

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 658.26:681.5.015

АБРАЗОВСКИЙ
Алексей Анатольевич

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ
МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
УТИЛИЗАЦИЕЙ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Минск 2018

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научные
руководители:

НЕСЕНЧУК Анатолий Петрович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Промышленная теплоэнергетика и
теплотехника» Белорусского национального тех-
нического университета;

СЕДНИН Владимир Александрович,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и
теплотехника» Белорусского национального тех-
нического университета

Официальные
оппоненты:

РУСАН Викентий Иванович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Практическая подготовка студентов»
Белорусского государственного аграрного техни-
ческого университета;

Оппонирующая
организация

МОРОЗ Денис Равильевич,
кандидат технических наук, доцент, директор
Проектного научно-исследовательского респуб-
ликанского унитарного предприятия «НИИ Белги-
проптогаз»

Научно-исследовательское и проектное респуб-
ликанское унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»

Защита состоится 12 апреля 2018 г. в 14.00 на заседании совета по защите дис-
сертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по
адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201; e-mail:
pte@bntu.by, телефон ученого секретаря (017)293-92-16.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национально-
го технического университета.

Автореферат разослан 6 марта 2018 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.01,
кандидат технических наук



Д. Б. Муслина

© Абразовский А. А., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Развитие пищевой промышленности Республики Беларусь направленно на обеспечение продовольственной безопасности и укрепление экспортно ориентированных позиций государства. В мировой практике одним из основных показателей конкурентоспособности производства являются удельная энергоёмкость и энергетическая составляющая себестоимости продукции.

В настоящее время объём производства мяса и пищевых субпродуктов составляет 1060,7 тыс. т в год, колбасных изделий 275,6 тыс. т, планируемый рост экспортных поставок к 2020 г составит 130 %. Агропромышленный комплекс (АПК) страны потребляет около 3 млн т у. т. в год, на производство пищевых продуктов расходуется 1,6 млрд кВт·ч электроэнергии и 4,3 млн Гкал тепловой энергии, энергетическая составляющая в себестоимости продукции составляет 11,5 %. Энергоёмкость данного сектора экономики значительно превышает соответствующий показатель для большинства развитых стран мира, что требует разработки и реализации мероприятий, направленных на повышение уровня энергоэффективности как всего сектора в целом, так и мясоперерабатывающей отрасли в частности. Реализуемые в настоящее время в этой отрасли мероприятия носят энергосберегающий характер и предполагают повышение эффективности энерготехнологических систем предприятий путем уменьшения доли энергетических отходов. На практике их реализация осуществляется без изменения принципиальных основ технологии и типа применяемого оборудования, а потенциал ограничен возможностями энерготехнологической системы предприятия. Дальнейшее расширение границ возможностей повышения уровня энергоэффективности может быть достигнуто построением энергетических интеграционных комплексов в составе объекта энергопотребления и источника энергоснабжения. Так, повышение уровня энергоэффективности мясоперерабатывающих предприятий может быть достигнуто посредством их энергетического сопряжения с другими объектами промышленного и топливно-энергетического комплекса, располагающими существенным объемом вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). В контексте этого целесообразным видится энергетическое объединение мясоперерабатывающих предприятий АПК с объектами газотранспортной системы страны, ВЭР которых используются лишь в незначительной степени. Такого рода энергетические объединения позволят значительно увеличить энергоэффективность предприятий АПК, снизить энергоёмкость производства продукции и, как результат, себестоимость продукции в целом.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Настоящая работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) в соответствии с планом НИР кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника». Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора БНТУ от 15.01.2013 № 162-лс.

Цели и задачи исследования соответствуют современным тенденциям развития энергосистемы Республики Беларусь и политике в области энергоэффективности, проводимой в государстве, соответствуют приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (указ Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166 «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы») по разделу 1 «Энергетика и энергоэффективность, атомная энергетика» в части пунктов «Энергоэффективные технологии и техника», «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы», а также приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы») по разделу 1 «Энергетика».

Цель и задачи исследования

Целью исследования являются разработка и научное обоснование технических решений «бестопливного» энергообеспечения мясоперерабатывающих предприятий утилизацией ВЭР компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнен анализ энерготехнологических систем предприятий мясоперерабатывающей отрасли и исследованы существующие пути повышения их энергоэффективности;

- исследована эффективность энерготехнологических систем предприятий мясоперерабатывающей отрасли и разработана методика прогнозирования объемов энергопотребления;

- исследованы фактические характеристики газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций магистральных газопроводов с учетом реальных параметров функционирования газотранспортной системы;

- осуществлены синтез, структурная и параметрическая оптимизация принципиальных схем энерготехнологических комплексов на базе газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов;

- разработаны регрессионные зависимости для определения значений КПД и электрической мощности комбинированных энерготехнологических установок (КЭТУ);

- выполнен технико-экономический расчет технических решений создания энергоцентров мясоперерабатывающих предприятий на базе компрессорных станций магистральных газопроводов.

Объект исследований – система энергоснабжения предприятий мясоперерабатывающей отрасли АПК.

Предмет исследований – энерготехнологические схемы энергоцентров предприятий мясоперерабатывающей отрасли АПК на базе газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов.

Научная новизна

Разработаны и научно обоснованы новые технические решения построения энергетического интеграционного комплекса в составе предприятия мясоперерабатывающей отрасли и компрессорной станции магистрального газопровода, которые позволяют организовать «бестопливное» энергоснабжение сопряженного промышленного узла в виде мясоперерабатывающего предприятия утилизацией ВЭР КС.

Для определения рациональной производительности мясоперерабатывающего предприятия в составе энергетического интеграционного комплекса с учетом располагаемого объема ВЭР КС разработана авторская методика прогнозирования объемов энергопотребления с использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях, позволяющая на основании номенклатурного перечня продукции и удельных фактических норм потребления ТЭР с глубиной анализа статистической отчетности, равной 15 месяцам, определять объемы энергопотребления предприятия.

Синтезированы и оптимизированы новые регенеративно-утилизационные схемы комбинированных энерготехнологических установок на базе КС магистральных газопроводов, отличающиеся совмещением принципов внутреннего и внешнего энергоиспользования и позволяющие без снижения надежности и энергоэффективности работы газоперекачивающих агрегатов максимально использовать ВЭР КС для генерирования электрической и тепловой энергии в объемах потребления предприятия мясоперерабатывающей отрасли АПК.

Для КЭТУ с детандер-генераторным агрегатом (ДГА) получены новые регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя, давления топливного газа после детандера, температуры топливного газа перед детандером.

Для КЭТУ с паросиловой установкой (ПСУ) получены новые регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя, степени сжатия воздуха в компрессоре, расхода пара на технологические нужды.

