На правах рукописи

ШОМОВА ТАТЬЯНА ПЕТРОВНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2014

Работа выполнена на кафедре «Промышленные теплоэнергетические системы» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор **СУЛТАНГУЗИН Ильдар Айдарович**

Официальные оппоненты:
НАТАРЕЕВ Сергей Валентинович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»

ХВОРОВ Георгий Анатольевич, кандидат технических наук, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (г. Москва), начальник лаборатории энергосбережения и энергоэффективности

Ведущая организация: **ОАО «Оргэнергогаз»,** г. Москва

Защита состоится «19» декабря 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу:153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.
Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Shomova.pdf
Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент  Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Газоперерабатывающие предприятия нашей страны отличаются высоким уровнем потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при недостаточно высоком качестве переработки сырья. Это связано в первую очередь с моральным и физическим износом оборудования и самой технологии. Энергоемкость отечественных технологий переработки в 6-10 раз больше, чем в странах Западной Европы, Японии и США. Основными энергоресурсами, потребляемыми предприятиями переработки газа, являются электрическая и тепловая энергия (на ее выработку используют топливный газ).

Одними из самых затратных процессов, на газоперерабатывающем предприятии, являются процессы ректификации, потребляющие большое количество тепловой энергии в виде пара, а также электроэнергии для процессов охлаждения.

Потенциал энергосбережения ТЭР в перерабатывающей отрасли составляет 1млн т у.т. Внедрение тепловых насосов, в технологические схемы переработки углеводородного сырья позволит сократить потребление энергетических ресурсов, главным образом тепловой энергии в виде пара. Абсорбционные тепловые насосы могут быть использованы для утилизации сбросного тепла с целью получения холода.

Тепловые насосы (ТН) могут применяться на установках очистки, осушки газа, а также на установках переработки нестабильного газового конденсата и переработки широкой фракции легких углеводородов.

Актуальным вопросом является методика выбора типа теплового насоса. В данной работе разработана методика подбора ТН с механической рекомпрессией пара и парокомпрессионных ТН для усовершенствования процессов ректификационных колонн в зависимости от технологических параметров (разности температур верхнего и нижнего продукта).

Тепловые насосы являются экологически чистыми устройствами, так как сами по себе не загрязняют окружающую среду, и снижают нагрузку на экологию за счет сэкономленных энергетических ресурсов.

Данная диссертационная работа вписывается в рамки политики Российской Федерации в области энергосбережения и соответствует Федеральному Закону № 261 от 23.11.2009. Проект « Реализация программы энергосбережения в технологическом производстве Сургутского завода стабилизации конденсата», выполненный автором и представленный на конкурс «Энергоидея», проводимый Министерством образования и науки РФ в 2013 году, был отмечен дипломом в номинации «Лучшее рацпредложение в сфере энергосбережения и энергоэффективности на производстве».

Цель работы заключается в повышении энергетической эффективности заводов газоперерабатывающего комплекса на основе анализа топливно-энергетических балансов предприятий, определения потенциала энергосбе-

режения, моделирования энерготехнологических установок и применения тепловых насосов.

Задачами работы являются :

- разработка методики проведения энергетического обследования на газоперерабатывающих предприятиях;
- анализ топливно-энергетических балансов газоперерабатывающего завода, гелиевого завода и завода по стабилизации конденсата с определением потенциала энергосбережения;
- разработка программы энергосбережения на основе анализа топливно-энергетических балансов предприятий газоперерабатывающего комплекса;
- разработка методов моделирования и построения математических моделей процессов ректификации широкой фракции легких углеводородов, пентан-гексановой фракции, пропан-бутановой фракции, процессов абсорбции сероводорода и диоксида углерода, процессов абсорбционной осушки газов;
- моделирование исследуемых энерготехнологических установок со снижением энергопотребления на основе применения тепловых насосов;
- повышение энергетических и экономических показателей установок ректификации углеводородов на основе применения тепловых насосов.

Научная новизна

1. Разработана методика подбора ТН с механической рекомпрессией пара для усовершенствования ректификационных колонн при разности температур верхнего и нижнего продукта не более 20 -30 ºС (при разности температур более 30 – 40 ºС предпочтительнее схема с парокомпрессионным ТН).
2. Разработаны методы реализации программы энергосбережения на основе анализа топливно-энергетического баланса и применения тепловых насосов на газоперерабатывающих предприятиях.
3. Впервые, для установки ректификации пентан-гексановой фракции с получением изопентана, предлагается использовать тепловой насос с механической рекомпрессией верхнего продукта (изопентана) совместно с рекуператором, теплообменником и дроссельного клапана (заявка на полезную модель № 2014113767 от 08.04.2014).

Практическая значимость

1. На основе исследования и анализа топливно-энергетического баланса заводов разработана программа энергосбережения с применением тепловых насосов на Сургутском заводе стабилизации конденсата, Оренбургском газоперерабатывающем заводе и Оренбургском гелиевом заводе.
2. Разработана математическая модель процессов разделения широкой фракции легких углеводородов с реализацией в программной среде Aspen HYSYS.

3. Разработана энерготехнологическая схема производства изопентана с экономией до 50 тыс. Гкал/год и получением экономического эффекта до 200 млн.руб./год.
4. Разработана энерготехнологическая схема очистки и осушки природного газа с применением абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) и двухцелевого теплового насоса, которая позволяет использовать тепловую энергию парового конденсата 14 тыс. Гкал/год для дополнительного охлаждения очищенного газа с экономией 6,4 млн кВт-ч электроэнергии на пропановой холодильной установке и получением экономического эффекта 15,5 млн руб./год.

Достоверность и обоснованность результатов работы обусловлены применением положительно зарекомендовавших себя методик расчетов теплоэнергетических агрегатов, сопоставлением справочных данных , сравнением полученных результатов с данными других авторов, а также данными, полученными при проведении исследований газоперерабатывающих предприятий.

Личное участие

Основные результаты получены лично автором под руководством д.т.н., проф. Султангузина И.А.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

В части формулы специальности: « совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем; …сбережение энергетических ресурсов»; ***в части области исследования специальности*** - пункту 1 паспорта специальности «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках»; пункту 4: «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками»; пункту 5: «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах».

