

**O. V. Zhirnova, B. T. Imanbek, A. Zh. Toigozhinova, A. E. Ikhsan, T. S. Turikanov, A. Orazalin**

Kazakh National Research Technical University after named K. I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: oxana\_fedoseyeva@mail.ru

## **MODELING AND DIAGNOSTICS DURING COPROCESSING BIOGAS AND NATURAL GAS FOR REDUCING GREENHOUSE GASES EMISSIONS**

**Abstract.** The continuous growth of modern society's energy needs leads to increased consumption of fossil fuel and energy resources and, consequently, to an increase in emissions to the atmosphere of combustion products, including greenhouse gases, increasing the concentration of which in the atmosphere is one of the probable causes of irreversible climate change. This paper shows the environmental efficiency of biogas in the heat energy. The article used the standard method for definition of greenhouse gas emissions through the levels. Research for natural gas and biogas. The results of mathematical modeling of combustion process showed that the amount of greenhouse gas emissions from the combustion of natural gas and biogas in the boilers reduced. It shows the effectiveness of co-combustion of these fuels. It is shown that co-combustion of natural gas and biogas will reduce the emission of gases by 10%. A mathematical model which plugs in itself dependences describing a heat exchange between a torch and telopriniyayuschey surface of heating is described in the article, between a torch and intermediate emitter, and also between an intermediate rectifier and CRT surfaces of heating.

**Keywords:** the bioreactor, biogas, bacteria, adjusting, mathematical model, distributed system, optimal control, integration, aggregation.

УДК 658.52.011.56:665.7

**О. В. Жирнова, Б. Т. Иманбек, А. Ж. Тойгожинова, А. Е. Ихсан, Т. С. Туриканов, А. Оразалин**

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева,  
Алматы, Казахстан

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ БИОГАЗА И ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ**

**Аннотация.** Непрерывный рост потребностей современного общества в энергии приводит к увеличению потребления ископаемых топливно-энергетических ресурсов и, соответственно, к увеличению выброса в атмосферу продуктов сгорания, в том числе, парниковых газов, повышение концентрации которых в атмосфере является одной из вероятных причин безвозвратного изменения климата. Эта статья показывает экологическую эффективность биогаза в тепловой энергетике. В статье использован стандартный метод для определения выбросов парниковых газов через уровни. Проведены исследования для природного газа и биогаза. Результаты математического моделирования процесса сжигания показали, что количество выбросов парниковых газов от сжигания природного газа и биогаза в котлах. Показана эффективность совместного сжигания этих видов топлива. Показано, что совместное сжигание природного газа и биогаза позволит снизить эмиссию выбросов газов на 10%. В статье описана математическая модель, которая включает в себя зависимости описывающие теплообмен между факелом и телопринимающей поверхностью топки, между факелом и промежуточным излучателем, а также между промежуточным выпрямителем и экранными поверхностями топки.

**Ключевые слова:** биореактор, биогаз, бактерии, регулирование, математическая модель, распределенная система, оптимальное управление, интеграция, агрегирование.

**Введение.** В современном мире интенсивно развивается использование энергии биогаза и природного газа. Получение электро- и теплоэнергии возможно путем совместного сжигания природного газа 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 немыслимо 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. Одним из основных путей снижения объема выбросов парниковых газов и экономии традиционных видов топлива является замена ископаемого топлива на возобновляемые источники энергии. Одним из таких источников может быть биогаз [2].

Основными критериями при выборе технологии энергетического использования биогаза являются экономические показатели и величина снижения эмиссии парниковых газов при допустимой величине выбросов загрязняющих веществ. Если экономические критерии известны и достаточно эффективно используются на практике, то существующие экологические критерии не позволяют объективно сравнивать различные технологии и оборудование, использующие различные виды биотоплива, а также полностью учесть влияние вида и качества заменяемого топлива [3].

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 топлива из органического сырья (осадков), получило название биоэнергетика. Разработка этого направления приведёт к значительной экономии традиционных видов топлива. 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. 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 м<sup>3</sup>/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.Разношица, 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.Лиллепярг, А.В.Черемисина, С.С.Нуркеева и других [3]. 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.

Целью данного проекта является разработка метода и модели, позволяющих в процессе сжигания (окисления) углеводородного газа произвольного (или с минимальными ограничениями) состава, определять этот состав, а так же состав продуктов сгорания в режиме реального времени. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач. На основании проведенных ранее исследований по разработке различных моделей по сжиганию различных углеводородов разработать общую математическую модель для решения поставленной цели. Тепло, газ, качественные удобрения являются только побочным, полезным эффектом установок для биотехнической переработки органических отходов, а главная составляющая ценности – сохранение экологической среды. Первыми реальными пользователями просто будут вынуждены быть предприятия по переработке сельхозпродукции. Причины: глобализация, стандарты, необходимость пускать на свои территории международные инспекции по контролю производства. Пока биогазовые системы не стали массовыми в связи с отсутствием эффективных, дешевых и надежных систем для широкого спектра объемов переработки. Существующие установки биопереработки отходов являются дорогими, слишком чувствительными к составу отходов, сложными в эксплуатации. Это делает их неконкурентными относительно альтернативных источников энергоснабжения и химических удобрений. Цели разработки – создание комплекса имитационных моделей биореакторных систем для интенсивного поиска эффективных модульных конструкций и методов управления процессами биопереработки.