Положения, выносимые на защиту:

– методика прогнозирования объемов энергопотребления предприятий мясоперерабатывающей отрасли на кратко- и среднесрочную перспективу, отличающаяся использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях и позволяющая прогнозировать объемы энергопотребления на основании номенклатурного перечня продукции и фактических норм потребления ТЭР на единицу продукции;

– принципиальные схемы энерготехнологических комплексов на базе газоперекачивающих агрегатов КС магистральных газопроводов, основанные на регенеративно-утилизационных принципах энергоиспользования и отличающиеся наличием как внутреннего, так и внешнего энергоиспользования;

– результаты численного анализа эффективности КЭТУ с детандер-генераторным агрегатом на базе газоперекачивающего агрегата КС магистрального газопровода и регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности КЭТУ от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя (диапазон варьирования фактора 1,5...28,5 °С), давления топливного газа после детандера

(диапазон варьирования фактора 2,16...3,84 МПа) и температуры топливного газа перед детандером (диапазон варьирования фактора 146...214 °С);

– результаты численного анализа эффективности КЭТУ с паросиловой установкой на базе газоперекачивающего агрегата КС магистрального газопровода и регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности КЭТУ от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя (диапазон варьирования фактора 1,5...28,5 °С), степени сжатия воздуха в компрессоре (диапазон варьирования фактора 13,3...16,7) и расхода пара на технологические нужды (диапазон варьирования фактора 2,6...9,4 кг/с);

– методика технико-экономического обоснования выбора установленной мощности энергоцентра, отличающаяся применением метода базовой точки в обобщенных переменных и позволяющая, располагая преysкурантными ценами на основное и вспомогательное оборудование, определить оптимальную мощность КЭТУ на базе ГПА КС магистрального газопровода.

Личный вклад соискателя ученой степени

Совместно с научным руководителем диссертационной работы д.т.н., профессором А.П. Несенчуком определены цель и задачи исследования, опубликованы печатные работы. Совместно с научным руководителем диссертационной работы д.т.н., профессором В.А. Седниным уточнены задачи, определены методы исследования, опубликованы печатные работы.

Личный вклад соискателя заключается в: выполнении аналитического обзора литературы по теме исследования, представленной в отечественных и иностранных источниках научной информации; разработке методики определения прогнозных объемов энергопотребления вертикально-интегрированных предприятий мясоперерабатывающей отрасли АПК на базе имитационного моделирования на нейросетевых моделях; структурной и параметрической оптимизации синтезированных энерготехнологических схем на базе газоперекачивающего агрегата КС магистрального газопровода; оценке эффективности энерготехнологических установок на базе газоперекачивающего агрегата КС с использованием энергетического и эксергетического методов термодинамического анализа; технико-экономическом оптимизационном расчете энергоцентра на базе КС магистрального газопровода.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы докладывались на научно-практической конференции «Менеджмент качества и инновации в образовании и производстве» (г. Гродно, 2010 г.), научно-практической конференции «Инновации и энергоэффективность в топливно-энергетическом комплексе» (г. Витебск, 2012 г.), научно-практической конференции «Инновации, энергоэффективность, образование – залог бережливости» (г. Гродно, 2013 г.), научно-практической конференции «Энергосберегающие и инновационные технологии в ТЭК» (г. Минск, 2014 г.), научно-практической конференции «Инновации. Образование. Энергоэффективность» (г. Гомель, 2016 г.), научно-практической конференции «Инновации. Образование. Энергоэффективность» (г. Барановичи, 2017 г.).

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в сфере проектирования объектов системы газоснабжения (приложение А к диссертации) и в газотранспортной сфере (приложение Б к диссертации), а также используются в

учебном процессе БНТУ (приложения В к диссертации) и учебном процессе ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ» (приложение Г к диссертации).

Опубликование результатов диссертации

Основные положения диссертации опубликованы в 24 работах: 13 статьях в научных изданиях, входящих в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований (перечень ВАК Республики Беларусь) и зарубежных научных изданиях; девяти публикациях в тематических сборниках, трудах, материалах научных конференций; двух статьях в научно-технических журналах. Общий объем опубликованных материалов в научных журналах – 5,2 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из титульного листа, оглавления, перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения. Логика построения работы определяется в постановке задач исследования и последовательном их решении для достижения цели, содержащейся в названии диссертационной работы.

Полный объем диссертации – 157 страниц. Всего иллюстраций – 57; таблиц – 31. Объем приложения – 18 страниц. Список использованных источников включает 161 наименований, из которых 24 авторские работы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

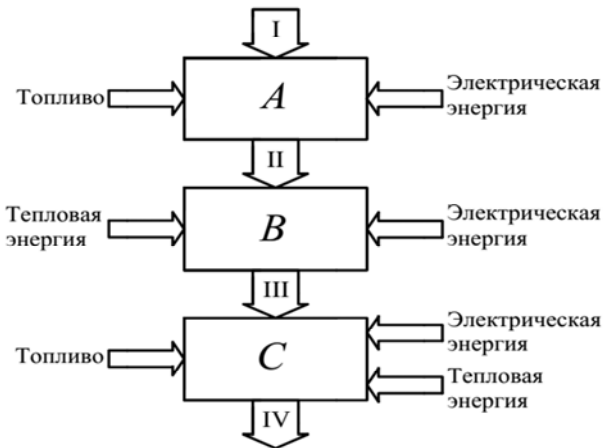
В первой главе **«Анализ энерготехнологических систем предприятий мясоперерабатывающей отрасли и пути повышения их энергоэффективности»** рассмотрена одна из тенденций развития пищевой отрасли Республики Беларусь, трендом которой является создание высокоэффективных интеграционных структур корпоративного типа по технологическим продуктовым цепочкам от производства исходного сырья до сбыта готовой продукции [3]. Анализ проблематики эффективного энергоснабжения агропромышленного сектора позволил прийти к выводу, что к решению проблемы следует подходить с позиции достижения синергетического результата посредством интегрирования энерготехнологических систем различных объектов, независимо от их профиля деятельности. Повышение эффективности энергоснабжения подобного рода объектов может быть достигнуто посредством сопряжения предприятий АПК с другими объектами промышленного и топливно-энергетического комплекса, располагающими существенным объемом ВЭР. В качестве источника значительного объема ВЭР рассмотрены КС магистральных газопроводов с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами.

Исходя из изложенного, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе **«Исследование энерготехнологических систем предприятий мясоперерабатывающей отрасли и разработка методики прогнозирования объемов энергопотребления»** разработан алгоритм определения объемов потребления ТЭР для вертикально-интегрированного предприятия мясоперерабатывающей отрасли АПК с использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях [3, 10, 19]. Для процессов анализа и оптимизации этой энерготехно-

гической системы была произведена декомпозиция структуры и выделены интегральные цепочки элементов.

На рисунке 1 показана структура комплекса по производству мясopодуKтов в виде последовательной цепочки технологических процессов с указанием материальных и энергетических потоков. Подсистема *A* представлена зерносушильным комплексом и комбикормовым цехом, *B* – комплексом содержания скота, *C* – мясоперерабатывающим предприятием. Для подсистемы *A* основное сырье – зерновые сельскохозяйственные культуры, а конечный продукт комбикорм. Для подсистемы *B* – сырьем и конечной продукцией являются соответственно комбикорм и мясо живым весом. В подсистеме *C* из мяса в живом весе (сырье) производится конечная продукция – мясные продукты и полуфабрикаты.



A, B, C – энергетические подсистемы; I, II, III, IV – потоки сырья и продукции

Рисунок 1. – Структура материальных и энергетических потоков предприятия по производству мясopодуKтов

Исходными данными для решения поставленной задачи являются: схема энергопотребления (структура) предприятия с энергетическими и материальными потоками, расчетно-статистическая и аналитическая информация по удельным величинам энергопотребления технологических линий, технические характеристики применяемого технологического оборудования, номенклатурный перечень выпускаемой мясоперерабатывающим предприятием продукции, значения условно-постоянных составляющих энергозатрат на всех уровнях производства.

Для определения прогнозного энергопотребления подсистемы *C* (мясоперерабатывающее предприятие) было применено имитационное моделирование на нейросетевых моделях. Выходным параметром выбрано электропотребление предприятия за месяц, МВт·ч. Для обработки данных использовался прикладной программный продукт Deductor Studio Academic 5.3. Исходное множество данных было разбито на обучающее и тестовое подмножества: первые 12 значений (80 %) устанавливаются в качестве обучающего множества, последние 3 (20 %) – как те-

стовое. Успешное обучение модели было завершено для сигмоидальной функции с одним скрытым слоем и выводом результатов при распознавании тестового множества со средней ошибкой менее 10 % [10].