Апробация работы

Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований докладывались на:

- 18, 20 Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика» (НИУ МЭИ, Москва, 2012, 2014 г.);

- 8th Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources» (Институт тепло- и массообмена им. А.А. Лыкова Национальной Академии Наук Беларуси, Минск, 2011 г.);

- IX Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 2012 г.);

- VI Международная школа – семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (НИУ МЭИ, Москва, 2012 г.);

- II Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Энерго – 2012» (НИУ МЭИ, Москва, 2012 г.);

- Международная конференция «Тепловые насосы в странах СНГ» (Алушта, 2013 г.)

- VIII Международная конференция «Проблемы промышленной теплотехники» (ИТТФ НАНУ, Киев, 2013 г.)

- IX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2014» (ИГЭУ, Иваново, 2014 г.)

Публикации

Основное содержание выполненных исследований опубликовано в 17 журнальных статьях, тезисах и докладах, в т.ч. 3 в журналах, аттестованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 152 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения. Работа содержит 62 рисунка и 19 таблиц, 3 приложения, список использованных источников содержит 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, дана общая характеристика работы.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации, основной задачей которого являлся анализ современного состояния газоперерабатывающей отрасли нашей страны с перспективами ее развития, дана оценка актуальности применения тепловых насосов на газоперерабатывающих предприятиях

Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, в частности, трудов Бродянского В.М., Долотовского И.В., Касаткина А.Г., Конахиной И.А., Лапидуса А.Л., Ларина Е.А., Накорякова В.Е., Рея Д., Янтовского Е.И., Diez E., Fonyo Z., Kiss A.A. и др.

На основе проанализированной информации из отечественной и зарубежной литературы сформулированы задачи дальнейшего исследования.

Вторая глава посвящена разработке методологии проведения энергетического обследования на газоперерабатывающих предприятиях и анализу энергопотребления существующих систем переработки газа и конденсата.

Газоперерабатывающие заводы представляют собой сложные энерготехнологические системы, и для их исследования необходимо применять системный подход. Методология проведения энергетического обследования включает в себя следующие основные этапы:

- построение топливно-энергетического баланса газоперерабатывающего предприятия на основе собранных данных;
- инструментальное обследование энерготехнологических установок с применением портативных измерительных приборов и стационарных приборов учета системы АСУ ТП;
- математическое моделирование энерготехнологических установок и сопоставление результатов моделирования с данными пассивного промышленного эксперимента;
- на основе полученных математических моделей расчет различных вариантов энергосберегающих мероприятий и определение наиболее эффективных из них.

Проведены энергетические обследования Сургутского завода стабилизации конденсата (ЗСК), Оренбургского газоперерабатывающего завода (ГПЗ) и Оренбургского гелиевого завода (ГЗ). Анализ топливно-энергетического баланса Сургутского завода стабилизации конденсата показал, что основным потребителем тепловой энергии является блок извлечения изопентана и узел получения пропана на процессы ректификации– 66 % всей потребляемой тепловой энергии. Тепловая энергия в виде пара, вырабатывается на сторонней котельной. Также этот блок потребляет 11% покупной электроэнергии, в основном, на аппараты воздушного охлаждения.

Оренбургский газоперерабатывающий завод неразрывно связан с гелиевым заводом, поэтому для них был построен единый топливно-энергетический баланс, во взаимосвязи со сторонней ТЭЦ. Основным энергоресурсом для ГПЗ является пар на установки очистки газов от серы - 76% от всего количества тепловой энергии. 63% тепловой нагрузки ГПЗ покрывается от ТЭЦ и 37% от собственных ВЭР. Для ГЗ основным энергоресурсом является электроэнергия, на сжатие метановой фракции и этана в дожимных компрессорных цехах (63%) и на пропановых холодильных установках (21%).

Анализ представленных заводов показал, что процессы газопереработки осуществляются в области относительно низких температур (-30 °С - +150 °С) при большом количестве низкопотенциальных ВЭР, которые практически не используются. При этом расходуется много электроэнергии на аппаратах воздушного охлаждения (АВО) и на перекачку оборотной воды. С другой стороны одним из основных потребляемых энергетических ресурсов является пар низкого давления (до 0.5 МПа), например, в ребойлерах. При этом образующийся конденсат имеет температуру 100- 120 °С, тепловой потенци-

ал которого обычно не используется. На его охлаждение приходится использовать те же самые АВО и оборотную воду.

Кроме тепловой энергии, для процессов переработки газа необходим холод. Например, для осушки газа используется холод, получаемый в пропановых холодильных установках при температурах -30 ℃.

Все это является благоприятной средой для применения тепловых насосов и АБХМ. Тепловые насосы могут снимать часть тепловой нагрузки у энергоносителей, которые нужно охладить, и передавать тепло другим энергоносителям, которые нужно нагреть. А АБХМ могут использовать тепло парового конденсата для снятия холодильной нагрузки ПХУ.

В третьей главе проводится разработка математических моделей расчета процессов газопереработки. В качестве основного инструмента моделирования была выбрана программа Aspen HYSYS. Программа Aspen HYSYS, разработанная фирмой AspenTech, предназначена для моделирования и оптимизации химико-технологических процессов и систем, в частности, для процессов переработки нефти и газа.

Основными целями математического моделирования являются сравнение результатов расчета и энергетического обследования, а также совершенствование энерготехнологических схем переработки углеводородов на основе расчетов различных энергосберегающих проектов. Для достижения данных целей были построены математические модели с проведением модельных математических экспериментов и построением тепловых балансов ректификационных колонн.

Материальный баланс процесса непрерывной ректификации бинарной смеси:

$$F = P + W, \tag{1}$$

где F,P, W – расходы соответственно исходной смеси, дистиллята и кубового остатка.