**Методы исследования.** Биогаз – это смесь метана и углекислого газа, 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 [3]. Результаты их исследований подготовили теоретические и практические основы для моделирования процессов разложения осадков сточных вод, создали предпосылки для оценки биогаза в качестве энергетического сырья. 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. Метантенки являются единственными сооружениями с положительным энергетическим балансом, в которых в результате анаэробного сбраживания осадков, полученных при очистке сточных вод, образуется биогаз. Теплотворная способность и количество биогаза зависит от его состава, т.е. от содержания основного компонента – метана и составляет 5000–6000 ккал /м<sup>3</sup>. Из 1 м<sup>3</sup> биогаза можно получить до 2 кВт·ч электроэнергии и до 6 кВт·ч тепловой энергии в отопительно-производственных котельных. Вода после прохождения сооружений биологической очистки поступает в приемный резервуар, оборудованный погружными насосами. Насосы подбираются в зависимости от расчетного расхода сточных вод очистных сооружений. Из приемного резервуара вода с помощью насосов направляется в распределительную камеру 3, откуда самотеком снизу вверх подается на фильтр 4.

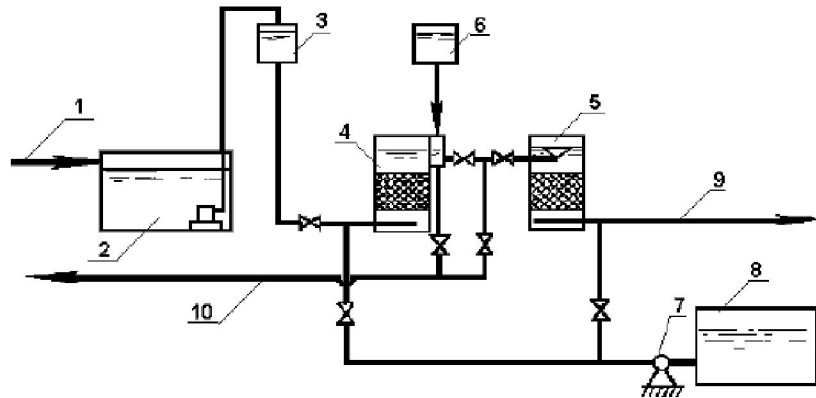


Рисунок 1 – Технологическая схема до очистки бытовых сточных вод на отдельно стоящих безнапорных фильтрах ГКП «Астана су арнасы»:

- 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.

Очищенная вода собирается в карман, где смешивается с гипохлоритом натрия и подается на вторую ступень фильтров 5. Вторая ступень фильтров загружена сорбентом, и подача воды осуществляется сверху вниз. Фильтры оборудуются промывными насосами 7. Промывка фильтров осуществляется очищенной водой из резервуаров чистой промывной воды 8. Гипохлорит натрия готовится в хлораторной 6.

На напорных фильтрах подача воды осуществляется сверху вниз. Ввод гипохлорита натрия производится в напорный трубопровод второй ступени фильтра через гидроэлеватор. Задержанные на решетках отбросы в ручную собираются в контейнеры и вывозятся на городскую свалку. Осадок из песколовков откачивается эрлифтами на песковые площадки для просушки. Сырой осадок из первичных отстойников насосами, установленными в насосной станции сырого осадка, удаляется на сбраживание в метантенки и далее на цех механического обезвоженного осадка где обезвоживаются на ленточных пресс-фильтрах производства «ЭМО». После первичного отстаивания стоки содержат загрязнения в виде мелкой суспензии, в коллоидном состоянии и в растворенном виде. Дальнейшая очистка предусматривает использование микроорганизмов, которые извлекают загрязнения из стоков в специальных сооружениях – аэротенках. Осветленные в первичных отстойниках стоки направляются в аэротенки по трубопроводу. Смесь очищенных стоков и активного ила поступает во вторичные отстойники, где ил оседает, а стоки отводятся в испаритель-накопитель. На рисунке 2 изображена схема процесса, приема, очистки и сброса сточных вод на очистном станция ГКП «Астана су арнасы» [1]. В результате анаэробной очистки органические соединения разлагаются до метана и углекислого газа (биогаз). Биогаз, содержащий 75-80% метана безопасно сжигается на факельной установке ТЭЦ (котельной) (рисунок 3). 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/см<sup>2</sup>.

