, спектрального анализа, колориметрический, феррографический, метод радиоактивных изотопов [32]. Каждый из них более информативен, чем методы вибродиагностики.

Магнитный метод. Метод основан на измерении силы взаимодействия ферромагнитных частиц масла с искусственно созданным внешним магнитным полем. Поскольку количество ферромагнитных металлов в работавшем масле компрессора обычно существенно больше, чем других продуктов износа, то их определение может служить интегральной оценкой степени износа трущихся пар двигателя.

Электромагнитный метод контроля, как разновидность магнитного метода, основан на взаимодействии переменного магнитного поля катушки индуктивности с электромагнитным полем, возникающим от вихревых токов металлических частиц в работающем масле. К недостаткам метода следует отнести малую чувствительность анализаторов, их подверженность влиянию внешних переменных полей, а также невозможность определения немагнитных частиц износа.

Эмиссионно-спектральный метод (в БГУ применяются установки типа МФС, МОА, Spektrooil). Этот метод использует явление свечения биогаза исследуемого вещества в результате нагревания его до температуры свыше 1000°C . При таких температурах энергия движения частиц биогаза такова, что при их столкновении происходят процессы диссоциации и ионизации, в результате которых, наряду с атомами и молекулами, в газе образуются свободные электрические заряды-ионы и электроны. Нагретый, частично ионизированный, проводящий электрический ток газ-плазма излучает электромагнитные колебания в оптическом диапазоне спектра. Существенной составляющей этого излучения являются линейчатые спектры атомов, в которых каждому элементу соответствует своя длина волны излучения определенной интенсивности. Исследуя спектр, можно определить химический состав образующего его биогаза, и, следовательно, состав анализируемой пробы.

Интенсивность аналитических спектральных линий (мощность излучения единицы объема плазмы) пропорционально связана с концентрацией соответствующих элементов в пробе. Установка позволяет определить не только качественный, но и количественный состав пробы. Для проведения количественного анализа необходимо выбрать адекватную модель спектроаналитического процесса (связь между сигналом и концентрацией исследуемого элемента) и провести с ее помощью градуирование установки.

Рентгеноспектральный метод. Метод основан на регистрации длины волны и интенсивности характеристического флуоресцентного излучения химических элементов, входящих в состав «сухой» пробы. Характеристическое излучение – это квантовое излучение с линейчатым (дискретным) спектром, возникающее при изменении энергетического состояния БГУома. Длина волны характеристического излучения зависит от атомного номера химического элемента и уменьшается по мере его возрастания. Явление флуоресценции связано с переходом атомов, молекул или ионов из возбужденных состояний в нормальное состояние под действием характеристического излучения. Излучение возбуждается рентгеновскими лучами, направленными на масляную пробу. Характеристическое излучение определяемых элементов выделяется из вторичного излучения образца кристалл-анализатором и регистрируется с помощью шести селективных рентгеновских фильтров и шести пропорциональных счетчиков. Анализ начинается с установки анализируемой пробы в пробо-загрузочное устройство спектрометра и продолжается от 10 до 1000 сек. в зависимости от анализируемого материала и требуемой точности анализа. Кванты излучения преобразуются в импульсы напряжения, скорость поступления которых измеряется и выводится на дисплей, и сохраняются в памяти компьютера, значения распечатываются на принтере. Спектрометр полностью управляется компьютером.



Рисунок 4.6 – Энергодисперсионный анализатор



Рисунок 4.7 – Рентгенофлуоресцентный волновой спектрометр с опцией энергодисперсионного детектора (хим.состав)

Органолептический метод. При этом методе степень частиц износа выявляется визуально или с использованием каких-либо устройств и приспособлений (магнитные пробки, фильтры, сигнализаторы). Как известно [41], на двигателях применяются сигнализаторы различного типа (электронные, электромеханические и др.).

Эти сигнализаторы имеют один принципиальный недостаток, который связан с возможностью ложного срабатывания из-за накопления смолистых веществ в масле и различного рода посторонних загрязнений, не имеющих отношения к развитию дефекта.

Сигнализаторы только фиксируют наличие износа, но не позволяют отслеживать скорость процесса накопления стружки в масле.

Таким образом, этот метод недостаточно информативен с точки зрения точности выявления морфологии частиц износа.

4.2.4 Эффективность диагностики БГУ по термогазодинамическим параметрам

В соответствии с общепринятыми концепциями к термогазодинамическим параметрам относят: давление, температуру, отношение давлений и температур, скорость течения, расход биогаза и масла, проходные площади сечений проточной части, тягу, а также частоту вращения роторов. Информативность термогазодинамической диагностики БГУ невысока. Общие подходы здесь не отличаются от подходов, применяемых при вибро- или модельном диагностировании, рассмотренных выше. Имеются лишь некоторые специфические отличия. Обычно при термогазодинамическом диагностировании БГУ применяется метод математического моделирования «поведения» вышеперечисленных параметров в процессе работы. Различают детерминированные, вероятностные и комбинированные модели БГУ. В детерминированных моделях все взаимосвязи, переменные и константы задаются точно (что весьма сложно при профилактике отказов). Данное условие обеспечивает возможность однозначного определения результирующей функции. В вероятностных моделях задаются соответствующие законы распределения случайных величин, что приводит к вероятностной оценке этой функции. Чаще применяют детерминированные модели. Здесь признаками состояния оборудования могут быть: тяга R , расход биогаза Cr , температура газов перед (T) или за топочной камерой (T_2), параметры рабочего тела по тракту, параметры топливной, масляной систем и т. д. Примерами возможных неисправностей могут служить: прогары жаровой части камер сгорания, деформация элементов проточной части и т. п. Решения принимают по критическим отклонениям термогазодинамических параметров.

Изменение температуры биогаза за топочной камерой сравнивают с эталонной математической моделью. Эталонная модель строится по исходным формулярным данным. Температура контролируется на взлетном режиме, которому соответствует контрольная температура за топочной камерой. В некоторых случаях температуру T , а также параметры T_n и R_n используют для подсчета тяги и сравнивают ее с той тягой, которая должна быть в конкретно заданных условиях.

Определенные возможности заложены в диагностический параметр «расход биогаза». Опыт показывает [16], что повреждение проточной части БГУ увеличивает расход биогаза на 120... 150 м³/ч при одновременном изменении других термодинамических параметров. Расход биогаза достаточно хорошо отражает состояние камер сгорания и сопловых аппаратов. Однако точное измерение расхода затруднено из-за погрешностей расходомеров, вызванных необходимостью учета плотности при разных температурах.

В определенных условиях диагностику БГУ можно осуществлять и по давлению биогаза перед форсунками P_f , но и здесь погрешности измерений могут играть решающую роль.

Для минимизации погрешностей оценки состояния БГУ по результатам измеренных термогазодинамических параметров, значения параметров приводят к стандартным условиям, а их измерение должно проводиться на одних и тех же высотах, и режимах работы.

Результаты исследований в области термогазодинамической диагностики БГУ позволили установить, что самым чувствительным и информативным показателем состояния проточной части является адиабатический КПД η_t [16]. Конечно, непосредственно замерить η_t невозможно, однако, его можно выразить через частоту вращения ротора компрессора, степень повышения давления π_k и температуру газов перед топочной камерой T_2^* . Эта зависимость будет эмпирической и специфичной по отношению к данному типу двигателя.

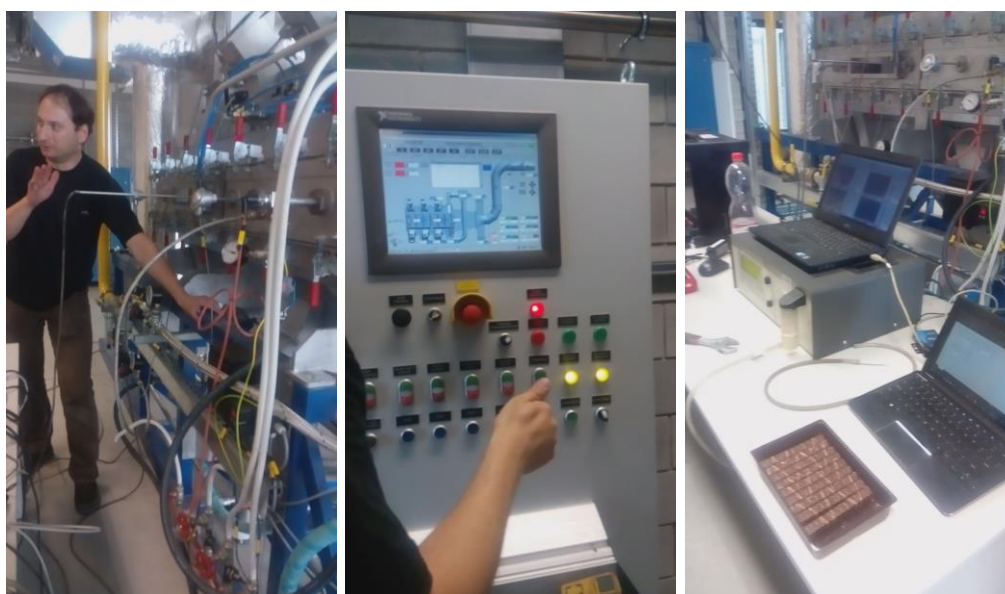


Рисунок 4.8 – Система диагностики БГУ в лабораторных условиях ЛПУ (г.Люблин, Польша)

Детерминированные модели диагностирования БГУ могут выражаться через систему уравнений состояния двигателя, решив которую можно сформировать диагноз, осуществить прогноз и дать рекомендации по предупреждению или устранению возможного отказа. Диагностические уравнения представляют собой конечное множество выражений, построенных для приращения расхода воздуха, температуры биогаза перед топочной камерой, удельного расхода и других термогазодинамических параметров. В правой части этих уравнений содержатся отклонения параметров, которые определяют путем сравнения текущих значений с эталонными значениями (при определенном режиме работы).

Наиболее ответственным этапом термогазодинамического диагностирования БГУ является составление диагностических уравнений. Число диагностических уравнений определяется классами возможных состояний БГУ.

В последнее время для диагностики БГУ предлагается использовать комплексные параметры, которые в аналитической форме связывают между собой несколько параметров и, тем самым, наиболее полно характеризуют рабочие процессы, происходящие в двигателе. Так, для диагностирования ТВД в ряде предприятий используют отношение температуры газов за турбинной T_2 к давлению масла в измерителе крутящего момента $P_{икм}$. При этом в качестве критерия оценки состояния двигателя по комплексному параметру используют относительное отклонение контролируемого параметра от эталонного:

$$\Delta K = V_{зам} - B_э,$$

где $V_{зам} = T_2/P_{икм}$ - комплексный параметр, приведенный к стандартным атмосферным условиям. Использование данной величины для контроля технического состояния в процессе проведения стендовых испытаний, а также в условиях эксплуатации оказалось эффективным для оценки работоспособности БГУ.

4.3 Методы обобщенной оценки состояния технических систем

4.3.1 Методы сверток частных параметров контроля к обобщенному показателю

Анализ существующих методов безразборной диагностики БГУ показал, что в настоящее время каждый из методов имеет определенную область применения и позволяет оценить состояние отдельных узлов и агрегатов. Для полного и детального контроля целесообразно использовать совокупность различных методов. При этом возникает необходимость обобщения диагностической информации. Существует ряд подходов к обобщенной оценке состояния технических систем [29,30,31]. Они сводятся к выявлению информативного обобщенного параметра состояния объекта. Идея заключается в том, что процесс постепенного изменения уровня работоспособности, характеризуемый многими компонентами, описывается одномерной функцией, численные значения которой зависят от контролируемых компонентов процесса. Такая функция рассматривается как обобщенный параметр процесса. При этом может оказаться, что обобщенный параметр не имеет конкретного физического смысла, а является математическим выражением, построенным искусственно из контролируемых компонентов процесса.

Обобщенный параметр должен соответствовать определенным требованиям. Эти требования в числе других предусматривают обработку частных параметров контроля, включающую:

- ранжирование по степени значимости;
- определение среди частных параметров критерия, имеющего решающее значение при постановке диагноза объекта.

Частные параметры ранжируют на 3 группы: существенные, второстепенные и несущественные. Для каждой группы определяют по статистическим данным свои весовые коэффициенты и назначают пределы допуска. Среди существенных параметров выбирается один, изменение которого полагают определяющим при оценке реакции состояния объекта в целом [27]. Практическое использование такого подхода при подготовке частных параметров для включения их в качестве составляющих в обобщенный параметр представляется затруднительным. Поскольку статистические данные по множеству БГУ не отражают текущего состояния конкретного двигателя, то при эксплуатации по фактическому состоянию необходимо использовать вместо них данные контроля. При этом для разных компрессора в разные моменты времени существенность каждого параметра может быть не адекватна. Она определяется остаточной надежностью двигателя по данному параметру. Следовательно, разбиение частных параметров на группы по их существенности для всего периода эксплуатации не представляется возможным. Кроме того, в каждом конкретном случае решающее значение для оценки работоспособности БГУ может иметь любой параметр, уход которого за пределы допуска способен привести к отказу. Таким образом, предлагаемый подход к ранжированию частных параметров в большей степени ориентирован для использования при организации планово-предупредительной стратегии эксплуатации и не вполне применим для эксплуатации БГУ по фактическому техническому состоянию.

К обобщенному параметру предъявляются следующие основные требования. Параметр должен:

- максимально характеризовать качество объекта;
- быть критичным к изменению частных параметров;
- характеризовать наступление критического состояния объекта.
- При свертке частных параметров к обобщенному, необходимо решить следующие задачи:
 - определить относительные значения частных параметров;
 - оценить значимость частного параметра для оценки состояния объекта:
 - построить математическое выражение для обобщенного параметра.

Определение относительных значений частных параметров считают необходимым, поскольку состояние объекта может характеризоваться параметрами, имеющими различную размерность. Все контролируемые параметры приводят к единой системе измерения, в которой они могут быть сравнимыми. Одной из таких систем является система безразмерного (нормированного) относительного исчисления. Для каждого параметра x_i ($i = 1, k$) выделяют допустимое значение x_i^* , при достижении которого объект теряет работоспособность и оптимальное, с точки зрения надежности, значение x_{iont} (как правило, оно равно номинальному значению x_{in}). Если в процессе эксплуатации соблюдается условие $x_i(t) > x_i^*$, тогда можно записать безразмерный (нормированный) параметр $x_i'(t)$ в виде:

$$xi'(t) = \frac{xi(t) - xi^*}{xi_{onm} - xi^*} \quad (4.1)$$

Таким образом, с помощью выражения (4.1) нормируется параметр $xi(t)$, а безразмерная нормированная величина $xi'(t)$ изменяется с течением времени от 1 до 0. Отсюда, по величине $xi'(t)$ судят о степени работоспособности объекта по данному параметру. Для решения частных задач предлагаются и другие нормирующие выражения применительно к конкретным случаям:

$$\begin{aligned} xi'(t) &= xi(t)/xi_0 \quad \text{или} \quad xi'(t) = xi(t)/xi_n ; \\ xi'(t) &= xi(t)/xi_{max} ; \\ xi'(t) &= xi(t)/Mxi ; \\ xi'(t) &= [xi(t) - xi_{my}] / xi_{my}, \end{aligned}$$

где xi , xi_0 , xi_{max} , xi_{my} , Mxi - соответственно текущее, нулевое, максимальное, заданное по ТУ значения и математическое ожидание 1-го параметра.

Следовательно, нормирование параметров позволяет получить совокупность безразмерных величин, которые характеризуют состояние объекта. Однако количественно одинаковое изменение этих величин не является равнозначным по степени влияния на изменение уровня работоспособности объекта. Поэтому необходимо дифференцировать частные параметры. Этот процесс осуществляется с помощью весовых коэффициентов, величины которых характеризуют существенность соответствующих параметров. При оценке состояния объекта каждому из частных параметров x_1, x_2, \dots, x_n ставят в соответствие весовые коэффициенты v_1, v_2, \dots, v_n , удовлетворяющие тем или иным заданным критериям, причем $0 < v_n < 1$.

