
на правах рукописи

ПОДЛЕСНАЯ Татьяна Александровна

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПАРАМЕТРОВ ГТУ
С РЕАКТОРОМ-ГАЗИФИКАТОРОМ
ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ, ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ И
НИЗКОСОРТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ**

Специальность 05.04.12 - Турбомашинны и комбинированные
турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2008

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (кафедра Э-3 «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»).

Научный руководитель: кандидат технических наук,

Иванов В.Л. доцент

Официальные оппоненты:

Гуров В.И. доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Землянский А.В. кандидат технических наук,
доцент

Ведущая организация: «Энергомаш(ЮК)Лимитед»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» декабря 2008 года в «14:30» часов на заседании диссертационного совета Д.212.141.09 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. № 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба посылать по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ученому секретарю диссертационного совета Д.212.141.09.

Автореферат разослан «___» _____ 2008 года

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



Р.З. Тумашев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие мировой цивилизации сопровождается улучшением комфортности жизни человека. Это является первопричиной и одновременно следствием развития энергетики, промышленности, других отраслей народного хозяйства. Это сопровождается возрастающим темпом образования бытовых и промышленных отходов (ТБПО) как результат жизнедеятельности человека. К промышленным отходам также следует отнести отходы, которые имеют энергетическую и материальную ценность, но их использование на современном этапе развития технологии экономически не оправданно. Накопление ТБПО оказывает отрицательное воздействие на среду обитания и требует специальных дорогостоящих мер по сведению к минимуму последствий их образования.

ТБПО представляют собой неиссякаемый (постоянно подпитываемый) источник связанной в них энергии, которая может и должна быть использована для созидательных целей. По скромным оценкам экспертов в России для энергетических целей можно ежегодно использовать 800 млн. т древесной биомассы, 250 млн. т отходов лесной, бумажной и деревообрабатывающей промышленности, 60 млн. т ТБО городов и поселков.

В программе Энергетической стратегии России на период до 2020 г. отмечено: «важным местным видом топлива... являются бытовые отходы. Необходимо создать условия для включения их в топливо-энергетический баланс и решения одновременно экологических проблем».

Мусоросжигание, или переработка ТБПО термическим методом с выделением и последующим использованием теплоты химических реакций является наиболее сложным, высокотехнологичным способом обращения с отходами, но и более результативным в общеэкономическом и экологическом аспектах. Сокращается масса ТБПО, подлежащая захоронению, а современные технические средства фильтрации и подавления токсичности продуктов сгорания позволяют свести к минимуму (в пределах действующих нормативов) воздействие последствий образования ТБПО на окружающую среду. Выделяемая энергия может и должна быть использована для производства электрической и теплофикационной энергии.

Диссертация посвящена разработке ГТУ на твердом горючем с реактором-газификатором твердых бытовых, промышленных отходов и низкосортного высокосортного твердого топлива. Установка позволяет производить термическую переработку ТБПО на месте их образования, а также использовать местные ресурсы низкосортного твердого топлива для производства товарной электрической и тепловой энергии. Таким образом, диссертационная работа направлена на решения комплексной проблемы охраны окружающей среды и экономии высокосортного углеводородного топлива; направленность работы отвечает задачам Энергетической стратегии России до 2020 г. и программам обращения с твердыми бытовыми отходами, сформулированных в Постановлениях Правительства г. Москвы.

Целью работы является – разработка научно-технических основ расчета и проектирования ГТУ модифицированной схемы на твердом топливе с реактором-газификатором ТБПО и низкосортных твердых топлив.

Исходя из поставленной цели определены и выполнены следующие задачи научного исследования:

- анализ и обобщение результатов опытной эксплуатации двух образцов опытно-промышленного реактора (по технологии ИПХФ РАН г. Черноголовка), создание программы расчета и банка данных теплоэнергетических характеристик продуктов сгорания генераторного газа (при газификации исходного сырья различного состава) в удобной для расчета ГТУ форме;

- разработка и исследование модифицированной схемы ГТУ с турбиной на высокотемпературном воздухе, камерой сгорания после турбины, перепуском части воздуха после турбины в обход камеры сгорания и вводом этого воздуха в газовый тракт воздухоподогревателя.

Научную новизну работы представляют:

- банк данных фракционного состава и теплоэнергетических характеристик генераторного газа при газификации характерных типов исходного сырья в реакторе ИПХФ;

- методика и программа расчета, банк данных теплоэнергетических характеристик продуктов сгорания генераторного газа при различных видах исходного сырья на газификацию; результаты представлены в удобной для расчета ГТУ форме;

- результаты исследования модифицированной схемы ГТУ с измененной последовательностью процессов и байпасированием камеры сгорания частью воздуха, позволяющей более полно использовать энергетический потенциал низкокалорийного генераторного газа;

- методика и программа расчета массы перепуска, показано влияние массы перепуска на мощность и экономичность ГТУ, характеристики высокотемпературного воздухоподогревателя.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

- разработана и исследована модифицированная схема ГТУ на твердом топливе с реактором-газификатором ТБПО и низкосортного твердого топлива, позволяющая создать высокоэффективный энерготехнологический комплекс термической утилизации ТБПО или создать энергетическую ГТУ на твердом высококалорийном низкосортном топливе;

- разработан комплекс материалов, на основе которых производится расчет и проектирование твердотопливной ГТУ модифицированной схемы с реактором-газификатором по технологии ИПХФ;

- предложены возможные варианты исполнения твердотопливной ГТУ с реактором ИПХФ; приведен анализ сопутствующих проблем и путей их решения.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на 14-й Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Рыбинск, 25-28 мая 2003 г.); на 1-ом Российском научно-практическом семинаре «Использование нетрадиционных и возобнов-

ляемых видов энергии и способы ее хранения» (Москва, 2 декабря 2003 г.); на Международной научно-практической конференции «Использование нетрадиционных и возобновляемых видов энергии и способы ее хранения (Москва, 16 ноября 2004 г.), на XII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (Москва, 24-26 ноября 2004 г.); а также семинарах кафедры Э-3 МГТУ им. Баумана в 2003-2005 г.