В результате компримирования биогаза его температура увеличивается до 100°C. Так как температура биогаза на входе в электроагрегат не должна быть выше 25°C, 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 газами 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°C, а

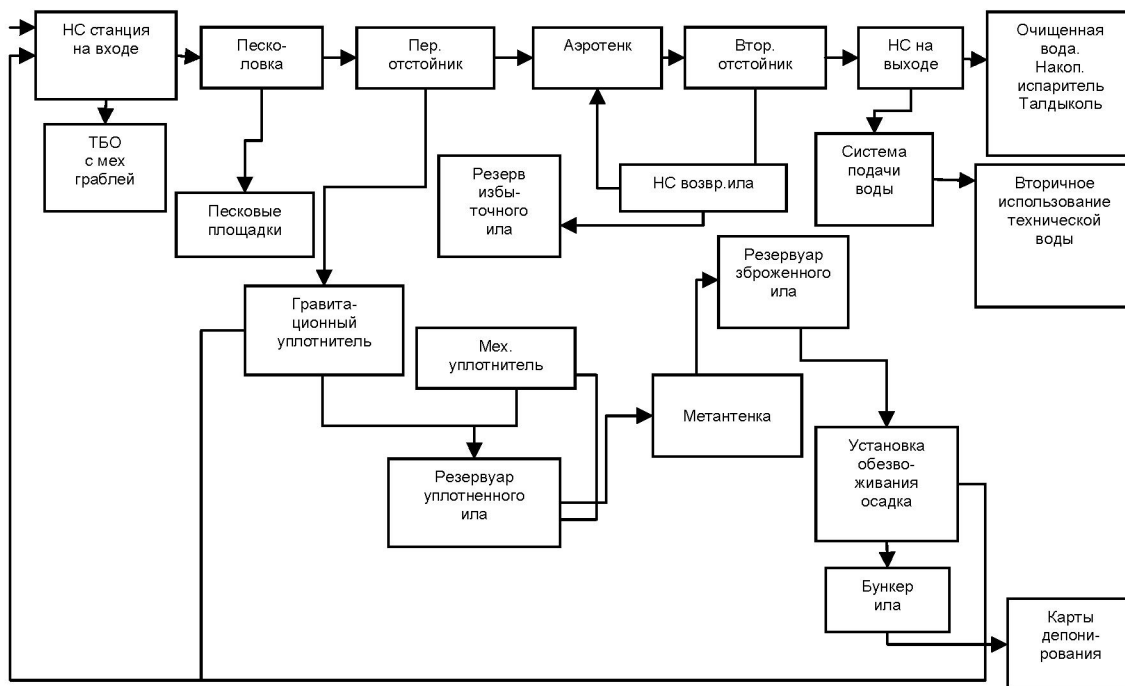


Рисунок 2 – Схема процесса, приема, очистки и сброса сточных вод

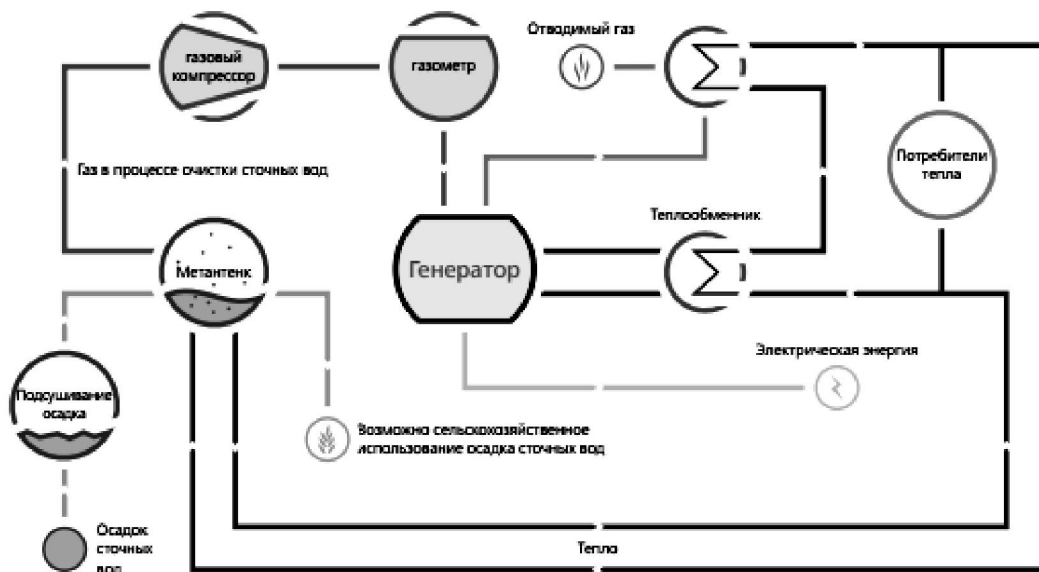


Рисунок 3 – Схема выработки энергии на блок-ТЭЦ

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 топлива для двигатель-генераторов позволит решить комплекс важнейших задач, а именно: технологических, обеспечивающих получение стабилизированного незагнивающего осадка; энергетических, дающих возможность компенсирования

