

На правах рукописи



ФАРУХШИНА РЕГИНА РАДИКОВНА

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ С ГАЗОТУРБИННЫМ ПРИВОДОМ ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2018

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Китаев Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Тухбатуллин Фарит Гарифович**,
доктор технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина / факультет «Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта», профессор кафедры «Нефтепродуктообеспечение и газоснабжение» (г. Москва)

Кишалов Александр Евгеньевич,
кандидат технических наук, Уфимский государственный авиационный технический университет / факультет «Авиационных двигателей, энергетики и транспорта», доцент кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика» (г. Уфа)

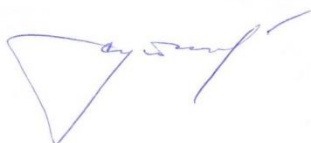
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2018 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшей составляющей частью системы обеспечения природным газом промышленности, энергетики и населения России был и остается трубопроводный транспорт.

Истощение запасов газа на существующих месторождениях, отдаление от центров потребления газа до новых мест освоения добычи приводят к увеличению протяженности трубопроводного транспорта и непрерывному росту стоимости энергоресурсов в стране.

Увеличение объемов добываемого и транспортируемого газа, с ростом количества эксплуатируемого физически и морально устаревшего оборудования компрессорных станций, диктуют потребность в новых программах реконструкции и модернизации с учетом индивидуальных характеристик применяемого газотранспортного оборудования.

Значительные энергозатраты на работу компрессорных станций (КС) обуславливают потребность в экономии природного газа, расходуемого на собственные нужды газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

В связи с вышеизложенным, актуальными являются задачи разработки и обоснования новых методов, направленных на повышение энергоэффективности работы ГПА при реконструкции и эксплуатации КС с учетом технологических показателей транспорта газа.

Степень разработанности темы

Вопросами обеспечения энергетической эффективности КС с газотурбинным приводом занимались следующие авторы: Поршаков Б.П., Апостолов А.А., Седых А.Д., Лопатин А.С., Вертепов А.Г., Козаченко А.Н., Никишин В.И., Калинин А.Ф., Торопов А.Ю., Ванчин А.Г., Будзуляк Б.В., Микаэлян Э.А., Шотиди К.Х. (РГУ НГ им. И.М. Губкина), Гриценко А.И., Галиуллин З.Т., Ишков А.Г., Харионовский В.В., Леонтьев Е.В., Козлов С.И., Сеницин Ю.Н., Цегельников Л.С., Щуровский В.А. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), Шаммазов А.М., Байков И.Р., Гаррис Н.А., Галлямов А.К., Гольянов А.И.,

Китаев С.В., Смородова О.В. (Уфимский государственный нефтяной технический университет).

Вопросами совершенствования энергетических показателей ГПА, установленных на КС, занимались и отражали в своих работах Зюзьков В.В., Поршаков Б.П., Лопатин А.С., Микаэлян Э.А., Козаченко А.Н., Кичатов В.В., Вертепов А.Г., Чурикова М.М. (РГУ им. И.М. Губкина), Байков И.Р., Шаммазов А.М., Галлямов А.К., Гаррис Н.А., Гольянов А.И., Смородова О.В., Китаев С.В. (УГНТУ) и другие авторы.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности ВАК РФ 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: п. 2 – «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии»; п. 3 – «Разработка научных основ и усовершенствование технологии трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта»; п. 6 – «Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования компрессорных станций».

Цель работы – разработка технологических и технических решений для повышения эффективности работы компрессорных станций с газотурбинным приводом при эксплуатации и реконструкции.

Для достижения поставленной цели диссертационного исследования решались следующие **задачи**:

- 1 Оценка фактических потерь природного газа через свечи из камер дегазации центробежных компрессоров (ЦБК) с определением вида функциональной зависимости количественных потерь от наработки газоперекачивающих агрегатов.

2 Разработка технического решения для повышения эффективности ГПА путём снижения потерь природного газа из камер дегазации ЦБК, сбрасываемого в атмосферу через свечи.

3 Оптимизация схемы компоновки компрессорных станций газоперекачивающими агрегатами по типу и мощности, аппаратами воздушного охлаждения и пылеуловителями при реконструкции.