Степень работоспособности объекта по множеству контролируемых параметров оценивается с помощью выражения (4.2):

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k v_i [xi_i(t)]^{v_i}}{\sum_{i=1}^k v_i}, \quad (4.2)$$

где $Q_{\Sigma}(t)$ - текущее значение обобщенного параметра. Из определения обобщенного параметра следует, что чем большие величины $xi_i(t)$ и v_i , тем больший вклад i -го параметра в $Q_{\Sigma}(t)$. Весовые коэффициенты выбирают на основе использования статистических данных о физической значимости i -го параметра и с учетом флуктуации в функциях $xi_i(t)$ и v_i . Обобщенный параметр можно подсчитать с помощью выражения вида (4.3)

$$Q_{\Sigma}(t) = \left[\frac{\sum_{i=1}^k [x_i(t)]^{\frac{1}{v_i}}}{k} \right]^{\sum_{i=1}^k v_i}, \quad (4.3)$$

которое представляет собой нелинейное среднее. Здесь $Q_{\Sigma}(t)=1$, если все $x_i(t) = 1$. Кроме того, чем больше $x_i(t)$ и v_i , тем больший вклад вносит слагаемое $[x_i(t)]^{\frac{1}{v_i}}$ в величину $Q_{\Sigma}(t)$.

Можно использовать и другой вариант нелинейного среднего:

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k v_i [x_i(t)]^{\frac{1}{v_i}}}{\sum_{i=1}^k v_i}, \quad (4.4)$$

где при $Q_{\Sigma}(t)=1$, $x_i(t) = 1$. Для определения обобщенного параметра используется выражение для параметрического среднего, в частности

$$Q_{\Sigma}(t) = \left[\frac{\sum_{i=1}^k [x_i(t)]^{\frac{p}{v_i}}}{k} \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (4.5)$$

где $p \geq 1$ подбирается так, чтобы критерий давал лучшее приближение к реальным результатам получаемым экспериментальным путем. При рассмотрении выражений для обобщенных параметров считается, что $x_i(t)$ не меняет знака, т.е. всегда $x_i(t) \geq x_i^*$. Если же учитывать знак, то каждое слагаемое в выражениях (3.2)-(3.5), стоящее под знаком суммы, дополнительно умножается на член вида $sign[x_i(t)-x_i^*]$. В этом случае выражение (3.2) примет вид

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k v_i [x_i(t)]^{v_i} \cdot sign[x_i(t) - x_i^*]}{\sum_{i=1}^k v_i}. \quad (4.6)$$

В тех случаях, когда в изменениях $x_i(t)$ много случайного и погрешности измерений велики, в обобщенные параметры целесообразно вводить интегральные значения безразмерных параметров $x_i(t)$:

$$Q_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^k v_i \cdot \int_{t_j}^{t_{j+1}} x_i(t) dt, \quad (4.7)$$

где $(t_j \dots t_{j+1})$ - интервал обработки или контроля.

Если обобщенный параметр представить в виде произведения частных

параметров

$$Q_{\Sigma}(t) = \left[\prod_{i=1}^k [x_i(t)]^{\nu} \right]^{\frac{1}{k}}, \quad (4.8)$$

то выход любого параметра за допустимые пределы, т.е. $x_i(t)=0$, приводит к равенству $Q_{\Sigma}(t)=0$. Следовательно, выражение (4.8) позволяет характеризовать наступление отказа по любому из контролируемых параметров. По обобщенным параметрам предлагают определять текущий уровень работоспособности многопараметрического объекта и характер его изменения во времени. Таким образом, задача сводится к прогнозированию одномерной временной функции вида $Q_{\Sigma}(t_0), Q_{\Sigma}(t_1) \dots Q_{\Sigma}(t_n)$.

Наряду с очевидными преимуществами обобщенной оценки состояния технических систем, рассмотренные подходы к определению обобщенного параметра обладают определенными недостатками, затрудняющими их практическое использование.

Необходимость введения весовых коэффициентов для учета существенности нормированных частных параметров приводит к снижению объективности общей оценки уровня работоспособности объекта, поскольку решение этой задачи базируется на использовании статистических данных без учета технологических и эксплуатационных особенностей конкретного объекта. Обобщенные и нормированные частные параметры лишены физического смысла, что также затрудняет оценку существенности их влияния на состояние объекта. Кроме того, все рассмотренные выражения для обобщенного параметра, за исключением (4.8), не позволяют получить однозначную характеристику наступления отказа объекта, что недопустимо при оценке состояния БГУ. В случае выхода за пределы допуска одного из нормированных параметров обобщенный параметр может иметь некоторое численное значение за счет вклада остальных частных параметров. Таким образом, оценка состояния БГУ по предлагаемым обобщенным параметрам не исключает возможности пропуска отказа по одному из частных параметров контроля. Следовательно, оценить запас работоспособности БГУ, определить сроки профилактических мероприятий при рассмотренных подходах представляется затруднительным.

Наряду с рассмотренными вариантами определения обобщенного параметра существуют подходы, основанные на использовании в качестве такового вероятности безотказной работы объекта [40], а также некоторого функционала, описывающего зависимость суммарных выходных характеристик объекта от входных. Однако эти подходы также представляются в определенной степени удаленными от структурных параметров БГУ. Анализ изменения величины вероятности безотказной работы, как правило, не позволяет сделать вывод о том, по вине какого элемента произошло ее снижение. Кроме того, эти подходы основываются на использовании статистических данных и не позволяют учесть конкретные условия эксплуатации и фактическое состояние двигателя, а также требуют

значительного времени для набора данных, в течение которого двигатель часто морально устаревает. При организации эксплуатации технических систем по ресурсу в качестве показателя работоспособности предлагают использовать величину остаточного ресурса наименее надежного элемента объекта. Это позволяет определить время наступления критического состояния, следовательно, и сроки прекращения эксплуатации двигателя. Однако наименьший остаточный ресурс характеризует запас работоспособности двигателя по времени, но не уровень работоспособности в целом, который определяется состоянием всех узлов и деталей, способных привести к отказу. Следовательно, такая оценка не может считаться обобщенной.

4.3.2 Методы обобщенной оценки состояния технических систем по информационному критерию

Одним из подходов к обобщенной оценке состояния технических систем является определение количества информации, характеризующей уровень работоспособности объекта при его контроле [45]. Это позволяет установить однозначную количественную связь между пространством состояний, определяемых структурными параметрами объекта и пространством диагностических признаков этих состояний. Другими словами, степень изменения работоспособности объекта характеризуется количеством информации, получаемой при контроле. Существенным достоинством информационных оценок является возможность рассмотрения исследуемого объекта в его взаимосвязи с системой контроля.

Пусть $J_A(B)$ – ожидаемое значение информации, содержащееся в системе контроля B относительно всех состояний объекта A . Обозначив $J_A(B)$ как среднюю информацию, содержащуюся в системе контроля относительно состояния A_i , получим:

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot J_{A_i}(B), \quad (4.9)$$

где $P(A_i)$ - вероятность i -го состояния объекта A ($i=1, n$); n - выделенное количество состояний объекта A .

В соответствии с определением условной энтропии [76] можно записать:

$$H(A/B) = H(AB) - H(B),$$

где $H(AB)$ - энтропия сложной системы (AB) ; $H(B)$ - энтропия системы контроля B .

Используя соотношение для $J_{A_i}(B)$, выразим:

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i) \cdot P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right], \quad (4.10)$$

где $P(B_j)$ - вероятность нахождения системы контроля B в j -м состоянии ($j=1, m$); $P(B_j/A_i)$ - условная вероятность j -го состояния системы контроля B при нахождении объекта A в i -м состоянии.

Теперь с учетом (4.9) и (4.10) выражение для средней информации в системе контроля о состоянии объекта A_i примет вид:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right] \quad (4.11)$$

или в эквивалентной форме:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(A_i)} \right]. \quad (4.12)$$

Для решения практических задач:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(A_i/B_j)}{P(B_j) \cdot P(A_i)} \right], \quad (4.13)$$

где $J_{A_i}(B)$ представляет собой среднее значение информации, которую можно получить от системы контроля об i -м состоянии объекта. Поскольку объект и система контроля взаимосвязаны, то полагают, что каждое из состояний B может содержать информацию относительно какого-либо состояния объекта A . Информация, которую дает состояние B_j о состоянии A_i , определяется из соотношения:

$$J_{A_i}(B_j) = \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right]. \quad (4.14)$$

Отсюда следует вывод, что $J_{A_i}(B)$ представляет собой усреднение этой информации по всем состояниям системы B при условии, что эта информация относится к состоянию A_i :

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot J_{A_i}(B_j). \quad (4.15)$$

Величину $J_{A_i}(B_j)$ называют элементарной информацией состояний B_j о состоянии A_i . Величины $J_{A_i}(B)$ и $J_{A_i}(B_j)$ являются усреднением элементарной информации. Вместе с тем, элементарной информации придают конкретный физический смысл.

Система контроля B может быть представлена системой признаков, связанных с состоянием объекта A . Тогда, если сигнал B встречается одинаково часто при наличии состояния A_i и при любых других состояниях объекта A , т.е. $P(B_j/A_i) = P(B_j)$, то, очевидно, что такой сигнал не несет информации о состоянии A_i . Из выражения (4.13) видно, что в этом случае $J_{A_i}(B_j) = 0$. Если априорная вероятность состояния A_i равна $P(A_i)$, а после получения сигнала B_j она изменится и станет $P(A_i/B_j)$, то по известному состоянию можно получить некоторую информацию относительно A_i :

$$J_{A_i}(B_j) = \log \left[\frac{P(A_i/B_j)}{P(A_i)} \right]. \quad (4.16)$$

Однако вероятность состояния A_i после получения сигнала может стать больше или меньше априорной вероятности в зависимости от характера связи этих вероятностей. $J_{A_i}(B_j)$ может быть как положительной, так и отрицательной величиной, тогда как $J_{A_i}(B)$ и $J_A(B)$ всегда положительны или равны нулю. Элементарная информация $J_A(B_j)$ становится отрицательной, если вероятность состояния A_i после получения сигнала B_j уменьшается. В выражении (4.9) величина $J_A(B)$ представляется как результат усреднения по информации, содержащейся в системе контроля B относительно каждого из состояний объекта A . Существует и другой путь усреднения на основе введения понятия об информации, которой обладает состояние B относительно объекта A :

$$J_A(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j) \cdot J_A(B_j), \quad (4.17)$$

где

$$J_A(B_j) = \sum_{i=1}^m P(A_i/B_j) \cdot \log \left[\frac{P(A_i/B_j)}{P(A_i)} \right]. \quad (4.18)$$

Существенность или значимость параметров контроля также определяется по количеству информации, которое можно получить с их помощью.

Рассмотренные информационные подходы не предусматривают обратной связи со структурными параметрами объекта. Предлагаемые информационные показатели не позволяют оценить уровень работоспособности объекта, т.к. характеризуют только количество информации, получаемой при контроле безотносительно к текущему состоянию объекта. Здесь важную роль играет изменчивость диагностических признаков, реагирующих на множество возможных состояний. Решающим действием при назначении диагностических проверок является выделение более значимой информации из числа многофакторного диагностического анализа. На этом этапе ценность обследования определяется мерой вероятности данного состояния, а не вероятностью отказа, по контролируемому параметру. Кроме того, определение вероятностей $P(A_i)$, $P(B/A_i)$, $P(A_s)$, $P(B/A_s)$ с учетом особенностей эксплуатации и конструкции при диагностировании объектов БГУ представляет некоторую сложность, т.к. предполагает использование статистических данных по многим. Необходимо отметить, что для реализации рассмотренных подходов следует разбить пространство возможных состояний БГУ на некоторую детерминированную совокупность, что в принципе представляется возможным при изменении технического состояния БГУ и соответствующих параметров.

Результатом сравнительного анализа методов диагностики БГУ, в основе которого положены известные подходы к теории узнавания, а также экспертные оценки с учетом накопленных многолетних статистических

данных и обобщенного опыта эксплуатации, является иерархическая структура информативности методов (таблица 4.1). Ранее была произведена оценка взаимосвязи – «информативность-метод» по 10-ти бальной шкале.

Таблица 4.1 – Иерархическая структура и экспертная оценка информативности основных методов диагностики БГУ

№	Методы диагностики БГУ	Экспертная оценка (max – 10 баллов)
	<u>Инструментальные</u>	
1.	Тепловизионный (инфракрасная термография)	9,5
2.	Трибомониторинг (анализ проб авиамасел)	8,5
3.	Эндоскопия (фото-видео документирование)	8,0
4.	Виброакустический	7,5
5.	Термогазодинамическая параметрия	6,0
6.	Неразрушающий контроль (кроме теплового)	6,0
	<u>Аналитические</u>	
7.	Классификационные	7,0
8.	Статистических решений	6,0
9.	Прогностические	5,5

Учитывалось количество безошибочно поставленных диагнозов («попадание в цель») по результатам применения рассмотренных выше методов, на основе которых и производилась экспертная рейтинговая оценка. Так как получаемая информация формировалась от различного объема выборок, каких-либо количественных характеристик, позволяющих с математической точностью оценить весомость каждого из методов (в табл. не приводится).

4.4 Требования к информационному критерию технического состояния БГУ

В разделе 4.3 был проведен анализ существующих подходов к обобщенной оценке состояния технических систем. На основе проведенного анализа применительно к объектам БГУ необходимо учесть следующие требования, предъявляемые к информационному критерию (таблице 4.2):

1. Информационный критерий (ИК) должен максимально характеризовать систему диагностических признаков, т.е. соответствовать изменчивости и реагировать на возможные состояния, определяемых нормативно-технической документацией. При оценке качества первостепенный интерес с точки зрения эксплуатанта представляет его работоспособность, поэтому информационный критерий должен отражать именно эту сторону качества.

2. Информационный критерий должен быть критичен по отношению к каждому из контролируемых диагностических параметров. Изменение

уровня работоспособности элементов должно характеризоваться изменением величины ИК и хотя бы одного из диагностических параметров контроля. С другой стороны, в ИК не должны включаться такие диагностические параметры, изменение которых не отражало бы изменение уровня работоспособности БГУ.

3. Информационный критерий и диагностические параметры должны иметь физический смысл, быть связанными функционально со структурными параметрами и иметь количественную оценку.

4. Информационный критерий - однозначно отражать степень изменчивости состояния БГУ и проявление отказа по любому из контролируемых параметров.

5. Характер изменения ИК в процессе эксплуатации - быть необратимым. Это может позволить прогнозировать сроки очередного контроля и прекращения эксплуатации.

6. Информационный критерий должен позволять оценивать состояние применительно к используемым средствам и методам контроля. При этом - позволять сравнивать эффективность различных систем контроля. В качестве критерия эффективности целесообразно использовать информативность контроля.

7. Информационный критерий - быть пригодным для использования в качестве составляющих частных параметров любой размерности и физической природы. При этом частные параметры должны использоваться без назначения недостаточно обоснованных весовых коэффициентов.

8. Информационный критерий должен характеризовать уровень работоспособности на всех этапах их эксплуатации.

При оценке возможности реализации требований к ИК целесообразно рассматривать для удобства классификации множество возможных состояний БГУ, как пространство этих состояний. В этом случае каждому классу можно поставить в соответствие определенный уровень работоспособности, вплоть до критического уровня. Поскольку информационный критерий представляет собой некоторую композицию частных параметров контроля, то он должен однозначно отражать принадлежность двигателя тому или иному классу состояний. Одному и тому же численному значению ИК могут соответствовать различные состояния, принадлежащие одному классу. Количество состояний в классе определяется количеством контролируемых частных параметров и может служить косвенной характеристикой информативности применяемой системы контроля. Изменение уровня работоспособности представляет собой непрерывный процесс перехода объектов БГУ из одного класса состояний в другое. Задавшись допусковым значением частных параметров можно определить предельно допустимый уровень работоспособности, как критический класс состояний. И, наконец, ИК должен отражать переход диагностируемого объекта от одного класса состояний к другому вплоть до критического.