Научные публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, 6 материалов конференций и 2 статьи, из них по перечню ВАК – 1 публикация.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общего заключения и списка литературы. Она содержит 168 страницы, 19 приложений, 42 рисунков, 26 таблиц и список литературы из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется общая характеристика проблемы энерго-сбережения и охраны окружающей среды. Энергетическая программа России на период до 2020 г. ориентирует на максимально экономичное использование топливо-энергетического потенциала страны, рациональное использование вторичных энергоресурсов, к числу которых относятся также твердые бытовые и промышленные отходы (их органическая составляющая). Известно, что затраты на создание утилизационных комплексов с лихвой могут перекрываться экономией материальных ресурсов, потребных на разведку новых месторождений, обустройство, создание транспортных артерий для поставки потребителям эквивалентных масс топлива (не говоря об экономии топливных ресурсов). Энергетически целесообразные способы утилизации ТБПО приводят к сдерживанию и даже сокращению потребления органического топлива, снижают техногенную нагрузку на среду обитания. Вновь образующиеся ТБПО и уже являются неиссякаемым возобновляемым источниками энергии.

В России проблеме утилизации ТБПО в последние десятилетия уделяется все большее внимание. Энергетической программой России предусматривается интенсификация работ по использованию ТБПО с целью удовлетворения нужд локальных децентрализованных потребителей, соответствующего сокращения потребления нефти и газа, а также улучшения экологической ситуации территории.

Разработка и развитие новых методов и установок, с помощью которых можно эффективно использовать энергетический потенциал ТБПО, не нанося урона окружающей среде, является актуальной задачей.

В первой главе приведен краткий обзор известных методов термической переработки ТБПО и твердых (низкосортных), топлив. Наибольшее распространение получило прямое сжигание ТБПО на мусоросжигательных заводах, оборудованных электрогенерирующими паротурбинными установками. Такие МСЗ ориентированы на большую производительность и привязаны к

территориям с большой численностью населения. Поэтому создание установок небольшой производительности, обслуживающих муниципальные территории с ограниченным числом жителей или производственные предприятия с большим выходом сгораемых промышленных отходов, является актуальным.

Менее распространен метод двухстадийной термической переработки ТБПО: газификация – сжигание генераторного газа. Он позволяет более эффективно решать проблему обезвреживания сбрасываемых в атмосферу субстанций, т.к. позволяет ввести предварительную обработку генераторного газа перед его сжиганием. При этом масса генераторного газа, подлежащего очистке существенно ниже массы продуктов сгорания, получаемых при прямом сжигании исходной массы ТБПО.

Совместная работа МГТУ им. Баумана и ФГУП ММПШ «Салют», участником которой являлась диссертант, направлена на создание комплекса по утилизации ТБПО и низкосортного твердого топлива на базе реактора-газификатора нового типа (по технологии Института проблем химической физики Российской академии наук г. Черноголовка).

Это реактор шахтного типа с паровоздушной газификацией при фильтрационном горении в тонком слое с высоким локальным разогревом. Процесс ведется при противоточном движении газифицируемого сырья и газифицирующего агента (паровоздушная смесь). Особенность процесса - вместе с газифицируемым сырьем в реактор вводится многократно используемый инерт (высокотеплоемкостный материал, непосредственно не участвующий в химических реакциях), выполняющий роль теплового аккумулятора, концентрирующего теплоту химических реакций в узкой зоне протекания реакций. Характер протекания процесса зависит от соотношения массовых теплоемкостей паровоздушного дутья и шихты, соотношения массовых расходов пара и воздуха, соотношения между расходом воздуха и массой газифицируемого сырья.

В тестовом примере показано, что при газификации угля (чистого углерода) и парокислородном дутье максимальный КПД процесса газификации достигается при относительной концентрации углерода в шихте «углерод-инерт» около 18...20 %. КПД процесса газификации зависит от относительной концентрации водяного пара в газифицирующем агенте: при объемном отношении H_2O/O_2 около 1,7, КПД процесса почти 95 %. Газифицируется чрезвычайно забалластированное сырье. Соотношение «водяной пар - кислород» существенно влияет на КПД процесса газификации, температуру в зоне реакции окисления углерода.

В процессе газификации управляющими (регулирующими) параметрами промышленного реактора являются расход воздуха и пара на газификацию. Реактор работает под атмосферным давлением и требует незначительного избыточного давления наддува. Зола, шлак и повторно используемый инерт с температурой 70...100 °С выводятся из реактора через нижний шлюз, а генераторный газ с температурой 100...250 °С отводится из верхней части реактора. В зоне максимального разогрева (по терминологии авторов технологии – зона сверхадиабатического разогрева) температура в узком слое достигает

1000...1200 °С. Реактор газифицирует сырьё повышенной влажности с зольностью до 80 %. В промышленном масштабе технология опробована на реакторе для газификации сильно забалластированных отходов закалочных масел на заводе «Электростальмаш» г. Электросталь, где реактор действует с 1995 г.

Технология подтверждена опытом газификации ТБО на первом действующем с 1998 г. опытно-промышленном реакторе мусоросжигательного завода г. Лаппеенранта в Финляндии. Работа реактора характеризуется низким уровнем выхода пылевых частиц в генераторном газе, в том числе возгонов тяжелых металлов, а продукты сгорания ТБО (даже без специальных мер очистки) - низким уровнем содержания токсинов, в том числе диоксинов. Второй экспериментальный реактор, доведенный до стадии промышленной эксплуатации, установлен на испытательной площадке ФГУП ММПШ «Салют» г. Москва. Экспериментальные пуски реактора проводятся с декабря 2003 г. Производительность реактора по переработке ТБО позволяет обслужить муниципальную территорию с населением 15...30 тыс. чел., обеспечив санитарное состояние территории, а генераторный газ, как топливо, может быть использован для производства электрической и тепловой энергии.

На базе реактора можно создавать локальные энергоутилизационные комплексы переработки ТБО, например, для городов Московской области, предотвратив образование новых территорий складирования ТБО и ликвидировав колоссальную захламленность территории области стихийными свалками.

Показателен пример утилизационного комплекса UPU-400 (США) производительностью 100 т/сут ТБО. Обслуживаемая территория – 150 тыс. человек. Комплекс энергетически полностью автономен и замещает (продает) примерно 5 % электроэнергии, потребляемой территорией. В состав комплекса входит устройство сортировки и подготовки сгораемой части ТБО. Экстрактированные черные, цветные металлы, стекло, песок, керамика, шлам идут на реализацию как ценное вторичное сырьё. На 1 долл. вложенных средств (капитальные вложения, в том числе стоимость сортировального устройства, эксплуатационные затраты) за счет продажи товарного продукта (электроэнергия, вторичное сырьё) возвращается 1,23 долл.