На рисунке 2 представлена последовательность операций при прогнозировании объемов энергопотребления комплекса.



Рисунок 2. – Алгоритм определения прогнозных объемов энергопотребления предприятия АПК

В третьей главе «**Исследование фактических характеристик газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов**» определены фактические располагаемые энергетические ресурсы энергоисточника (КС магистрального газопровода). Выполнен расчет фактических показателей энергоэффективности функционирования ГПА: коэффициента полезного действия и удельного расхода топливного газа. В качестве первичной информации для расчета были приняты результаты измерений на КС «Крупская» в рамках параметрической диагностики ГПА 16-01 «Урал» с двигателями ПС-90ГП-2.

Потребляемая мощность КС непосредственно связана с производительностью магистрального газопровода, при этом производительность газопровода и параметры транспортируемого газа значительно изменяются в течение года. На основании анализа изменения параметров транспортируемого по магистральному газопроводу «Ямал–Европа» природного газа определена фактическая зависимость потребляемой мощности КС от производительности газопровода. Коэффициент влияния,

характеризующий данную зависимость, находится в диапазоне 1,9–2,5, т.е. при изменении производительности на 1 % потребляемая мощность КС изменится на 1,9–2,5 % (рисунок 3) [4].

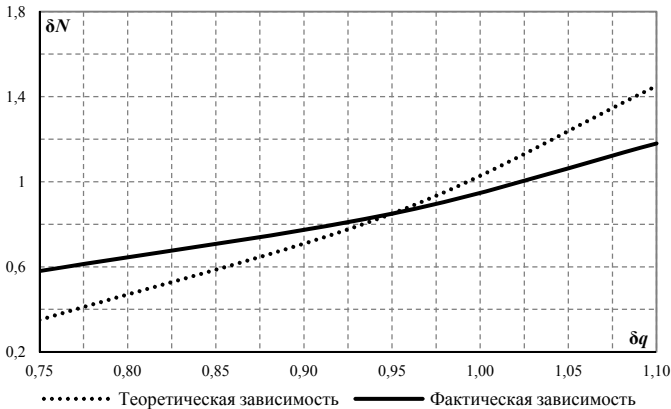


Рисунок 3. – Относительная потребляемая мощность КС в тренде изменения относительной производительности газопровода

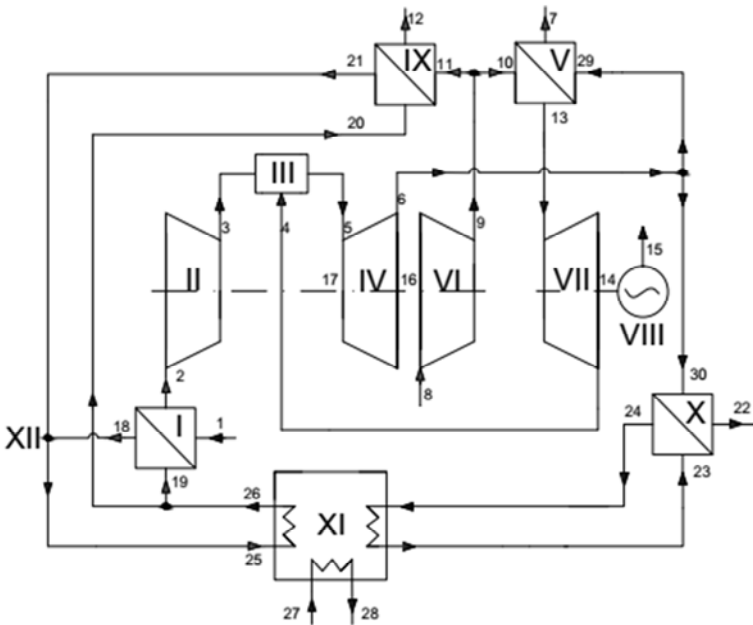
Для определения влияния дополнительного регенеративного и утилизационного оборудования на параметры функционирования ГТУ применен метод малых отклонений. Используя данный метод, аналитическим путем получены коэффициенты влияния изменения сопротивления выпускного тракта на эффективную мощность и эффективный КПД приводной газотурбинной установки (ГТУ), что позволяет с достаточной точностью определять влияние аэродинамического сопротивления утилизационных теплообменных аппаратов на параметры работы ГТУ при различных температурах продуктов сгорания перед турбиной и степенях сжатия воздуха в компрессоре [5].

В четвертой главе «Оптимизация энерготехнологических схем на базе газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов» представлены технологические схемы комбинированных энерготехнологических установок на базе КС магистральных газопроводов: с детандер-генераторным агрегатом; с паросиловой установкой с водой в качестве рабочего тела; с паросиловой установкой с органическим рабочим телом (ОРЦ). Осуществлена их параметрическая оптимизация, получены полиномиальные регрессионные зависимости [6–9, 11, 13, 15, 22]. Во всех предложенных схемах для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор газотурбинного двигателя, в теплое время года применяется абсорбционная холодильная машина (АБХМ), горячим источником для которой являются продукты сгорания двигателя. Наличие АБХМ позволило увеличить среднегодовую мощность и КПД газоперекачивающего агрегата, тем

самым нивелируя их понижение из-за увеличения аэродинамического сопротивления выхлопного тракта ГТУ.

Технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, ДГА и АБХМ для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор газотурбинного двигателя, представлена на рисунке 4 [6].

Для параметрической оптимизации была разработана математическая модель макроуровня [6]. При составлении системы балансовых уравнений принято, что транспортные элементы (связи) схемы идеальные, т.е. в них отсутствуют энергетические и материальные потери. В технологических элементах материальные потери (утечки и присосы) также приняты нулевыми. Энергетические потери в транспортных элементах учитывались через коэффициенты потерь энергии в связываемых ими технологических элементах.



I, V, IX, X – теплообменные аппараты; II – компрессор; III – камера сгорания;
 IV – газовая турбина; VI – нагнетатель; VII – детандер; VIII – генератор;
 XI – абсорбционная холодильная машина; 1, 2, 3 – воздух; 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 – природный газ; 5, 6, 7, 22, 29, 30 – продукты сгорания; 14, 16, 17 – механическая энергия;
 15 – электрическая энергия; 18...21, 25, 26 – вода холодного контура абсорбционной холодильной машины; 23, 24 – вода горячего контура абсорбционной холодильной машины; 27, 28 – вода из контура обратного водоснабжения компрессорной станции

Рисунок 4. – Принципиальная схема комбинированной энерготехнологической установки с детандер-генераторным агрегатом

