

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 658.26:620.98

**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 2020

Научная работа выполнена в УО «Белорусский национальный технический университет»

Научные  
руководители:

**НЕСЕНЧУК Анатолий Петрович,**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета;

**СЕДНИН Владимир Александрович,**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета

Официальные  
оппоненты:

**АКЕЛЬЕВ Валерий Дмитриевич,**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета;

**ГАРКУША Карина Эдуардовна,**

кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки и профессиональной ориентации молодежи Белорусского государственного аграрного технического университета

Оппонирующая  
организация

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Институт энергетики НАН Беларуси»

Защита состоится 12 марта 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций 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 национального технического университета.

Автореферат разослан \_\_ февраля 2020 г.

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

А. А. Бобич

## **ВВЕДЕНИЕ**

Агропромышленный комплекс (АПК) Республики Беларусь является одним из важнейших секторов экономики страны, обеспечивающим продовольственную безопасность и составляющий более 15% в структуре экспорта республики. В мировой практике одним из основных показателей конкурентоспособности производства является его удельная энергоемкость, которая для АПК составляет 11,5 %, тем самым значительно превышая соответствующие значения для большинства развитых стран мира. АПК потребляет около 2,2 млрд кВт·ч электроэнергии, 3,4 млн Гкал тепловой энергии в год. В то же время системы энергообеспечения объектов АПК на базе местных энергоресурсов могут обеспечить не более 25 % приходной части энергобаланса организации, что требует новых решений для вовлечения дополнительных энергетических ресурсов.

Одними из наиболее энергоемких объектов агропромышленного производства являются мясоперерабатывающие предприятия. Внедряемые в отрасли энергосберегающие мероприятия предполагают повышение эффективности теплотехнологических 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 теплотехнологических систем предприятий. Применительно к теплотехнологическим системам промышленных предприятий целесообразно применение концепции интенсивного энергосбережения, которая может быть реализована путем создания интеграционных энерготехнологических систем и комплексов на базе организаций различного профиля деятельности.

Тем самым задача повышения энергоэффективности мясоперерабатывающих предприятий является актуальной, а ее решение находится в плоскости энергетического сопряжения предприятий с другими объектами промышленного и топливно-энергетического комплекса, обладающими существенным объемом вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и расположенными в непосредственной близости от них.

## **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 методических и технических решений энергообеспечения мясоперерабатывающих предприятий АПК утилизацией ВЭР компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов.

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

- выполнен анализ энергоэффективности мясоперерабатывающих предприятий АПК и КС магистральных газопроводов;
- исследованы характеристики силового оборудования КС магистральных газопроводов как источника ВЭР;
- синтезированы и оптимизированы энерготехнологические схемы на базе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) КС магистральных газопроводов;
- выполнена структурная оптимизация теплотехнологической системы мясоперерабатывающего предприятия по прогнозным объемам энергопотребления;
- исследована технико-экономическая эффективность интеграционных энергетических комплексов на базе ГПА КС магистральных газопроводов.

Объект исследований – энергетические интеграционные комплексы в составе мясоперерабатывающих предприятий и КС магистральных газопроводов.

Предмет исследований – структура и состав оборудования, энергетическая и экономическая эффективность энергетических интеграционных комплексов в составе мясоперерабатывающих предприятий и КС магистральных газопроводов.

### **Научная новизна**

Впервые разработаны и научно обоснованы методические и технические решения построения энергетического интеграционного комплекса в составе мясоперерабатывающего предприятия и КС магистрального газопровода, которые позволяют по известным эксплуатационным характеристикам КС определять рациональный потенциал энергосбережения и синтезировать оптимальные структуры комплекса с рациональной производительностью мясоперерабатывающего предприятия, обеспечиваемой этим потенциалом.

Синтезированы и оптимизированы новые схемы комбинированных энерготехнологических установок (КЭТУ) на базе КС магистральных газопроводов, отличающиеся совмещением принципов внутреннего (регенеративного) и внешнего (утилизационного) энергоиспользования и позволяющие без снижения производительности и энергоэффективности работы ГПА максимально использовать потенциал ВЭР КС для генерирования электрической энергии.

Разработана математическая модель КЭТУ с детандер-генераторным агрегатом (ДГА) и получены новые регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности КЭТУ от температуры воздуха, подаваемого в компрессор двигателя,

давления топливного газа после детандера, температуры топливного газа перед детандером.

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

Разработана нейросетевая имитационная модель для прогнозирования объемов энергопотребления, удельных норм энергоресурсов и производительности мясоперерабатывающего предприятия по статистическим данным, отражающая взаимосвязи между видами и объемами продукции, количеством потребляемых энергоресурсов для различных промышленных теплотехнологий переработки мясных продуктов.