4.5 Описание функционирования автоматизированной системы диагностики технологического процесса

Диагностирование сложных систем является неотъемлемой частью процессов их обслуживания. Поэтому ряд показателей, характеризующих надежность функционирования объектов и их отдельных составляющих, могут являться одновременно как показателями СТД, так и объекта диагностирования. С другой стороны, диагностирование объекта осуществляется СТД, а это в свою очередь также означает, что целый ряд признаков системы и объекта диагностирования трудно отделить друг от друга. Потребность объекта в диагностировании определяется стратегией самого процесса эксплуатации и обслуживания, во время проведения которого осуществляется управление состоянием компонентов системы. Составляющими СТД являются (рисунок 4.11):

- объект диагностирования (ОД), под которым понимают сам объект или его элементы, состояние которых подлежит идентификации;
- средства диагностирования;
- совокупность контрольно-измерительных приборов, органов управления, средств коммутации и сопряжения с ОД;
- программное обеспечение системы технической диагностики, обработки, передачи и хранения результатов для последующего прогнозирования поведения или состояния объекта.

Система диагностирования работает в соответствии с алгоритмом диагностирования, который представляет совокупность предписаний о проведении диагностирования.

Программное обеспечение СТД в свою очередь включает:

- 1) диагностирующий модуль, который после определения текущего состояния оборудования с помощью решающих правил относит текущие состоянию к одному из множества диагнозов;
- 2) база данных признаков и диагнозов, содержащая сведения об информативности ДП, их предельно допустимые предотказовые значения и множество состояний (диагнозов) оборудования;
- 3) подсистема сбора информации от экспертов для пополнения и уточнения данных о ДП и множестве состояний функционирования химико-технологических систем (ХТС);
- 4) математические модели диагностирования (нечеткая лингвистическая модель, модель типа нейронная сеть и т.д.) для реализации диагностирования различными методами с последующим их сравнением;
- 5) алгоритмы обучения моделей диагностирования:
 - алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефазификации. На данный момент широкое распространение имеют модели нечеткого вывода: Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото;
 - существуют два подхода к обучению нейронных сетей: обучение с учителем и самообучение.

Обучение нейронной сети с учителем предполагает, что для каждого входного вектора из обучающего множества существует требуемое значение выходного вектора, называемого целевым.

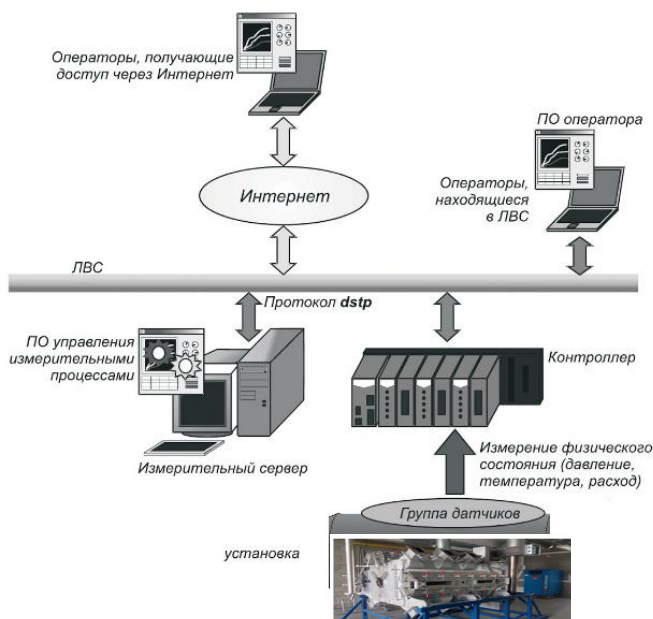


Рисунок 4.9 – Структура САУ и диагностики процесса сжигания биогаза

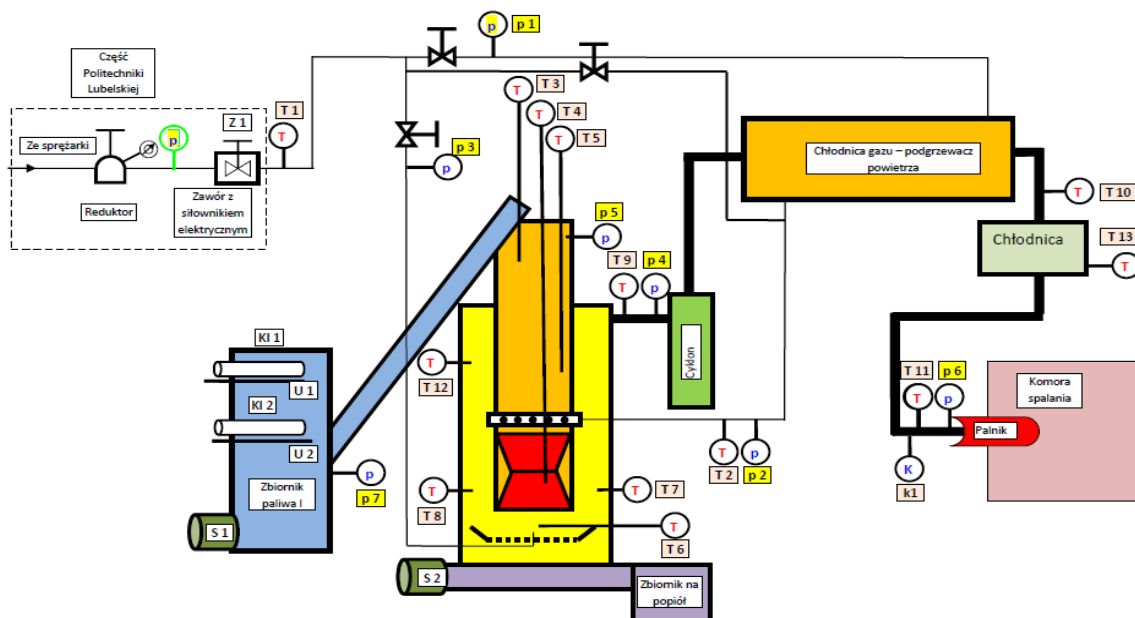


Рисунок 4.10 – Технологическая схема ТП сжигания биогаза в лабораторной установке

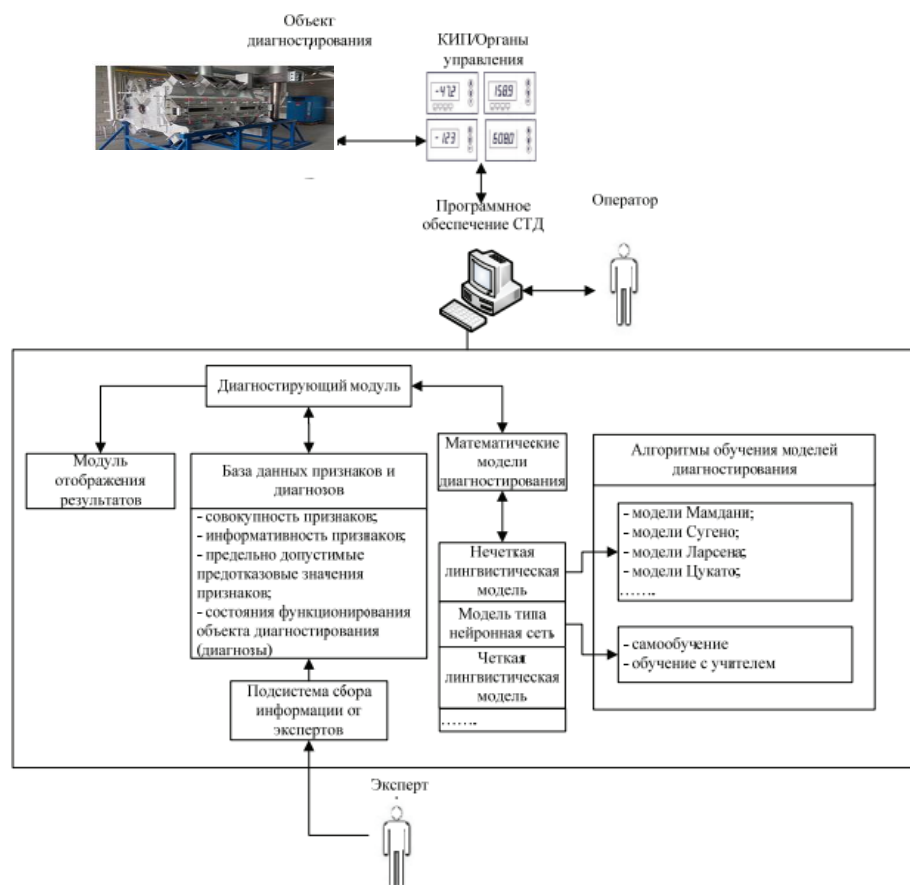


Рисунок 4.11 – Структура системы технической диагностики процесса сжигания биогаза

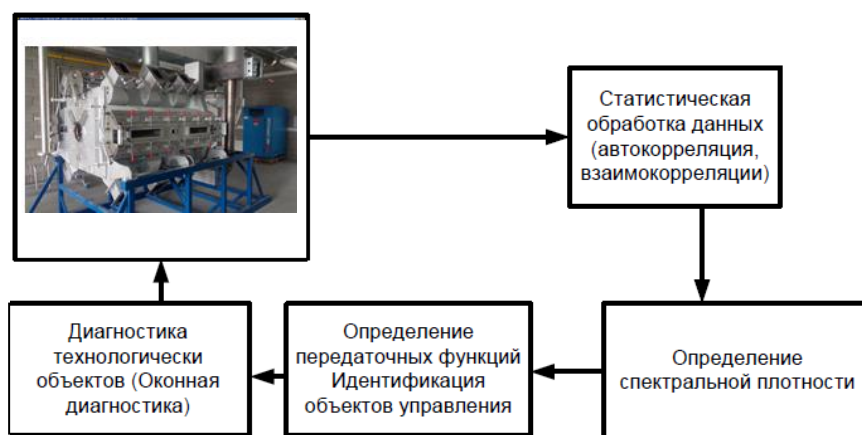


Рисунок 4.12 – Структура статической обработки данных

Рабочий процесс в БГУ протекает при наличии существенной неоднородности смеси как по фазе, так и по составу, т.е. имеет место неоднородное распределение топлива по объему жаровой трубы. Особенностью рабочего процесса является также то, что в ней осуществляется постепенный, ступенчатый подвод вторичного воздуха по длине зоны горения.

Необходимость рассредоточенного подвода воздуха связана с тем, что обеспечение эффективного сгорания топлива, в особенности жидкого, возможно только при организации постепенного смешения топлива с воздухом. В настоящее время наряду с расчетами оптимальное распределение подачи воздуха по длине зоны горения устанавливается также при экспериментальной доводке в лабораторных и стендовых условиях.

При анализе экспериментальных данных установлено, что горение первых, образовавшихся у фронтального устройства объемов горючей смеси, происходит в условиях, благоприятных для воспламенения и сгорания, т.е. при составах, близких к стехиометрическим.

В дальнейшем горючая смесь образуется смешением испарившейся части топлива и первичного воздуха. В зависимости от закона подвода воздуха состав смеси может быть в концентрационных пределах воспламенения или же вне их, т.е. в конечном итоге от интенсивности испарения и смешения зависит воспламенение и развитие процесса горения. Поэтому для расчета и правильной организации процесса горения необходимо знать закономерности формирования локальных составов смеси по длине жаровой трубы.

Для решения данной задачи представляется оправданным разделение всего объема жаровой трубы на n зон горения, в пределах которых все параметры смеси, состав, температура, давление меняются в соответствии с законами горения и смешения. По мере сгорания смеси в пределах каждой зоны возрастает температура, меняется скорость и остается некоторое количество несгоревшего топлива и воздуха на выходе из рассматриваемой зоны. Кроме того, особенностью сгорания неоднородной смеси в условиях жаровой трубы является то, что одновременно с процессами реагирования смеси происходит подмешивание воздуха, поступающего из боковых отверстий. Следовательно, для получения расчетных зависимостей необходимо принять ряд допущений:

1. Весь объем жаровой трубы условно разделен на n зон, в которых происходит горение однородной смеси.

2. Параметры газа на входе каждой зоны являются выходными параметрами предыдущей зоны.

3. Состав смеси в каждой зоне формируется из остаточного воздуха и топлива предыдущей зоны и воздуха, поступающего из отверстий жаровой трубы в данном сечении.

4. В каждой зоне происходит сгорание испарившегося и смешавшегося с воздухом топлива.

5. Процесс смешения паров топлива и воздуха, определяется закономерностями турбулентной диффузии и смешения поперечных струй воздуха с газовым потоком в жаровой трубе, рассмотренными в [1].

На рис. 5.2 приведена схема реализации данной модели КС. Как видно из приведенной схемы, на входе в каждую зону определяются следующие

параметры: расход воздуха G_{B_i} , жидкого топлива G_{T_i} , парового топлива $G_{П_i}$, продуктов сгорания $G_{П.с}$, полнота сгорания η_i , температура $T_{см}$ и скорость потока $W_{см}$, степень испарения топлива z_i и смешения вторичного воздуха m_i .

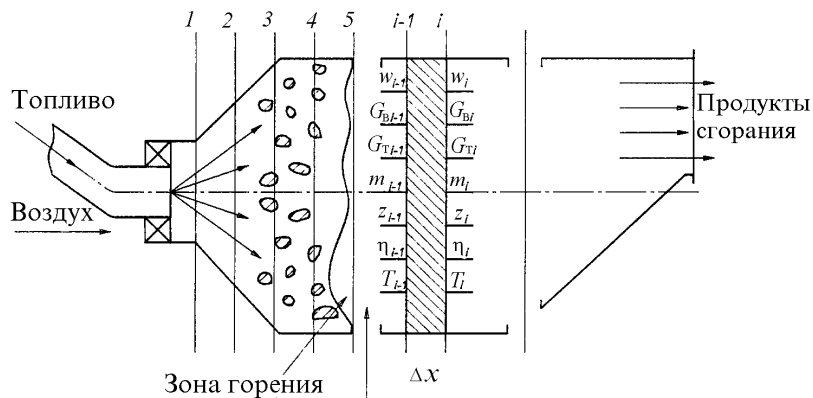


Рисунок 4.12 – расчетная схема БГУ

Изменение указанных параметров в каждой зоне можно определить с помощью уравнений баланса вещества, тепла, количества движения.

1. Расход воздуха определяется из уравнения

$$G_{B_i} = G_{B_{i-1}} + G_{B_i} \Delta m_i - \Delta G_{B_i}^r,$$

где $G_{B_{i-1}}$ – воздух, поступающий из предыдущей зоны без учета гидравлических потерь; $G_{B_i} = F_i \rho_o V_o$ – вторичный воздух, поступающий из периферийных отверстий, с эффективной площадью F_i , со скоростью и плотностью W_o , ρ_o ; Δm_i – коэффициент смешения вторичного воздуха с потоком; $\Delta G_{B_i}^r$ – количество воздуха, израсходованного в i -й зоне.

$$\Delta G_{B_i}^r = \Delta \eta_i G_{П_i} L_0 \text{ при } a \geq 1,0;$$

$$\Delta G_{B_i}^r = \Delta \eta_i G_{B_i} \text{ при } a < 1,0.$$

2. Расход жидкого топлива:

$$G_{T_i} = \delta_{T_i} G_{T_{i-1}} - \Delta G_{П_i},$$

где $G_{T_{i-1}}$ – жидкое топливо, поступающее из предыдущей зоны; $G_{П_i}$ – количество испарившегося топлива ($\Delta G_{П_i} = \Delta z_i G_{T_{i-1}}$); Δz_i – степень испарения топлива; δ_{T_i} – коэффициент распределения капель топлива по сечению жаровой трубы, учитывающий долю топлива попадающего в зону горения.