ровать значительную часть электрической и тепловой энергии, расходуемой на работу воздуходушных 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 газа и воздуха. Поэтому вероятность взрыва смеси биогаза с воздухом при утечке намного меньше, чем при утечке природного газа. Средняя плотность биогаза составляет примерно  $1,13 \text{ кг/м}^3$ , то есть, в среднем он легче воздуха, плотность которого при комнатной температуре составляет около  $1,2 \text{ кг/м}^3$ . 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 газа 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 газа 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 газах. 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 газах 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 газа. КПД газовых котлов обычно составляет 90-95%. При работе газового котла на биогазе КПД может получиться меньшим из-за неточных настроек газовой-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  $75^\circ\text{C}$ , циркулирующей через теплообменник когенератора и нагревающейся там. А теплообменник, в свою очередь, может греться теплоносителем, охлаждающим рубашку двигателя, маслом картера и выхлопными газами. 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. Горячими продуктами сгорания биогаза непосредственно греют емкости с водой, пищей, поверхности нагревателей и т.п. Попросту говоря, применение биогаза для получения тепловой энергии ничем кардинально не отличается от применения для этих же целей природного газа 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 метантенков позволяет решить проблему снижения энергозатрат при очистке сточных вод за счет использования постоянно возобновляющихся нетрадиционных источников энергии, имеющихся 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  $\alpha$ , который равен 1,0. Максимальная

температура достигается при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ , который равен 1,0. Альтернативой такому методу может служить определение состава газа 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. Стоимость системы растет с увеличением этого перечня.

Целесообразно рассмотреть подходы к моделированию и результаты натурных и численных экспериментов в ряде исследований, которые были получены при изучении образования сажи, фактически углерода. В [6] рассматриваются топлива, обладающие свойствами образования сажи, содержащие полициклические ароматические углеводороды (нафталин). Избыточная концентрация кислорода на эффект образования сажи не повлияла. Влияние оказало изменение температуры пламени, расход топлива и продолжительности горения топлива. А в [7] было обнаружено, что в условиях высокой температуры пламени появляется возможность разложить метан на водород и  $C_2 - C_4$  углеводороды, тем самым снизить формирование бензола и конденсированных фаз, в том числе и сажи. Это означает, что ароматизации/дегидрогенизации сажи в предварительно смешанном топливе во время горения больше зависит от характеристик топлива. Результаты рассмотренных материалов [5-7] показали, что созданные и примененные численные модели не являются универсальными и не могут быть взяты за основу изучения сгорания углеводородного газа при изменении во времени концентраций составляющих его частей.

Постановка задачи. Эффективный путь решения этой проблемы – совместимое согласованное проектирование технологий и конструкции установки для переработки отходов, создание компьютерных моделей для накопления опыта и статистики на виртуальной реальности. Биохимические и термодинамические процессы в реакторе существенно нелинейны, нестационарны, неопределенны. Биореактор сложнее ядерного. Использование "интеллектуальных" регуляторов без изучения биохимических процессов и процессов генетической эволюции микроорганизмов – наилучший путь к окончательной дискредитации биореакторов и интеллектуальных систем. Предлагается разработка с двухуровневым регулятором: первый уровень – это разработка биотехнической системы с саморегулированием; второй уровень – разработка регуляторов, которые будут сервисными для биотехнической системы. Аналогом может быть обычный аквариум, где большинство процессов регулируются экосистемой аквариума, а регуляторы обеспечивают нужные температуру, насыщение кислородом и освещение. Проблемы биореакторов не являются новыми, существует достаточно источников с достаточно полным анализом процессов и конструкций биореакторов, например [2]. В последнее время растет количество электронных публикаций и патентов по биореакторам для переработки отходов. Анализ и систематизация литературы невозможны в рамках статьи. На базе просмотренных источников отобраны эмпирические данные о характеристиках процессов анаэробного метанового брожения – процессов, на которых, собственно, строится биореактор. Структура процесса анаэробного брожения. Центром анализа и проектирования биореакторов являются естественные процессы переработки отходов соответствующими видами и штаммами бактерий. Решающий фактор эффективности биореакторов – эффективность и адаптивность культур бактерий. Сегодня идут интенсивные поиски таких культур в природе и выполняются дорогостоящие разработки новых штаммов с нужными свойствами, методами "генетического программирования". На рисунке 4 представлена упрощенная схема процессов анаэробного брожения.

Главная особенность процессов брожения – наличие двух классов бактерий и соответственно – двух типов биохимических процессов. Эта особенность задает направление поиска эффективных структур биореактора, а именно, двухступенчатого с разделением процесса брожения. В этом случае возможно оптимизировать температуру и состав биомассы под конкретный тип бактерий. Изучение многоуровневых процессов, реализуемых в рамках разработанной технологии, невыполнимо с точки зрения одностороннего подхода биологических преобразований. Формирование фундаментальных понятий о протекающих реакциях и установление действующих в них взаимосвязей осуществимо лишь при комплексном исследовании всех областей процесса, включающих в себя химические превращения в субстрате, производство биотоплива и получение тепловой энергии.