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

**Положения, выносимые на защиту:**

- принципиальные схемы и математические модели КЭТУ на базе КС магистральных газопроводов, основанные на регенеративно-утилизационных принципах энергоиспользования;

- регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности КЭТУ с ДГА 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);

- регрессионные зависимости для КПД и электрической мощности КЭТУ с ПСУ 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);

- нейросетевая имитационная модель для определения и прогнозирования объемов энергопотребления, удельных норм энергоресурсов и производительности мясоперерабатывающего предприятия по статистическим данным, отражающая взаимосвязи между видами и объемами продукции, количеством потребляемых энергоресурсов для различных промышленных теплотехнологий переработки мясных продуктов;

- результаты структурной оптимизации теплотехнологической схемы мясоперерабатывающего предприятия с переходом на электротеплотехнологии, позволяющей снизить энергопотребление на 19% с увеличением доли потребления электроэнергии в балансе предприятия на 56%;

- методика технико-экономического обоснования выбора установленной мощности энергоцентра, отличающаяся применением метода базовой точки в обобщенных переменных и позволяющая, располагая прејскурантными 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; структурной и параметрической оптимизации синтезированных энерготехнологических схем на базе ГПА КС магистрального газопровода; структурной оптимизации теплотехнологических систем мясоперерабатывающих предприятий; разработке имитационной модели для определения прогнозных объемов энергопотребления на нейронных сетях; 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 31 работе: 16 статьях в научных изданиях, входящих в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований (перечень ВАК Республики Беларусь), и зарубежных научных изданиях; 11 публикациях в тематических сборниках, трудах, материалах научных конференций; четырех статьях в научно-технических журналах. Общий объем опубликованных материалов в научных журналах – 5,8 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 ис-

следования и последовательном их решении для достижения цели, содержащейся в названии диссертационной работы.

Полный объем диссертации – 160 страниц. Всего иллюстраций – 59; таблиц – 30. Объем приложения – 18 страниц. Список использованных источников включает 172 наименования, из которых 31 – авторские работы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе **«Анализ энергоэффективности мясоперерабатывающих предприятий и компрессорных станций магистральных газопроводов»** рассмотрена тенденция развития АПК Республики Беларусь, трендом которой является создание высокоэффективных интеграционных структур корпоративного типа по технологическим продуктовым цепочкам от производства исходного сырья до сбыта готовой продукции. Показано, что одними из наиболее энергоемких объектов агропромышленного производства являются мясоперерабатывающие предприятия, к рассмотрению проблем энергоснабжения которых следует подходить с позиции достижения синергетического результата посредством интегрирования энерготехнологических систем различных объектов независимо от их профиля деятельности. Актуальным является рассмотрение задачи сопряжения мясоперерабатывающих предприятий АПК с системой газоснабжения Республики Беларусь. Рассматривая систему газоснабжения, в первую очередь, следует обратить внимание на КС магистральных газопроводов как источников значительного объема ВЭР. Для решения указанной задачи наибольший практический интерес представляют тепловые ВЭР ГПА КС магистральных газопроводов, которые могут быть использованы для выработки тепловой и электрической энергии. Существующие и потенциальные варианты генерирования электрической энергии на базе ГПА можно классифицировать по принципиальным схемам и применяемому типу оборудования на ПСУ, ОРЦ, ДГА и ГТУ с измененной последовательностью процессов [2, 3, 23].

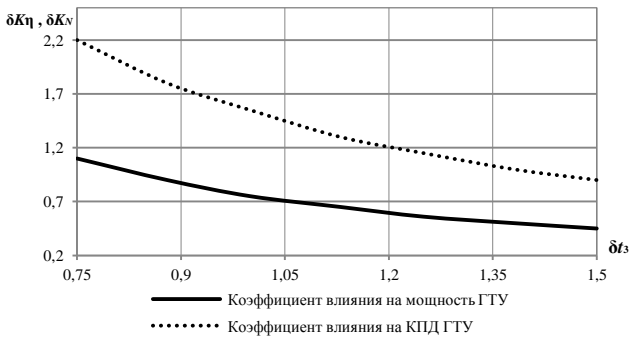
Исходя из изложенного, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе **«Исследование характеристик силового оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов как источника вторичных энергетических ресурсов»** 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 потребляе-

мой 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 % [4].

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 установки, 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. Изменения коэффициентов влияния на эффективную мощность и эффективный КПД установки, обусловленные изменением температуры продуктов сгорания перед турбиной, отображены на рисунке 1 [5, 24].