Сокращенная система балансовых уравнений математической модели имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 G_1 + G_4 - G_5 = 0; \\
 G_1 = \alpha G_8^T G_4; \\
 G_1 h_1 - G_1 h_2 + G_{18} h_{19} - G_{18} h_{18} = 0; \\
 G_1 h_2 - G_1 h_3 + \eta_4 N_{17} = 0; \\
 G_1 h_3 + \eta_3 G_4 h_4 - G_5 h_5 = 0; \\
 G_5 h_5 - G_5 h_6 - \frac{1}{\eta_4} N_{17} - \frac{1}{\eta_4} N_{16} = 0; \\
 G_7 h_{29} - G_7 h_7 + G_{10} h_{10} - G_{10} h_{13} = 0; \\
 G_8 h_8 - G_8 h_9 + \eta_r N_{16} = 0; \\
 G_4 h_{13} - G_4 h_4 - \frac{1}{\eta_8} N_{14} = 0; \\
 \eta_8 N_{14} - N_{15} = 0; \\
 G_{11} h_{11} - G_{11} h_{12} + G_{20} h_{20} - G_{20} h_{21} = 0; \\
 G_{30} h_{30} - G_{30} h_{22} + G_{23} h_{23} - G_{23} h_{24} = 0; \\
 G_{23} h_{24} + G_{25} h_{25} - G_{23} h_{23} - G_{25} h_{26} - G_{27} h_{28} + G_{27} h_{27} = 0; \\
 G_{25} = K_1 G_{23}; \\
 G_{25} = K_2 G_{27}; \\
 G_{20} + G_{18} - G_{25} = 0; \\
 G_7 + G_{30} - G_5 = 0; \\
 G_{10} + G_{11} - G_8 = 0; \\
 G_{20} h_{20} + G_{18} h_{18} - G_{25} h_{25} = 0,
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где G_1 – расход воздуха, кг/с;

G_4 – то же топливного природного газа, кг/с;

G_5, G_7, G_{30} – то же продуктов сгорания, кг/с;

G_8, G_{12} – то же транспортируемого газа, кг/с;

G_{23}, G_{25}, G_{27} – то же воды, кг/с;

α – коэффициент расхода воздуха;

h_1, h_2, h_3 – энтальпия воздуха, кДж/кг;

h_5, h_6, h_7, h_{30} – то же продуктов сгорания, кДж/кг;

h_8, h_9, h_{12} – то же транспортируемого природного газа, кДж/кг;

$h_{23}, h_{24}, h_{25}, h_{26}, h_{27}, h_{28}, h_{20}, h_{21}, h_{18}, h_{19}$ – то же воды, кДж/кг;

η – коэффициент потерь в окружающую среду, отнесенный к i -му элементу;
 $N_{14}, N_{15}, N_{16}, N_{17}$ – мощность, кВт.

Для проведения параметрической оптимизации в качестве критериев эффективности принимались коэффициент использования топлива b_T и удельная электрическая мощность e_{33} . В качестве управляемых переменных принимались: температура продуктов сгорания перед газовой турбиной t_5 , температура топливного газа перед детандером t_{13} и температура воздуха, поступающего в компрессор t_2 . Диапазон их изменения соответственно: $t_5 = 700 \dots 1150$ °С, $t_{13} = 100 \dots 190$ °С, $t_2 = 15 \dots 35$ °С.

В исследуемой области при расходе транспортируемого природного газа 1000 кг/с минимальный расход топливного газа равен 4,91 кг/с при $t_5 = 1150$ °С, $t_2 = 15$ °С, при этом электрическая мощность, дополнительно вырабатываемая ДГА, составляет 1157 кВт. Максимальное значение электрической мощности составляет 1714 кВт при $t_5 = 700$ °С, $t_{13} = 190$ °С, при этом удельный расход топливного газа равен 6,84 кг/с.

Для получения регрессионных зависимостей, аппроксимирующих математическую модель, был использован численный эксперимент [11, 13] с применением математического аппарата теории планирования эксперимента.

В качестве критериев оптимизации принимались электрическая мощность ДГА (N_{15}) и КПД КЭТУ ($\eta_{\text{КЭТУ}} = \frac{N_{15} + N_{16}}{G_4 Q_H^p}$). В качестве управляемых параметров:

температура топливного газа перед детандером t_{13} , давление топливного газа после детандера p_4 , температура воздуха, подаваемого в компрессор двигателя t_2 .

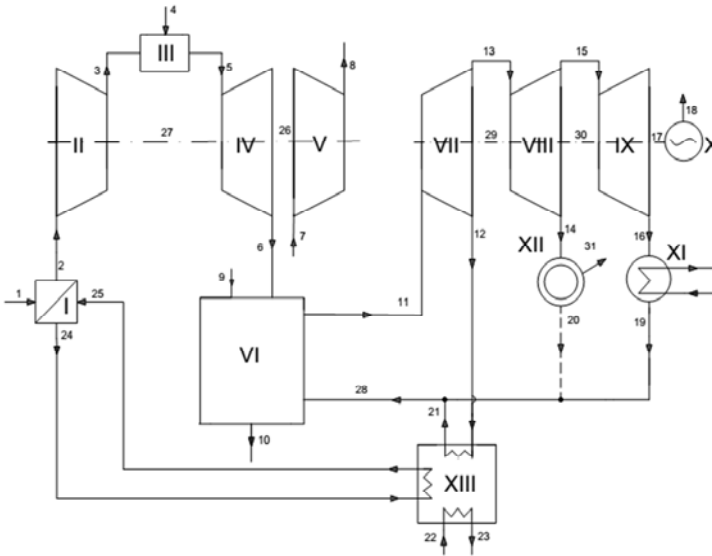
В результате уравнения регрессии в именованных величинах имеют следующий вид

$$N_{15} = 1,41 \cdot 10^3 + 4,92 t_{13} - 389 p_4 + 0,97 t_2 - 0,63 t_{13} p_4 - 0,186 p_4 t_2 + 36,3 p_4^2; \quad (2)$$

$$\eta_{\text{КЭТУ}} = 30,0 + 3,11 \cdot 10^{-3} t_{13} - 1,21 \cdot 10^{-1} p_4 + 3,23 \cdot 10^{-5} t_{13}^2 - 5,90 \cdot 10^{-2} p_4^2 + 1,69 \cdot 10^{-4} t_2^2. \quad (3)$$

Расхождение результатов расчета по математическим моделям и регрессионным зависимостям для электрической мощности ДГА и КПД КЭТУ во всей области исследования не превышает соответственно 2,7 % и 2,1 %.

Технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, теплофикационной паросиловой установки и АБХМ для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, представлена на рисунке 5. Для параметрической оптимизации предложенной технологической схемы энерготехнологической установки была также разработана математическая модель макроуровня.



I – теплообменный аппарат; II – компрессор; III – камера сгорания; IV – газовая турбина; V – нагнетатель; VI – котел-утилизатор; VII, VIII, IX – ступени паровой турбины; X – генератор; XI – конденсатор; XII – потребитель тепловой энергии; XIII – абсорбционная холодильная машина; 1, 2, 3 – воздух; 5, 6, 10 – продукты сгорания; 4, 7, 8, 9 – природный газ; 11, 12, 13, 14, 15, 16 – пар; 19, 20, 21, 28 – конденсат; 24, 25 – вода холодного контура АБХМ; 22, 23 – вода из контура обратного водоснабжения компрессорной станции; 17, 26, 27, 29, 30 – механическая энергия; 31 – тепловая энергия;

18 – электрическая энергия

Рисунок 5. – Технологическая схема комбинированной энерготехнологической установки с паросиловой установкой

В качестве критерия эффективности принимались коэффициент использования топлива b_T и удельная электрическая мощность e_{33} . В качестве управляемых переменных принимались: степень увеличения давления в компрессоре β_K , температура наружного воздуха T_1 , а также расход пара из паровой турбины на технологические нужды G_{14} . Диапазоны изменения управляемых параметров соответственно: $\beta_K = 8...17$, $T_1 = 15...35^\circ\text{C}$, $G_{14} = 0...10$ кг/с. Расчеты выполнялись для расхода транспортируемого газа G_7 , равного 1000 кг/с.