3. Расход парового топлива:

$$G_{П_i} = G_{П_{i-1}} + \Delta G_{П_i} - \Delta G_{П_i}^r,$$

где $G_{П_{i-1}}$ – пар, поступивший из предыдущей зоны; $\Delta G_{П_i}$ – испарившееся топливо в i -й зоне; $\Delta G_{П_i}^r$ – количество сгоревшего пара в i -й зоне.

$$\Delta G_{\Pi i}^r = \Delta \eta_i G_{\Pi i} \text{ при } a \geq 1,0;$$

$$\Delta G_{\Pi i}^r = \frac{\Delta \eta_i G_{\text{В}i}}{L_0} \text{ при } a < 1,0.$$

4. Расход продуктов сгорания:

$$G_{\text{п.}ci} = G_{\text{п.}ci-1} + \Delta G_{\text{п.}ci},$$

где $G_{\text{п.}ci-1}$ – продукты сгорания, поступающие из предыдущей зоны;
 $\Delta G_{\text{п.}ci}$ – продукты сгорания, образующиеся в i -й зоне.

Для "бедных" смесей ($a > 1,0$):

$$\Delta G_{\text{п.}ci} = \Delta \eta_i G_{\Pi i} (1 + L_0).$$

Для "богатых" смесей ($a < 1,0$):

$$\Delta G_{\text{п.}ci} = \Delta \eta_i G_{\text{В}i} \frac{L_0 + 1}{L_0}.$$

Приведенные балансовые уравнения позволяют определить изменение основных физических параметров по длине БГУ.

Характеристикой функционального отказа является выход за пределы допуска ДП. Решение о работоспособном состоянии объекта принимается на основе измерения совокупности ДП, причем эта совокупность тем больше, чем сложнее система. Определение состояния на основе оценки совокупности ДП оказывается сложной научно-технической задачей, включающей следующие операции: выбор совокупности ДП, выбор допусков на каждый ДП, измерение текущих значений параметров и другие рассмотренные операции, включая прогнозирование. В случае, если значения диагностических параметров не поддаются непосредственному измерению, они могут быть найдены путем обработки других параметров, связанных с искомыми прямыми функциональными зависимостями. Для каждого объекта необходимо иметь перечень признаков, позволяющих выявить основные возможные допустимые состояния, характеризующие нормальное функционирование или потерю работоспособности. В ряде случаев часть параметров системы, которая не может быть проконтролирована «визуально», должна контролироваться с помощью специальных средств диагностики и контроля. Оптимизация всей совокупности параметров при контроле функционирования, как правило, не производится, но при необходимости она осуществляется теми же методами, которыми осуществляется выбор совокупности ДП для контроля работоспособности системы.

4.6 Выводы по главе

По результатам выполненных в четвертом разделе исследований можно сделать следующие выводы:

1 Для полного достижения поставленной цели работы необходимо синтезировать алгоритмы системы оперативной диагностики технического состояния БГУ и её отдельных агрегатов.

2 Подсистема диагностики использует практически ту же информацию, что и подсистема управления, поэтому подсистема контроля может быть с успехом использоваться и для информационного обеспечения подсистемы диагностики.

3 Совместная работа подсистем контроля, управления и диагностики даст значительный синергетический эффект.

4 Предложен метод оценки технического состояния технологического объекта по значению степени его управляемости.

5 Разработан и исследован алгоритм диагностики на основе интеллектуальных моделей оценки степени управляемости объекта.

6 Предложены алгоритмы анализа технического состояния отдельных агрегатов БГУ.

7 Результаты приведенных выше исследований нами в [72, 75, 77, 79].

5 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ И АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ

5.1 Структура трехуровневой системы управления процессом

Газификатор для низкокачественного биогаза, запатентованного Институтом энергетики, прошла ряд тестов, чтобы определить степень его готовности к использованию в агропромышленных комплексах. Исследование было направлено в первую очередь на определение его способности для образования стабильного пламени, газификации и идентификации потенциальных эксплуатационных и конструкционных проблем. Дополнительной особенностью используемого материала является его высокая устойчивость к коррозии и кислотами. Из-за низкой мощности газификатора, по сравнению с пылевыми газификаторами необходимо было сделать новый диффузор. Форму диффузора изготовлена из керамической массы. Важным элементом подготовки газификатора к тесту, было также изготовление термической изоляции газовой трубы, которой температура на выходе из газогенератора составляет прибл. 400-600°C.

Основная цель исследования заключалась в оценке концептуальной основы, которые в основном состоят в большой степени на расширение зоны применения газификатора к газификации биомассы.

Этот газификатор характеризуется:

- узким диапазоном стабильной работы, что приводит к необходимости частого включения поддерживающей газификатора,
- высокие собственные, сопротивления, которые приводят к продувке газификатора. Эти недостатки ограничивают возможность применения этой концепции к газу с низким и переменным качеством. Для устранения этих недостатков, разработана в рамках проекта новая концепция газификатора.

Результаты испытаний также служили для проверки разработанных в Институте энергетических математических моделей. Исследование системы газификатора была проведена в зоне изменений параметров, указанных в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Условия работы исследовательской установки.

параметр	описание
Топливо	гранулят
Воздух до газогенератора	25-55 nf/h
Газ до газификатора	35-75 m ³ /h
теплотворная	5 MJ/m ³ , ± 0,2
Тепловая мощность Газ	66-110 kW
Воздух в газификаторе	40-110 m ³ _в /h

5.2 Алгоритм для расчета расхода биогаза при заданной степени газификации

В прямоточном газификаторе с биомассы и воздух протекают через устройство в том же направлении. В этой конфигурации, биомасса подается из верхней части устройства, в то время как воздух - на высоте камеры сгорания. В верхней части устройства биомассу высушивают и подвергают пиролизу, а в камере сгорания, происходит частичное окисление под действием поступающего воздуха. Газовый продукт, после прохождения через зону восстановления, передается под колосниковой решеткой. В этой конфигурации, газ из пиролиза, содержащий большое количество смол, проходит через зону газификации, которая часто снабжена специально разработанным сужением (горлом), где высокая температура и присутствие кислорода способствуют их крекингу и частичному окислению.

Затем газ проходит через горячую зону восстановления (температура ок. 800 ° C), где взаимодействие смол с карбонизатом приводит к последующему уменьшению их количества. В то же время содержание несгоревшего вещества выше, чем в противоточном реакторе. Кроме того, общая энергоэффективность прямоточного реактора газификатора ниже, чем противоточного реактора из-за высокой температуры биогаза, выходящего из реактора [42]. Тем не менее, гораздо меньшее количество смол в газе (даже ниже 1 г/м³ для хорошо спроектированного реактора и хорошего биогаза) является большим преимуществом с точки зрения применения, чем более низкая энергоэффективность реактора газификации.

Как уже упоминалось выше, реакторы газификации с твердым слоем имеют простую структуру. Также более простым является управление процессом по сравнению с газификаторами с псевдооживленным слоем или потоковыми реакторами газификации из-за меньшего количества параметров процесса. Гораздо более трудной является оптимизация процесса из-за его неомогенного (неоднородного) и локально стохастического характера [4].

Реакторные системы питания включают в себя следующие элементы:

- **Система подачи биогаза:** два резервуара, два улитковые податчики и тензометрические весы для измерения потока подаваемого биогаза; топливо подается из верхней части реактора, насыпаясь на решётку и заполняя пиролитическую трубу - в зависимости от режима работы газификатора;

- **Система подачи воздуха:** нагнетательный вентилятор и измерительно-регулирующая установка. Измерение потока осуществляется с помощью измерительных установок, а регулировка - с помощью регулирующих клапанов, управляемых PLC. Воздух может подаваться к соплам в пиролитической трубе независимо и под решётку. Таким образом можно оптимизировать зоны, богатые кислородом, **что оказывает влияние на снижение количества смол** и на переработку угля. Кроме того, воздух может подаваться холодным (без предварительного подогрева) или нагретым теплом от потока выходного биогаза. Это повышает количество тепла,

подаваемого в процесс, что снижает λ , тем самым увеличивая химическую эффективность процесса;

- **Система подачи водного пара:** пар подается из узла теплоэлектростанции. Измерение расхода (потока) осуществляется с помощью измерительных узлов, **а регулировка осуществляется вручную.** Водный пар играет активную роль в процессе газификации, в частности, в реакциях преобразования водяного биогаза и реформинга. Так как большинство из этих реакций, кроме реакции преобразования водяного биогаза, - эндотермические реакции, то можно использовать водяной пар для контроля (локального) температур процесса;

- **система подачи воздуха в горелку:** аналогично с системой подачи воздуха в реактор газификации.

Важным будет также мониторинг процесса и его ближайшего окружения: многоканальные датчики биогаза (например, CO, CO₂, O₂, H₂S), средства индивидуальной защиты и установленные процедуры безопасности позволят безопасную эксплуатацию установки и управление рисками.

5.3 Разработка интеллектуальных моделей (алгоритмов) управления

В работе выполнено компьютерное моделирование схемы БГУ на основе газификации биомассы в программе Aspen Plus 7.3.2, приобретенной на кафедре ЛПУ. Данная программа представляет собой универсальный продукт, с помощью которого возможно построение и расчет блоков газификации или пиролиза твердого органического топлива [73, 96, 100]. Программный продукт Aspen Plus, выпущенный американской фирмой Aspen Tech Inc., предназначен для моделирования статических и динамических режимов энергетических и химико-технологических процессов и систем [104]. Для работы с данным программным продуктом пользователь должен уметь пользоваться персональным компьютером и операционной системой Windows 95 или более поздней. Aspen Plus включает в себя большую базу данных по различным неорганическим и органическим химическим веществам в различных агрегатных состояниях и различным смесям веществ [8]. В состав данного программного продукта входят различные программные модули для расчета типовых химико-технологических процессов, таких как ректификация, абсорбция, выпаривание, сушка, рекуперация тепла. Программный продукт Aspen Plus решает многопараметрические задачи и позволяет производить синтез оптимальных систем теплообмена, осуществлять расчет различных типов химических реакторов, смесителей и делителей потоков [53, 54].

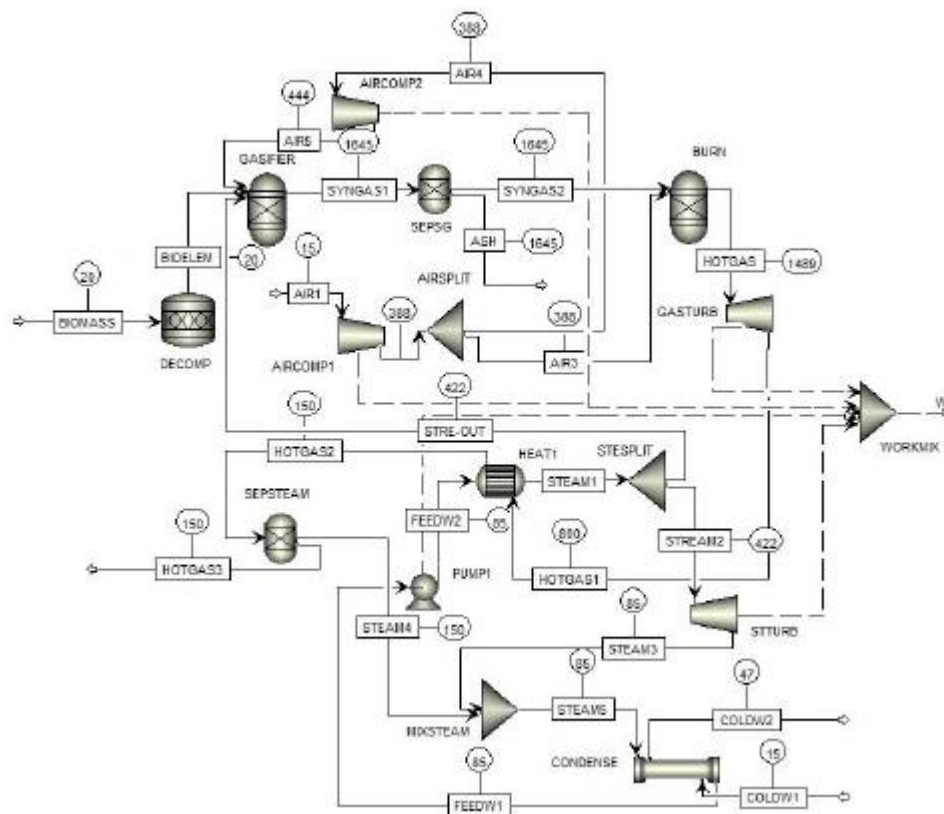


Рисунок 5.1 – Моделирование схемы БГУ в программе Aspen Plus

На рисунке 5.1 представлена схема БГУ на основе газификации биомассы, спроектированная в данной программе. Главным преимуществом подобной программы является возможность проводить анализ всех стадий энергетического комплекса, начиная расчетом химических процессов непрерывной газификации и заканчивая оценкой эффективности выработки электрической энергии в цикле БГУ. В данной схеме блок газификации включает в себя два компонента: блок расчета декомпозиции биомассы и реактор Гиббса, где непосредственно осуществляется процедура расчета равновесного состава газа. Для каждого потока вещества указана его температура в градусах Цельсия.

В программе были проведены расчеты для определения оптимальных режимных параметров различных компонентов тепловой схемы и всей системы БГУ [18, 49]. На рис. 4.7. представлены результаты варьирования коэффициента избытка воздуха с целью изучения его влияния на температуру дымовых газов на входе в турбину и полезную электрическую мощность ГТУ.

5.4 Выводы по главе

В настоящее время требуется движение в сторону дифференциации первичных источников энергии, используемых человечеством. Хотя мнения относительно последствий глобального потепления разделены, но тем не

менее, до сих пор остается открытым вопрос энергетической безопасности для будущих поколений.

Одним из наиболее важных критериев оценки работы газификатора будет *качество получаемого биогаза*. На практике она оценивается на основании:

- химического состава и связанной с ним теплотворной способности,
- количества загрязняющих вредных веществ в процессах с использованием биогаза, например, пыли, смол, соединений серы, щелочных металлов и т. д.

Использование биомассы в агропромышленных комплексах является одним из возможных путей в процессе дифференциации. Использование технологии газификации, вместо газификации биомассы, открывает возможность локального (распределенного) производства электроэнергии и тепла. Использование этой технологии в сельскохозяйственных районах с высоким уровнем поставок биомассы к количеству жителей позволило бы удовлетворить местный спрос на энергию с использованием местных источников первичной энергии, что явилось бы шагом на пути к устойчивой и возобновляемой энергетике. Кроме того, использование биомассы идеально подходит для балансирования потока энергии, получаемой от переменных источников, то есть солнца и ветра. Является поэтому элементом возобновляемого и устойчивого энергетического сочетания.