Задачей реферируемой работы являются разработка и обоснование схемы газотурбинного энергопреобразователя для энергоутилизационного комплекса с реактором ИПХФ. Для решения поставленной задачи необходимо:

- обобщить результаты, полученные в ходе опытно-промышленных пусков реактора, представив их в виде фракционного состава и теплоэнергетических характеристик генераторного газа для различных видов сырья;
- рассчитать и представить в удобной для расчета ГТУ форме зависимости температуры сгорания и теплоемкости продуктов сгорания генераторного газа от коэффициента избытка воздуха и других факторов;
- создать банк данных теплоэнергетических характеристик продуктов сгорания генераторного газа при газификации различных видов исходного сырья;

- создать и обосновать методику расчета оригинальной схемы газотурбинного энергопреобразователя с измененной последовательностью термодинамических процессов (непрямая схема) с байпасированием частью воздуха камеры сгорания; показать возможные пути реализации ГТУ заданной схемы.

Во второй главе рассматривается реактор ИПХФ, установленный на площадке ФГУП ММПШ «Салют», анализируются показатели его работы в режиме опытных пусков, теплоэнергетические характеристики генераторного газа и продуктов его сгорания. Конструктивно-технологическая схема реактора с топливосжигающим устройством и системой загрузки реактора представлена на рисунке 1, на рисунке 2 приведена фотография реакторного комплекса на испытательной площадке. Расчетная производительность реактора 15000 т/г, тепловая мощность (в расчете на переработку ТБО московского региона) 4...5 МВт. По техническим характеристикам реактор аналогичен образцу в Финляндии (поэтому часть работ по реактору была проведена на финском реакторе).

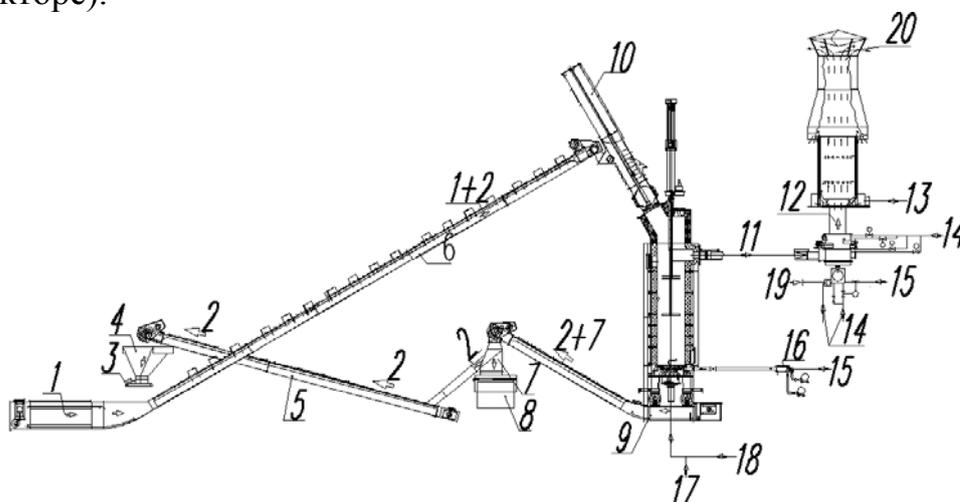


Рис. 1. Технологическая схема комплекса с реактором-газификатором на площадке ФГУП ММПШ «Салют»; 1 – сырье, 2 – инерт, 3 - конвейер подачи инерта с весами, 4 - воронка сбора инерта, 5 - конвейер подачи инерта в воронку, 6 - конвейер подачи сырья, 7 – зола, 8 - контейнер сбора золы, 9 - конвейер отвода золы с инертном от реактора, 10 - питающий механизм, 11 - продукт-газ, 12 - продукты сгорания продукт-газа, 13 - воздух на охлаждение продуктов сгорания продукт-газа, 14 - воздух на горение, 15 - легкое нефтяное топливо, 16 - блок розжига, 17 – пар, 18 – воздух, 19 – дежурное топливо, 20 - дымовая труба

Реактор оборудован системой загрузки ТБО, перегрузки инерта и вывода зольного остатка, топливосжигающим устройством, системами управления процессом и учетом энергопотребления на обслуживание реакторного комплекса. В стендовом варианте исполнения реакторного комплекса утилизация теплоты сгорания генераторного газа не предусмотрена, в финском варианте генераторный газ сжигается в топке водогрейного котла местной котельной.



Рис. 2. Фотография комплекса с реактором-газификатором на ФГУП ММПП «Салют»

Энергообеспечение реактора электроэнергией, паром и воздухом для наддува реактора осуществляется от заводских энергоисточников (что естественно для испытательного стенда). Постоянные и кратковременные энергозатраты на реактор соответствуют эквивалентной электрической мощности 250...300 кВт. Располагаемой тепловой мощности реактора (4...5 МВт) при работе с эффективным энергопреобразователем достаточно для перевода реактора на полностью автономный режим работы и производство товарной электроэнергии и теплофикационного тепла.

На реакторах в Финляндии и на площадке ФГУП ММПП «Салют» исследовались производительность реактора при работе на разном сырье, характеристики процесса газификации, температурный режим реактора. В диссертации использованы результаты опытных пусков реактора в Финляндии в 2003 г., а также результаты пусков реактора в Москве в период с декабря 2003 г. по ноябрь 2004 г.

На основании расчетно-теоретических разработок ИПХФ, а также экспериментальных исследований реактора в Финляндии и на Салюте (участником которых являлась диссертант), была апробирована программа расчёта фракционного состава генераторного газа и его характеристик. Результаты расчета хорошо коррелируются с экспериментом, как это показано на рис. 3.