Уравнение теплового баланса ректификационной колонны выглядит следующим образом:

$$Q_f + Q_{\text{кип}} = Q_w + Q_{\text{д}} + Q_{\text{пд}} + Q_{\text{п}}\ , \tag{2}$$

где Q_f- теплосодержание смеси в кубе колонны после ее подогрева до температуры кипения t_f, кВт; Q_w - теплосодержание остатка в кубе при температуре t_w, кВт; $Q_{\text{д}}$ - тепло, отдаваемое флегмой охлаждающей воде в дефлегматоре, кВт; $Q_{\text{пд}}$ - тепло, уносимое парами дистиллята, кВт; $Q_{\text{п}}$- потери тепла в окружающую среду, кВт; $h_{1,2}$ – энтальпия соответственно греющего пара и конденсата, кДж/кг; $D_{\text{кип}}$ - расход греющего пара, кг/с; $D_{\text{нагр.}}$ - расход греющего пара на нагрев начальной смеси, кг/с; G_f – количество начальной смеси, поступающей на разделение, кг/с; $c_a, c_{\text{в}}$ - теплоемкость жидких компонентов А и В, кДж/ кг $^{\circ}$С; $a_f, a_{\text{р}}, a_w$ – содержание компонента А в начальной смеси, дистилляте и кубовом остатке, % вес.

Расход тепла на кипячение смеси в кубе колонны:

$$Q_{\text{кип}} = D_{\text{кип}}(h_1 - h_2) = Q_w + Q_{\text{д}} + Q_{\text{пд}} + Q_{\text{п}} - \ Q_f. \tag{3}$$

На нагрев жидкости в кубе расходуется тепла

$$Q_{\text{нагр}} = D_{\text{нагр}}(h_1 - h_2) = G_f\left(c_a \cdot \frac{a_f}{100} + c_{\text{в}} \cdot \frac{100 - a_f}{100}\right)\left(t_{\text{к}} - t_f\right) + Q_{\text{п}}. \quad (4)$$

Расход тепла в испарителе будет равен:

$$Q_{\text{исп}} = Q_{\text{кип}} + Q_{\text{нагр}}\,. \quad (5)$$

Целью теплового расчета ректификационной колонны является определение расхода тепла на нагрев кубовой жидкости и отвода энергии от верхнего продукта.

Расход греющего пара на нагрев кубовой жидкости $D_{\text{исп}}$.

$$D_{\text{исп}} = D_{\text{кип}} + D_{\text{нагр}} = \frac{Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{кип}}}{h_1 - h_2}\,. \quad (6)$$

Из расчета теплового баланса воздушного холодильника определяется количество энергии, которое нужно отобрать от верхнего продукта

$$Q_{\text{вх}} = G_{\text{вх}} C_{p\ \text{вх}}(t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}})\,. \quad (7)$$

На первоначальном этапе проводилось моделирование существующих теплотехнологических схем с определением параметров работы установок и сравнением с экспериментальными данными. В качестве основного объекта исследования был выбран цех по переработке широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), технологическая схема которого представлена на рис. 1.

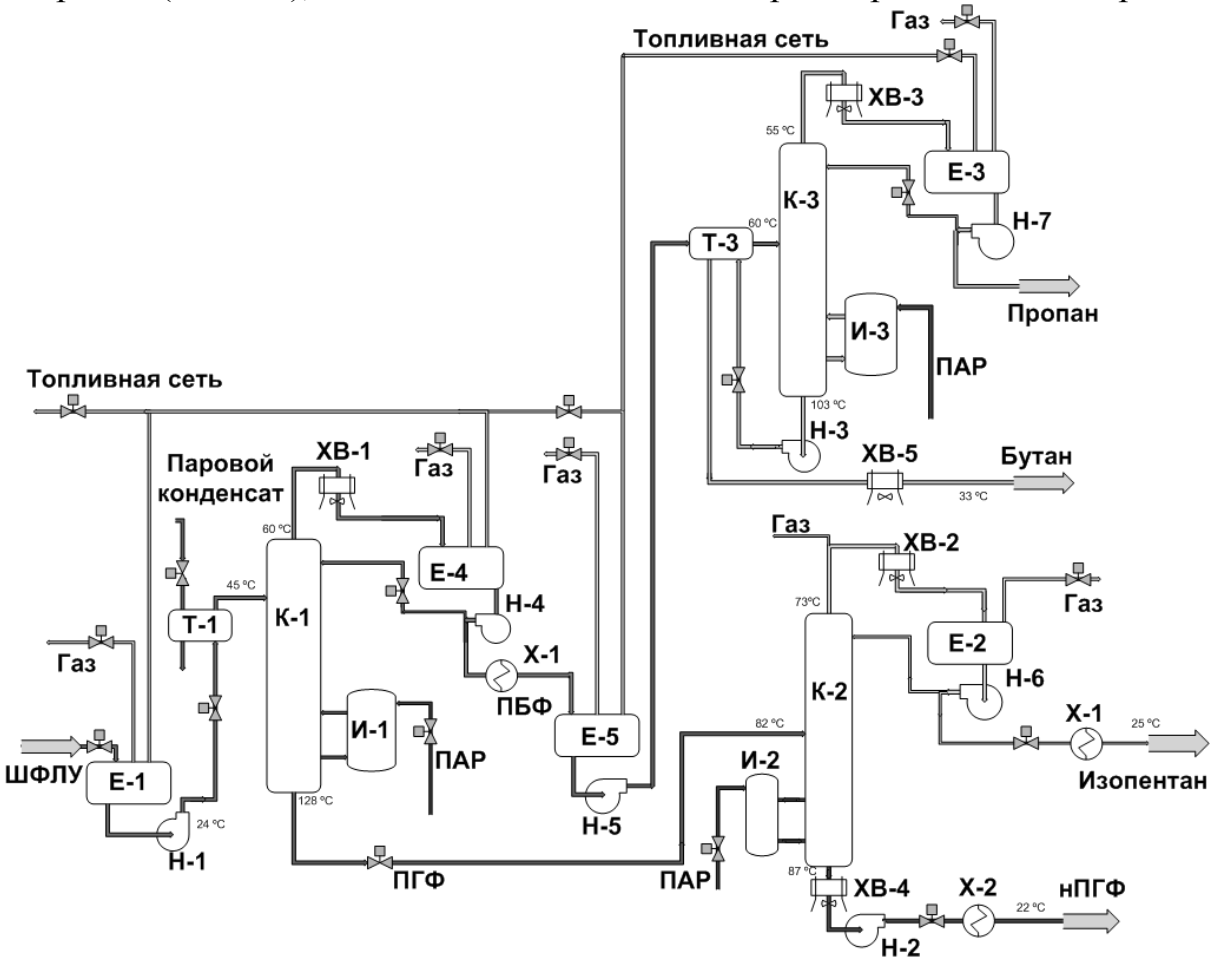


Рис. 1. **Технологическая схема переработки ШФЛУ: К – ректификационная колонна, И – испаритель, Т – теплообменник, Е – емкость, Н – насос, ХВ – холодильник воздушный, Х – холодильник водяной, ПГФ – пентан-гексановая фракция, нПГФ – фракция нормального пентана и гексана, ПБФ – пропан-бутановая фракция**