Технология газификации, разработанная и запатентованная Институтом энергетики, позволяет газификацию биомассы широкого спектра, начиная с древесной биомассы, через сельскохозяйственную и до текущих испытаний с газификации отходов. Гибкость биогаза позволяет повысить доступность системы, а важную роль играет возможность работы реактора в различных режимах, в зависимости от подаваемого биогаза в данный момент времени. При более качественном топливе (небольшое количество золы) установка может работать в режиме, который позволяет достичь более высокий уровень преобразования угля и более высокий степень чистоты биогаза (меньше смол). Тем не менее, если будет использоваться топливо с высоким содержанием золы, что может вызвать проблемы при перемещении слоя из-за зашлакованности, существует возможность перехода в режим, который позволяет легче выделять твердые вещества, но по цене более низкой, чем цена преобразования углерода и увеличенного количества примесей в газе. Так как продуктом процесса газификации является горючий газ, т.е. вторичный энергоноситель, то существует также широкий спектр приложений, которые его используют. В случае распределенной энергетике, где стоимость покупки будет играть существенную роль в принятии инвестиционного решения, приложение, вероятно, будет ограничено до (со)сгорания в энергетическом котле или при использовании систем СНР, которые используют двигатель внутреннего сгорания. В будущем интересной возможностью является использование топливных элементов, которые могли бы почти в два раза увеличить электрическую эффективность всей системы (смотрите главу 14). В более

крупном масштабе можно также рассмотреть возможность производства жидкого биогаза. Многого можно получить путем интенсификации процесса, то есть, через способ проектирования различных химических процессов, позволяющий максимизировать его эффективность при минимизации потребности в энергии. Использование биомассы для энергетических процессов на данный момент до сих пор встречает сопротивление из-за высокой стоимости энергии, полученной таким образом. Однако следует помнить о том, что на протяжении десятилетий, если не столетий, использовались ископаемые источники, которые оказались чрезвычайно дешевыми в эксплуатации. Поскольку минеральные ресурсы были доступны в больших количествах, даже несмотря на постепенное увеличение цен, например, на нефть, стоимость их покупки была и есть приемлемой. Увеличение стоимости энергии, вызванное использованием возобновляемых источников энергии, является результатом десятилетий плохого управления легкодоступными источниками энергии и неконтролируемым ростом спроса на неё, особенно в развитых странах, и в настоящее время также в развивающихся. Работа по технологии использования возобновляемых источников энергии позволяет опередить критический момент, когда-либо закончатся ископаемые виды биогаза, доступные по приемлемым ценам, или когда изменение климата будет неприемлемо, а нет уверенности, не является ли это именно этим моментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

В настоящее время требуется движение в сторону дифференциации первичных источников энергии, используемых человечеством. Хотя мнения относительно последствий глобального потепления разделены, но тем не менее, до сих пор остается открытым вопрос энергетической безопасности для будущих поколений.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1 Предложено использовать разработанный на кафедре «Автоматизация и управление» КазНИТУ метод создания систем управления, основанный на составлении матрицы планирования ПФЭ вместо рекомендованных в литературе правил продукций, в которой сосредоточены многолетний опыт, знания и интуиция людей-экспертов.

2 Рассмотрен процесс сжигания биогаза как объект управления.

3 Разработана подсистема контроля основных параметров технологического процесса сжигания биогаза.

4 Предложена структура системы управления на среднем уровне АСУТП, что позволит достаточно точно корректировать температуру под сводом топочной камеры - тем самым снижая потери с отходящими газами.

5 Синтезированы и исследованы на адекватность, однозначность, устойчивость и чувствительность четыре модели управления на среднем уровне АСУТП: нейросетевая, нечеткая, нейро-нечеткая и полученная с помощью метода планирования эксперимента.

6 Предложен метод создания систем диагностики состояния технологического оборудования на основе оценки степени его управляемости.

7 Синтезированы и исследованы интеллектуальные модели (алгоритмы) оперативной диагностики состояния БГУ.

8 В качестве технических средств для проведения промышленных испытаний интеллектуальных алгоритмов приняты: сервер действующей АСУТП, новая рабочая станция и интеллектуальный контроллер.

9 Для согласования программного обеспечения среднего и нижнего уровней АСУТП предложена структурная схема передачи данных между уровнями.

10 Проведены испытания интеллектуальных алгоритмов в промышленных условиях ТЭЦ Мегатерм (Польша), ГКП «Астана Су Арнасы».

11 Имитационные испытания алгоритма, предложенного авторами [75, 77] показали, что рекомендации компьютера не совпадают с действиями оператора-технолога. Проведенный совместно с ИТР анализ показал, что ошибка ранее разработанных алгоритмов управления процессом сжигания биогаза заключается в постоянном запаздывании рекомендаций компьютера от реальных действий оператора.

12 Запаздывание объясняется тем, что в качестве обратной связи по оценке качества биогаза использовалась информация о количестве возврата, оценка которого производилась приборным способом. В то время как оператор оценивал качество биогаза по яркости пламени, определяемого им вручную на «глазок».

13 Проведены испытания скорректированной модели в промышленных условиях, которые показали, что визуальное определение качества биогаза позволило значительно сократить время запаздывания по сравнению с алгоритмом управления, предложенным в [75, 77].

15 Сравнительные испытания скорректированного алгоритма (без управления от компьютера - 20 дней и с управлением – 19 дней) выявили его эффективность - количество возврата сократилось на 4-6%. Такой эффект получен за счёт улучшения качества биогаза при той же средней (за 19 дней) производительности пиролизера, что и являлось целью всей работы. При этом ожидаемый экономический эффект в годовом выражении составит 17 млн. тенге из-за снижения возврата на 4,8%.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов исследований. Полученные результаты могут быть использованы при создании интеллектуальных систем управления и диагностики для любых других технологических процессов химической, металлургической, нефтехимической и других отраслей промышленности.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. Проведенные испытания интеллектуальных алгоритмов управления и диагностики в промышленных условиях показали их высокую эффективность - ожидаемый экономический эффект от внедрения интеллектуальной системы составит 7 млн. тенге в год для одних очистных сооружений.

Эффект получен за счёт снижения потерь биогаза с отходящими газами и без аварийной работы БГУ во время проведения длительных испытаний.

Промышленные испытания скорректированного алгоритма управления процессом сжигания биогаза выявили его эффективность - количество возврата сократилось на 4-6%. Такой эффект получен за счёт улучшения качества биогаза при той же средней производительности пиролизера, что и являлось целью всей работы. При этом ожидаемый экономический эффект в годовом выражении составит 17 млн. тенге из-за снижения возврата был увеличен на 4,8%.

Практическая значимость работы:

- предложена трёхуровневая иерархическая структура АСУ ТП с подсистемами контроля, управления и диагностики;
- разработана и внедрена подсистемы контроля основных технологических параметров процесса сжигания биогаза;
- разработаны подсистема управления процессом и подсистема оперативной диагностики состояния БГУ;

- проведены длительные испытания интеллектуальной подсистемы управления процессом сжигания биогаза и подсистемы оперативной диагностики в промышленных условиях (Приложение В);

- в использовании результатов исследований в учебном процессе по дисциплине «Методы искусственного интеллекта в системах управления», «Автоматизация типовых технологических процессов» (Приложение Г).

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области. На основании выполненных исследований получены следующие новые (не имеющие аналогов) научные результаты:

- синтезирована интеллектуальная модель управления процессом сжигания биогаза;

- проведены исследования интеллектуальных моделей на адекватность, устойчивость, однозначность и чувствительность;

- предложен метод создания автоматизированных систем оперативной диагностики состояния технологического объекта;

- синтезированы и исследованы три скорректированных модели управления процессом сжигания биогаза: нейросетевая, нечеткая и нейро-нечеткая.

Оценка полноты решений поставленных задач. Все поставленные в диссертационной работе задачи выполнены в полном объеме. Диссертация выполнена с соблюдением принципов самостоятельности, внутреннего единства (все разделы и положения логически взаимосвязаны), научной новизны, достоверности (интеллектуальные алгоритмы управления и диагностики подтверждены промышленными испытаниями) и практической ценности.

По результатам исследований:

- опубликовано (Приложение Ж) 43 статьи и доклада, из них в том числе 2 за рубежом и 11 статьи в журналах базы «Скопус», 7 статей в «ТомсонРоутерс»;

- получено четыре акта внедрения (Приложения В, Г, Д, Е).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Turowski L., Является ли биомасса отходом? Экологический информационный центр - Ekorportal. пл., 2007.
2. Р. Василевски, Соболевский А. Твердые вторичные виды биогаза - в качестве части системы восстановления энергия из отходов, 2009, 28-33.
3. Т. Rajak, системы термической обработки бытовых отходов в Казахстане - условия, планы, реализация, New Energy, 1, 2008, 2-10.
4. А. Соболевский, Василевски Р., Стельмах С., использование твердых вторичного биогаза в энергетическом секторе, энергетической политики, т. 10, специальный выпуск 2, 2007, 379-389.
5. Использование возобновляемых источников энергии. Сельскохозяйственные энергетические ресурсы - коллективная работа под редакцией Б. Уилер и М. Матука. А: 2011 16.02.2011.
6. Подача биомассы для термохимических реакторов - Дай Цзяньцзюнь, Цуй Хэпин, Джон Р. Грейс - "Прогресс в области энергетики и горения науки" 38 (2012) 716 - 736.
7. Тепло из биомассы на практике 2008 - Польская палата Биомасса, Варшава - Кельце, 2008.
8. Suzuki T.: Горелка и способ сжигания биогаза low калорийность биогаза, U. S. Patent 5, 447, 427, 1995.
9. Trimis D., Wawrzinek K.: Пламя стабилизации высокой диффузных газовых смесей в пористой инертной среде, Журнал вычислительной и прикладной механики, Vol 5, No. 2, 2004, стр. 367-381.
10. Mujeebu M.A., MZ Абдулла, Абу Бакар M.Z, А.а Мохамад, Абдулла М.К: Применение технологии сжигания биогаза пористых СМН - Обзор, Прикладная Энергия, Том 86, 2009, 1365-1375...
11. Рид Р. Д., Шварц R.E.: Узел газификатора для сжигания биогаза теплотворной способности газов, патент США 4,323,343, 1982.
12. Pantangi V. K., S.C. Мишра: Сжигание газообразных углеводородных топлив в пористых средах - обзор, прогресс в развитии энергетических исследований, 2006.
13. C. Mofbauer, Pickenacker O., Pickenacker K., trimis D.: Применение газификатора технологии ячеистого в энерго- и Тепло- Engineering, Пятой Международной конференции по технологиям и газификации для чистой окружающей среде, Португалия, Vol. , 1999, стр. 519-523.
14. Р. Танака, М. Шинода, Arai N.: Сгорания характеристики керамической горелкой heatrecirculating с использованием low-теплотворную-Fuel преобразования энергии и управления, Vol 42, 2001, стр. 1897-1907..
15. Mujeebu M.A., Абдулла М. З., М. З. Абу Бакар, Мохамад А. А., Muhad R.M.N, Абдулла М.К: Горение в пористых средах и ее применения - комплексное обследование.. Журнал экологического менеджмента, 2008, стр. 1-26.

16. Намамре З. А., С. Diezinger, Талукдар П., фон ISSENDORFF В., trimis D.: Сжигание low теплотворной способности газов от свалок и пиролиз отходов с использованием пористой среды технологии газификатора. Транс Ichem, часть В, безопасности технологических процессов и охраны окружающей среды, Vol. 84 (B4), 2006, стр. 297-308.

17. С. Восс, М. Mendes, Pereira J.C., trimis D.: Сравнение экспериментальных и численных результатов Ultra-Lean H₂ / CO горения внутри инертную пористую Media. Труды Совещания Европейского газификации 2009 года.

18. М. Шинода, Р. Танака, Arai N.: Оптимизация теплопередачи характеристик керамической горелкой heatrecirculating во время метан / воздух, и газификации / воздух с низким калорийность биогаза. Преобразование энергии и управления, Vol. 43, 2002, стр. 1479-1491. [13]

19. С. Вуд Харрис А.Т.: Пористые газификатора для бедной топливной смеси приложений. Прогресс в области энергетики и сжигания биогаза наук, т. 34, 2008, стр. 667-684.

20. А. А. Halbouni, Rahms Н. Горнер К.: Эффективная концепция сгорания для low теплотворной способности газов. Международная конференция по возобновляемым источникам энергии и качества электроэнергии, 2007.

21. Hoetger M. Тиле W.: Порового типа газификатора с карбида кремния пористого тела, US 2006/0035190 A1, 2006.

22. Wunning J.: Беспламенной Окисление, 6-й HiTACG симпозиум - 2005, Эссен - Германия 2005.

23. А. Шустер, М. Zieba, Scheffknecht Г., Wunning J.G.: Оптимизация обычной системы для сжигания биогаза биомассы путем применения беспламенной окисления. Конференция 15-я IFRF участника, 2007.

24. Lu H., Robert W., Peirce G., Ripa B., Baxter L.L., Comprehensive study of biomass particie combustion, Energy & Fuels 22, 2008, pp. 2826-2839.

25. Bartle K.D., et al., The combustion of droplets of liquid fuels and biomass particles, Fuel 90,2011, pp. 1113-1119.

26. Wornat M., et al., Single-particle combustion of two biomass chars, 26 th Symposium (Int.) on Combustion, 1996, pp. 3075-3083.

27. Yang Y. B. et al., Combustion of a single particie of biomass, Energy & Fuels 22, 2008, pp. 306-316.

28. Porteiro E., et al., Mathematical modelling of the combustion of a single wood particie, Fuel Processing Technology 87,2006, pp. 169-175.

29. Thunman H., et at., Combustion of wood particles - a particie model for Eulerian calculations, Combustion and Flame 129, 2002, pp. 30-46.

30. Haseli Y., van Oijen J.A., de Goey L.P.H., Reduced model for combustion of a smali biomass particie at high operating temeratures, Bioresource Technology 131, 2013, pp. 397-04.

31. Haseli Y., van Oijen J.A., de Goey L.P.H., A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particie, Bioresource Technology 102, 2011, pp. 9772-9782.