В исследуемой области изменения оптимизируемых параметров минимальное значение коэффициента использования топлива составило $b_T = 5,78$ кг/с при $\beta_K = 17$, $T_1 = 15^\circ\text{C}$. В исследуемой области изменения оптимизируемых параметров максимальная электрическая мощность равна 17,9 МВт при $T_1 = 15^\circ\text{C}$ и нулевом расходе пара на технологические нужды.

Сокращенная система балансовых уравнений математической модели имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 + G_4 - G_5 = 0; \\ G_1 = \alpha G_B^T G_4; \\ G_1 h_1 - G_1 h_2 + G_{24} h_{25} - G_{24} h_{25} = 0; \\ G_1 h_2 - G_1 h_3 + \eta_4 N_{27} = 0; \\ G_1 h_3 + \eta_3 G_4 h_4 - G_5 h_5 = 0; \\ G_5 h_5 - G_5 h_6 - \frac{1}{\eta_4} N_{26} - \frac{1}{\eta_4} N_{27} = 0; \\ G_7 h_7 - G_7 h_8 + \eta_4 N_{26} = 0; \\ G_5 h_6 - G_5 h_{10} + G_{11} h_{28} - G_{11} h_{11} = 0; \\ G_{11} h_{11} - G_{12} h_{12} - G_{13} h_{13} - \frac{1}{\eta_7} N_{29} = 0; \\ G_{13} h_{13} - G_{14} h_{14} - G_{15} h_{15} - \frac{1}{\eta_8} N_{30} = 0; \\ G_{15} h_{15} - G_{15} h_{16} - \frac{1}{\eta_9} N_{17} = 0; \\ N_{17} + N_{29} + N_{30} = \frac{1}{\eta_{10}} N_{18}; \\ G_{14} h_{14} - G_{14} h_{20} - N_{31} = 0; \\ G_{12} h_{12} - G_{12} h_{21} + G_{22} h_{22} - G_{22} h_{23} + G_{24} h_{24} - G_{24} h_{25} = 0; \\ G_{24} = K_1 G_{12}; \\ G_{22} = K_2 G_{12}; \\ G_{11} - G_{12} - G_{13} = 0; \\ G_{13} - G_{14} - G_{15} = 0; \\ G_{28} - G_{19} - G_{20} - G_{21} = 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

где G_1 – расход воздуха, кг/с;

G_4 – то же топливного природного газа, кг/с;

G_7, G_8 – то же транспортируемого природного газа, кг/с;

G_5, G_6, G_{10} – то же продуктов сгорания, кг/с;

$G_{19}, G_{20}, G_{21}, G_{22}, G_{24}$ – то же воды, кг/с;

$G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, G_{15}, G_{16}$ – то же воды, кг/с;

G_B^T – теоретический расход воздуха, кг/с;

α – коэффициент расхода воздуха;

h_1, h_2, h_3 – энтальпия воздуха, кДж/кг;

h_5, h_6, h_{10} – то же продуктов сгорания, кДж/кг;

h_4, h_7, h_8 – то же природного газа, кДж/кг;

$h_{19}, h_{20}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{24}, h_{28}$ – то же воды, кДж/кг;

$h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{14}, h_{15}, h_{16}$ – то же пара, кДж/кг;

η – коэффициент потерь в окружающую среду, отнесенный к i -му элементу;

$N_{17}, N_{18}, N_{26}, N_{27}, N_{29}, N_{30}$ – мощность, кВт.

Для получения регрессионной зависимости электрической мощности ПСУ и КПД КЭТУ от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя, степени сжатия в компрессоре двигателя и расхода пара на технологические нужды был использован численный эксперимент. В результате обработки полученных данных, с учетом исключения статистически незначимых коэффициентов зависимости и перехода к именованным величинам, уравнения имеют вид:

$$N_{18} = 5,03 \cdot 10^4 + 75t_2 - 3,29 \cdot 10^3 \beta_K - 369G_{14} - 0,75t_2 \beta_K + 0,37t_2^2 + 75\beta_K^2 + 1,69G_{14}^2; \quad (5)$$

$$\eta = 55 + 30,1 \cdot 10^{-3} t_2 - 1,81\beta_K - 0,20G_{14} + 3,22 \cdot 10^{-4} t_2^2 + 4,51 \cdot 10^{-2} \beta_K^2 + 3,13 \cdot 10^{-3} G_{14}^2. \quad (6)$$

Сравнение результатов расчета математической модели и полученных регрессионных зависимостей для электрической мощности ПСУ и КПД КЭТУ показало в исследованной области различие не более соответственно на 5,3 % и 4,7 %. Оценка адекватности регрессий (3–6) показала, что данные зависимости пригодны для использования с доверительной вероятностью не менее 95 %.

В пятой главе «Технико-экономическое обоснование технических решений создания энергоцентров мясоперерабатывающих предприятий на базе компрессорных станций магистральных газопроводов» исследована эффективность тепловых схем энергоцентров на базе ГПА КС магистральных газопроводов. Для оценки энергоэффективности работы предложенных энерготехнологических схем был использован эксергетический метод термодинамического анализа [8, 22]. По результатам анализа сделан вывод, что наиболее энергоэффективными являются КЭТУ с ПСУ и КЭТУ с ОРЦ. При режимах работы установок с максимально возможной генерируемой электрической мощностью эксергетический КПД для них составил соответственно 39,3 % и 35,4 %.

Применительно к КС с тремя ГПА единичной мощностью по 16 МВт выполнено технико-экономическое сравнение трех вариантов модернизации силового оборудования: КЭТУ с ПСУ; КЭТУ с ОРЦ; КЭТУ с ДГА [12]. Оценка экономической эффективности инвестиционных ресурсов была проведена в расчете как коммерческой эффективности, с точки зрения инвестора, так и системной государственной эффективности. Таким образом, при определении срока окупаемости учитывалась

расчетная годовая экономия топлива в результате реализации проекта за счет выработки электрической энергии на локальном энергоисточнике и сопутствующие затраты в энергосистеме. Чистый дисконтированный доход для продолжительности расчетного периода 25 лет (с учетом прогноза изменения тарифа на электрическую энергию на 1 % ежегодно) и срок окупаемости с учетом макроэффекта составили соответственно для КЭТУ с ПСУ, ОРЦ и ДГА: 33 млн дол. США и 4,4 года; 15,1 млн дол. США и 6,2 года; 1,73 млн дол. США и 6,6 года. Экономически наиболее выгодным является вариант с ПСУ, который по своим показателям превосходит два других. Это объясняется, в первую очередь, превосходством варианта по значению установленной электрической мощности.

Для энергоцентра на базе КС магистрального газопровода в составе КЭТУ с ПСУ и дополнительного энергоисточника на местных видах топлива проведен технико-экономический оптимизационный расчет методом базовой точки в обобщенных переменных [12, 24], который позволяет сформулировать методически выверенные рекомендации по схемному решению и установленной мощности КЭТУ с точки зрения минимизации суммарных приведенных затрат для энергоцентра. При базовом варианте установленная электрическая мощность КЭТУ принята 7 МВт. Функция приведенных затрат определялась тремя группами величин: свободными параметрами, которыми можно варьировать в процессе оптимизации системы; термодинамическими и техническими показателями, характеризующими систему; исходными стоимостными показателями, которые являются конъюнктурными и определяются как базовыми экономическими закономерностями, так и ситуационными экономическими факторами.

