ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Бетинской Оксаны Андреевны «Организация рабочего процесса в универсальной камере сгорания газотурбинной установки для утилизации попутного нефтяного газа» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

Высокие значения характеристик газотурбинных установок обуславливают их применение в самых различных областях промышленности, в том числе и для утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ). Одним из наиболее рациональных вариантов утилизации влажного неподготовленного ПНГ на малодебитных месторождениях является использование газотурбинных установок (ГТУ) для получения электрической и тепловой энергии. Одним из проблемных узлов подобных установок являются камеры сгорания (КС), т. к. ПНГ имеет различный компонентный состав в зависимости от месторождения, а также на одном и том же месторождении состав ПНГ может быть различным в разные периоды времени.

Таким образом, для утилизации разнородных по составу, забалластированных, неосушенных ПНГ необходима разработка специальной КС, высокий ресурс работы которой достигается обеспечением гарантийного запаса по устойчивости работы в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время имеется большое количество разработанных и изготовленных ГТУ различных мощностей и назначения со встроенными и выносными КС. Аналогами разрабатываемой утилизационной КС являются жаровая труба КС авиационного двигателя и двухзонный газогенератор жидкостного ракетного двигателя, но с горючим постоянного состава

Целью данной работы является разработка методики проектирования утилизационной КС в составе ГТУ для малодебитных нефтяных месторождений и выработка рекомендаций по увеличению ресурса их работы.

Объектом исследования являются высокоресурсные утилизационные камеры для сжигания нефтяных и других техногенных газов. Для получения

геометрического облика и режимных параметров камеры использованы методики, разработанные в различных работах в этой области.

Первая глава посвящена информационно – аналитическому обзору по проблемам утилизации ПНГ. Анализ показал, что наиболее рациональным способом является утилизация ПНГ в КС ГТУ с целью получения электрической и тепловой энергии. Однако применение данного способа также сопровождается некоторыми сложностями. Состав ПНГ на разных месторождениях и даже на одном месторождении в процессе эксплуатации является переменным, что негативно сказывается на устойчивости горения. В данной работе для обеспечения стабильного горения разнородных по составу ПНГ предлагается многозонная КС, где в зоне горения происходит устойчивое горение забалластированных газов сложного состава при универсальном значении коэффициента избытка воздуха, а в зоне разбавления подводом вторичного воздуха температура продуктов сгорания снижается для работоспособности лопаток турбины. Попадание конденсата в КС может спровоцировать неконтролируемый подвод тепла, самовозгорание и распространение пламени вверх по потоку. В данной работе для исключения жидких фракций предлагается подогрев топливного газа в составе ГТУ непосредственно перед подачей в КС.

Автор считает, что для сокращения затрат на экспериментальную доводку КС требуется численное моделирование рабочего процесса, близкого или совпадающего с реальными условиями эксплуатации ГТУ. **В первой главе** большое внимание уделяется анализу существующих моделей химического реагирования, моделей турбулентности и выбору граничных условий для условий работы утилизационной КС. Показано, что при использовании готовых программных комплексов типа ANSYS и Flow Vision требуется использование дополнительных уравнений рабочего процесса, однако перед этим необходимо создать исходную конструкцию жаровой трубы.

В связи с этим **во второй главе** автором обосновывается необходимость разработки универсальной КС для отечественной ГТУ блочно–модульного типа для утилизации разнородных по составу забалластированных ПНГ. В отличие от существующих в исследуемой КС происходит сгорание топлива с отклонениями от расчетного состава смеси в зоне горения. Термохимические расчеты учитывают состояние ПНГ (наличие влаги, конденсата тяжелых углеводородов, балластирующих компонентов, сероводорода) и условия его подачи в КС (температура, давление). Автором приводятся данные по

дефектации установок прошедших эксплуатацию на малодебитных месторождениях. На основании анализа автор делает вывод о необходимости создания специальной КС для сжигания топлив со сложным составом. Здесь же приводится расчетная граница устойчивости рабочего процесса в виде зависимости времени преобразования топлива (непонятно, что это за параметр) от перепада давления на инжекторе. *К сожалению данная характеристика отличается от общепринятой и не позволяет оценить реальные процессы в КС.* Автор рассматривает различные схемы утилизационных ГТУ и рынка основных ее агрегатов и делает вывод о том, что с технической, маркетинговой и экономической точек зрения наиболее предпочтительной для практической реализации является одновальная редукторная схема блочно-модульной ГТУ номинальной мощностью 145 кВт. В работе предлагается КС с зоной горения, обеспечивающей устойчивое горение разнородных по составу ПНГ. Остальная часть циклового воздуха (вторичный воздух), минуя зону горения, через ряды отверстий и кольцевую щель подается в зоны смешения (разбавления). Необходимо отметить, что в данной КС осуществляется раздельный подвод первичного и вторичного воздуха, тогда как в реальных КС подача первичного и вторичного воздуха производится из одной общей полости, т.к. разделение воздуха требует постоянного контроля за перераспределением воздуха для достижения оптимальных параметров на выходе, поэтому приведенная схема КС трудно реализовать на практике. Диссертант также рассматривает вопросы снижения концентрации коррозионно-активных веществ и создания антикоррозионной пленки на поверхности конструкционных материалов. Установлено, что для этого целесообразно применение антикоррозионных добавок типа анилин в составе топливного газа на входе в КС ГТУ. Получено, что использование присадок с массовой долей до 0,1 % снижает концентрацию серосодержащих коррозионно-активных веществ более чем на 10 %. В заключение автор на основании анализа рабочего процесса в камере формулирует рекомендации по выбору конструкционных материалов, для изготовления жаровой трубы. Следует отметить, что указанные исследования *не связаны с основной темой диссертации исследования рабочего процесса в ней, поэтому их следовало вынести как дополнение в приложении.*