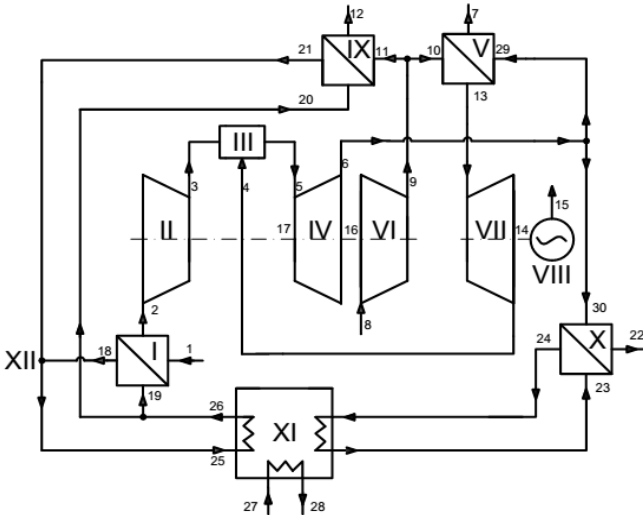


**Рисунок 1. – Коэффициенты влияния сопротивления выпускного тракта на эффективную мощность и КПД ГТУ от температуры продуктов сгорания перед турбиной**

В третьей главе «Синтез и оптимизация энерготехнологических схем на базе газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов» разработаны три вида комбинированных энерготехнологических установок на базе КС магистральных газопроводов: с ДГА; с ПСУ с водой в качестве рабочего тела; с ПСУ с органическим рабочим телом (ОРЦ). Осуществлена их параметрическая оптимизация, получены полиномиальные регрессионные зависимости [6–9, 11, 13, 15, 19, 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 ГПА, 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 2 [6].



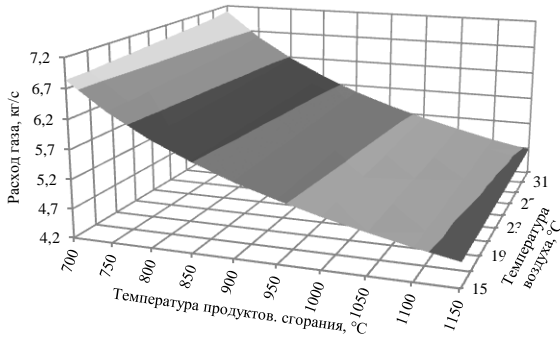
**I, V, IX, X – теплообменные аппараты; II – компрессор; III – камера сгорания;  
IV – газовая турбина; VI – нагнетатель; VII – детандер; VIII – генератор;  
XI – абсорбционная холодильная машина; 1, 2, 3 – воздух; 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 –  
природный газ; 5, 6, 7, 22, 29, 30 – продукты сгорания; 14, 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 2. – Технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, ДГА и АБХМ**

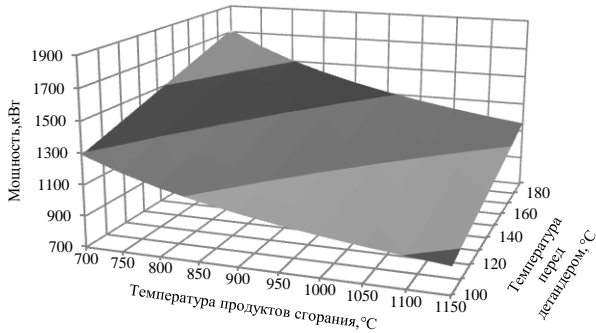
Для параметрической оптимизации была разработана математическая модель макроуровня [6]. При составлении системы балансовых уравнений принято, что транспортные элементы (связи) идеальные, т.е. в них отсутствуют энергетические и материальные потери. В технологических элементах материальные потери (утечки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

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:  $t_5 = 700...1150$  °С,  $t_{13} = 100...190$  °С,

$t_2 = 15...35$  °С. Основные результаты расчетов при расходе транспортируемого природного газа 1000 кг/с приведены на рисунках 3, 4.



**Рисунок 3. – Расход топливного газа в зависимости от температуры продуктов сгорания перед турбиной и температуры наружного воздуха**



**Рисунок 4. – Удельная электрическая мощность в зависимости от температуры продуктов сгорания перед турбиной и температуры топливного газа перед детандером**

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, 28] 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 обработки полученных данных, с учетом исключения статистически незначимых коэффициентов зависимости и перехода к именованным величинам, уравнения имеют вид:

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

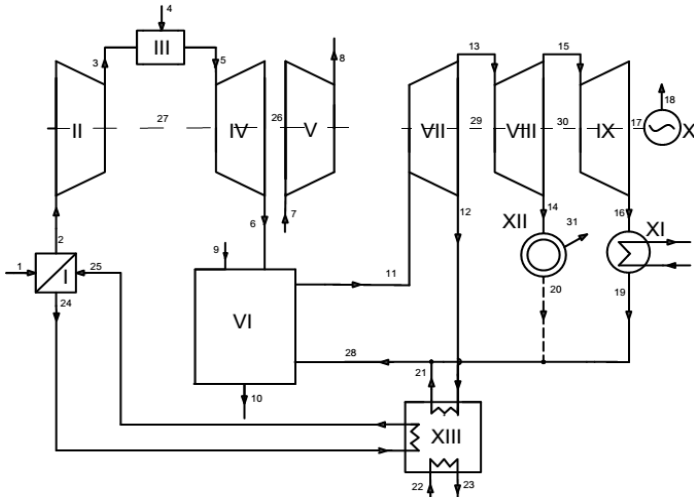
$$\eta_{\text{КЭТУ}} = 30,0 + 3,11 \cdot 10^{-3} t_{13} - 1,21 \cdot 10^{-1} p_4 + 3,23 \cdot 10^{-5} t_{13}^2 - 5,90 \cdot 10^{-2} p_4^2 + 1,69 \cdot 10^{-4} t_2^2. \quad (2)$$

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 (ТПСУ) 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.

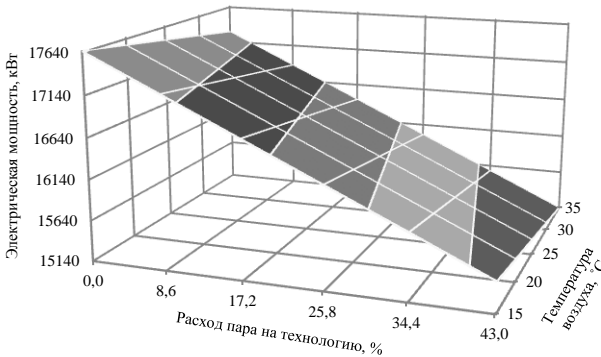
В качестве критерия эффективности принимались коэффициент использования топлива  $b_T$  и удельная электрическая мощность  $e_{33}$ . В качестве управляемых переменных принимались: степень увеличения давления в компрессоре  $\beta_K$ , температура наружного воздуха  $T_1$ , а также расход пара из паровой турбины на технологические нужды  $G_{14}$ . Диапазоны изменения управляемых параметров соответственно:  $\beta_K = 8 \dots 17$ ,  $T_1 = 15 \dots 35^\circ\text{C}$ ,  $G_{14} = 0 \dots 10$  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. Основные результаты расчетов при расходе транспортируемого природного газа 1000 кг/с приведены на рисунках 6, 7.

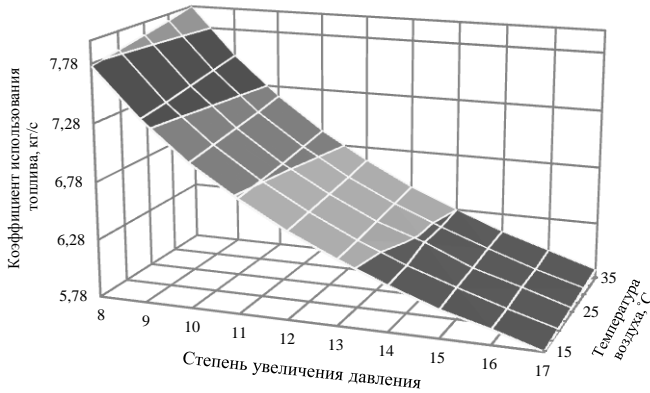


**I** – теплообменный аппарат; **II** – компрессор; **III** – камера сгорания; **IV** – газовая турбина; **V** – нагреватель; **VI** – котел-утилизатор; **VII, VIII, IX** – ступени паровой турбины; **X** – генератор; **XI** – конденсатор; **XII** – потребитель тепловой энергии; **XIII** – абсорбционная холодильная машина; 1, 2, 3 – воздух; 4, 5, 6, 10 – продукты сгорания; 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 КЭТУ в составе ГПА, ТПСУ и АБХМ



**Рисунок 6.** – Электрическая мощность КЭТУ с ТПСУ в зависимости от расхода пара технологического отбора (относительно расхода пара, генерируемого в КУ) и температуры наружного воздуха



**Рисунок 7. – Коэффициент использования топлива в зависимости от степени увеличения давления в компрессоре и температуры наружного воздуха**

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:

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

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

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 показала, что данные зависимости пригодны для использования с доверительной вероятностью не менее 95 %.

Синтезирована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, одноступенчатой ОРЦ и АБХМ для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ. Применительно к ГПА-16 «Урал» с приводным ГТУ ДГ90 предложенная КЭТУ позволяет сгенерировать мощность равную 2 МВт электрической энергии. В холодное время года, когда не требуется охлаждение воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, выско-

бюджетается дополнительно 17,9 МВт тепловой энергии, а экономия топливного газа, обусловленная охлаждением воздуха перед компрессором двигателя в период стояния температур выше 15 °С, составит 194,6 тыс. кг в год [8, 25].