Комплекс переработки ШФЛУ включает в себя ректификационные колонны:

- К-1 - разделения пентан-гексановой и пропан-бутановой фракций;
- К-2 - разделения изопентана и смеси гексана с нормальным пентаном;
- К-3 - разделения пропана и бутана.

Колонна К-1 предназначена для разделения ШФЛУ. Верхний продукт колонны К-1 в виде пропан-бутановой фракции служит сырьем колонны К-3 для получения пропана и бутана, а нижний продукт подвергается дальнейшей переработке в изопентановой колонне К-2.

Для расчета термодинамических свойств веществ используется уравнение состояния Пенга-Робинсона, которое отличается высокой точностью в области, близкой к критической точке, и отвечает всем требованиям для расчета углеводородных смесей.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b)+b(V-b)}\ , \qquad (8)$$

где P – давление, МПа; T – температура, К; V – молярный объем, м^3/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, R=0,0083144 МПа·м^3/кмоль·К; a, b, α - коэффициенты.

База данных содержит обширные сведения о свыше 1500 компонентов смесей с их термодинамическими свойствами. В программе представлен наглядный графический интерфейс для проектирования технологических схем-процессов (ректификация, очистка, осушка и т.д.).

Интерфейс программы Aspen HYSYS V8.0 и структурная схема моделирования ректификационной колонны К-2 разделения пентан-гексановой фракции представлены на рис. 2.

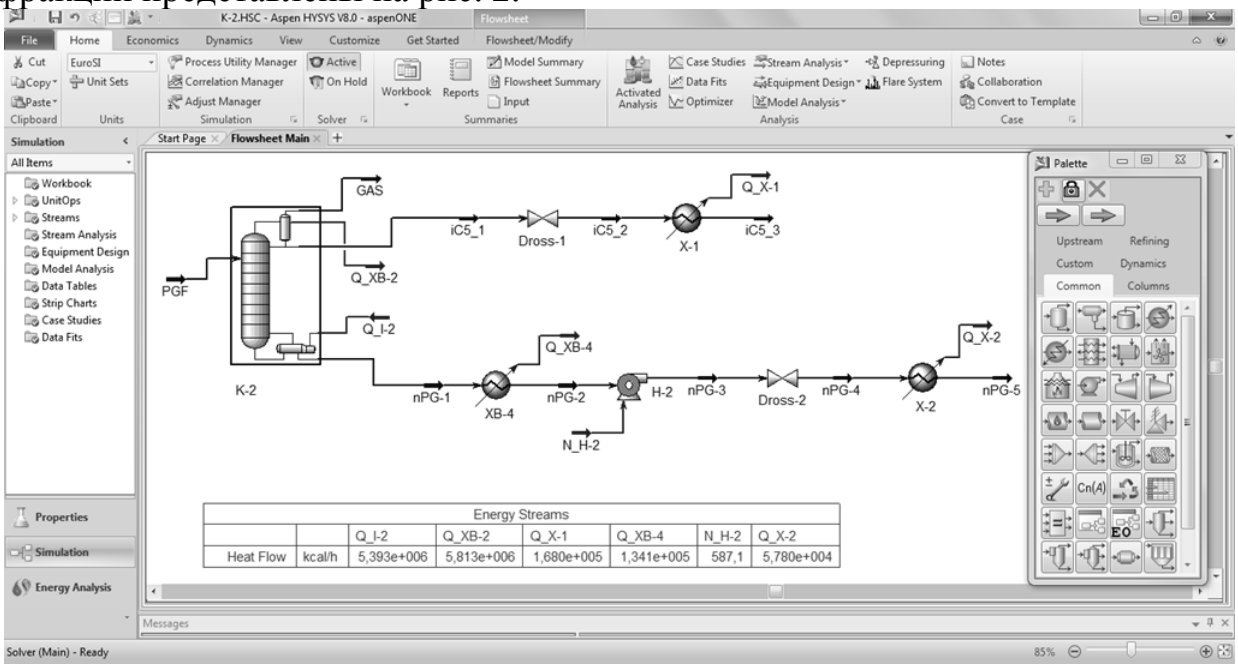


Рис. 2. **Интерфейс Aspen HYSYS V8.0 и структурная схема моделирования РК К-2**

Сопоставление результатов моделирования и экспериментального обследования показали, что погрешность расчетов не превышает 5-10%, что свидетельствует об удовлетворительной точности модели.

Четвертая глава посвящена повышению энергетической эффективности систем переработки природного газа и газового конденсата на предприятиях газоперерабатывающего комплекса на основе полученных математических моделей с применением различных типов тепловых насосов с оценкой эффективности их применения.

Большой потенциал имеет применение ТН для совершенствования процессов ректификации. В частности, могут быть применены парокомпрессионные ТН и ТН с механической рекомпрессией пара.

Принцип работы насоса с механической рекомпрессией пара заключается в том, что парообразный верхний продукт при адиабатическом сжатии в компрессоре нагревается до температуры, превышающей температуру жидкого нижнего продукта. Для испарения нижнего продукта в теплообменник направляется верхний продукт, который при этом конденсируется и отдает тепло, вытесняя пар, подаваемый в испаритель ректификационной колонны в исходной схеме.

Разработанная программа в среде Aspen HYSYS позволяет подобрать оптимальные параметры работы ТН с соблюдением требований технологии производства и оценить энергетическую эффективность при сравнении нескольких возможных вариантов.