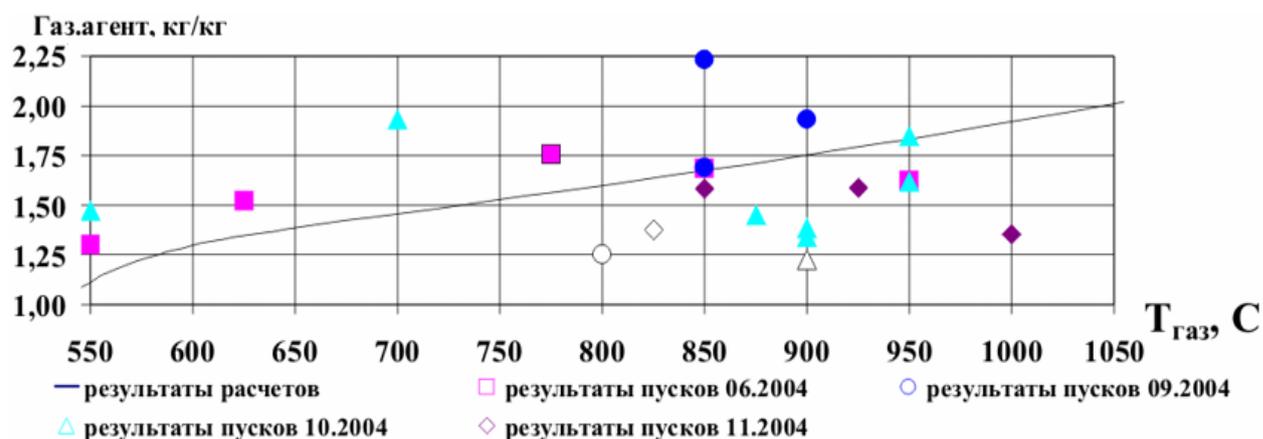


Рис.3. Сопоставление экспериментальных и расчетных параметров реактора

Выполнен расчет характеристик генераторного газа для широкого спектра исходного сырья на газификацию. Пример характеристик приведён в таблице 1. Таблица 2 иллюстрирует характеристики генераторного газа при газификации ТБО морфологического состава близкого к московскому. Приведён фракционный состав генераторного газа на выходе из реактора, а так же при его обезвоживании.

Таблица 1.

Характеристики генераторного газа из различного сырья

Фракционный состав, % по объему	Антра- цит	Газовый уголь	Бурый уголь	Торф	Древесина	ТБО
H ₂ O	5,24	5,52	14,84	26,06	30,99	43,92
CO ₂	5,34	4,82	5,27	6,61	5,42	7,89
CO	25,66	25,60	21,74	19,79	19,79	9,31
H ₂	8,86	12,29	11,04	10,45	10,45	10,84
N ₂	53,46	48,77	44,90	30,68	30,68	26,60
CH ₄	0,31	2,62	1,53	2,04	2,04	1,02
C ₂ H ₄	0,00	0,35	0,15	0,27	0,27	0,10
Ar	0,64	0,58	0,53	0,36	0,36	0,31
Q _H ^P , МДж/кг	3,712	5,096	4,205	4,749	4,429	4,41
L ₀ , кг/кг	0,945	1,386	1,123	1,308	1,205	1,220

Таблица 2.

Характеристики генераторного газа – продукта газификации ТБО

Фракционный состав, % по массе	Исходный состав	Частично осушен	Частично осушен	Осушенный
H ₂ O	35,619	20,000	10,000	0,000
CO ₂	14,488	18,003	20,253	22,504
CO	9,188	11,417	12,844	14,270
H ₂	0,844	1,049	1,180	1,311
N ₂	37,882	47,072	52,956	58,840
CH ₄	0,883	1,097	1,234	1,372
C ₂ H ₄	1,096	1,369	1,532	1,702
Q _H ^P , МДж/кг	2,897	3,600	4,050	4,499
L ₀ , кг/кг	0,827	1,028	1,156	1,284

Характеристики аналогичного рода рассчитаны для комбинированного сырья: ТБО с добавкой различных видов низкосортного твердого топлива.

Разработана методика расчёта температуры и теплоемкости продуктов сгорания в функции коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха и генераторного газа на входе в камеру сгорания. Методика базируется на уравнении сгорания в форме, предложенной профессором МГТУ им. Баумана В.Е. Михальцевым.

Программа расчёта, блок-схема которой представлена на рисунке 4, позволяет рассчитать на ПЭВМ характеристики продуктов сгорания генераторного газа любого фракционного состава.

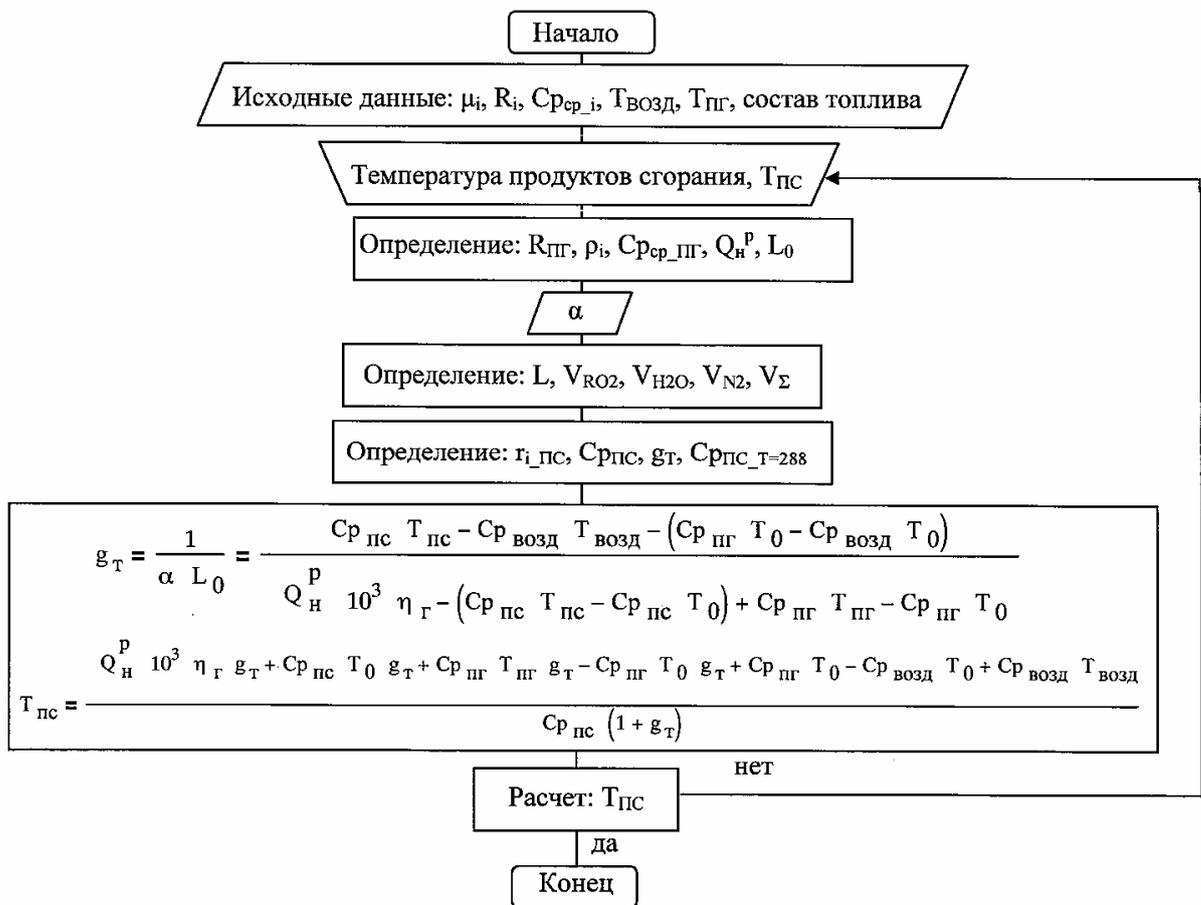


Рис 4. Блок-схема расчёта характеристик продуктов сгорания генераторного газа

Характеристики $T_{сг}=f(T_B, \alpha), C_p=f(T_B, \alpha)$ продуктов сгорания генераторного газа для различного фракционного состава табулированы и представлены в графической форме, удобной при проектировании ГТУ. Примеры характеристик представлены на рисунках 5 и 6.