В четвертой главе «**Структурная оптимизация теплотехнологической системы мясоперерабатывающего предприятия по прогнозным объемам энергопотребления**» разработана и апробирована имитационная модель на основе нейронных сетей для определения и прогнозирования объемов энергопотребления, удельных норм энергоресурсов и производительности мясоперерабатывающего предприятия по статистическим данным, отражающая взаимосвязи между видами и объемами продукции, количеством потребляемых энергоресурсов для различных промышленных теплотехнологий переработки мясных продуктов с приемлемой для практического применения точностью и достоверностью. Для обработки статистических данных были использованы два альтернативных программных средства: Deductor Studio Academic 5.3 и NeuroXL Predictor. Средняя относительная погрешность спрогнозированных выходных параметров для Deductor Studio Academic 5.3 и NeuroXL Predictor составила соответственно 4,8%, и 1,1%, что демонстрирует адекватность обеих нейросетевых моделей [10, 16, 20].

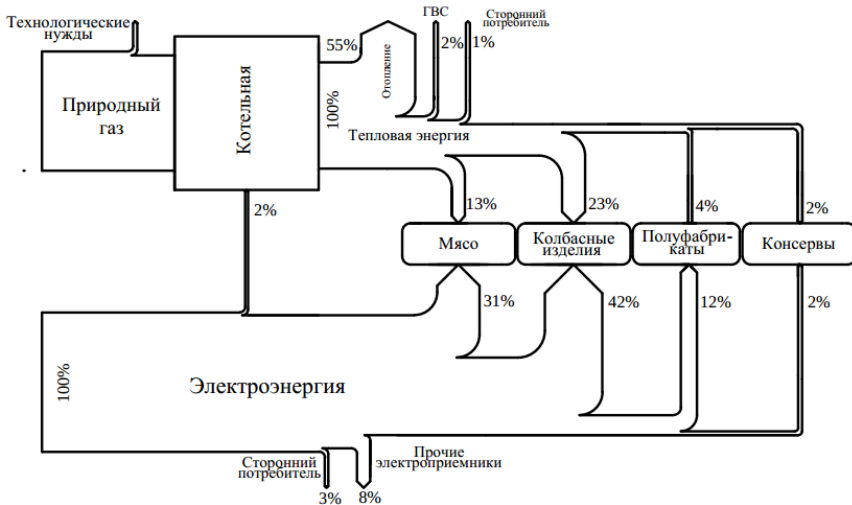
Исследована структура энергопотребления типового мясоперерабатывающего предприятия и проведена структурная оптимизация теплотехнологической системы предприятия. Приблизительно 70% тепловой энергии, направляемой на технологические нужды, расходуется в теплотехнологических агрегатах с паровым теплоносителем, которые могут быть заменены на более высокотехнологичные агрегаты с электроэнергией в качестве первичного теплоносителя. При оптимизации теплотехнологической системы предприятия были рассмотрены два варианта. В качестве критерия эффективности при сравнении вариантов был выбран экономически обусловленный максимум потребления электроэнергии.

*Вариант 1.* Техническое переоснащение теплоисточника с заменой газовых котлов на котлы электрические при неизменном технологическом процессе. Применение современных электрических паровых котлов позволит полностью отказаться от котельно-печного топлива, не меняя существующие теплотехнологии, системы отопления и горячего водоснабжения.

*Вариант 2.* Принципиальные изменения в реализации основных теплотехнологических процессов посредством перехода от паровых агрегатов к электрическим. При этом собственная котельная с газовыми котлами вырабатывает тепловую энергию на нужды отопления, горячего водоснабжения и те теплотехнологические процессы, где переход на прямое использование электроэнергии не целесообразен.

Диаграмма энергетических потоков мясоперерабатывающего предприятия с электрическим теплотехнологическим оборудованием и собственным теплоисточником представлена на рисунке 8.

Переход на электротеплотехнологии позволяет снизить энергопотребление промышленного предприятия мясоперерабатывающей отрасли на 19% с увеличением доли потребления электроэнергии в балансе предприятия на 56%. Применение электротеплотехнологий становится экономически выгодным при стоимости электроэнергии менее 0,17 руб./( $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ ) (при стоимости природного газа равной 534 руб./1000 м<sup>3</sup>) [3, 10, 14, 16, 23].