Колонна с ТН с рекомпрессией пара моделировалась таким образом, чтобы обеспечить тепловую нагрузку испарителя. Тепловая нагрузка нагрева нижнего продукта (нормального пентана и гексана) покрывается паром. В качестве рабочего агента ТН предлагается использовать верхний продукт колонны (изопентан), температура которого становится выше температуры нижнего продукта после сжатия в компрессоре.

Внедрение винтового компрессора сухого сжатия позволяет отказаться от полного или частичного использования пара, а также потребления электроэнергии на воздушных холодильниках**.**

Структурная схема моделирования колонны К-2 с ТН механической рекомпрессией пара в Aspen HYSYS представлена на рис. 3.

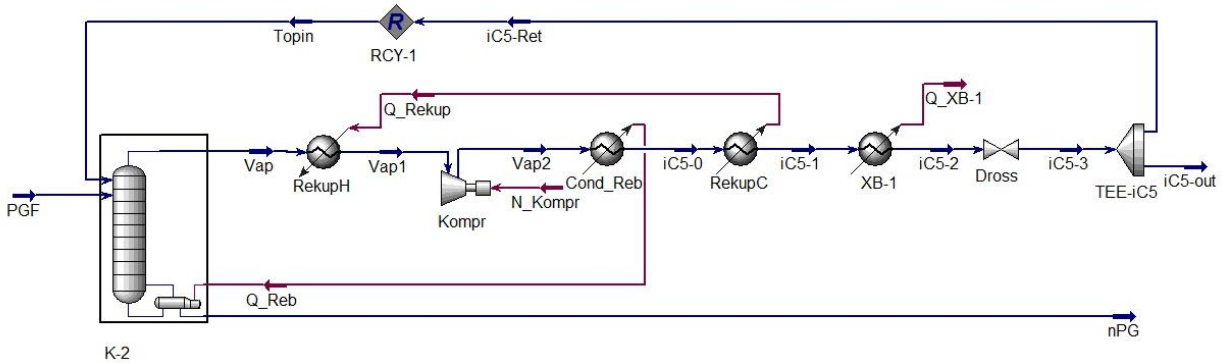


Рис. 3. **Схема моделирования РК К-2 с ТН механической рекомпрессии пара**

Изопентановая фракция с верхней части колонны, проходя через рекуперативный теплообменник, частично нагревается. Далее изопентановая фракция, направляется в компрессор, где при сжатии повышает свою температуру примерно до 95 °С. Затем изопентановая фракция направляется в кон-

денсатор, где конденсируется и нагревает кубовую часть колонны, после чего фракция, пройдя через теплообменник, доохлаждается в воздушных холодильниках. Таким образом, предлагаемое решение позволяет полностью или частично отказаться от потребления пара и электроэнергии на аппараты воздушного охлаждения, которые часто работают не эффективно, в том числе это связанно с воздействием окружающей среды.

Проведены расчеты процесса ректификации пентан-гексановой фракции с применением парокомпрессионного ТН.

Результаты расчетов исходной схемы (рис. 2), ТН с рекомпрессией пара (рис. 3) и парокомпрессионного ТН представлены в таблице 1.

Таблица 1. **Расход энергетических ресурсов для колонны К-2**

Показатель	Исходная РК	РК с ТН рекомпрессии пара	РК с парокомпрессионным ТН
Расход тепловой энергии пара в испаритель, Гкал/ч	5,4	0	0
Стоимость тепловой энергии пара, руб./ч	8100	0	0
Отвод тепловой энергии от воздушных холодильников, Гкал/ч	5,8	0,95	1,07
Расход электроэнергии на привод компрессора ТН, кВт*ч	0	617	761
Стоимость электроэнергии на привод компрессора, руб./ч	-	1851	2283
Экономия денежных средств, руб./ч	-	6249	5817

Для расчета экономии денежных средств принимались следующие значения: стоимость тепловой энергии 1500 руб./Гкал, электроэнергии - 3,0 руб/кВт*ч.

Парокомпрессионный ТН - это классический ТН с использованием во внутреннем цикле хладагента с необходимыми термодинамическими и теплофизическими свойствами. Хладагент циркулирует по внутреннему контуру ТН, где он вскипает в испарителе ТН, охлаждает верхний продукт колонны и конденсируется в конденсаторе ТН, при этом отдавая свое тепло кубу колонны. Таким образом, экономится пар в испарителе колонны и снижается тепловая нагрузка на аппараты воздушного охлаждения верхнего продукта.

В случае ТН с рекомпрессией пара мощность компрессора на 144 кВт меньше, чем для внешнего ТН. В среде моделирования Aspen HYSYS для воздушных холодильников рассчитывался тепловой поток, отводимый от верхнего продукта. Расход электроэнергии на вентиляторы аппаратов воздушного охлаждения существенно меньше расхода электроэнергии на компрессор ТН и в расчетах не учитывается. При использовании ТН электрическая нагрузка на воздушные холодильники будет меньше, и реальный энергосберегающий эффект от применения ТН будет больше.

Таким образом, при разности температур кипения изопентана и нормального пентана с гексаном Δt =14 ºС - предпочтительнее схема с рекомпрессией пара.

На основе моделирования процесса ректификации пропан-бутановой фракции были определены потребления основных энергетических ресурсов: пара на нагрев нижнего продукта ректификационной колонны К-3 – бутана в испарителе I-3 и электроэнергии на захолаживание верхнего продукта – пропана в воздушном холодильнике ХВ-3 и бутана в воздушном холодильнике ХВ-5. Применение теплообменника Т-3 позволяет нагреть пропан-бутановую фракцию перед входом в колонну К-3 за счет охлаждения продуктового бутана, что позволяет снизить энергопотребление на процесс ректификации.

Внедрение в существующую схему ТН позволит отказаться от полного или частичного использования пара для нагрева кубовой части колонны и электроэнергии для охлаждения пропановой фракции верха колонны.

Структурная схема моделирования колонны К-3 с парокомпрессионным ТН в Aspen HYSYS представлена на рис. 4. ТН моделировался таким образом, чтобы полностью покрыть тепловую нагрузку на испаритель. В качестве хладагента была выбрана пропан-бутановая фракция.