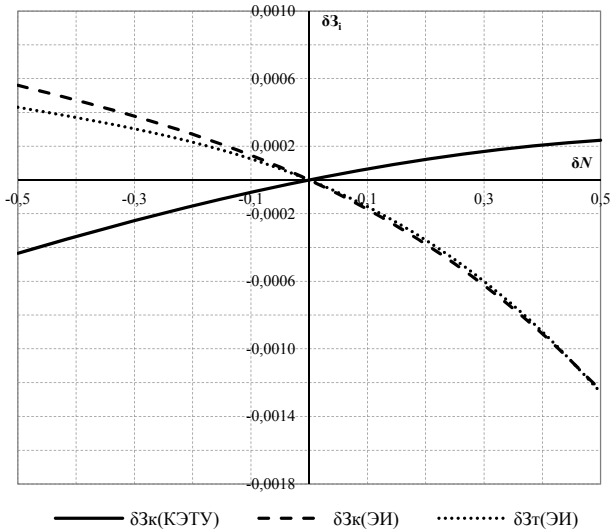


Рисунок 6. – Изменение относительных приведенных затрат от относительной мощности δN

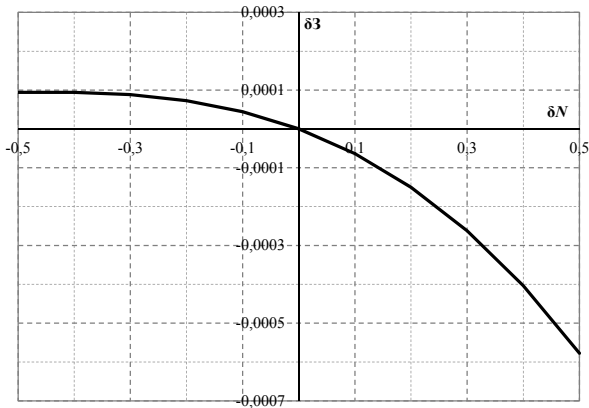


Рисунок 7. – Изменение относительных суммарных затрат от относительной мощности δN

При изменении относительной мощности в пределах единицы ($-0,5 \dots 0,5$) относительные приведенные капитальные затраты для КЭТУ увеличиваются с $-4,34 \cdot 10^{-4}$ до $2,36 \cdot 10^{-4}$, при этом капитальные и топливные приведенные затраты для дополнительного энергоисточника соответственно снижаются с $5,61 \cdot 10^{-4}$ и $4,31 \cdot 10^{-4}$ до $-12,6 \cdot 10^{-4}$ (рисунок 6). Суммарные приведенные затраты существенно снижаются при увеличении установленной мощности КЭТУ по сравнению с базовым вариантом и достигают своего минимального значения при $\delta N = 0,5$. В диапазоне мощностей $(0,5-0,7)N_B$ приведенные затраты практически неизменны, что объясняется большими удельными затратами на КЭТУ (рисунок 7).

Технико-экономический оптимизационный расчет методом базовой точки в обобщенных переменных позволил определить значение приведенных затрат для энергоцентра в зависимости от установленной мощности КЭТУ, имея в расположении преискуранные данные на технические устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. По результатам анализа проблематики эффективного энергоснабжения предприятий мясоперерабатывающей АПК получен вывод, что к решению проблемы следует подходить с позиции достижения синергетического результата посредством интегрирования энерготехнологических систем объектов, независимо от их профиля деятельности. Так, повышение эффективности энергоснабжения мясоперерабатывающего предприятия может быть достигнуто посредством сопряжения с другими объектами промышленного и топливно-энергетического комплекса, располагающими существенным объемом ВЭР. В качестве источника значительного объема ВЭР рассмотрены КС магистральных газопроводов с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами.

2. Разработана методика определения прогнозных объемов энергопотребления предприятия мясоперерабатывающей отрасли АПК с использованием имитационного моделирования на нейросетевых моделях. Исходными данными для решения поставленной задачи являются: схема энергопотребления (структура) предприятия с энергетическими и материальными потоками, расчетно-статистическая и аналитическая информация по удельным величинам энергопотребления технологических линий, технические характеристики применяемого технологического оборудования, номенклатурный перечень выпускаемой мясоперерабатывающим предприятием продукции, значения условно-постоянных составляющих энергозатрат на всех уровнях производства. Результатом являются прогнозные показатели удельных норм потребления ТЭР и объемы потребления на прогнозируемый период времени работы предприятия [3, 10, 18].

3. Определены фактические энергетические ресурсы энергоисточника (КС магистрального газопровода) и зависимость потребляемой мощности КС от производительности газопровода. Получены коэффициенты влияния изменения сопротивления выпускного тракта на эффективную мощность и эффективный КПД, что позволяет с достаточной точностью оценить влияние аэродинамического сопротивления утилизационных теплообменных аппаратов на параметры работы при различных температурах продуктов сгорания перед турбиной и степенях сжатия воздуха в компрессоре [2, 4, 5, 20].

4. Исследована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, ДГА и АБХМ. Анализ результатов параметрической оптимизации (расход транспортируемого газа 1000 кг/с) показал, что в исследуемой области минимальный расход топливного газа равен 4,69 кг/с при температуре продуктов сгорания перед турбиной и воздуха перед компрессором соответственно 1150 °С и 15 °С. При этом электрическая мощность, дополнительно вырабатываемая ДГА, составила 1157 кВт [2, 6, 14, 16].

5. Математическая модель КЭТУ в составе ГПА, ДГА и АБХМ была аппроксимирована методом численного эксперимента с получением регрессионных зависимостей для электрической мощности и КПД КЭТУ от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя (диапазон варьирования фактора 1,5...28,5 °С), давления топливного газа после детандера (диапазон варьирования фактора 2,16...3,84 МПа) и температуры топливного газа перед детандером (диапазон варьирования фактора 146 ... 214 °С) [11, 13, 23].

6. Исследована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, ПСУ и АБХМ. По результатам параметрической оптимизации (расход транспортируемого газа 1000 кг/с) получен вывод, что в исследуемой области изменения оптимизируемых параметров минимальное значение коэффициента использования топлива составило $b_T = 5,78$ кг/с при степени сжатия в воздушном компрессоре, равной 17, и температуре воздуха, подаваемого в компрессор, 15 °С. Максимальная электрическая мощность (при нулевом расходе пара на технологические нужды) равна 17,9 МВт. При дожигании топлива в среде уходящих газов на входе в котел-утилизатор (температура продуктов сгорания после дожигания 570 °С) и аналогичных значениях переменных величин электрическая мощность составляет 24,7 МВт. При этом дополнительный расход топлива равен 0,31 кг/с, что составляет 5,3 % от расхода топливного газа [2, 7, 9].

7. Математическая модель КЭТУ в составе ГПА, ПСУ и АБХМ была аппроксимирована методом численного эксперимента с получением регрессионных зависимостей для электрической мощности и КПД КЭТУ от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя (диапазон варьирования фактора 1,5...28,5 °С), степени сжатия воздуха в компрессоре (диапазон варьирования фактора 13,3...16,7) и расхода пара на технологические нужды (диапазон варьирования фактора 2,6...9,4 кг/с) [11, 13, 23].

8. Исследована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, одноступенчатой ОРЦ и АБХМ. Применительно к ГПА-16 «Урал» с приводным ГТУ ДГ90 предложенная КЭТУ позволяет сгенерировать 2 МВт электрической энергии. В холодное время года, когда не требуется охлаждение воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, высвобождается дополнительно 17,9 МВт тепловой энергии. Применение АБХМ для охлаждения воздуха перед компрессором в период стояния температур выше 15 °С позволило снизить расход топливного газа на 194,6 тыс. кг в год [2, 8, 21].