4 Разработка методики определения показателей энергоэффективности ГПА в условиях недостатка информации, исключающей риски снижения точности полученных результатов.

Научная новизна:

1 Впервые подобрана статистическая модель для расчета потерь газа через свечи камеры дегазации ЦБК, учитывающая наработку компрессора после капитального ремонта, коэффициент технического состояния и объемную концентрацию метана в свече.

2 Установлена новая закономерность, представленная в виде эмпирической зависимости потерь природного газа из камеры дегазации центробежных компрессоров ГПА от наработки после капитального ремонта.

3 Разработан и обоснован новый критерий расчета удельного расхода топливного газа по основным параметрам работы ГПА, имеющим наиболее значимую корреляционную взаимосвязь с искомым показателем, определенной по обучающей выборке нейронной сети.

Методы решения задач

При решении задач, поставленных в диссертационной работе, применялись следующие методы: вероятностно-статистические, иерархий, конечных элементов. Для разработки математических моделей использовались программные продукты «Statistica Neural Networks» и «Ansys Workbench Fluent», электронные таблицы Excel.

Для подтверждения результатов использовались статистические данные промышленной эксплуатации ГПА на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Достоверность

В диссертационной работе были корректно использованы соответствующие математические методы и формулы, вычислительные программные комплексы, зарегистрированные средства измерений и методики. Достоверность научных положений и полученных результатов исследований подтверждаются сопоставлением полученных результатов с экспериментальными (фактическими) данными.

Теоретическая и практическая значимость работы

Рекомендации по экспериментальному определению нерациональных потерь природного газа из камеры дегазации центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов, математическая модель для расчета потерь газа через свечи дегазации, учитывающие наработку ЦБК после капитального ремонта, коэффициент технического состояния ЦБК и объемную концентрацию метана в свече для ГПА типа ГТК-10М «Рекон» позволяют уточнить нормативное значение на 30%, апробированы, подтверждены и используются Башкирским управлением ООО «Газпром газнадзор» с 28 ноября 2017 года.

По результатам выполненных в диссертационной работе исследований издано учебно-методическое пособие «Расчеты энергоресурсосберегающих мероприятий в магистральном транспорте газа», которое используется в учебном процессе в ФГБОУ ВО УГНТУ для студентов, обучающихся по направлению «Нефтегазовое дело», специальность «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки».

Апробация результатов работы

Основные результаты и научные положения диссертационной работы были доложены на: XVIII-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (г. Уфа, 12–14 марта 2014 г.); XIX-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (г. Уфа, 10–12 марта 2015 г.); X-ой Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт–2015» (г. Уфа, 2015 г.); VIII-ой Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники–2015»

(г. Уфа, ноябрь 2015 г.); XI-ой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Уфа» «Совершенствование и повышение качества инженерно-технического производства в газотранспортной отрасли» (г. Уфа, 2015); 67-ой научно-технической конференции УГНТУ (г. Уфа, апрель 2016 г.); XI-ой Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт–2016» (г. Уфа, 2016 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А. Х. Мирзаджанзаде (г. Уфа, 16-18 ноября 2016 г.); IX-ой Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники–2016» (г. Уфа, ноябрь 2016 г.); 68-ой научно-технической конференции УГНТУ (г. Уфа, апрель 2017 г.); XIII-ой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ООО «Газпром трансгаз Уфа» «Совершенствование и повышение качества инженерно-технического производства в газотранспортной отрасли», (г. Уфа, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли», (г. Альметьевск, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и достижения науки и образования в XXI веке (естественные и технические науки)», (г. Самара, 2018 г.).

Публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 16 работах, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 155 страницах печатного текста, включая 29 таблиц и 52 рисунка; состоит из введения, четырех глав, основных выводов, содержит список использованной литературы из 139 наименований, в том числе 6 иностранных, и 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований. Описаны основные положения, выносимые на защиту, характеристика научной новизны, практической ценности и апробации научных результатов.

В первой главе исследованы мероприятия по поддержанию и повышению энергетической эффективности работы КС магистральных газопроводов, а также методы проведения энергетических обследований, выполнен обзор методов моделирования, применяемых при эксплуатации и реконструкции основного оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению количественных потерь газа из камеры дегазации ЦБК с учетом их наработки, рассматривается и обосновывается техническое решение, позволяющее исключить потери природного газа из камеры дегазации ЦБК ГПА путем подачи его в систему топливного газа с помощью эжектора.