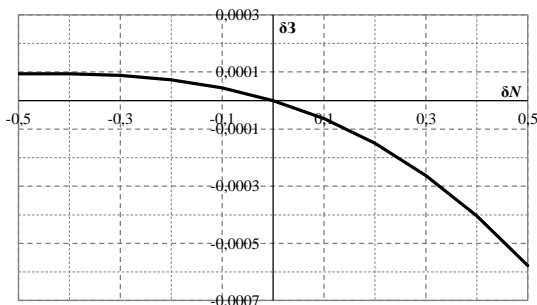
**Рисунок 8. – Диаграмма энергетических потоков мясоперерабатывающего предприятия с электрическими теплотехнологиями**

В пятой главе «Исследование технико-экономической эффективности интеграционных энергетических комплексов на базе газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций» исследована энергетическая и экономическая эффективность интеграционных энергетических комплексов. Для оценки энергоэффективности работы предложенных энерготехнологических схем был использован эксергетический метод термодинамического анализа [8, 26]. 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 %.

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, 29], который позволяет сформулировать методически выверенные рекомендации по установленной мощности КЭТУ с точки зрения минимизации суммарных приведенных затрат для энергоцентра. При базовом варианте установленная электрическая мощность КЭТУ принята 9,9 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.

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 9).



**Рисунок 9. – Изменение относительных суммарных затрат от относительной мощности  $\delta N$**

Для КС магистрального газопровода «Ямал-Европа», расположенных на территории Республики Беларусь, (потребляемая мощность КС в течение года составляет 54 МВт) максимальная электрическая мощность КЭТУ составит 9,9 МВт. Для данного объема энергетических ресурсов определена производительность мясоперерабатывающего предприятия с оптимизированной теплотехнологической системой. При замене газовых котлов на электрические без изменений в технологическом процессе годовая производительность предприятия по мясу и колбасным изделиям составит 20350 т/год и 16270 т/год, в варианте замены котлов и модернизации основных теплотехнологий производительность предприятия по мясу и колбасным изделиям увеличится соответственно до 24220 т/год и 19360 т/год. Энергоснабжение мясоперерабатывающего предприятия утилизацией ВЭР КС позволит обеспечить системную экономию энергетических ресурсов в объеме 14,7 тыс т у. т.

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.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате анализа литературных источников показано, что энергетическая составляющая в себестоимости продукции АПК составляет 11,5 %, при этом организация энергообеспечения объектов АПК за счет местных энергоресурсов позволит обеспечить не более 25 % приходной части их энергобаланса, что требует инновационных решений в части эффективности энергоснабжения предприятий комплекса. Особенно это важно в условиях приближения предприятий переработки сельскохозяйственной продукции к месту ее производства. Одними из наиболее энергоемких объектов агропромышленного производства являются мясоперерабатывающие предприятия. В современных условиях решение вопросов эффективного энергообеспечения мясоперерабатывающих предприятий следует рассматривать с позиции синергетического эффекта, получаемого энерготехнологическим интегрированием объектов различного производственного профиля. Ввиду территориальной приближенности в качестве источника энергоресурса для мясоперерабатывающего предприятия рассмотрены ВЭР КС магистрального газопровода с газотурбинными ГПА [2, 3, 18, 23, 30, 31].

2. Исследована структура и объем ВЭР КС магистрального газопровода. Установлено, что зависимость фактической потребляемой мощности ГПА, а следовательно, объема ВЭР характеризуется коэффициентом влияния от производительности газопровода равным 1,9–2,5. Для оценки влияния утилизационного оборудования на эффективность ГПА определена зависимость, позволяющая определять влияние аэродинамического сопротивления утилизационных теплообменных аппаратов на параметры работы ГПА [4, 5, 24].

3. Синтезирована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, ДГА и АБХМ. Из результатов параметрической оптимизации (расход транспортируемого природного газа равен 1000 кг/с) следует, что в исследованной области минимальный расход топливного газа равен 4,69 кг/с при температуре перед газовой турбиной  $t_5 = 1150$  °С и температуре воздуха  $t_2 = 15$  °С, при этом электрическая мощность, дополнительно вырабатываемая ДГА, составляет 1157 кВт. Максимальное значение электрической мощности равно 1714 кВт при  $t_5 = 700$  °С,  $t_{13} = 190$  °С, при этом удельный расход топливного газа составит 6,84 кг/с. Получены 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) [6, 9, 11, 13, 18, 19, 28].

4. Синтезирована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, ТПСУ и АБХМ. Из результатов параметрической оптимизации (расход транспортируемого природного газа равен 1000 кг/с) следует, что в исследованной области поиска минимальное значение коэффициента использования топлива составило  $b_T = 5,78$  кг/с при степени сжатия в компрессоре  $\beta_K = 17$  и температуре воздуха  $t_2 = 15$  °С, максимальная электрическая мощность равна 17,9 МВт при  $t_1 = 15$  °С и нулевом расходе пара на технологические нужды. Получены 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) [7, 9, 11, 13, 15, 28].