9. Экспериментальным методом был выполнен анализ энергоэффективности трех технологических схем КЭТУ. Экспериментальный КПД для КЭТУ с ПСУ составил 39,3 %, для КЭТУ с ОРЦ – 35,4 %, для КЭТУ с ДГА – 32,1 % [8].

10. Проведена оценка экономической эффективности инвестиционных ресурсов для трех типов КЭТУ в расчете коммерческой эффективности, с точки зрения инвестора, и системной государственной эффективности с учетом макроэкономического эффекта в масштабах республики. Для энергоцентра на базе КС магистрального газопровода в составе КЭТУ и дополнительного энергоисточника на местных видах топлива проведен технико-экономический оптимизационный расчет методом базовой точки в обобщенных переменных, который позволил сформулировать методически выверенные рекомендации по схемному решению и установленной мощности КЭТУ с точки зрения минимизации суммарных приведенных затрат для энергоцентра [12, 24].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследования рекомендованы при реализации проектов энергообеспечения объектов мясоперерабатывающей отрасли АПК. Применение предложенных КЭТУ на базе КС магистрального газопровода позволяет сгенерировать до 66500 МВт·ч электрической энергии в год, что достаточно для энергоснабжения вертикально-интегрированного предприятия мясоперерабатывающей отрасли, располагаемая мощность которого составит 43300 т в год. При реализации проекта создания энергоцентра чистый дисконтированный доход для продолжительности расчетного периода 25 лет составит соответственно для КЭТУ с ПСУ, ОРЦ и ДГА: 33 млн дол. США; 15,1 млн дол. США; 1,73 млн дол. США.

Результаты исследований рекомендованы для разработки проектно-сметной документации строительства и реконструкции объектов системы газоснабжения, на основании чего расширяется перечень технических предложений с возможностью проектирования на объектах газотранспортной системы энергоэффективных комбинированных установок (справка о возможном практическом использовании результатов диссертационного исследования б/н от 27.06.2017 г).

Полученные результаты исследования составляют теоретическую основу для практических рекомендаций при внедрении энергосберегающих технологий на КС

магистральных газопроводов, содействуя развитию электроэнергетического направления деятельности и обеспечению надежной и энергоэффективной работы объектов газотранспортной системы (справка о возможном практическом использовании результатов диссертационного исследования б/н от 06.09.2017 г).

Методика синтеза и параметрической оптимизации КЭТУ на базе КС магистральных газопроводов и методика моделирования теплотехнических систем на метауровне с использованием нейросетевых моделей для прогнозирования объемов энергопотребления предприятия применяется в учебном процессе Белорусского национального технического университета в рамках дисциплины «Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами» для специальности 1-43 01 05 – Промышленная теплоэнергетика (акт внедрения результатов законченных научно-методических и научно-исследовательских работ в учебный процесс № 47 от 28.11.2017 г).

Методика синтеза и параметрической оптимизации КЭТУ на базе КС магистральных газопроводов применяется в учебном процессе ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ» в рамках дисциплины «Теплогенерирующие установки и теплоснабжение» по специальности 1-43 01 72 – Техническая эксплуатация объектов газораспределительной системы и газопотребления (акт внедрения результатов законченных научно-методических и научно-исследовательских работ в учебный процесс № 1-2017 от 17.11.2017 г).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Республики Беларусь и зарубежных научных изданиях

1. Несенчук, А. П. Эффективность использования топлива в идеальном цикле ГТУ с изобарным подводом теплоты / А. П. Несенчук, А. А. Абразовский, А. Б. Бегляк, Т. В. Рыжова, Д. И. Шкловчик, В. В. Бегляк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 2. – С. 43–48.

2. Несенчук, А. П. Влияние теплоутилизационного «хвоста» компрессорной станции на эффективность работы газотурбинного привода с изобарным подводом теплоты и регенеративным теплоиспользованием / А. П. Несенчук, В. Н. Романюк, А. А. Абразовский, А. Б. Бегляк, Т. В. Рыжова, В. В. Бегляк, Р.О. Кузьмин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 4. – С.37–46.

3. Несенчук, А. П. Энергоснабжение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счет утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А. П. Несенчук, А. А. Абразовский, Т. В. Рыжова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 6. – С.32–36.

4. Абразовский, А. А. Влияние технологических параметров магистрального газопровода на показатели работы компрессорной станции / А. А. Абразовский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 3. – С. 27–32.

5. Абразовский, А. А. Влияние утилизационной нагрузки привода компрессорной станции на параметры работы ГТУ / А. А. Абразовский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 4. – С.24–29.

6. Седнин, В. А. Повышение эффективности газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 6. – С.14–16.

7. Седнин, В. А. Применение паросиловой установки для повышения энергоэффективности работы газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 2. – С. 16–19.

8. Седнин, В. А. Анализ эффективности энерготехнологических установок на базе газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 5. – С. 12–17.

9. Седнин, В. А. Параметрическая оптимизация газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В. А. Седнин, А. В. Седнин, А. А. Абразовский // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск: Из-во НГТУ, 2016. – Вып. 26. – С. 136–144.

10. Седнин, В. А. Прогнозирование объемов энергопотребления предприятия агропромышленного комплекса / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергия и Менеджмент. – 2017. – № 2. – С.12–18.

11. Седнин, В. А. Аппроксимация математических моделей комбинированных энерготехнологических установок / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергия и Менеджмент. – 2017. – № 3. – С. 16–20.

12. Седнин, В. А. Технико-экономическое сопоставление технических решений для энергоцентров на базе компрессорных станций магистральных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергия и Менеджмент. – 2017. – №4. – С. 2–7.

13. Седнин, В. А. Анализ и параметрическая оптимизация энерготехнологических установок на базе силового оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Вып. 60, № 6. – С. 571–583.

Другие научные статьи по теме диссертации

14. Абразовский, А. А. Детандер-генераторные установки: «бестопливная» энергия / А. А. Абразовский // Промышленная безопасность. – 2010. – № 8. – С. 15–16.

15. Седнин, В. А. Использование вторичных энергетических ресурсов компрессорных станций магистрального газопровода для энергообеспечения предприятий агропромышленного комплекса / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Вопросы энергетики. – 2016. – № 1. – С. 12–17.

Тезисы докладов научных конференций

16. Абразовский, А. А. Перспективы использования детандер-генераторных установок в энергосистеме Беларуси / А. А. Абразовский // Менеджмент качества и инновации в образовании и производстве : материалы науч.-практ. конф., Гродно, 29–30 сент. 2010 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2010. – С. 93–94.

17. Абразовский, А. А. Использование газоздушных смесей СУГ в качестве резервного топлива / А. А. Абразовский // Инновации и энергоэффективность в топливно-энергетическом комплексе : материалы VI науч.-практ. конф., Витебск, 27–28 сент. 2012 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2012. – С. 21–23.

18. Абразовский, А. А. Энергосбережение предприятия мясоперерабатывающей отрасли за счет утилизационной теплоты ВЭР компрессорной станции магистрального газопровода / А. А. Абразовский // Инновации, энергоэффективность, образование – залог бережливости : материалы VII науч.-практ. конф., Гродно, 17–19 окт. 2013 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 17–19.

19. Абразовский, А. А. Влияние сопротивления выпускного тракта ГТУ на эффективную мощность и эффективный КПД установки / А.А. Абразовский // Энергосберегающие и инновационные технологии в ТЭК : материалы VIII науч.-практ. конф., Минск, 14–16 окт. 2014 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 10–12.