Технологические потери газа из-за негерметичности уплотнения «масло-газ» рассчитываются согласно СТО Газпром 2-1.19-332-2009 по нормативным характеристикам. Для оценки фактической величины потерь газа, направляемого из газоотделителя на свечу, экспериментально были определены объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на КС оснащенной ГПА типа ГТК-10М «Рекон» с неполнонапорными ЦБК марки НЗ70-18-1.

Используемый нами базовый метод определения объемов утечек основан на измерении с помощью анемометра скорости потока газа, вытекающего в атмосферу через свечу, и рассчитан по формуле:

$$Q = V_{\text{cp}} \cdot S, \quad (1)$$

где V_{cp} – скорость потока вытекающего газа, м/с;

S – площадь сечения свечи, м².

Для измерения скорости потока вытекающего газа чувствительный элемент анемометра, в соответствии с руководством по эксплуатации, вводится внутрь свечи и располагается перпендикулярно направлению потока газа в трубопроводе. Производятся измерения скорости потока газа: два вблизи внутренних стенок свечи и два в центре. После этого вычисляется среднее показание анемометра V_{cp} по формуле:

$$V_{cp} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4}, \quad (2)$$

где V_1, \dots, V_4 – снятые показания.

Одновременно производилось измерение концентрации метана. Для измерения концентрации метана использовался детектор метана с лазерным наведением марки LaserMethan mini (производства Японии). В основу принципа работы положено свойство метана поглощать инфракрасное излучение лазера определенной длины волны.

Частично отраженный луч принимается устройством, которое показывает количество поглощенного потока излучения, автоматически пересчитанного в плотность метана в исследуемом слое газа в ppm-м. Пересчет концентрации метана в % по объему осуществляется по следующей формуле:

$$C_{cp} = 10^{-4} \cdot C_{a(cp)}, \quad \% \quad (3)$$

где $C_{a(cp)}$ – числовое значение концентрации, ppm-м.

На Рисунках 1, 2 и 3 приведены зависимости скорости потока газа, концентрации метана и потерь газа через свечу от наработки ЦБК после капитального ремонта соответственно.

Приведенная на Рисунке 3 зависимость аппроксимируется функцией вида:

$$Q_{\text{гас}} = a + b \cdot \exp(-\alpha \cdot t), \quad (4)$$

где a, b, α – эмпирические коэффициенты; ($a = 17$; $b = 11,21$; $\alpha = 0,0000585$);

t – наработка, тыс. часов.

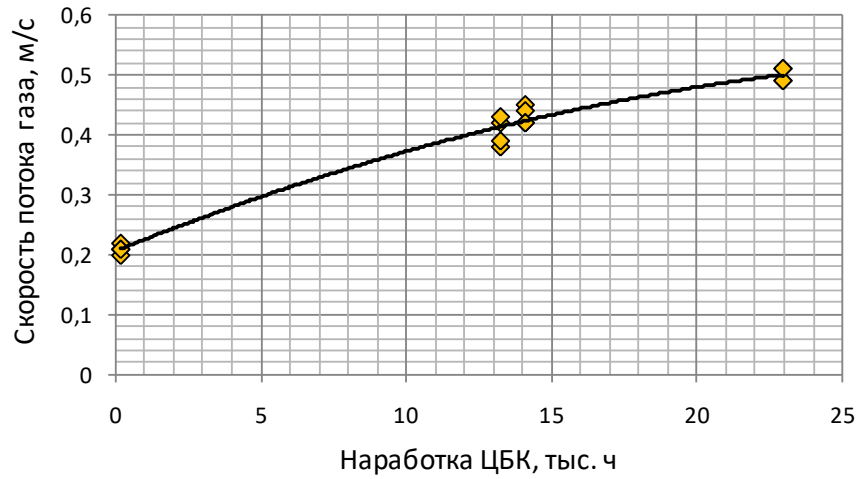


Рисунок 1 – Зависимость скорости потока газа от наработки ЦБК после капитального ремонта