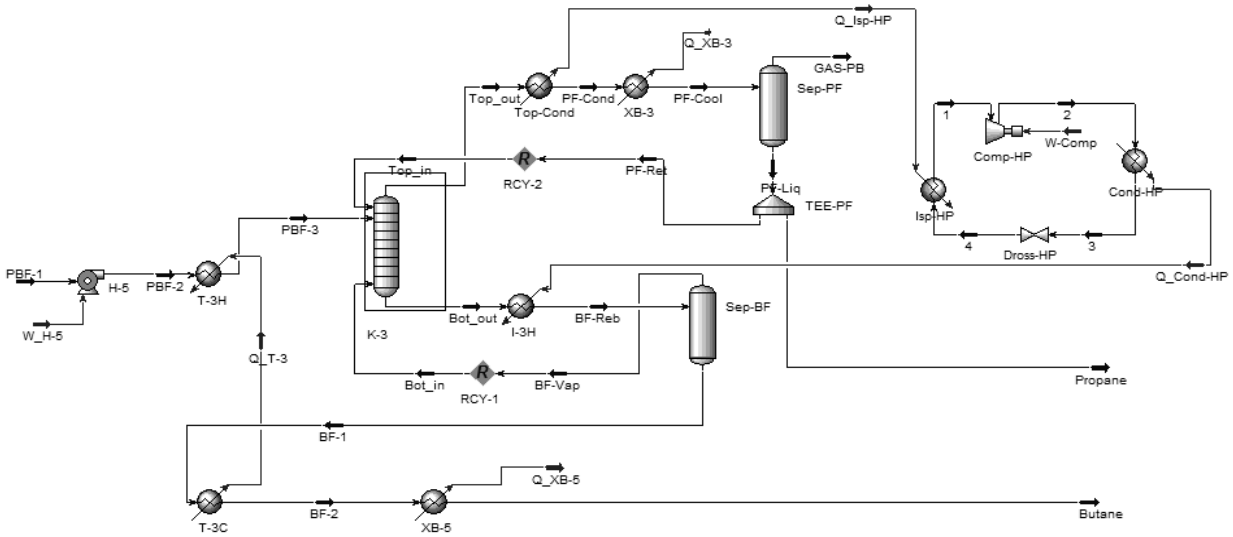


Рисунок 4. **Схема моделирования РК К-3 с парокомпрессионным ТН в Aspen HYSYS**

Работа ТН может полностью резервироваться за счет перехода к первоначальной схеме с расходом пара в испаритель.

Также проведены расчеты процесса ректификации пропан-бутановой фракции с ТН механической рекомпрессией пара.

Результаты расчетов колонны К-3 исходной схемы, ТН с рекомпрессией пара и парокомпрессионного ТН (рис. 4) представлены в таблице 2.

Для ТН с рекомпрессией пара мощность компрессора на 758 кВт меньше, чем для внешнего ТН. Но ТН с механической рекомпрессией пара не может полностью покрыть тепловую нагрузку на испаритель.

Таблица 2. **Расход энергетических ресурсов для колонны К-3**

Показатель	Исходная РК	РК с ТН рекомпрессии пара	РК с парокомпрессионным ТН
Расход тепловой энергии, пара в испаритель, руб./Гкал	12,42	3,92	0
Стоимость тепловой энергии пара, руб./ч	18630	5880	0
Отвод тепловой энергии от воздушных холодильников, Гкал/ч	10,94	5,48	2,46
Расход электроэнергии на привод компрессора ТН, кВт*ч	0	2617	3375
Стоимость электроэнергии на привод компрессора, руб./ч	-	7851	10125
Экономия денежных средств, руб./ч	-	4899	8505

Из таблицы видно, что при разности температур кипения пропана и бутана $\Delta t = 48$ ºС эффективнее схема с внешним парокомпрессионным ТН.

Для завода стабилизации конденсата (ЗСК) разработана технологическая схема с тепловым насосом с механической рекомпрессией пара (заявка на полезную модель № 2014113767 от 08.04.2014). Экономия денежных средств на покупку энергетических ресурсов при реализации схемы с компрессором на колонне извлечения изопентана составит 50 – 70 млн руб./год. При реализации схемы с компрессором на 3-х колоннах извлечения изопентана экономия денежных средств на покупку энергетических ресурсов составит 150 – 200 млн руб./год.

Стоимость покупного оборудования, проекта и строительно-монтажных работ для 3-х колонн составит предположительно менее 100 млн. рублей. Простой срок окупаемости затрат составит 0,5 – 0,7 года.

По результатам проведенного энергетического обследования газоперерабатывающего завода и гелиевого завода были определены основные энергопотребляющие установки, для ГПЗ - это установка очистки и осушки газа и для ГЗ - установка переработки ШФЛУ.

Очистка газа осуществляется с помощью раствора аминов, который затем регенерируется в колонне десорбера. Процесс регенерации аминов основан на противоточном контактировании насыщенного раствора с тощими парами аминов на контактных тарелках десорбера.

Предлагается установить двухцелевой тепловой насос для охлаждения тощего амина и нагрева богатого, что позволит сократить расход пара на ребойлер и снизить нагрузку на аппараты воздушного охлаждения. Тощим амином называется водный раствор амина с низкой концентрацией H_2S и CO_2.

Под двухцелевым тепловым насосом будем понимать энергетическую установку, которая обеспечивает тепловые нагрузки на различных температурных уровнях.

Разница температур верхнего и нижнего продукта: $\Delta t=103-80=33^oC$

Теплопроизводительность теплового насоса:

Q=3930 кВт или 3,379 Гкал/ч

Основным расходом энергии на установку очистки газа является пар низкого давления, направляемый на ребойлер десорбера амина. Таким образом, сокращается расход пара в ребойлере на величину

$$Э_{пара} = Q_{\text{пара}} \cdot Ц_{пара} = 3{,}379 \cdot 1500 = 5068 \text{ р/ч}$$

Кроме этого холодопроизводительность теплового насоса 3041кВт, что позволяет снизить нагрузку на аппараты воздушного охлаждения. При этом будут выполняться требования технологического регламента по температуре в емкости хранения тощего амина не более 65°С.