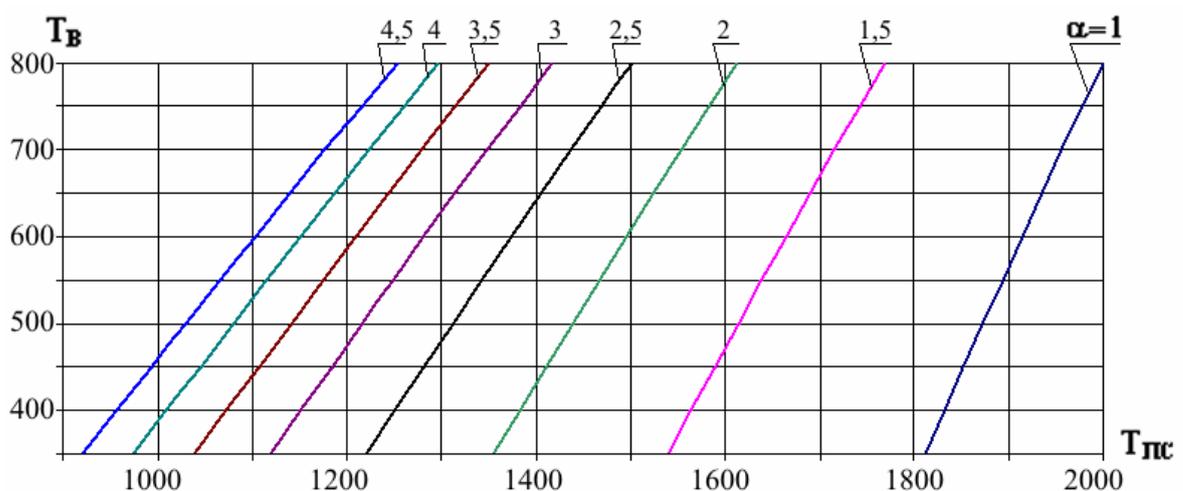


Рис. 5. Температура сгорания генераторного газа - продукта газификации ТБО, (газ осушен, температура генераторного газа на входе в камеру сгорания 300 К)

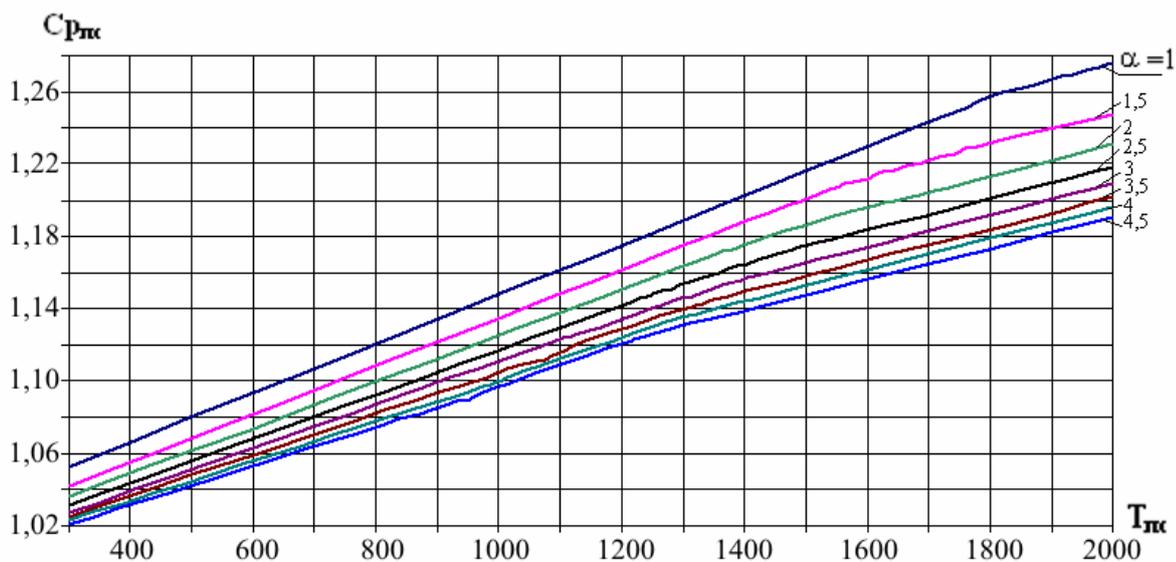


Рис. 6. Средняя теплоемкость продуктов сгорания осушенного генераторного газа-продукта газификации ТБО

В третьей главе представлена разработка и исследования оригинальной схемы газотурбинного энергопреобразователя – с изменённой последовательностью процессов и байпасированием части воздуха в обход камеры сгорания.

Разработки выполнены применительно к реактору ИПХФ производительностью 15000 т/г и тепловой мощностью 4...5 МВт. При КПД энергопреобразователя 25...35 % это соответствует мощности до 6 МВт. Такая мощность мала для ПТУ и достаточно велика для ДВС, для ГТУ – это распространенный ряд мощности. В перспективе предполагается форсированный вариант реактора ИПХФ мощностью порядка 15 МВт.

Использование ГТУ позволяет решать вопросы полной энергетической независимости реактора от внешних энергоисточников и удовлетворять экологическим нормативам.

При переводе ГТУ на твердое топливо требуется ввести защиту газовой турбины от эрозионного воздействия твердых взвесей, которыми загрязнены продукты сгорания. Допустимую концентрацию твердой взвеси ограничивают 5 мг/нм^3 при максимальном размере частиц не более 5...7 мкм. Инерционные способы очистки (жалюзи, циклон, турбоциклон), характеризуясь приемлемым уровнем гидравлического сопротивления и способностью контактировать с высокотемпературным потоком газа, не позволяют достичь требуемой тонкости очистки. Фильтрация более эффективна, но требует температуростойких фильтров, их постоянной очистки или периодической замены.