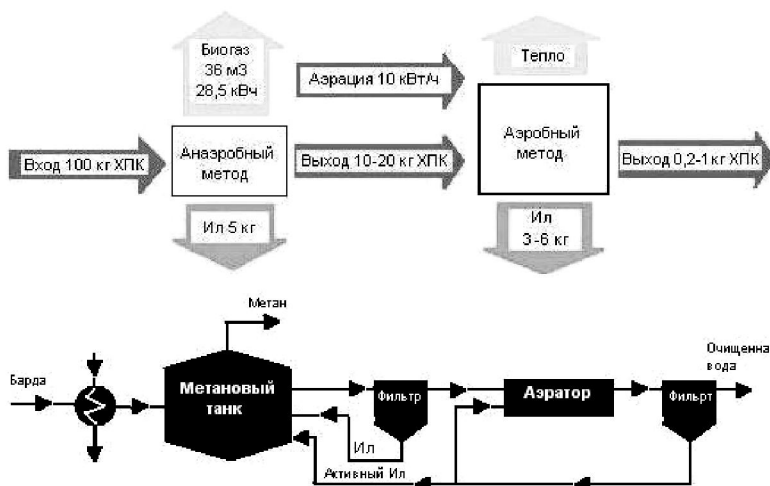


Рисунок 4 – Схема процесса анаэробного брожения

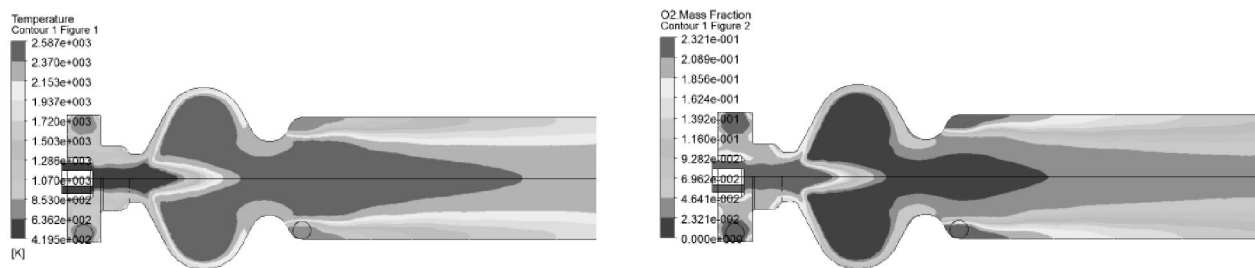
**Результаты исследования.** Для реализации комплексной методики опытного исследования осуществлено моделирование экспериментального комплекса, позволяющего одновременно изучать поведение характеристик субстрата, биогаза и процесса его горения на различных температурных режимах (рисунок 5). Проведено численное моделирование аэродинамических процессов в горелочном устройстве с учетом химических реакций. Моделировались следующие процессы и явления: турбулентность в реагирующей среде, горение биогаза, движение частиц газа 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 горелочном 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 топлива 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 топлива в котором на основе результатов моделирования достигает 95%. В ходе опытов фиксируется значение и изучается взаимосвязь объемов осадка сточных вод и производимого биогаза, их элементного состава, термохимических характеристик субстрата, процессов воспламенения и горения биотоплива. Отдельно изучаются процессы производства и горения твердого топлива: объем, теплота сгорания, зольность, содержание вредных веществ в уходящих газах и др. В любом случае рассмотрение общей технологической цепочки и оптимального взаимодействия между всеми ее элементами следует проводить, начиная с этапа проектирования биогазовой установки. Это связано с тем, что эффективная работа биогазовой установки является следствием слаженной работы всего оборудования, составляющего технологическую цепочку. Поэтому одно должно полностью подходить по заданным рабочим параметрам, а не представлять собой случайный набор элементов, исполняющих определенные рабочие функции. Для того, чтобы оптимизировать работу биогазовой установки, необходимо также проследить течение ее материальных потоков, для того, чтобы определить ту стадию ее работы, которая тормозит течение всего технологического процесса. В качестве примера можно привести оптимизацию за счет изменения состава субстрата, или же более эффективной работы второй ступени.

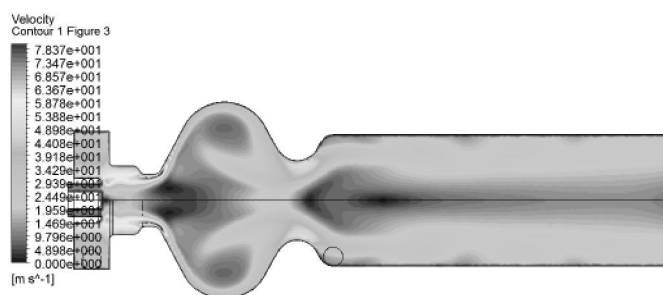
Оценка полноты сгорания в устройстве проведена для подаваемого топлива. Для выделяющегося в процессе сжигания биогаза проанализирована картина концентраций биогаза и ее динамика.