Коэффициент трансформации теплового насоса:

$$\mu = \frac{Q_{\text{тн}}}{N_{\text{компр}}} = \frac{3930}{889} = 4{,}4 \quad (8)$$

Данный тепловой насос имеет высокую энергетическую эффективность.

Также предлагается схема с двухцелевым тепловым насосом на блоке осушки газа для нагрева богатого моноэтиленгликоля (МЭГ), насыщенного влагой, и охлаждения регенерированного (тощего) МЭГ. Тепло, отобранное в испарителе ТН, используется для охлаждения насыщенного МЭГ. Тепло, переданное в конденсаторе ТН, используется для нагрева тощего МЭГ. Работа теплового насоса полностью резервируется за счет перехода к первоначальной схеме.

Для теплового насоса основная доля затрат энергетических ресурсов приходится на электроэнергию, на привод компрессора. Электрическая мощность компрессора теплового насоса $N_{\text{компр}}$ =38.9 кВт при температуре конденсации хладагента R-134a в конденсаторе 50°С и температуре испарения хладагента в испарителе 24°С.

Разница температур верхнего и нижнего продукта: Δt=50-24=26°С.

Теплопроизводительность теплового насоса $Q_{\text{тн}}$= 218 кВт

Коэффициент трансформации теплового насоса:

$$\mu = \frac{Q_{\text{тн}}}{N_{\text{компр}}} = \frac{218}{38{,}9} = 5{,}6 \quad (9)$$

Экономия энергетических ресурсов, в пересчете на тепловую энергию, составляет порядка 1500 Гкал/год. Кроме того экономится электроэнергия на перекачку оборотной воды 1450 МВт-ч, которая использовалась для охлаждения тощего МЭГ.

Капитальные затраты на проект с тепловым насосом составляют 2,34 млн руб. Годовой экономический эффект мероприятия - 765 тыс. руб./год со сроком окупаемости 3 года. Таким образом, данный тепловой насос имеет высокую энергетическую и экономическую эффективность.

С целью повышения энергетической эффективности установки были проанализирована возможность установки трех тепловых насосов:

1) Первый тепловой насос использует в качестве низкопотенциального источника теплоты пентан-гексановую фракцию для нагрева ШФЛУ перед ректификационной колонной. Что позволит снизить расход пара в теплообменнике Т03 и расход топливного газа на печи подогрева куба колонны.

2) Второй тепловой насос с аналогичен первому, в качестве низкопотенциального источника теплоты используется газообразная ШФЛУ для на-

грева ШФЛУ перед ректификационной колонной. Что также позволит снизить расход пара в теплообменнике Т03 и расход топливного газа на печи подогрева куба колонны.

3) И третий тепловой насос в качестве низкопотенциального источника теплоты использует оборотную воду для нагрева ШФЛУ. Что позволит сократить потребление оборотной воды для охлаждения двигателей циркуляционных насосов.

Для первых двух тепловых насосов разница температур технологических потоков небольшая, но стоимость единицы тепла топливного газа значительно меньше стоимости тепловой и электрической энергии, что говорит об экономической нецелесообразности их использования.

В качестве промежуточного теплоносителя в контуре испарителя и конденсатора используется вода. Тепло в конденсаторе рекомендуется использовать для нагрева ШФЛУ. Работа теплового насоса полностью резервируется за счет перехода к первоначальной схеме. Тепловой насос НТ-320.1 предназначен для нагревания воды с +35 до +45°С, источник низкого потенциала - вода с температурой +29°С. Холодильный агент R134a. Тепловой насос представляет собой компактный аппарат с винтовым компрессором, кожухотрубным конденсатором и кожухотрубным испарителем.

Внедрение теплового насоса позволит повысить надежность работы оборудования, практически отказаться от использования низкокачественной оборотной воды, сократить потребление природного газа на трубчатых печах за счет нагрева ШФЛУ, по технологическому регламенту температура ШФЛУ не должна превышать 85 °С.

Теплопроизводительность теплового насоса $Q_{\text{тн}}$= 243 кВт

Мощность компрессора теплового насоса $N_{\text{компр}}$=39,6 кВт

Коэффициент трансформации теплового насоса:

$$\mu = \frac{Q_{\text{тн}}}{N_{\text{компр}}} = \frac{243}{39{,}6} = 6{,}1 \qquad (10)$$

Капитальные затраты составят К= 2,18 млн руб

Экономические расчеты показали, что экономия энергетических ресурсов составляет 840 тыс. руб. в год, а срок окупаемости - 2,6 года.

Таким образом, данный тепловой насос имеет высокую энергетическую и экономическую эффективность.

Разработана энерготехнологическая схема очистки и осушки природного газа с применением АБХМ, использующей низкопотенциальное тепло парового конденсата для охлаждения обессеренного газа перед его осушкой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика проведения комплексного исследования энерготехнологических установок газоперерабатывающих предприятий на основе построения топливно-энергетических балансов с применением инструментального энергетического обследования, математического моделирования и определением потенциала энергосбережения.

2. Разработана программа энергосбережения на основе анализа топливно-энергетического баланса и применения тепловых насосов на газоперерабатывающих предприятиях.

3. Разработана тепловая схема с тепловым насосом для получения изопентана из пентан-гексановой фракции, состоящая из ректификационной колонны, теплового насоса с винтовым компрессором для механической рекомпрессии верхнего продукта (изопентана), рекуператора, теплообменника для конденсации изопентана и испарения нижнего продукта (нормального пентана и гексана), дроссельного клапана и воздушного охлаждения изопентана.

4. Разработана методика подбора ТН с механической рекомпрессией пара и парокомпрессионных ТН для усовершенствования ректификационных колонн в зависимости от технологических параметров (при разности температур верхнего и нижнего продукта не более 20 ºС).

5. Разработана математическая модель процессов разделения широкой фракции легких углеводородов с получением изопентана и пропана с реализацией в программной среде Aspen HYSYS.

6. Разработана энерготехнологическая схема производства изопентана с экономией 50 тыс. Гкал/год и получением экономического эффекта 200 млн.руб./год.

7. Разработана энерготехнологическая схема очистки и осушки газа с применением высокоэффективных двухцелевых тепловых насосов, обеспечивающих тепловые нагрузки на различных температурных уровнях при разностях температур 20-40 градусов с коэффициентом трансформации теплоты 5-6 и более.