32. Saastamoinen., et al., Burnout of pulverized biomass particles in large scale boiler - single particle approach, *Biomass & Bioenergy* 34, 2010, pp. 728-736.
33. Williams A., et al., Pollutants from the combustion of solid biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science* 38, 2012, pp. 113-137.
34. Karlstrom O., Brink A., Hupa M., Time dependent production of NO from combustion of large biomass char particles, *Fuel* 103, 2013, pp. 524-532.
35. Gómez-Barea A., Leckner B., Modeling of biomass gasification in fluidized bed, *Progress in Energy and Combustion Science* 36, 2010, pp. 444-509.
36. Eaton A.M., Smoot L.D., Hill S.C., Eatough C.N., Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models, *Progress in Energy and Combustion Science* 25, pp. 387-436, 1999.
37. Williams A., Pourkashanian M., Jones J.M.: Combustion of pulverized coal and biomass, *Progress in Energy and Combustion Science* 27, pp. 587-610, 2001.
38. Williams A., Backreedy R., Habib R., Jones J.M., Pourkashanian M.: Modelling coal combustion: the current position, *Fuel* 81, pp. 605-618, 2002.
39. Smoot L.D., Smith P.J.: Coal combustion and gasification, *The Plenum Chemical Engineering Series*, Springer, 1985.
40. Smoot L.D.: A decade of combustion research, *Progress in Energy and Combustion Science* 23, pp. 203-232, 1997.
41. Maloney J.O.: *Perry's chemical engineers' handbook*, McGraw-Hill; 2008.
42. Elarlow F.H., Amsden A.A., Numerical calculation of almost incompressible flow, *Journal of Computational Physics* 3, pp. 80-93, 1968.
43. Rivard W.C., Farmer O. A., Butler T.D.: RICE: A computer program for multicomponent chemically reactive flows at all speeds, Los Alamos National Lab., Los Alamos, NM, Rept. LA-5812, 1975.
44. Lewtak R., Marek M., Numerical and experimental investigations into combustion of a single biomass particle, *Proceedings of the 8th US National Combustion Meeting*, Park City, Utah, USA, May 19-22, 2013, pp. 1-20.
45. Levendis Y.A., Joshi K., Khatami R., Sarofim A.F.: Combustion behavior in air of single particles from three different coal ranks and from sugarcane bagasse, *Combustion and Flame* 158, pp. 452-465, 2011.
46. Lettner R, Timmerer H., Haselbacher R, Guideline for safe and eco-friendly biomass gasification, *Gasification guide IEE/06/078/SI2.447511*, December 2007. [2]
47. Kaupp A., Small scale gas producer-engine systems, wznawione przez Biomass Energy Foundation Press, 1948. [3] Balat M., Balat M., Kirtay E., Balat H., Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: gasification systems, *Energy Conversion and Management* 50 (2009), pp. 3158-3168. [4]
48. Wang L., Weller C.L., David D., Jones D.D., Hanna M.A., Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production, *Biomass and bioenergy* 32 (2008), pp. 573-581. [5]

49. Ruiz J.A., Juarez M.C., Morales M.R, Munoz R, MendMI M.A., Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers, *Renewable and sustainable Energy Reviews* 18 (2013), pp. 174-183. [6]
50. Dai, Cui H., Grace J.R., Biomass feeding for thermochemical reactors, *Progress in Energy and Combustion science* 38 (2012), pp. 716-736. [7]
51. Gómez-Barea A., Leckner B., Modeling of biomass gasification in fluidized bed, *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010), pp. 444-509. [8]
52. Umberto Arena, Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Management* 32 (2012).
53. Altafini C, Wander P. & Barreto R., Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model *Energy Conversion and Management*, 2003, 44, pp. 2763-2777.
54. Borowiecki T., Kijęński J., Machnikowski J. & Sciażko M. (ed.), *Czysta energia, produkty chemiczne i paliwa z węgla - ocena potencjału rozwojowego*, 2008.
55. Giltrap D.L., McKibbin R. & Barnes G.R.G., A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier *Solar Energy* 2003, pp. 85-9174.
56. Hobbs M.L., Radulovic P. & Smoot L., Prediction of effluent temperatures and. compositions for fixed-bed coal gasifiers, *Fuel*, 1992, 71, pp. 1177-1194.
57. Iordanidis A., *Mathematical modeling of catalytic fixed bed reactors* University of Twente, 2002.
58. Jayah T., Aye L., Fuller R. & Stewart D., Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying *Biomass and Bioenergy* 2003, 25, pp. 459-69.
59. Li X.T., Grace J.R., Lim C.J., Watkinson A.P., Chen H.P. & Kim J.R., Biomass gasification in a circulating fluidized bed *Biomass and Bioenergy* 2004, 26, 171-193.
60. Melgar A., Perez J., Laget H. & Horillo A., Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process *Energy Conversion and Management*, 2007, 48, pp. 59-67.
61. Roy R, Datta A. & Chakraborty N., Assessment of cow dung as a supplementary fuel in a downdraft biomass gasifier *Renewable Energy*, 2009. [10]
- Ruggiero M. & Manfrida G., An equilibrium model for biomass gasification processes, *Renewable Energy*, 1999, 16, pp. 1106-1109.
62. Shin D. & Choi S., The combustion of simulated waste particles in a fixed bed *Combustion and Flame*, 2000, 121, pp. 167-180.
63. Syamlal M. & Bissett L., *METC Gasifier Advanced Simulation (MGAS) model* U.S. Department of Energy, Morgantown Energy Technology Center, USA, 1992.
64. Zainal Z. A., Ali R., Lean C.H. & Seetharamu K., Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials *Energy Conversion and Management*, 2001, 42, pp. 1499-1515.

65. Ahmed T, Ahmad M., Yusup S., Inayat A. & Khan Z., Mathematical and computational approaches for design of biomass gasification for hydrogen production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012,16, pp. 2304-2315.

66. Gerun L., Paraschiv M., Vijeu R., Bellettre, Tazerout M., Gobel B. & Henriksen U., Numerical investigation of the partial oxidation in a two-stage downdraft gasifier, *Fuel*, 2008, 87, pp. 1383-1393.

67. Sharma A., Modeling fluid and heat transport in the reactive, porous bed of downdraft (biomass) gasifier, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28, pp, 1518-1530.

68. Walters D. & Cokljat D., A three-equation eddy-viscosity model for reynolds-averaged navier-stokes simulations of transitional flows, *Journal of Fluids Engineering*, 2008,130, 121401:1-14.

69. M. Siedlecki О сжигания биогаза в парокислородной взорван CFB газификатор с акцентом на модернизацию биогаза: технологии фон, эксперименты и математическое моделирование, тезис, Technische Universiteit Delft, Нидерланды.

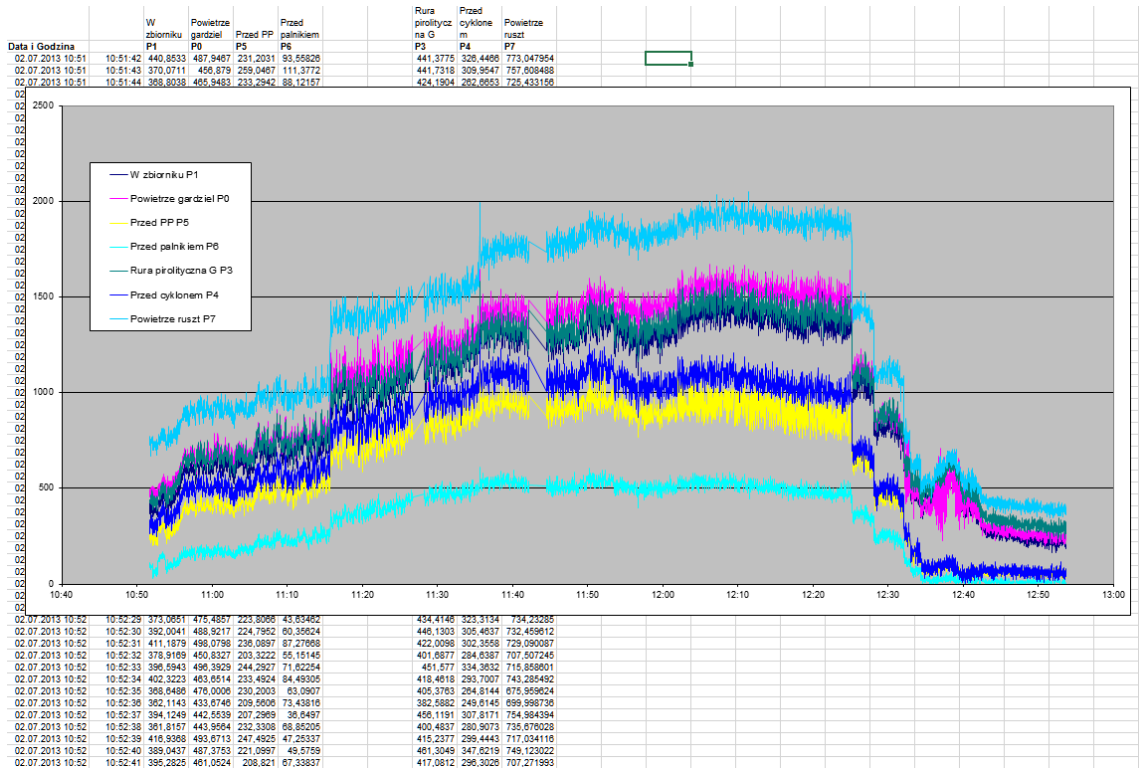
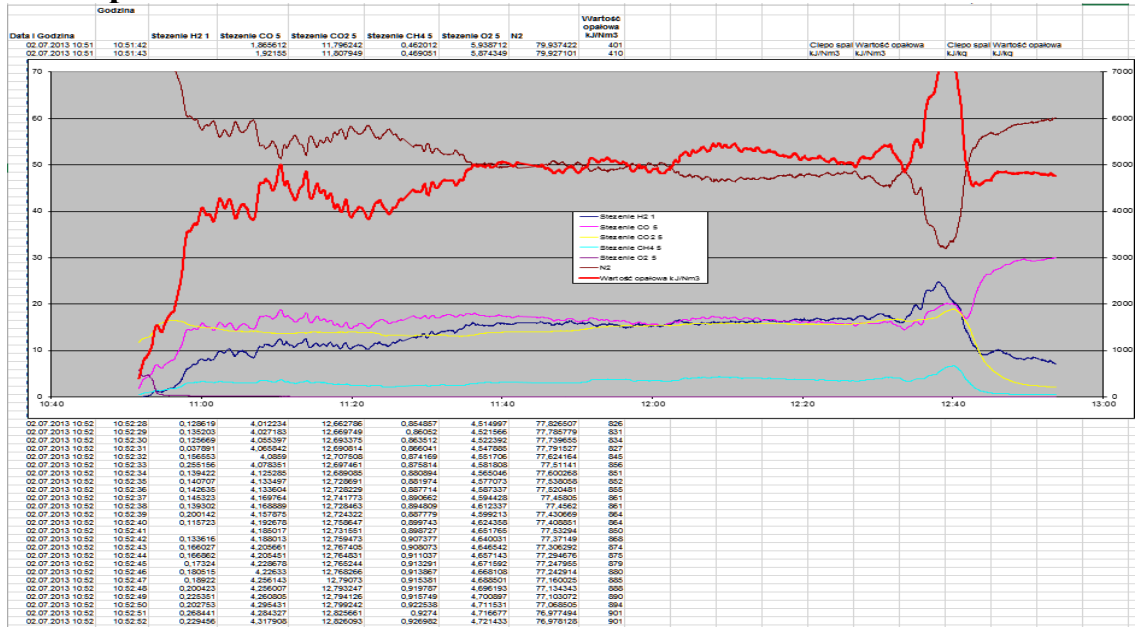
70. Teislev Б., Harboøre - щепы восходящий поток газификатор и 1500 кВт газовые двигатели работают на 32% энергетической эффективности в конфигурации ТЭЦ.

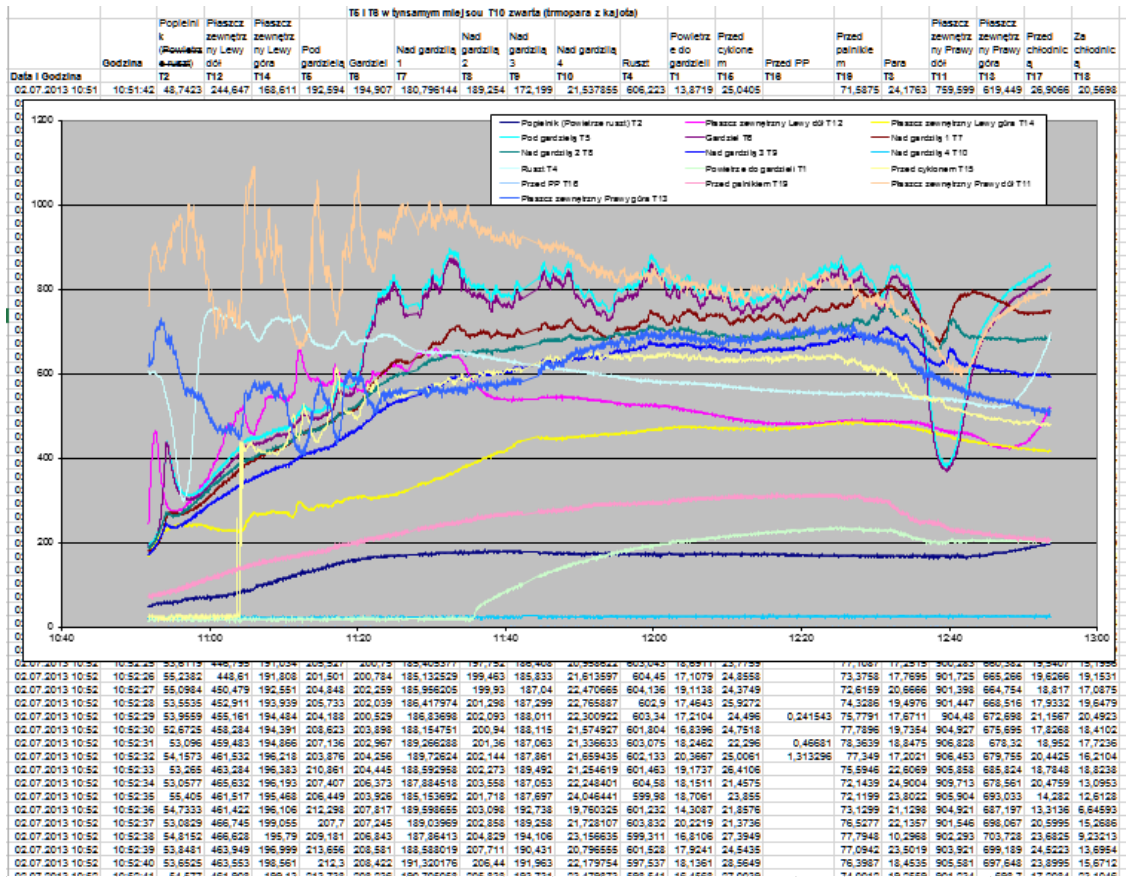
71. Бриджуотер А. В., Технико-экономическое обоснование сжигания биогаза для выработки электроэнергии, биогаза 74 (2005), стр. 631-653.

72. И. Олофссон, А. Нордин и Soderlind У., Предварительный обзор и оценка процесса технологий и систем, пригодных для Экономичное среднего масштаба сжигания биогаза для жидкого биогаза Отчет, ЕКПЧ 05-02 (2005), Университет Умео Швеция.

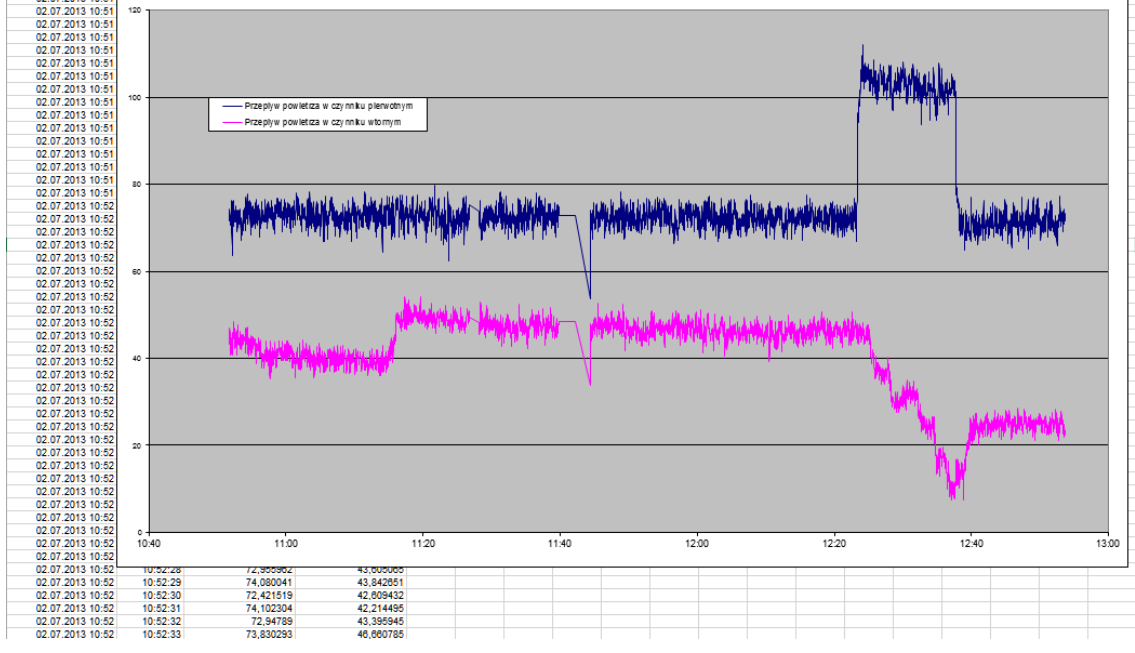
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Экспериментальные данные с объекта