5. Синтезирована технологическая схема КЭТУ в составе ГПА, одноступенчатой ОРЦ-установки и АБХМ для охлаждения воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ. Применительно к ГПА-16 «Урал» с приводным ГТУ ДГ90 предложенная КЭТУ позволяет сгенерировать мощность равную 2 МВт электрической энергии. В холодное время года, когда не требуется охлаждение воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, высвобождается дополнительно 17,9 МВт тепловой энергии [8, 25].

6. Для определения и прогнозирования объемов энергопотребления, удельных норм энергоресурсов и производительности мясоперерабатывающего предприятия разработана и апробирована имитационная нейросетевая модель, отражающая взаимосвязь между видами и объемами продукции, количеством потребляемых энергоресурсов для различных промышленных теплотехнологий переработки мясных продуктов с приемлемой для практического применения точностью и достоверностью. Для обработки статистических данных были использованы два альтернативных программных средства: Deductor Studio Academic 5.3 и NeuroXL Predictor. Средняя относительная погрешность спрогнозированных выходных параметров для Deductor Studio Academic 5.3 и NeuroXL Predictor составила соответственно 4,8%, и 1,1%, что демонстрирует адекватность обеих нейросетевых моделей [10, 16, 20].

7. В рамках повышения энергоэффективности интеграционного комплекса исследованы варианты реструктуризации теплотехнологической системы мясоперерабатывающего предприятия с собственным теплоисточником. Установлено, что переход на электротеплотехнологии позволяет снизить энергопотребление промышленного предприятия мясоперерабатывающей отрасли на 19% с увеличением доли потребления электроэнергии в балансе предприятия на 56% [3, 10, 14, 16, 23].

8. Для энергоцентра на базе КС магистрального газопровода разработана методика технико-экономического обоснования выбора установленной мощности КЭТУ, позволяющая сформулировать выверенные рекомендации по установленной мощности КЭТУ с точки зрения минимизации суммарных приведенных затрат для энергоцентра.

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. Определены основные экономические показатели по годам реализации проектов при различных сценариях роста тарифов на энергоресурсы. Наиболее экономически выгодным является вариант с ПСУ, чистый дисконтированный доход для которого к 25 году реализации проекта составит 33 млн дол. США при динамическом сроке окупаемости проекта равном 4 года [12, 29].

9. Установлено, что для КС магистрального газопровода «Ямал-Европа», расположенных на территории Республики Беларусь, при потребляемой мощности КС в течение года 54 МВт максимальная электрическая мощность КЭТУ может составить 9,9 МВт. Для данного объема энергетических ресурсов определена произво-

длительность мясоперерабатывающего предприятия с оптимизированной теплотехнологической системой: при замене газовых котлов на электрические без изменений в технологическом процессе годовая производительность предприятия по мясу и колбасным изделиям составит соответственно 20,4 тыс. т/год и 16,3 тыс. т/год; при замене газовых котлов и модернизации основных теплотехнологий производительность предприятия по мясу и колбасным изделиям увеличится соответственно до 24,2 тыс. т/год и 19,4 тыс. т/год. Энергообеспечение мясоперерабатывающего предприятия такой производительности путем утилизации ВЭР КС позволит обеспечить системную экономию энергетических ресурсов в объеме до 14,7 тыс. т. у. т. [16].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты исследования могут быть использованы при реализации проектов энергообеспечения объектов мясоперерабатывающей отрасли АПК. Применение предложенных КЭТУ на базе КС магистрального газопровода позволяет сгенерировать до 65,8 ГВт·ч электрической энергии в год, что достаточно для энергоснабжения мясоперерабатывающего предприятия, производительность которого по мясу и колбасным изделиям составит соответственно 24,2 тыс. т/год и 19,4 тыс. т/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. При отсутствии достаточной сырьевой базы возможно дискретное снижение мощности КЭТУ и соответственно производительности мясоперерабатывающего предприятия.

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 теплоснаб-

жение» 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.

14. Седнин, В. А. Структурная оптимизация энерготехнологических систем предприятий мясоперерабатывающей отрасли / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергоэффективность. – 2019. – № 7. – С.28–31.

15. Седнин, В. А. Многомерная интеграция газотранспортной системы в топливно-энергетический комплекс / В. А. Седнин, А. А. Абразовский, П. Е. Бушков // Энергетическая стратегия. – 2019. – №4. – С. 20–25.

16. Седнин, В. А. Оценка энергосберегающего эффекта интеграции энергетических систем компрессорной станции магистрального газопровода и мясоперерабатывающего предприятия агропромышленного комплекса / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергоэффективность. – 2019. – № 10. – С.28–31.

#### **Другие научные статьи по теме диссертации**

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

18. 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.

19. Седнин, В.А. Синтез и оценка эффективности схем комбинированных энерготехнологических установок на базе газоперекачивающего агрегата компрессорной станции магистрального газопровода / В.А Седнин, А.А. Абразовский / Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Сборник трудов / Институт промышленной экологии. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2018. – С. 184–189.