Возможен иной путь решения проблемы. Так, в 1950-х г. в Англии была испытана экспериментальная твердотопливная ГТУ, с турбиной на чистом высокотемпературном воздухе, нагреваемом в теплообменнике продуктами сгорания твердого топлива, а камера сгорания встроена в тракт после турбины. Позднее (топливный кризис 1970-х г.) к этой схеме, названной «with indirect combustion» вернулись вновь в связи с разработкой способов эффективной

утилизации различных видов местного низкосортного твердого горючего для целей энергетики.

В работах МГТУ схема с измененной последовательностью процессов и камерой сгорания за турбиной (рисунок 7) была выбрана изначально. Главным преимуществом схемы является полная эрозионная неуязвимость турбины. Камера сгорания работает под атмосферным давлением, что не требует высоконапорного компрессора топливного газа, а высокая температура воздуха на входе в камеру сгорания упрощает сжигание низкокалорийного сильно забалластированного генераторного газа. Фактически это регенеративная схема со стопроцентной регенерацией (в традиционном смысле). А недостаток - работоспособность ГТУ определяется работоспособностью высокотемпературного воздухонагревателя, чем ограничивается температура на входе в турбину и соответственно энергетические показатели ГТУ.

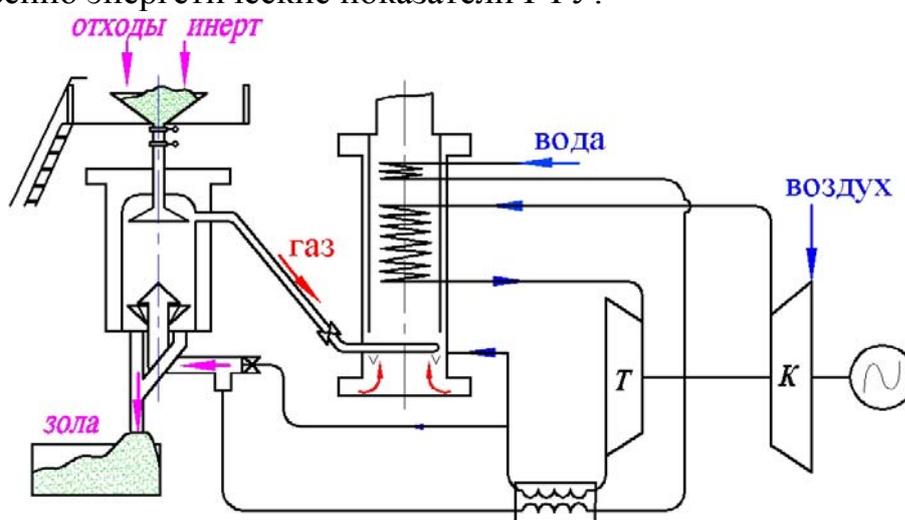


Рис. 7. Схема ГТУ на твердых горючих (разработка МГТУ им. Баумана)

Сопоставление ГТУ принятой и традиционной регенеративной схемы при идентичных поверхностях теплообменников и затрате энергии на сжатие топливного газа не выявляет термодинамических преимуществ последней.

Характерным для высокотемпературного воздухонагревателя является значительное различие водяного эквивалента продуктов сгорания и нагреваемого воздуха при сгорании низкокалорийного газа (стехиометрический коэффициент при сжигании природного газа около 16, при сжигании генераторного газа 0,8...1,3). Соответственно, водяной эквивалент продуктов сгорания может превысить водяной эквивалент нагреваемого воздуха в 1,3...1,8 раза. Это отражается на недоиспользовании энергетического потенциала продуктов сгорания.

Предложена модифицированная схема ГТУ с более полным использованием теплосодержания продуктов сгорания, схема представлена на рисунке 8, где 1 – воздух перед компрессором, 2 – воздух после компрессора, 3 – воздух после регенератора перед турбиной, 4 – воздух за турбиной, 5 – продукты сгорания, 6 – точка ввода перепускного воздуха в теплообменный аппарат, 7 – выход смеси продуктов сгорания и перепускного воздуха.

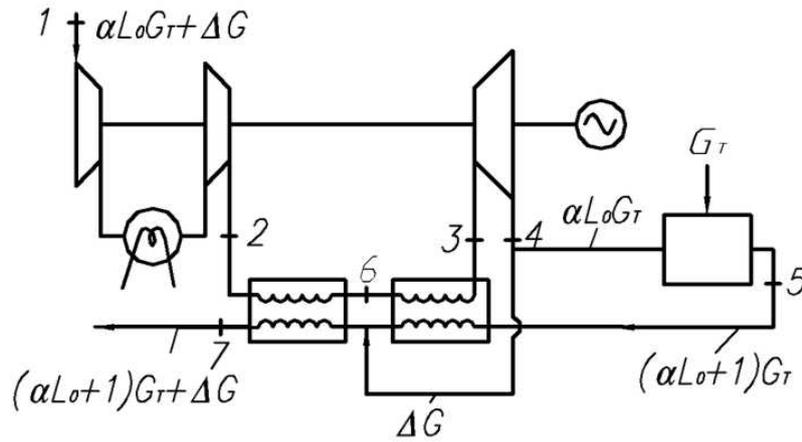


Рис. 8. Модифицированная схема ГТУ

Воздухонагреватель составлен из высокотемпературной и низкотемпературной секций. Температура продуктов сгорания за высокотемпературной секцией равна температуре воздуха за турбиной. Это позволяет части воздуха массой ΔG после турбины (минуя камеру сгорания) ввести в газовый тракт между секциями. Через воздушный тракт воздухонагревателя проходит массовый расход $(\Delta G + \alpha L_0 G_T)$.

Массовый расход ΔG воздуха на перепуске, температура воздуха T_6 в воздушном тракте между секциями воздухонагревателя, расход продуктов сгорания связаны уравнением энергии в форме уравнения (1). Соответственно температура T_7 на выходе из горячего тракта воздухонагревателя определяется зависимостью (2).

$$\Delta \bar{G} = \frac{\Delta G}{\alpha \cdot L_0 \cdot G_T} = \frac{C\tilde{p}_{ПС}}{C\tilde{p}_B} \cdot \frac{(T_5 - T_4)}{(T_3 - T_6)} \cdot \left(\frac{1}{\alpha \cdot L_0} + 1 \right) - 1 \quad (1)$$

$$T_7 = T_4 - \frac{C\tilde{p}_{ПС}}{C\tilde{p}_B} \cdot (T_6 - T_2) \cdot \frac{1 + \Delta \bar{G}}{1 + \Delta \bar{G} + \frac{1}{\alpha \cdot L_0}} \quad (2)$$

Система уравнений (1)...(2) позволяет построить удобную номограмму для выбора расхода ΔG на перепуск. Пример номограммы приведён на рисунке 9.