8. Для гелиевого завода и завода стабилизации конденсата на колонне разделения ШФЛУ проведен анализ применения парокомпрессионных тепловых насосов, использующих теплоту технологических потоков. Показано, что при одинаково высокой энергетической эффективности применения тепловых насосов, их экономическая эффективность существенно выше при экономии пара, чем при экономии газового топлива.

9. Показано, что выбор типа теплового насоса зависит от индивидуальных особенностей технологической схемы производства на основе результатов анализа энергетических обследовании и моделирования.

10. Разработана энерготехнологическая схема очистки и осушки природного газа с применением АБХМ и теплового насоса, которая позволяет использовать тепловую энергию парового конденсата 14 тыс. Гкал/год для дополнительного охлаждения очищенного газа с экономией 6,4 млн. кВт-ч электроэнергии на пропановой холодильной установке и получением экономического эффекта 15,5 млн.руб./год.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Султангузин И.А., Албул А.В., **Шомова Т.П**., Шомов П.А. Энергоснабжение газоперерабатывающих заводов на основе газовых турбин и теп-

ловых насосов. // Наука и техника в газовой промышленности. - № 3. – 2012. – С. 96-101.

2. Султангузин И.А., Албул А.В., Потапова А.А., **Шомова Т.П.**, Шомов П.А. Прогнозирование термодинамических свойств новых хладагентов для тепловых насосов. // Наука и техника в газовой промышленности. - № 2. – 2013. – С. 44-51.

3. Султангузин И.А., **Шомова Т.П.**, КурзановС.Ю., Белов Р.Б. Совершенствование процессов ректификации углеводородов с применением тепловых насосов на основе моделирования в программе Aspen HYSYS// Надежность и безопасность энергетики. - № 2. – 2014.- С.56-60.

Публикации в других изданиях

4. Potapova A.A., Sultanguzin I.A., Shomov P.A., **Shomova T.P**. Heat pumps for heat supply of enterprise and district heating // VIII Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 12-15 September, 2011. – Vol. 2. – P. 165 - 171.

5. Потапова А.А., Султангузин И.А., **Шомова Т.П.**, Шомов П.А. Применение тепловых насосов в системе теплоснабжения промышленного предприятия и города // Тепловые насосы (Украина). - 2011. - № 3. – С. 39 – 44.

6. Султангузин И.А., **Шомова Т.П.**, Рамазанов Н.С. Возможные направления использования тепловых насосов на газоперерабатывающих заводах // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». Тезисы докладов. Часть II. Секции 5-10. – Москва, РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 30 января - 1 февраля 2012 г., М., 2012. – С. 75-76.

7. Шомов П.А., Султангузин И.А., **Шомова Т.П**. Анализ материальных и энергетических балансов газоперерабатывающих заводов // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». Тезисы докладов. Часть II. Секции 5-10. – Москва, РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 30 января - 1 февраля 2012 г., М., 2012. – С. 128-129.

8. Рамазанов Н.С., **Шомова Т.П.,** Султангузин И.А. Применение абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин в газовой промышленности // 18-ая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 29 февраля – 1 марта 2012: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. Т. 2. – С. 317.

9. **Шомова Т.П.**, Рамазанов Н.С., Султангузин И.А. Применение теплового насоса на установке переработки широкой фракции легких углеводородов // 18-ая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 1–2 марта 2012: Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. Т. 2. – С. 331.

10. Султангузин И. А., **Шомова Т.П.**, Шомов П.А., Албул А.В. Производство электрической и тепловой энергии в ПГУ-ТЭЦ и применение тепловых насосов на газоперерабатывающих заводах// Вторая Всероссийская научно-

практическая конференция «Повышение надежности и эффективности электрических станций и энергетических систем», Москва, 4-6 июня 2012 г. Издательский дом МЭИ, М. 2012: Труды - С. 401 – 404.
11. **Шомова Т.П.,** Рамазанов Н.С, Албул А.В., Султангузин И. А., Шомов П.А Разработка энергосберегающих технологий на основе парогазовых установок и тепловых насосов для газоперерабатывающего комплекса// Шестая международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение. Теория и практика». МЭИ, М. - 2012 г., с. 25-31.
12. Потапова А.А., **Шомова Т.П.**, Султангузин И.А., Албул А.В. Сравнение энергетической эффективности тепловых насосов при работе на хладагентах 3-го и 4-го поколений // Шестая международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение. Теория и практика». МЭИ, М. - 2012 г., с. 267-271.
13. **Шомова Т.П**., Белов Р.Б., Султангузин И.А. Использование тепловых насосов на заводе переработки углеводородного сырья// VIII Международная конференция «Проблемы промышленной теплотехники»// [Электронный ресурс] Киев., 2013. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска
14. Султангузин И.А., **Шомова Т.П.**, Шомов П.А.. Разработка энергосберегающих технологий для газоперерабатывающего комплекса на основе тепловых насосов и АБХМ// Международная конференция «Тепловые насосы в странах СНГ»// [Электронный ресурс] URL: http://conf.esco.co.ua/reports/shomova.pdf (Дата обращения 29.11.2013)
15. Султангузин И.А., **Шомова Т.П**., Шомов П.А.. Разработка энергосберегающих технологий для газоперерабатывающего комплекса на основе тепловых насосов и АБХМ//Тепловые насосы-2013-№3 (12) –с 31-33
16. **Шомова Т.П.,** Султангузин И.А. Разработка энергосберегающих мероприятий в производстве изопентана с применением тепловых насосов // 20-ая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 27-28 февраля 2014: Тез. докл. В 4-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 3. – С. 242.
17. **Шомова Т.П.**, Султангузин И.А. Применение программы Aspen Hysys для расчета процессов ректификации с тепловыми насосами // IX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2014». Иваново, ИГЭУ, 2014. - В 7т. Т.1, Ч.1.- с. 134-136.

ШОМОВА ТАТЬЯНА ПЕТРОВНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
Подписано в печать «16» октября 2014
Формат 60х84 $^{1}/_{16}$ Печать плоская.
Усл. печ. л. 1,16. Тираж: 100 экз. Заказ №
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