20. Седнин, В. А. Нейросетевое моделирование энергопотребления промышленных предприятий / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Сборник трудов / Институт промышленной экологии. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2019. – С. 88–92.

#### **Тезисы докладов научных конференций**

21. 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.

22. Абразовский, А. А. Использование газозвоздушных 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. Абразовский, А. А. Интенсивное энергосбережение путем создания интеграционных энерготехнологических систем и комплексов / А. А. Абразовский //

Инновации. Образование. Энергоэффективность: материалы XII науч.-практ. конф., Могилев, 25–27 окт. 2018 г. / ГАЗ-ИНСТИТУТ ; редкол.: А. А. Лапко [и др.]. – Минск, 2018. – С. 12–14.

31. Седнин, В. А. Энергоснабжение предприятий агропромышленного комплекса утилизацией побочных энергетических ресурсов компрессорных станций магистральных газопроводов / В. А. Седнин, А. А. Абрамовский // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: материалы IX междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 18–20 дек. 2018 г. / УО «Полоц. гос. ун-т ; редкол. : В. К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2018. – С. 39–41.

## РЭЗІЮМЭ

Абразоўскі Аляксей Анатольевіч

### Энергаабеспячэнне мясаперапрацоўчых прадпрыемстваў утылізацыяй другасных энергетычных рэсурсаў кампрэсарных станцый магістральных газаводаў

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

**Мэта працы:** распрацоўка і навуковае абгрунтаванне метадычных і тэхнічных рашэнняў энергаабеспячэння мясаперапрацоўчых прадпрыемстваў АПК утылізацыяй ВЭР КС магістральных газаводаў.

**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:** Вызначана фактычная залежнасць спажыванай магутнасці КС ад прадукцыйнасці магістральнага газавода. Сінтэзаваны і аптымізаваны рэгенерацыйна-утылізацыйныя схемы камбінаваных энергатэхналагічных устаноў на базе КС магістральных газаводаў. Атрыманы рэгрэсійныя залежнасці для электрычнай магутнасці і ККД сінтэзаваных КЭТУ. Распрацавана і апрабавана імітацыйная мадэль на аснове нейронавых сетак для вызначэння і прагназавання аб'ёму энергаспажывання мясаперапрацоўчага прадпрыемства. Выканана структурная аптымізацыя цеплаэнергетычных сістэмы мясаперапрацоўчага прадпрыемства і вызначана яго прадукцыйнасць з улікам размяшчанага аб'ёму энергетычных рэсурсаў. Для энергацэнтра на базе КС магістральнага газавода ў складзе КЭТУ і дадатковага энергакрыніцы на мясцовых відах паліва праведзены тэхніка-эканамічны аптымізацыйны разлік.

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

**Галіна ўжывання:** мясаперапрацоўчая галіна АПК, газатранспартная сістэма.



## РЕЗЮМЕ

**Абразовский Алексей Анатольевич**

### **Энергообеспечение мясоперерабатывающих предприятий утилизацией вторичных энергетических ресурсов компрессорных станций магистральных газопроводов**

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

**Цель работы:** разработка и научное обоснование методических и технических решений энергоснабжения мясоперерабатывающих предприятий АПК утилизацией ВЭР КС 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:** 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. Разработана и апробирована имитационная модель на основе нейронных сетей для определения и прогнозирования объемов энергопотребления мясоперерабатывающего предприятия. Выполнена структурная оптимизация теплоэнергетической системы мясоперерабатывающего предприятия и определена его производительность с учетом располагаемого объема энергетических ресурсов. 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**

**Energy supply of meat-processing organizations  
by utilization of secondary energy resources  
of compressor stations of main gas pipelines**

**Key words:** energy technology 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 methodical and technical solutions of power supply of meat-processing organizations of agroindustrial complex by utilization 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 actual dependence of the power consumption of the compressor station on the performance of the main gas pipeline is determined. The regeneration and utilization schemes of combined energy technology plants based on compressor stations of main gas pipelines have been synthesized and optimized. Regression dependences for electric power and efficiency of synthesized plants are obtained. A simulation model based on neural networks was developed and tested to determine and predict the energy consumption of a meat-processing organizations. The structural optimization of the heat and power system of the meat-processing organizations was performed and its productivity was determined taking into account the available volume of energy resources. For energy center on the basis of compressor station of gas pipeline in a combination of energy-technology unit and the additional energy source on local fuels is conducted technical and economical optimization calculation.

**Recommendations for use:** the results of the study can be used to develop practical recommendations when implementing projects of energy supply of meat-processing organizations of agroindustrial complex and the introduction of energy saving technologies at compressor stations of main gas pipelines.

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