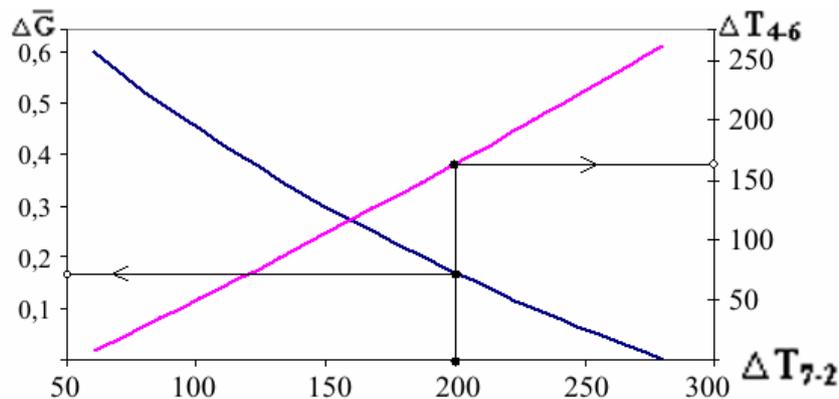


Рис. 9. Номограмма для расчета относительной массы перепуска ($T_5=1273$ К, $L_0=1,28$, $\alpha=3,89$, $C_{p_T}=1,133$ кДж/(кг·К), $G_T=0,86$ кг/с)

Массовый расход воздуха на перепуске влияет на эффективность (степень регенерации) секций воздухонагревателя:

$$\sigma_1 = \frac{T_3 - T_6}{T_5 - T_6} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{T_6 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (4)$$

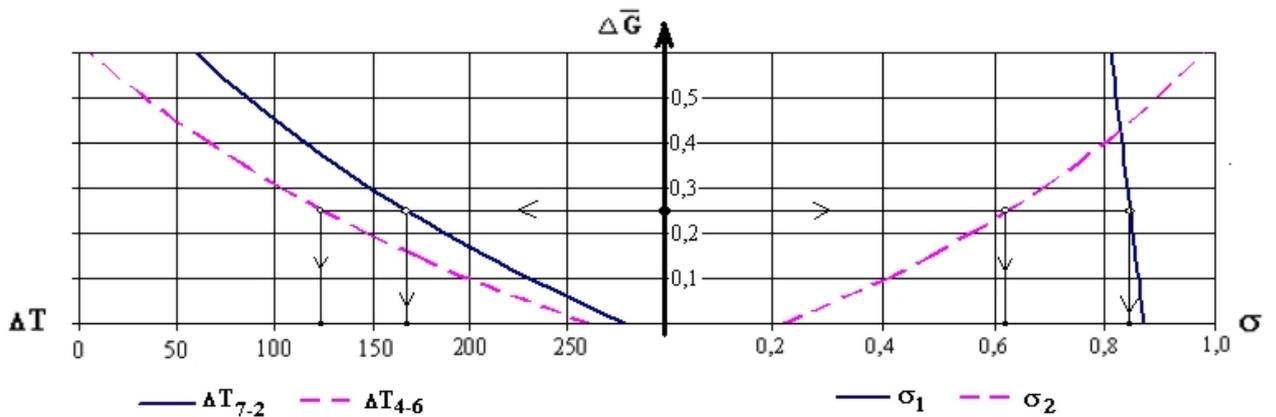


Рис. 10. Номограмма эффективности теплообменного аппарата по уравнениям (1)...(4) для осушенного газа ($T_5=1273$ К, $C_{pг}=1,133$ кДж/(кг·К), $G_T=0,86$ кг/с)

При неизменных параметрах ГТУ и расходе генераторного газа мощность и КПД ГТУ изменяются пропорционально изменению относительного расхода воздуха на входе в компрессор:

$$N_e = N_{e0} (1 + \Delta \bar{G}) \quad (5) \quad \eta_e = \eta_{e0} (1 + \Delta \bar{G}) \quad (6)$$

Увеличение массы перепуска улучшает экономические показатели ГТУ. Но приводит к изменению степени эффективности и размеров секций воздухонагревателя.

Масса расхода на перепуск может быть оптимизирована.

ГТУ с байпасированием позволяет создать более «гибкую» систему регулирования и приспособляемости при изменении состава генераторного газа.

В четвертой главе представлены результаты поисковых разработок газотурбинного энергопреобразователя. Решение возможно в рамках конверсии авиационных двигателей.

Диапазону мощностей соответствует целый ряд серийных ГТУ и ГТД, в том числе ГТД ТВЗ-117: температура перед турбиной 1163...1193 К, расход воздуха через компрессор 8,7 кг/с, степень повышения давления 9,4. Упрощенная схема не позволяет достичь экономичности выше 27...29 %.

Переход к модифицированной схеме (в основу концептуальной разработки положен проект ГТД ГАЗ 903) позволил при тех же параметрах поднять КПД до 37...39 %.

В соответствии с принятой схемой энергопреобразователя теплообменный аппарат состоит из двух секций: высокотемпературной и низкотемпературной, так, что байпасированный воздух вводится в сечении между секциями, где происходит смешение потоков воздуха и продуктов сгорания с равными температурами. Возможная реализация такой схемы показана на рисунке 11.

Ключевым элементом комплекса является высокотемпературный нагреватель воздуха. В одном из принятых анализируемых вариантов ГТУ температура продуктов сгорания 1273 К, а температура воздуха на входе в турбину составляет 1173 К. К материалу матрицы предъявляются повышенные требования жаростойкости (окалиностойкости) и жаропрочности. Кроме того, вследствие технологии изготовления материал должен иметь достаточную пластичность, позволяющую обеспечить требуемую вытяжку при штамповке. Он должен обрабатываться резанием и хорошо свариваться всеми видами сварки.