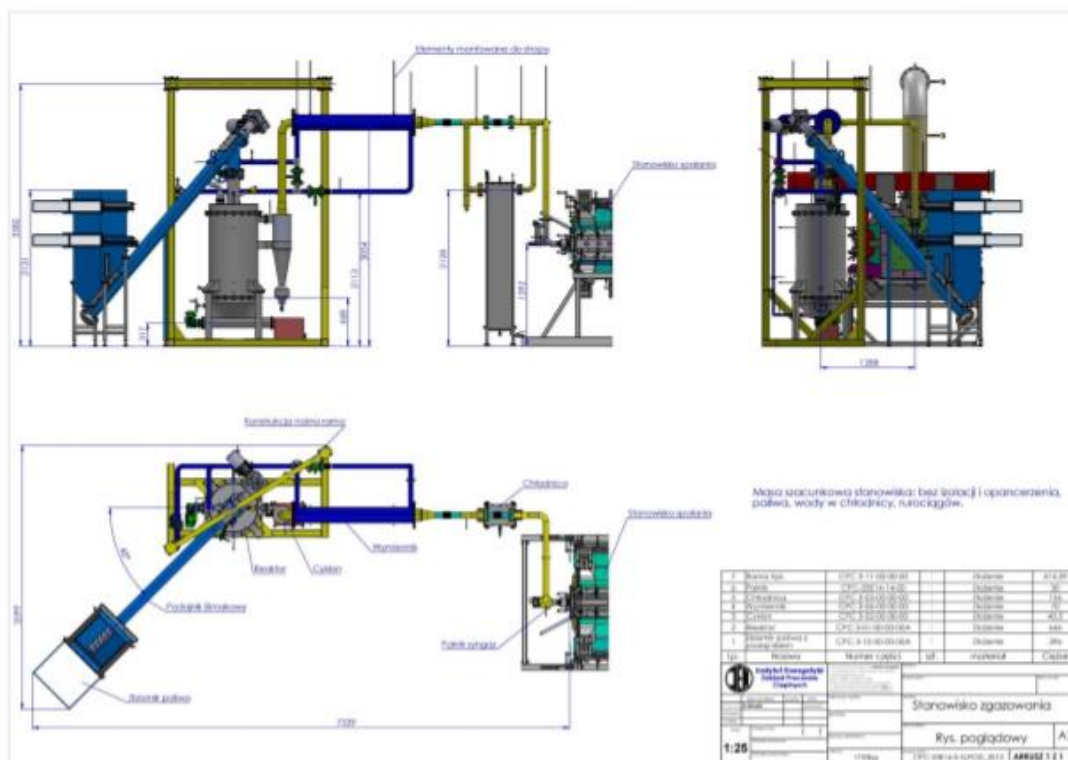


Data i Godzina	Przepływ powietrza w czynniku pierwotnym	Przepływ powietrza w czynniku wtórnym
02.07.2013 10:51	73,408691	43,103365
02.07.2013 10:51	72,250148	45,250108



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Чертежи



Rys. 2 Stanowisko badawcze – Instalacja zgazowania o mocy 80kW, zestawienie masowe.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения

MEGATEM EC-EUROPE Sp. z o.o.
20-097 Łódź, ul. Melpomska 7-9
REG. 000021971, NIP: 525-251-411

УТВЕРЖДАЮ
Zastępca Dyrektora Zakładu

Waldemar Wojcik
« » 2017г.

АКТ



о внедрении научных результатов диссертационной работы
PhD докторанта Казахского национального исследовательского
технического университета имени К.И.Сатпаева,
Жирновой Оксаны Викторовны
на тему «Разработка автоматизированной системы диагностики и
управления процессом сжигания биогаза»,
представленный на соискание ученой степени доктора PhD
по специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление»

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы PhD докторанта Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И.Сатпаева, специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление» Жирновой Оксаны Викторовны по теме: «Разработка автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза» были реализованы в процессах производственного комплекса. Были реализованы методы создания автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза, закономерностей взаимодействия различных газифицирующих агентов с углеродсодержащими материалами, методы исследования влияния температуры и вида сырья при бескислородной газификации углеродсодержащих веществ угледобывающей и лесоперерабатывающей промышленности с потоком перегретого водяного пара атмосферного давления на характеристики получаемого биогаза для развития новых подходов в создании полигенерирующих систем, обеспечивающих производство тепловой, электрической энергии. Методы исследования включают в себя экспериментальные исследования по установлению влияния температурных условий газификации, свойств исходного сырья на качественный состав и количественный выход биогаза; моделирование процесса сжигания биогаза с решением полученной модели итерационно-интерполяционным методом.

Научные результаты диссертационной работы являются актуальными и представляют практический интерес. Разработанные методы и полученные результаты диссертационной работы применяются в производстве для изучения и анализа современных технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе непрерывного пиролиза или газификации исходного топлива. Разработанная автоматизированная система диагностики и управления используется для мониторинга и диагностики состояния оборудования, расчета состава продуктов пиролиза и газификации

твердого топлива, на основе которой получены оптимальные режимные характеристики реакторов термической конверсии биомассы.

от Люблинского политехнического
университета, г.Люблин, Польша:
директор института электроники
и информационных технологий,
доктор технических наук,
профессор


Waldemar Wojcik
от предприятия
Techno-Nowoczesność

Irzysław Gulec

От КазННТУ имени К.И.Сатпаева

Научный руководитель, доктор
технических наук, профессор

_____ Сулейменов Б.А.

PhD докторант

_____ Жирнова О.В.



POLITECHNIKA LUBELSKA

LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin,

tel. (+48 81) 53 84 309

fax (+48 81) 53 84 312

http://www.pollub.pl

e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

Pełnomocnik Rektora
ds. Partnerstwa Wschodniego



POLITECHNIKA LUBELSKA

LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin,

tel. (+48 81) 53 84 309

fax (+48 81) 53 84 312

http://www.pollub.pl

e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

Pełnomocnik Rektora
ds. Partnerstwa Wschodniego

АКТ

**о внедрении научных результатов диссертационной работы
PhD докторанта Казахского национального исследовательского
технического университета имени К.И.Сатпаева,
Жирновой Оксаны Викторовны
на тему «Разработка автоматизированной системы диагностики и
управления процессом сжигания биогаза»,
представленный на соискание ученой степени доктора PhD
по специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление»**

Мы нижеподписавшие члены комиссии:

Председатель комиссии – директор института электроники и информационных технологий Люблинского политехнического университета, доктор технических наук, профессор Waldemar Wojcik

Члены комиссии: доктор технических наук, профессор института электроники и информационных технологий Люблинского политехнического университета – Andrzej Kotyła,
доктор технических наук, профессор института электроники и информационных технологий Люблинского политехнического университета – Andrzej Smolarz,

составили настоящий акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы PhD докторанта Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И.Сатпаева, специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление» Жирновой Оксаны Викторовны по теме: «Разработка автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза».

В лаборатории «Микропроцессорной техники и оборудования для исследования процесса сжигания биогаза» Люблинского политехнического университета (г.Люблин, Польша) внедрены результаты научных исследований PhD докторанта Жирновой Оксаны Викторовны по исследованию процесса получения биогаза при газификации и его дальнейшего сжигания, закономерностей взаимодействия различных газифицирующих агентов с углеродсодержащими материалами, исследованию влияния температуры и вида сырья при бескислородной газификации углеродсодержащих веществ угледобывающей и лесоперерабатывающей промышленности с потоком перегретого водяного пара атмосферного давления на характеристики получаемого синтез-газа для развития новых подходов в создании политенергирующих систем, обеспечивающих производство тепловой, электрической энергии и синтез-газа.

Актуальность исследования процесса сжигания биогаза обусловлена тем, что данная технология позволяет решать комплекс задач, связанных с использованием низкокачественных и возобновляемых ресурсов для производства тепла и энергии. В условиях острого энергетического кризиса остро стоит проблема сокращения этих энергозатрат за счет использования нетрадиционных источников энергии, имеющихся на очистных сооружениях и постоянно обновляемых. Развитие этого направления приведет к значительной экономии традиционных видов топлива. Не менее важным является экологический аспект, поскольку утилизация энергии органическими отходами значительно снизит загрязнение окружающей среды. Тема работы «Разработка автоматизированной

системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза» связана с тем, что эта система позволяет решать комплекс проблем, связанных с использованием некачественных и возобновляемых ресурсов для производства тепла и энергии. В то же время гетерогенность используемых сырьевых материалов, сложность и разнообразие химических реакций, необходимость увеличения теплотворной способности получаемого биогаза (синтез-газа) обуславливают необходимость создания эффективной системы для диагностики и контроля обработать. Проблема снижения энергозатрат всегда была очень острой. Кроме того, энергосбережение является важнейшим средством защиты окружающей среды, обеспечивая сокращение вредных выбросов пропорционально количеству сэкономленного газа. Поэтому оптимизация процесса сжигания биогаза на основе создания новых методов и средств контроля качества горения является актуальной научно-технической задачей.

Для решения поставленных задач в работе используются методы математического и физического моделирования, методы синтеза и структурного анализа систем, теории автоматического управления, а также методы статической динамики, методы планирования и обработки результатов экспериментов.

Научные результаты диссертационной работы являются актуальными и представляют практический интерес. Разработанные методы и полученные результаты диссертационной работы применяются в лаборатории для изучения и анализа современных технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе непрерывного пиролиза или газификации исходного топлива.

Разработанная автоматизированная система диагностики и управления используется для мониторинга и диагностики состояния оборудования, расчета состава продуктов пиролиза и газификации твердого топлива, на основе которой получены оптимальные режимные характеристики реакторов термической конверсии биомассы.

**Председатель комиссии:
доктор технических наук,
профессор**

Waldemar Wojcik

**доктор технических наук,
профессор**

Andrzej Kotyla

**доктор технических наук,
профессор**

Andrzej Smolarz

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznych
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
tel. (81) 53 84 309, fax. (81) 53 84 312

DYREKTOR
Instytutu Elektroniki i Techniki Informatycznych
Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

КАЗАХСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БҒЫМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
ҒЫЛЫМ КОМПЛЕКТІ
«ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ-ТЕХНИКАЛЫҚ
АКЦИОНЕРЛІК ОРТАЛЫҚ»
АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КОМПЛЕКТ НАУКИ
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ»

050026, Қазанстан Республикасы
Алматы қ., Бөкейбай б-ғары, 221
Тел.: +7 (727) 378-05-09, Факс: +7 (727) 378-05-47
Email: dir@int.kz; http://www.int.kz

050026, Республика Казахстан
г. Алматы, ул. Бөкейбай б-ғары, 221
Тел.: +7 (727) 378-05-09, Факс: +7 (727) 378-05-47
Email: dir@int.kz; http://www.int.kz

Исх №: 01-02-031659
46-05 2016

**Казахский национальный
исследовательский технический
университет им. К.И. Сатпаева**

Согласно Вашего запроса № 34,598 от 23.05.2016 г. предоставляю информацию о наличии публикаций докторанта PhD **Жирновой О.В.** в научных изданиях, входящих в базу данных Scopus (Elsevier, Нидерланды).

1. Журнал **Journal of Theoretical and Applied Information Technology** (Pakistan), ISSN 1992-8645, E-ISSN 1817-3195 входит в Scopus с 2010 года по настоящее время. Предметная область – **компьютерные науки, математика**;
2. Серийное издание **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering** (United States), ISSN 0277-786X, ISBN:978-162841880-4 входит в Scopus с 1981 года по настоящее время. Предметная область – **компьютерные науки, физика и астрономия, инженерия, материаловедение, математика**.

Публикации докторанта PhD **Жирновой О.В.:**

1. Amirgaliyev E.N., Kalizhanova A.U., Kozbakova A.K., Kashaganova G.B., Aitkulov Z.S., **Zhirnova O.V.** Software application design and 3D modeling for evacuation of people from educational institution // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2016. - V. 84. – Iss. 1. – P. 133-139.

Данная статья **выявлена** в базе Scopus. В момент ее опубликования в первой половине 2016 года журнал **«Journal of Theoretical and Applied Information Technology»** имел SJR за 2014 год, **равный 0,151**, действительный до июля 2016 г.

2. Lawicki T., **Zhirnova O.** Application of curvelet transform for denoising of CT images / Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015, Wilga; Poland, May 25-31, 2015 // Proceedings of

SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2015. - V. 9662. – Article number 966226.

Данные материалы конференции **выявлены** в базе Scopus. В момент их опубликования в первой половине 2015 года **«Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering»** имел SJR за 2013 год, **равный 0,192**, действительный до июля 2015 г.

3. Moskvina S.M., Yukhymchuk M.S., **Zhirnova O.**, Gromaszek K. Evaluation of the impact of uncontrolled parametric perturbations on stability of automatic systems with logical control units / 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications; Energetyk ResortLublin, Naleczow; Poland, Sep 22-25, 2015 // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2015. - V. 9816. – Article number 98161X.

4. Kvyetnyu R.N., Sofina O.Y., Lozun A.V., Smolarz A., **Zhirnova O.** Modification of fractal coding algorithm by a combination of modern technologies and parallel computations / 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications; Energetyk ResortLublin, Naleczow; Poland, Sep 22-25, 2015 // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2015. - V. 9816. – Article number 98161R.

Данные материалы конференции **выявлены** в базе Scopus. В момент их опубликования во второй половине 2015 года **«Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering»** имел SJR за 2014 год, **равный 0,212**, действительный до июля 2016 г.

Вице-президент АО «НЦНТИ»



Л. Абубакирова

Бүрентбас Ж.
8 (727) 378-05-13



УТВЕРЖДАЮ
Директор департаментов
DF&PD
ТОО «Сименс»
С.Мазуров
« » 2015г.

передачи методики интеграции промышленного контроллера «Simatic S7-1200» со средой Simulink пакета MathLab

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что предложенная методика была успешно опробована при программировании контроллера «Simatic S7-1200».

Данная методика передана в ТОО «Сименс» для дальнейшего использования при разработке и внедрении интеллектуальных систем управления различными технологическими процессами.

От КазНТУ имени К.И. Сатпаева:

Научный руководитель
научно-исследовательского
и учебного центра
систем автоматизации
Проректор по учебно-методической
работе и международным связям

С.С. Жусупбеков

Докторант
специальности 6D070200 (АиУ)
кафедры Автоматизация и управление

О.В. Жирнова

От ТОО «Сименс»:

Директор департаментов DF&PD



С.Мазуров

Бланк утверждения формы, выданной в соответствии с приказом Министерства образования и науки Республики Казахстан от 23.05.2016 года № 34,598. Форма утверждена на основании приказа № 34,598 от 23.05.2016 года.

002196



LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering & Computer Science
Institute of Electronics and Information Technology



ul. Nadbystrzycka 38A, 20-018 Lublin, Poland, tel. +48 81 538 43 700 fax. +48 81 538 43 12 e-mail: wif@poczta.um.lublin.pl

СПРАВКА

о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационного исследования
докторанта 2-го года обучения ИИТТ НАО КазНУТУ им. К.И. Сатпаева
специальности 6D070200 – Автоматизация и управление
Жирновой Оксаны Викторовны
по теме «Разработка автоматизированной системы диагностики и управления процессов сжигания биогаза»

Данная справка подтверждает, что в период прохождения 2 научной стажировки с 07.06.2016 г. по 08.07.2016г. в Люблинском политехническом университете, г. Люблин (Польша) докторантом Жирновой О.В. проведены следующие научно-экспериментальных работ диссертационного исследования:

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, на основе которой были рассчитаны коэффициенты зависимости для расчета коэффициента местных сопротивлений (от устройства барботажного перемешивания оригинальной конструкции биореактора, коэффициенты, определяющие максимальную удельную скорость роста микроорганизмов и коэффициент местных сопротивлений системы барботажного перемешивания. Получена эмпирическая зависимость для определения максимальной удельной скорости роста микроорганизмов μ_m при анаэробной ферментации субстрата в мезофильном температурном режиме. Найдена эмпирическая зависимость удельного выхода биогаза $Q_{уд}$ от частоты перемешивания, продолжительности процесса, влажности и температуры биомассы.