А) Распределение температуры в сечении горелки с двумя подводами воздуха при  $\alpha = 1,3$

Б) Распределение массовых концентраций кислорода в сечении горелки с двумя подводами воздуха при  $\alpha = 1,3$



В) Поле скоростей в сечении горелки при  $\alpha = 1,3$

Рисунок 5 – Распределение температуры в сечении горелки

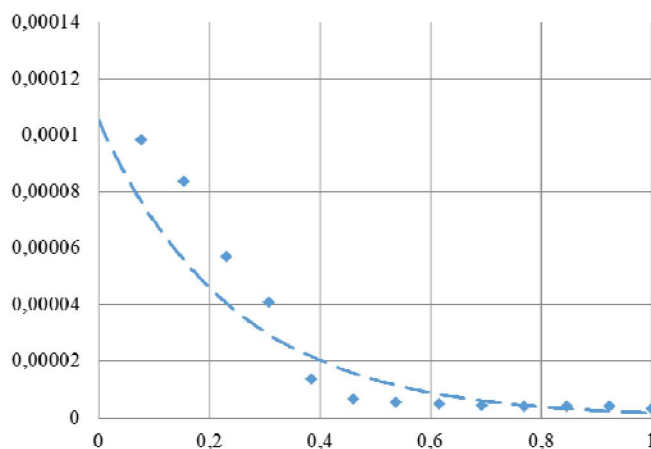


Рисунок 6 – Анализ концентраций биогаза и ее динамика

С целью исследования производимого биогаза в качестве топлива для производства электрической энергии использовался лабораторный стенд, закупленный нашим Вузом партнером – Институт электроники и информационных технологий, Люблинский технический университет г. Люблин, Польша (рисунок 7, 8).

В статье получена математическая модель для процесса сжигания на основе уравнений материального и теплового балансов и метода сеток. Математическая модель определения условной формулы сжигаемого газа произвольного состава. При известных массовых или объемных долях составных частей топлива записывается условная формула топлива в виде

$$A_{b1T}^{(1)}A_{b2T}^{(2)} \dots A_{biT}^{(i)}, \quad (1)$$

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

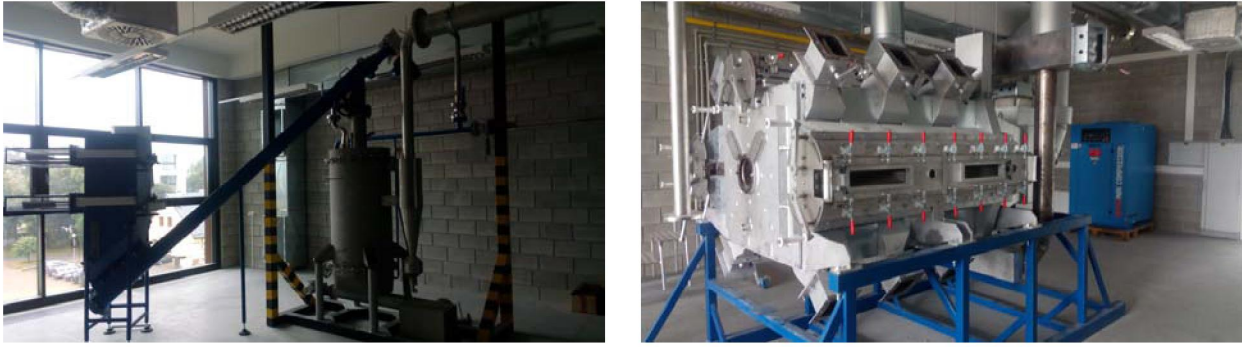


Рисунок 7 – Внешний вид установки метантенка

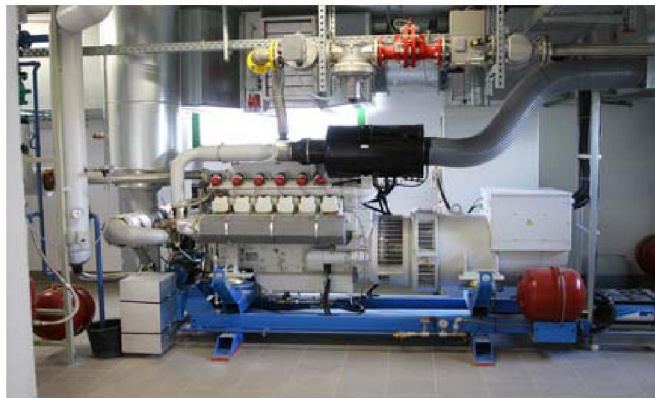


Рисунок 8 – Когенерационная установка

Метод предполагает, что все расчеты выполняются на основе условной формулы топлива (2). 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:

$$\sum_q (a_{in} * n_q) = b_{iT} , \quad (2)$$

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:

$$\sum (a_{in} * P_q) = M_T * b_{iT} . \quad (3)$$

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 топлива 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.

По соблюдению баланса энтальпий расчеты выполнялись до достижения относительной погрешности вычислений  $\sim 10^{-4}$ . Данные приведены для давления в камере сгорания РКС=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/с. Сравнение результатов показывает, что при  $\alpha=0,4$  рассчитанные температура и энтальпия продуктов сгорания близки величинам. При  $\alpha=0,7$  и  $\alpha=2,0$  отклонения температур также незначительны и составляют соответственно  $\Delta T=16K$  и  $\Delta T=40K$ .