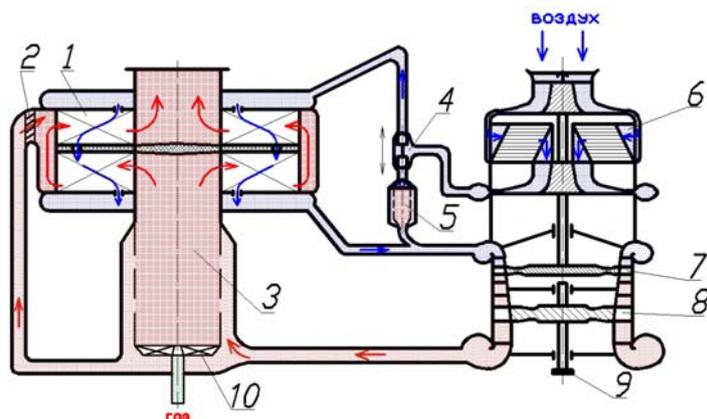


Рис. 11. Принципиальная схема энерготехнологической ГТУ: 1 - высокотемпературный двухъярусный воздухонагреватель, 2 - регулятор перепуска байпасного воздуха, 3 - основная камера сгорания, 4 - блок регулирования перепуска холодного воздуха, 5 - пусковая камера сгорания на пусковом топливе, 6 - двухкаскадный компрессор со встроенным воздухоохладителем, 7 - турбина привода компрессоров, 8 - силовая турбина, 9 - муфта привода электрогенератора, 10 - горелка

Таким требованиям удовлетворяют материалы, широко применяемые для изготовления деталей камер сгорания, форсажных камер, экранов, труб и других деталей авиационных газотурбинных двигателей, работающих при температуре 950-1100 °С.

Для изготовления матрицы пластинчатого теплообменника может быть выбран сплав на никелевой основе ХН60ВТ (ЭИ868, ВЖ-98).

Как вариант, может быть рассмотрен новый высокохромистый сплав SIRIUS 314, допускающий длительную работу в окислительной атмосфере низким содержанием соединений серы при температуре до 1100 °С, а в среде с высоким содержанием сернистых соединений – до 950 °С.

Важным аспектом изготовления теплообменника является его стоимость и ресурс. Применение дорогостоящих жаропрочных сплавов целесообразно лишь для тех участков теплообменника, температура стенок которых максимальна. Участки с меньшей температурой могут быть выполнены из менее жаропрочного и более дешевого материала, например нержавеющей стали. Реализация подобной схемы теплообменника требует разработки модульной конструкции, в которой увеличение ресурса может быть достигнуто легкой заменой вышедших из работы модулей. Модульная конструкция позволяет использовать одну и ту же оснастку для изготовления тепло-

обменников на различную тепловую мощность (при одинаковых параметрах теплоносителей).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные положения и выводы, характеризующие представленные результаты исследования применения ГТУ-преобразователя в комплексе с газификацией твердых топлив, следующие:

1. Выполнен анализ существующих технологий утилизации ТБПО и показан экологический, экономический и эксплуатационный эффект применения ГТУ как энергопреобразователя в комплексе термической переработки ТБПО с реактором-газификатором по технологии ИПХФ. Это положение может быть распространено на комплекс и с другим типом газификатора.

2. Проведены исследования характеристик генераторного газа, полученного в результате опытных пусков газификатора (по технологии ИПХФ) при газификации различных видов низкосортных твердых топлив, в том числе твердых бытовых отходов. Разработана программа расчета характеристик продуктов сгорания генераторного газа в форме, удобной для инженерных расчетов ГТУ или комбинированных установок.

3. Показано, что на базе испытанного реактора может быть создан эффективный энергоутилизационный комплекс по переработке ТБПО, характеризующийся высокой тепловой эффективностью и полной автономностью.

4. Предложена и исследована модифицированная схема с ГТУ, турбина которой работает на чистом высокотемпературном воздухе. Воздух после компрессора направляется в высокотемпературный нагреватель. Высокотемпературный воздух высокого давления расширяется в турбине и затем подается как окислитель в камеру сгорания. Для повышения коэффициента использования энергии продуктов сгорания вводится перепуск части воздуха в обход камеры сгорания. Такая схема позволяет улучшить мощностные и экономические показатели.

5. Разработан комплекс программ, необходимых для инженерных расчетов в ГТУ модифицированной схемы, в том числе определение массы байпасного воздуха.

6. Показано, что эффективность ГТУ модифицированной схемы может достигать уровня 38-40 % при умеренной температуре воздуха перед турбиной.

7. На конкретных примерах показаны возможные пути реализации ГТУ модифицированной схемы при работе с реактором-газификатором.

8. Основные положения работы используются в учебном процессе подготовки инженеров в МГТУ им. Баумана.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Газотурбинная установка на твердом топливе с реактором-газификатором / Заживихина Т.А., Иванов В.Л., Синичкин А.А., Трдастьян С.А. // Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. – Рыбинск, 2003. – Т.2. – С. 66-69.

2. Проблемы создания ГТУ для утилизации ТБО и низкосортного твердого топлива / Елисеев Ю.С., Заживихина Т.А., Иванов В.Л., Осипов М.И. и др. // Тез. докл. Международная научно-практическая конференция «Малая энергетика-2005». – М., 2005. – С. 34-36.

3. Иванов В.Л., Заживихина Т.А. Энергокомплекс по утилизации твердых бытовых отходов // Тез. докл. I Российский научно-практический семинар «Использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и способы ее хранения». – М., 2003. – С. 55-56.

4. Иванов В.Л., Егоров К.С., Заживихина Т.А. Энерготехнологический газотурбинный комплекс для утилизации твердых сжигаемых промышленных и бытовых отходов // Возобновляемые источники энергии.: Тез. докл. IV Всероссийская научная молодежная школа МГУ им. М.В.Ломоносова. – М., 2004. – С. 37-38.

5. Иванов В.Л., Заживихина Т.А. Энерготехнологическая установка с газотурбинным преобразователем энергии для переработки твердых промышленных и бытовых отходов посредством их газификации // Тез. докл. XII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». – М., 2004. – С. 148-149.

6. Иванов В.Л., Заживихина Т.А., Трдастьян С.А. Исследование экологических и энергетических характеристик реактора-газификатора для переработки твердых бытовых и промышленных отходов // Тез. докл. Международная научно-практическая конференция ЮНЕСКО «Использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и способы их хранения», УТС при МГТУ им. Баумана. – М., 2005. – С. 37-39.

7. Иванов В.Л., Заживихина Т.А. Газотурбинный двигатель для установки по термической переработке твердых бытовых и промышленных отходов // Авиационная техника. – Казань, 2006. – №2 – С. 76-79.

8. Иванов В.Л., Подлесная Т.А. Особенности выбора схемы и параметров ГТУ, работающей на сильно запыленном низкокалорийном топливном газе // Тез. докл. XIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». – М., 2008. – С. 18-19.

* - фамилия Подлесной Т.А. до замужества