В главе 3 рассмотрена система уравнений рабочего процесса в утилизационной КС, включающая в себя уравнения в частных производных и алгебраические уравнения, описывающие трехмерное турбулентное течение с горением. Автор считает, что скорость горения топливного газа связана со скоростью турбулентного смешения в турбулентных пульсациях и химико-

кинетического взаимодействием горючего с окислителем. *Однако известны более распространённые зависимости для скорости турбулентного горения, в которых присутствуют как турбулентные характеристики, так и физико-химические в виде нормальной скорости горения, например, формулы Дамкеллера, Щелкина К.И.,Талантова А.В.* Для численного моделирования рабочего процесса автор использует программный комплекс ANSYS Fluent, но при этом распределения коэффициента избытка воздуха, концентраций окислителя, горючего и продуктов сгорания по объему зоны горения определялись по вновь разработанным программам. *Необходимо отметить, что такой подход требует больших временных затрат при подготовке и выполнении расчетов, что не позволяет выполнять многовариантное проектирование, т.е. проводить оптимизацию конструкции КС. По-видимому, подобные расчеты целесообразны для поверочных расчетов. Что и сделано в главе 4.*

В главе 4 приведены результаты численного моделирования параметров рабочего процесса по объему КС. Здесь приводятся в качестве примера картины распределения полей скоростей, давлений, температур, коэффициентов избытка воздуха, распределения концентраций SO_2 и смешения в трех сечениях по длине КС. Анализ полученных данных позволяет определить картину рабочего процесса для данного режима работы КС. К сожалению данные расчеты не позволяют принять решения по улучшению характеристик камеры, таких как полнота сгорания, срыва пламени. Но получен важный вывод о том, что благодаря сильной турбулентности происходит выравнивание концентраций смеси по радиусу камеры, а это позволяет применять более упрощенные одномерные модели в расчетах, и значительно расширить возможности проведения оптимизации при проектировании. Автор утверждает, *что температура огневой стенки может достигнуть значений 1400-1600 К. В настоящее время нам известно, что наибольшие значения температур охлаждаемых стенок современных КС достигают 1000-1100 К. Однако автор не уделил внимания вопросу охлаждения утилизационной КС.*

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по горению забалластированного ПНГ сложного состава проведено для модельной горелки. В работе представлены расчетные и экспериментальные зависимости температуры газа от коэффициента избытка воздуха. *Несмотря даже на то, что здесь не указаны исходные данные можно заметить заниженные*

значения температур для продуктов сгорания углеводородного топлива. Возможно здесь надо принять, что температура в С.°

При сравнении экспериментальных и расчетных данных автором установлено их отличие на 8%. Но известно также, что точность измерений температуры хромель-алюмелевой термопарой не более 10% и это надо учитывать при анализе результатов исследований.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Выбранная автором схема исследуемой КС значительно отличается от существующих вследствие раздельной подачи первичного и вторичного воздуха и отсутствия охлаждающего огневую стенку воздуха. Поэтому данные, полученные в работе не могут быть обобщающими.

2. Проведенные в работе результаты измерений хромель-алюмелевой термопарой температуры продуктов сгорания существенно отличаются от расчетных.

3. Исследуемая в работе утилизационная КС должна быть по определению экологичной, однако в работе отсутствуют данные по эмиссии токсичных веществ NO_x, CO, являющиеся нормируемыми.

4.Приведенные результаты по выбросам SO_x в основном необходимы для выбора материалов для жаровой трубы и не соответствуют теме исследований, поэтому их целесообразно вынести в раздел приложения.

Несмотря на указанные замечания работа **Бетинской Оксаны Андреевны** выполнена на высоком научно-техническом уровне. Предложены новые методы расчета характеристик утилизационных КС на основе трехмерных моделей вычислительной газодинамики, проведены экспериментальные исследования, впервые исследована утилизационная КС, работающая на попутном нефтяном газе с широкой фракцией. Результаты работы внедрены в учебном процессе и в промышленности. В заключение считаю, что диссертационная работа **Бетинской Оксаны Андреевны «Организация рабочего процесса в универсальной камере сгорания газотурбинной установки для утилизации попутного нефтяного газа»** является законченным научным трудом соискателя, в котором автор показал высокий уровень квалификации по камерам сгорания газотурбинных двигателей, владение современными методами математического моделирования сложных физических процессов и их применение в

практических задачах. Диссертация соответствует технической отрасли науки и научной специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки по следующим областям исследований: - разработка научных основ изучения физико-химических, гидрогазодинамических, тепло- и массообменных процессов, общих свойств и принципов функционирования отдельных узлов и механизмов, а также основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок; - экспериментальные исследования в области деформирования, прочности и разрушения материалов, узлов и механизмов, циклов, схем, режимов работы основного и вспомогательного оборудования турбомашин и комбинированных турбоустановок. Содержание диссертации полностью соответствует требованиям п. 9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, **Бетинская Оксана Андреевна**, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – «Турбомашины и комбинированные турбоустановки».

Официальный оппонент:
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой реактивных
двигателей и энергетических установок
ФГБОУ ВПО Казанского национального
исследовательского технического
университет им. А.Н.Туполева, Билал Галавтдинович
Мингазов 30.03.2017

Подпись Мингазова Б.Г.
заверяю. Начальник управления
делами КНИТУ-КАИ

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ», кафедра реактивных двигателей и энергетических установок
Адрес: Республика Татарстан, г. Казань 420111, ул. К. Маркса, 10.
Электронная почта: BGMingazov@kai.ru,
тел.:+79172999361, (843)238-44-20,
факс: (843)238-44-20