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 <sub>ПС</sub> - -7625	I <sub>ПС</sub> - -7584	I <sub>ПС</sub> - -22195	I <sub>ПС</sub> - -18520	I <sub>ПС</sub> - -25000	I <sub>ПС</sub> - -17096	
Температура T, К	2124	2125	3065	3081	2855	2895	
Парциальные давления	P <sub>CO</sub>	0,4868	0,4869	0,3458	0,3440	0,0618	0,0594
	P <sub>CO2</sub>	0,0181	0,0181	0,1108	0,1131	0,2036	0,2031
	P <sub>H2O</sub>	0,0783	0,0784	0,2744	0,2761	0,2127	0,2047
	P <sub>OH</sub>	–	–	0,0551	0,0592	0,0660	0,0778
	P <sub>H2</sub>	0,4143	0,4143	0,1124	0,1094	0,0090	0,0082
	P <sub>O2</sub>	–	–	0,0180	0,0130	0,3952	0,3783
	P <sub>H</sub>	0,0023	0,0022	0,0645	0,0638	0,0094	0,0098
	P <sub>O</sub>	–	–	0,0189	0,0213	0,0422	0,0587
	P <sub>C</sub>	–	–	–	–	–	–
	P <sub>Mr</sub>		0,505		0,4571		0,2625

при относительной погрешности  $\varepsilon \approx 0,5\%$  и  $\varepsilon \approx 1,4\%$ . Энтальпии же продуктов сгорания имеют значительный дисбаланс с энтальпиями топлива: 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 (24). 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 [C] и [H] в горючем при  $\alpha = 1$  (стехиометрическом соотношении компонентов). С одной стороны, из (4) при  $\alpha = 1$  следует

$$\frac{V_O}{V_T} = \alpha * X_O = X_O. \quad (4)$$

Конечная система уравнений содержит:

- двадцать уравнений, соответствующих двух измерений температур и объемных расходов. Эти уравнения содержат 18 неизвестных парциальных давлений и два  $M_T$  молей топлива, соответствующих определенным замерам;
- два уравнения, соответствующих этим же измерениям;
- уравнение (4).

**Обсуждение результатов.** 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

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

Результаты моделирования системы автоматического регулирования работы агрегата подтвердили работоспособность разработанной модели. Полученная модель экстремального регулирования процесса горения 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.

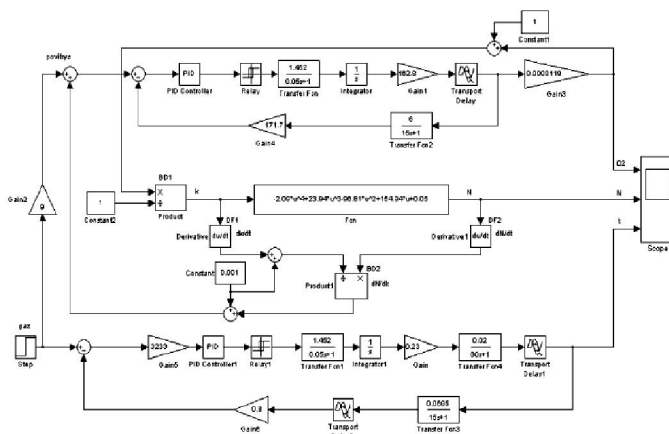


Рисунок 10 – Структурная САР в программе MatLAB

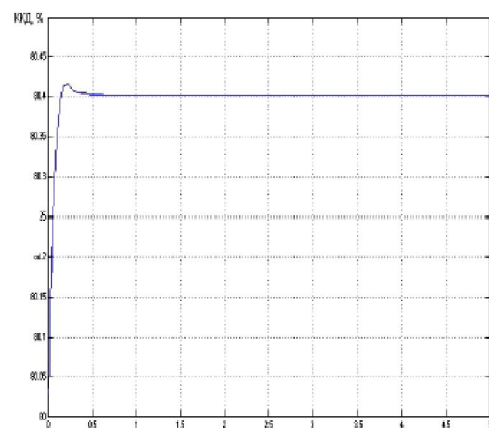


Рисунок 11 – Переходной процесс системы при экстремальном регулировании КПД

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большаков Н.Ю. Оптимизация технологического процесса в системе аэротенк – отстойник для минимизации сброса органических и биогенных элементов: Автореф. дис. ... к. т. н. – СПб., 2005.
- [2] Николаев А.Н., Большаков Н.Ю., Фетюлина И.А. Исследование влияния возраста активного ила на эффективность биологической дефосфатации в системе аэротенк – вторичный отстойник // Вода и экология: проблемы и решения. – 2002. – № 2.
- [3] Губинский М.В., Усенко А.Ю., Шевченко Г.Л., Шипко Ю.В. Оценка эмиссии парниковых газов при использовании топлив и биомассы // Щокварталийний науково-практичний журнал. – 2007. – № 2.

[4] Національна металургійна академія України. Усенко А. Ю. Удосконалення процесу окислювального піролізу біомаси з метою зниження емісії парникових газів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Дніпропетровськ, 2006.

[5] A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 (Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 8.3.2011 COM (2011) 112 final) // Official website of the European Union. [Electronic resource] / Mode of access: [http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com\\_2011\\_112\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com_2011_112_en.pdf). - Date of access: 09.03.2011.