20. Абразовский, А. А. Применение утилизационной паросиловой надстройки ГТУ с низкотемпературным парогенератором и органическим рабочим веществом / А. А. Абразовский // Энергосберегающие и инновационные технологии в ТЭК : материалы VIII науч.-практ. конф., Минск, 14–16 окт. 2014 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 12–15.

21. Седнин, В. А. Эффективность комбинированных энерготехнологических установок на базе газоперекачивающего агрегата / В. А. Седнин, А. В. Седнин, А. А. Абразовский // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: материалы XII междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 1–3 нояб. 2016 г. / Саратовский научный центр РАН ; редкол. : Р. З. Аминов [и др.]. – Саратов, 2016. – С. 264–268.

22. Абразовский, А. А. Применение комбинированной энерготехнологической установки для увеличения энергоэффективности работы газоперекачивающего агрегата / А. А. Абразовский // Инновации. Образование. Энергоэффективность : материалы X науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 нояб. 2016 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2016. – С. 5–7.

23. Абразовский, А. А. Получение регрессионных зависимостей посредством аппроксимации математических моделей энерготехнологических установок / А. А. Абразовский // Инновации. Образование. Энергоэффективность: материалы XI науч.-практ. конф., Барановичи 20–21 нояб. 2017 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол. : А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2017. – С. 5–7.

24. Абразовский, А. А. Технико-экономический оптимизационный расчет энергоцентра на базе компрессорных станций магистральных газопроводов / А. А. Абразовский // Инновации. Образование. Энергоэффективность: материалы XI науч.-практ. конф., Барановичи, 20–21 нояб. 2017 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол.: А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2017. – С. 7–8.

РЭЗІЮМЭ

Абразоўскі Аляксей Анатольевіч

**Навуковае абгрунтаванне тэхнічных рашэнняў «бязпаліўнага»
энергазабеспячэння мясаперапрацоўчых прадпрыемстваў утылізацыяй
другасных энергетычных рэсурсаў кампрэсарных станцый магістральных
газаправодаў**

Ключавыя словы: цеплаэнергетычная сістэма, тэрмадынамічны аналіз, камбінаваная энергатэхналагічная ўстаноўка, матэматычнае мадэляванне, нейрасеткавая мадэль, структурная і параметрычная аптымізацыя, рэгрэсійная залежнасць.

Мэта працы: распрацоўка і навуковае абгрунтаванне арганізацыйна-метадычных і тэхнічных рашэнняў стварэння энергацэнтраў вертыкальна-інтэграваных прадпрыемстваў АПК на базе другасных энергарэсурсаў кампрэсарных станцый магістральных газоправодаў.

Метады даследавання: тэрмадынамічны аналіз тэхнічных сістэм; матэматычнае мадэляванне і аптымізацыя энергатэхналагічных сістэм; імітацыйнае мадэляванне на нейрасеткавых мадэлях; колькасны эксперымент з ужываннем матэматычнага апарата рэгрэсійнага аналізу тэорыі планавання эксперыменту; метады базавай кропкі ў абагульненых зменных.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана метадыка вызначэння прагнозных аб'ёмаў энергаспажывання мясаперапрацоўчых прадпрыемстваў АПК. Вызначана фактычная залежнасць спажыванай магутнасці КС ад прадукцыйнасці магістральнага газоправода. Сінтэзаваны і аптымізаваны рэгенерацыйна-утылізацыйныя схемы камбінаваных энергатэхналагічных устаноў на базе КС магістральных газоправодаў. Атрыманы рэгрэсійныя залежнасці для электрычнай магутнасці і ККД сінтэзаваных КЭТУ. Для энергацэнтра на базе КС магістральнага газоправода ў складзе КЭТУ і дадатковай энергакрыніцы на мясцовых відах паліва прыведзены тэхніка-эканамічны аптымізацыйныя разлікі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі практычных рэкамендацый пры рэалізацыі праектаў энергазабеспячэння прадпрыемства АПК, а таксама пры ўкараненні энергазберагальных тэхналогій на КС магістральных газоправодаў.

Галіна ужывання: мясаперапрацоўчая галіна АПК, газатранспартная сістэма.

РЕЗЮМЕ

Абразовский Алексей Анатольевич

**Научное обоснование технических решений
«бестопливного» энергообеспечения мясоперерабатывающих предприятий
утилизацией вторичных энергетических ресурсов компрессорных станций
магистральных газопроводов**

Ключевые слова: теплоэнергетическая система, термодинамический анализ, комбинированная энерготехнологическая установка, математическое моделирование, нейросетевая модель, структурная и параметрическая оптимизация, регрессионная зависимость.

Цель работы: разработка и научное обоснование организационно-методических и технических решений создания энергоцентров вертикально-интегрированных предприятий АПК на базе вторичных энергоресурсов компрессорных станций магистральных газопроводов.

Методы исследования: термодинамический анализ технических систем; математическое моделирование и оптимизация энерготехнологических систем; имитационное моделирование на нейросетевых моделях; численный эксперимент с применением математического аппарата регрессионного анализа теории планирования эксперимента; метод базовой точки в обобщенных переменных.

Полученные результаты и их новизна: разработана методика определения прогнозных объемов энергопотребления мясоперерабатывающих предприятия АПК. Определена фактическая зависимость потребляемой мощности КС от производительности магистрального газопровода. Синтезированы и оптимизированы регенерационно-утилизационные схемы комбинированных энерготехнологических установок на базе КС магистральных газопроводов. Получены регрессионные зависимости для электрической мощности и КПД синтезированных КЭТУ. Для энергоцентра на базе КС магистрального газопровода в составе КЭТУ и дополнительного энергоисточника на местных видах топлива проведен технико-экономический оптимизационный расчет.

Рекомендации по использованию: результаты исследования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций при реализации проектов энергообеспечения мясоперерабатывающих предприятий АПК, а также при внедрении энергосберегающих технологий на КС магистральных газопроводов.

Область применения: мясоперерабатывающая отрасль, газотранспортная система.

SUMMARY

Abrazouski Aliaksei Anatolievich

**Scientific substantiation of technical solutions
«fuel-free» energy supply of meat-processing organizations by utilization of
secondary energy resources of compressor stations of main gas pipelines**

Key words: thermal power system, thermodynamic analysis, combined power installation, mathematical modeling, neural network model, structural and parametric optimization, regression dependence.

Research objective: is the development and scientific substantiation of organizational-methodological and technical solutions to create energy centers of vertically integrated agricultural enterprises on the basis of secondary energy resources of compressor stations of main gas pipelines.

Methods: thermodynamic analysis of technical systems; mathematical modeling and optimization of energy technology systems; simulation of neural network models; numerical experiment, using the mathematical apparatus of the regression analysis of theory of planning of experiment; method of a base point in generalized variables.

Research finding and their novelty: the methodology of determining the forecast of energy consumption in meat-processing organizations. Determine the actual dependency of the power consumption of the compressor station from the loading of the main gas pipeline. Synthesized and optimized regeneration-recycling scheme combined energy-technology units on the basis of compressor stations of main gas pipelines. The obtained regression curves for electric power and efficiency of the synthesized plants. For the energy center based on compressor station of main gas pipeline in the composition of the combined plant and additional power sources on local kinds of fuel is conducted technoeconomic optimization calculation.

Recommendations for use: the results of the study can be used to develop practical recommendations when implementing projects of energy supply of agricultural enterprises and the introduction of energy saving technologies at compressor stations of main gas pipelines.

Area of use: meat processing industry, gas-transport system.

Научное издание

АБРАЗОВСКИЙ
Алексей Анатольевич

**ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ
МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
УТИЛИЗАЦИЕЙ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 01.03.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 80. Заказ 201.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.