2. Проведено экспериментальное исследование качественного и количественного состава биогаза на различных стадиях жизненного цикла технологического процесса сжигания биогаза.

3. Разработаны пошаговый алгоритм и математическая модель, позволяющие оптимизировать параметры технологического комплекса по утилизации отходов и выделению метаносодержащего газа, математическая модель процесса получения биогаза в биореакторе с барботажным перемешиванием биомассы. Разработана математическая модель процесса барботажного перемешивания биомассы, основанная на рассмотрении циркуляции двухфазного газожидкостного потока в турбулентном режиме.

4. Проведены натурные экспериментальные исследования процесса получения биогаза на экспериментальной и промышленной установках в г.Люблине, Польша.

5. Разработана инженерная методика расчета биореактора получения биогаза с системой барботажного перемешивания, реализованной в виде пакета программных комплексов.

6. Получены результаты вычислительного эксперимента, позволившего определить основные параметры процесса перемешивания и получить визуальную картину потоков биомассы в биореакторе, результаты экспериментальных исследований в виде уравнения регрессии по определению удельного выхода биогаза в биореакторе с системой барботажного перемешивания.

В результате исследований собраны экспериментальные данные по технологическому процессу получения и сжигание биогаза в виде электронных таблиц, разработанных в программной среде Excel. Данный материал может быть использован для создания и внедрения в практику автоматизированной системы диагностики и управления процессов сжигания биогаза.

зарубежный научный руководитель
д.т.н., профессор

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Techniki Informacyjnej
20-018 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
t.1. (81) 53 84 203, f.1. (81) 53 84 212

Waldemar Wojcik

DYREKTOR
Instytut Elektroniki i Techniki Informacyjnej

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Публикации Жирновой О.В.

За время обучения (2014-2017гг.) имеются следующие публикации:

№	Полное наименование	Ф.И.О. соавторов	Вид публикации и (тезис/статья)	Данные об издании (наименование, номер издания, год издания, номер страницы)	В какие базы входит издание*	Цитируемость научной публикации (тезис/статья)
1	Моделирование и диагностика процесса совместного сжигания биогаза и природного газа для снижения выброса парниковых газов	О.В. Жирнова, Б.Т. Иманбек, А.Ж. Тойгожинова, А.Е. Ихсан, Т.С. Туриканов, А.Оразалин	Статья	НАН РК Издание: Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан Серия Геологии и Технических Наук	BAK, Scopus	
2	Разработка математической модели для автоматизированной системы управления процессом сжигания биогаза для снижения выброса парниковых газов	О.В. Жирнова, А.Ж. Тойгожинова, Ж. Жакипов, Т.С.Туриканов, А.Оразалин, Н. Матенов	Статья	НАН РК Издание: Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан Серия Геологии и Технических Наук	BAK, Scopus	
3	Диагностика процесса совместного сжигания биогаза и газа на электростанциях для снижения выброса парниковых газов	О.В. Жирнова, А.Ж. Тойгожинова, Б.А. Сулейменов, С. Жумабек, А. Жаханов, Н.А. Соммер, Е.А. Кулакова	Статья	НАН РК Издание: Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан Серия Геологии и Технических Наук	BAK, Scopus	
4	Разработка автоматизированной установки для озонирования воздуха в рабочем объеме	Ш.А. Бахтаев ¹ , А.Ж. Тойгожинова ¹ , А.М. Сейтимбетов ² , О.В. Жирнова ³	Статья	НАН РК Издание: Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан Серия Геологии и Технических Наук	BAK, Scopus	
5	Построение математической модели процессов газификации биомассы	В. Войцк ¹ , Б.Т. Иманбек ² , А.Х. Ибраев ² , О.В. Жирнова ²	Статья	Журнал «Новости науки Казахстана», в № , 2016 года АО «НЦНТИ»	BAK	
6	Mathematical modeling of processes in the zone of corona discharge ionization by burning biogas using bragg gratings	Bakhtayev Sh.A., Toigozhinova A.Zh., Zhironova O.V., Imanbek B.T., Kulakova E.A., Kashaganova G	Статья	КАЗГАСА	BAK	
7	Моделирование, управление и диагностика процесса совместного сжигания биогаза и природного газа для снижения выброса парниковых газов	О.В. Жирнова, Б.Т. Иманбек, А.Ж. Тойгожинова, Ж. Жакипов, Т. Туриканов	Статья	Вестник Автоматизации. Инженерно-технический журнал. №4 (53), 12.2016, с.15-16 ISSN 1810-8626	КазБЦ	IF 0.4 в КазБЦ
8	Синтез интеллектуальной подсистемы оперативной диагностики турбоагрегатов тепловых электростанций.	Сулейменов Ап.Б., Сулейменов Б.А., Жирнова О.В., Сулейменов Айт.Б., Абдигалиев С.К., Акбасов А.	Статья	Вестник Автоматизации. Инженерно-технический журнал. №3 (53), 09.2016, с.15-16 ISSN 1810-8626	КазБЦ	IF 0.4 в КазБЦ
10	Разработка системы оптимального управления процессов сжигания биогаза.	Сагадиева А.М., Сулейменов Б.А., Жирнова О.В., Абдигалиев С.К., Акбасов А.	Статья	Вестник Автоматизации. Инженерно-технический журнал. №2 (52), 06.2016, с.36-37 ISSN 1810-8626	КазБЦ	IF 0.4 в КазБЦ
11	RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED SYSTEM DIAGNOSTICS AND CONTROL PROCESS OF BURNING BIOGAS	O.V. Zhironova	Статья	ВЕСТНИКА ТАРГУ ИМ. М.Х.ДУЛАТИ, 2016	BAK	
12	<u>Heat flow meter for the diagnostics of pipelines</u>	Bekbolat R Nussupbekov, Dana Zh Karabekova, Ayanbergen K Khassenov, Oxana Zhironova, Tomasz Zyska	Статья	W: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, Wilga, Poland, May 29, 2016 : Proc. of SPIE – 2015 00312C (September 28, 2016); doi:10.1117/12.2249304	Scopus	
13	Optyczna metoda diagnostyki gazu syntezowego z biomasy	Paweł Komada, Sławomir Ciężczyk, Oxana Zhironova, Nursanat Askarova	Статья	Middle pomeranian scientific society of the environment protection. Środkowopomorskie towarzystwo naukowe ochrony środowiska Annual Set The Environment Protection. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 18. Rok 2016, Koszalin, Poland, ISSN 1506-218X p.271–283	Thomson Reuters	

14	Diagnostyka stanu czujnika termoelektrycznego w procesie zgazowania biomasy	Tomasz Zyska, Waldemar Wójcik, Baglan Imanbek, Oxana Zhirnova	Статья	Middle pomeranian scientific society of the environment protection. Środokowo-pomorskie towarzystwo naukowe ochrony środowiska Annual Set The Environment Protection. Rocznik Ochrona Środowiska. Tom 18. Rok 2016, Koszalin, Poland, ISSN 1506-218X p.652-666	Thomson Reuters	
15	RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED SYSTEM DIAGNOSTICS AND PROCESS CONTROL BURNING BIOGAS	O.V. Zhirnova, A.B. Zhakhanov	Статья	Научный журнал «Вестник Жезказганского университета имени О.А.Байконурова», 2016	ВАК	
16	MODELING AND DIAGNOSTICS PROCESS COMBINED POPPING OF BIOGAS AND NATURAL GAS TO REDUCTION OF GREENHOUSE GASES	O.V. Zhirnova	Статья	LVI MEЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗАОЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИННОВАЦИИ В НАУКЕ», 2016	РИНЦ	
17	MODELING AND DIAGNOSTICS PROCESS COMBINED POPPING OF BIOGAS AND NATURAL GAS TO REDUCTION OF GREENHOUSE GASES	Zhirnova O.V., Toigoshinova A.Zh., Imanbek B.T., Kulakova E.A., Zhumabek S.E.	Статья	11 th European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences, 2016	РИНЦ	
18	DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM DIAGNOSTICS AND PROCESS CONTROL BURNING BIOGAS	O.V. Zhirnova, B.T. Imanbek, A.Z. Toygozhinova, N.A. Sommer, A.B. Zhakhanov	Статья	Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 2016	РИНЦ	
19	A modeling and diagnostics process combined popping of biogas and natural gas to reduction of greenhouse gases	O.V. Zhirnova, S.E. Zhumabek, E.A. Kulakova, A.Z. Toygozhinova	Статья	Международные Сатпаевские чтения «Конкурентоспособность технической науки и образования», посвященные 25-летию Независимости Республики Казахстан, 2016		
20	Моделирование и расчет процесса ректификации бензина с использованием программы MATLAB	A.A. Тилеубаева, О.В. Жирнова, А. Б. Жаханов, Б.Т. Иманбек	Статья	Международные Сатпаевские чтения «Конкурентоспособность технической науки и образования», посвященные 25-летию Независимости Республики Казахстан, 2016		
21	Разработка системы оптимального управления процессов сжигания биогаза	Сагадиева А.М., Сулейменов Б.А., Жирнова О.В., Абдигалиев С.К., Акбасов А.	Статья	Научный журнал «Вестник КазННТУ»/ҚазҰТЗУ хабаршысы №4 2016, с. 375-381	ВАК	
22	Разработка автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза	О.В. Жирнова, Е.А. Кулакова, Б.Т. Иманбек, Н.Соммер	Статья	Научный журнал «Вестник КазННТУ»/ҚазҰТЗУ хабаршысы №4 2016, с. 381-388	ВАК	
23	Разработка и исследование математической модели информационно-управляющей системы сжигания биогаза с дискретным регулированием и ее реализация с помощью пакета программ MathLab	О.В. Жирнова, А.А. Тилеубаева, А. Жаханов, С.Жумабек	Статья	Научный журнал «Вестник КазННТУ»/ҚазҰТЗУ хабаршысы №3 2016, с. 683-694	ВАК	
24	Up-to-date technologies of Fiber Bragg gratings production and their critical parameters	Kashaganova G.B., Kalizhanova A.U., Aitkulov ZH.S., Kozbakova A., Zhirnova O.V.	Статья	Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin 11 – 13 Czerwca 2016 ISBN 978-83-60617-45-8 p.75-77	Scopus	

25	Synthesis of intellectual subsystems of dynamic diagnosis of the condition of turbine units thermal power	Suleimenov A., Suleimenov B., Zhirnova O.V., Suleimenov Ait	Статья	Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin 11 – 13 Czerwca 2016 ISBN 978-83-60617-45-8 p.204-206	Scopus	
26	Development and research of automated control systems by technological process, roasting of the raw mixture	Suleimenov B., Zhailau E., Sommer N., Tileubayeva A., Zhirnova O.V., Zhakhanov A.B	Статья	Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin 11 – 13 Czerwca 2016 ISBN 978-83-60617-45-8 p.206-208	Scopus	
27	Development of an automated diagnostics and control system for biogas combustion processes	Zhirnova O.V., Kulakova E.A., Zhakhanov A.B., Zhumabek S.E	Статья	Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin 11 – 13 Czerwca 2016 ISBN 978-83-60617-45-8 p.242-243	Scopus	
28	Software application design and 3D modeling for evacuation of people from educational institution	Amirgaliyev E.N., Kalizhanova A.U., Kozbakova A.K., Koshaganova G., Aitkulov Z.S., Zhirnova O.V.	Статья	Journal of Theoretical and Applied Information Technology 2016. - Vol. 84. - № 1. - P. 133-139	Scopus	1 scholar.google.com
29	Фундаментальное преимущество процесса газового брожения	Жирнова О.В., Ибраев А.Х., Иманбек Б.Т., Сулейменов Б.А.	Статья	Труды международных сатпаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана», Том IV, направление инновации по информационным, телекоммуникационным и космическим технологиям, Алматы, 2015		
30	Gasification process for vapor flow, temperature, and raw materials	O. Zhirnova, Kozhamberdieva M.I., Imanbek B.T.	Статья	Materials of the IV International Conference "Global Science and Innovation", 12-13March, USA, Chicago, 2015		
31	Evaluation of the impact of uncontrolled parametric perturbations on stability of automatic systems with logical control units	S. M. Moskvina, M.S. Yukhynchuk, K. Gromaszek, O. Zhirnova	Статья	Proc. SPIE: 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161X. (December 18, 2015) doi: 10.1117/12.2229136	Scopus	1 scholar.google.com
32	The modification of fractal coding algorithm by a combination of modern technologies and parallel computations	R. N. Kryetnyy, O. Y. Sofina, A. V. Lozun, A. Smolarz, O. Zhirnova	Статья	Proc. SPIE: 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161R. (December 18, 2015) doi: 10.1117/12.2229009	Scopus	1 scholar.google.com
33	Application of curvelet transform for denoising of CT images	Ławicki Tomasz, Zhirnova Oxana	Статья	W: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015, Wilga, Poland, May 25, 2015 : Proc. of SPIE – 2015	Scopus	2 scholar.google.com

34	Разработка математической модели задачи оптимизации выпуска продукции литейного производства	О.В. Жирнова, С.Е. Жумабек,	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «информационные и телекоммуникационные технологии: образование, наука, практика», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
35	Разработка системы управления тепловым режимом нефтепровода на основе нейросетевой оценки	Әйнекова Ж.Д., Жирнова О.В., Лёгонький А.В., Серикбаев Е.Н.	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «информационные и телекоммуникационные технологии: образование, наука, практика», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
36	Разработка автоматизированной системы диагностики и управления процессом сжигания биогаза	Вальдемар Вуйцик, О.В. Жирнова, Е.А. Кулакова, Б.Т. Иманбек	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ПРАКТИКА», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
37	Разработка систем железнодорожной автоматики и телемеханики нового поколения	О.В. Жирнова, С.Е. Жумабек, Н. Сомер	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ПРАКТИКА», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
38	Разработка и исследование математической модели информационно-управляющих систем микрогидростанций с дискретным регулированием и ее реализация с помощью пакета программ matlab	О.В. Жирнова, А.А. Тилеубаева	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ПРАКТИКА», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
39	Автоматическое Регулирование Процессы Первичной Переработки Нефти На Основе Нечетких Систем	Ихсан А.Е., Жирнова О.В., Чагай А. П., Онласынова А. Ж.	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ПРАКТИКА», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
40	Разработка и исследование автоматизированной системы управления технологическим процессом обжига сырьевой смеси	Сулейменов Б.А., Жирнова О.В., Жайлау Э.М., Жаханов А.Б.	Статья	ТРУДЫ II Международной научно-практической конференции «ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ПРАКТИКА», Алматы, Казакстан, 3-4 декабря, 2015 года II том		
41	Разработка системы управления процессом плавки минеральных шихт в реакторе с погружным в расплав факелом с использованием альтернативного топлива (биогаз)	Жирнова О.	Статья	2014, Алматы, Труды Международного форума «Инженерное образование и наука в XXI веке: проблемы и перспективы», посвященного 80-летию КазНТУ имени К.И. Сатпаева		
42	Синергетический синтез нелинейных систем взаимосвязанного управления теплоэнергетическими объектами (сжигание биогаза)	А.Л. Бихур, П.Е. Сухарев, Жирнова О.	Статья	2014, Алматы, Труды III-ей Международной научно-практической конференции «Состояние, проблемы и задачи информатизации в Казахстане»		
43	Методика разработки интеллектуальных и гибридных систем оптимального управления технологическими процессами	Сулейменов Б.А., Сулейменов Алибек, Жирнова О.	Статья	2014, Вена, Австрия, Труды четвертой "Европейской конференции по инновациям в технических и естественных науках"	РИНЦ	

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