[6] Белоусов В. Н., Смородин С. Н., Лакомкин В. Ю. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO<sub>2</sub>): Учебное пособие. – СПб., 2014.

[7] Методические указания. По расчету выбросов парниковых газов. – Астана, 2010.

[8] Moskvina S.M., Yukhymchuk M.S., Zhirnova O., Gromaszek K. (2015, December). Evaluation of the impact of uncontrolled parametric perturbations on stability of automatic systems with logical control units. In 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications (pp. 98161X-98161X). International Society for Optics and Photonics.

[9] Kvyetnyy R.N., Sofina O.Y., Lozun A.V., Smolarz A., Zhirnova O. (2015, December). Modification of fractal coding algorithm by a combination of modern technologies and parallel computations. In 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications (pp. 98161R-98161R). International Society for Optics and Photonics.

#### REFERENCES

[1] Bolshakov N.Y. Process optimization in the aeration tank – septic tank to minimize the discharge of organic and nutrient: Author. Dis. Ph.D. SPb., 2005.

[2] Nikolaev A.N., Bolshakov N.Y., Fetyulina I.A. Investigation of the effect of age on the efficacy of activated sludge biological defosfotatsii in the aeration tank – secondary settling tank // Water and Environment: Challenges and resheniya. 2002. N 2.

[3] Guba M.V., Usenko A., Shevchenko G.L., Szyszko Y. Estimation of greenhouse gas emissions by using fuels and biomass // Schokvartalny NAUKOVO-practicality magazine. 2007. N 2.

[4] Natsionalna metalurgiyna akademiya Ukraine. Usenko A. Yu Udoskonalennya processes okislyuvalnogo pirolizu biomasi s metoyu znizhennya emisiï greenhouse gaziv. Abstract. Disertatsiï on zdbuttyanaukovogostupenya candidate tehlichnih Sciences Dnipropetrovsk, 2006.

[5] A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 (Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 8.3.2011 COM (2011) 112 final) // Official website of the European Union. [Electronic resource] / Mode of access: [http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com\\_2011\\_112\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com_2011_112_en.pdf). - Date of access: 09.03.2011.

[6] Belousov V.N., Smorodin S.N., Lakomkin V.Y. Energy saving and greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>). Tutorial. SPb., 2014.

[7] Guidelines. In the calculation of greenhouse gas emissions. Astana, 2010.

[8] Moskvina S.M., Yukhymchuk M.S., Zhirnova O., Gromaszek K. (2015, December). Evaluation of the impact of uncontrolled parametric perturbations on stability of automatic systems with logical control units. In 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications (pp. 98161X-98161X). International Society for Optics and Photonics.

[9] Kvyetnyy R.N., Sofina O.Y., Lozun A.V., Smolarz A., Zhirnova O. (2015, December). Modification of fractal coding algorithm by a combination of modern technologies and parallel computations. In 16th Conference on Optical Fibers and Their Applications (pp. 98161R-98161R). International Society for Optics and Photonics.

**О. В. Жирнова, Б. Т. Иманбек, А. Ж. Тойгожинова, А. Е. Ихсан, Т. С. Туриканов, А. Оразалин**

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің, Алматы, Қазақстан

#### **МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ПАРНИКТІК ГАЗДАРДЫ АТМОСФЕРАҒА ШЫҒАРУДЫ АЗАЙТУҒА АРНАЛҒАН БИОГАЗ ЖӘНЕ ТАБИҒИ ГАЗДЫ ЖАҒУ ТЕҢ ДИАГНОСТИКАЛАУ**

**Аннотация.** Қоғамның заманауи энергетикалық қажеттіліктерін үздіксіз өсуі атмосферада қайтымсыз климаттың өзгеруі ықтимал себептерінің бірі болып табылатын концентрациясын арттыру, парниктік газдар, оның ішінде жану өнімдерінің атмосфераға шығарындылар артуына, үшін, демек, өсті қазба отынды тұтыну мен энергия ресурстарын әкеледі және. Бұл мақалада жылу энергиясына биогаз экологиялық тиімділігін көрсетеді. мақала денгейдегі арқылы парниктік газдар шығарындыларын анықтау үшін стандартты әдісі пайдаланылады. табиғи газ және биогаз үшін ғылыми-зерттеу. жану процесінің математикалық модельдеу нәтижелері қазандық табиғи газ және биогаз жағудан парниктік газдар шығарындыларының осы соманы көрсетті. Осы отынның тең жағу тиімділігі. Ол табиғи газ және биогаз тең ату 10%-ға газдар шығарындыларын төмендетуге мүмкіндік береді деп көрсетілген. Қағаз алаудай және аралық таратқыштын арасындағы, сондай-ақ аралық түзеткіштер мен пештің экран беті арасындағы алауды мен пеш telorpinimayuschey беті арасында жылу беруді сипаттайтын тәуелділігін қамтиды математикалық моделі, сипаттайды.

**Түйін сөздер:** биореактор, биогаз, бактериялар, реттеу, математикалық модель, таратылған жүйесі, оңтайлы басқару, интеграция, біріктіру.