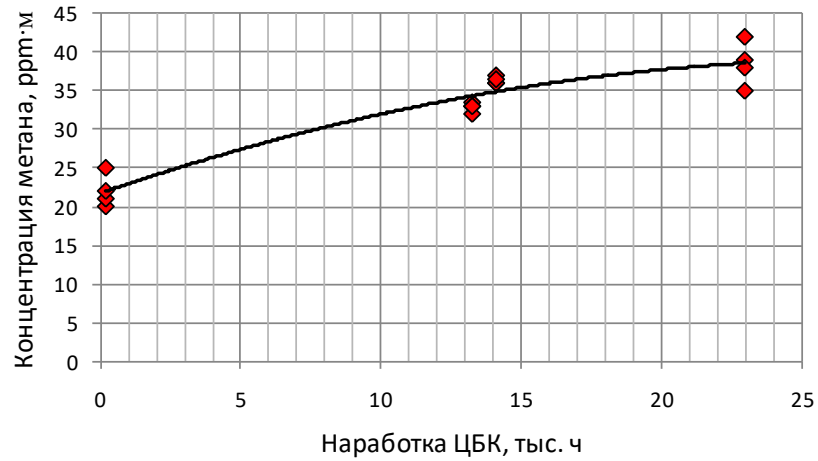


Рисунок 2 – Зависимость линейной концентрации метана от наработки ЦБК после капитального ремонта

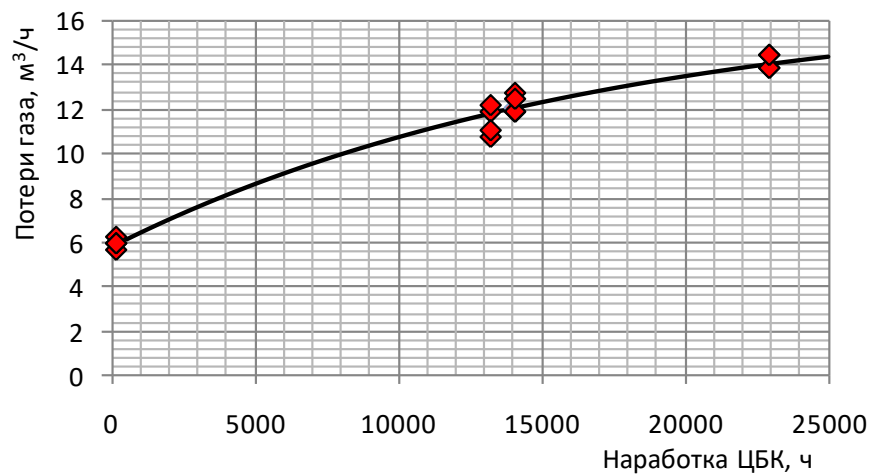


Рисунок 3 – Зависимость потерь газа через свечу от наработки ЦБК после капитального ремонта

Для определения величины потерь газа через свечи газоотделителей ЦБК с помощью лазерного детектора метана получено уравнение регрессии для пересчета величины концентрации в расход газа.

Оценку корреляционной взаимосвязи величины потерь газа с параметрами работы ЦБК провели с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена.

$$Q_{\text{час(р)}} = K_0 + \sum_{k=1}^N K_k x_k = K_0 + K_1 \cdot t + K_2 \cdot k_{\text{н}} + K_3 \cdot C_{\text{ср.}}, \quad (5)$$

где t – наработка ЦБК после капитального ремонта, тыс. ч.;

$k_{\text{н}}$ – КТС ЦБК;

$C_{\text{ср.}}$ – объемная концентрации метана в поперечном сечении свечи, %.

В Таблице 1 представлены коэффициенты уравнения регрессии, рассчитанные для ГПА марки ГТК-10М «Рекон».

Таблица 1 – Коэффициенты уравнения регрессии

K_0	K_1	K_2	K_3
2,9689	0,4323	2,9512	1,0233

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, приведенных на Рисунке 3, показывает хорошую сходимость результатов. Средняя квадратичная погрешность функции (5) не превышает 3,0 %.

С применением предлагаемой методики получена оценка потерь газа через свечи для четырех ГПА типа ГТК-10М «Рекон», которые составили 162,1 тыс. м³/год с учетом суммарной наработки агрегатов на КС за год, равной 15,4 тыс. ч.

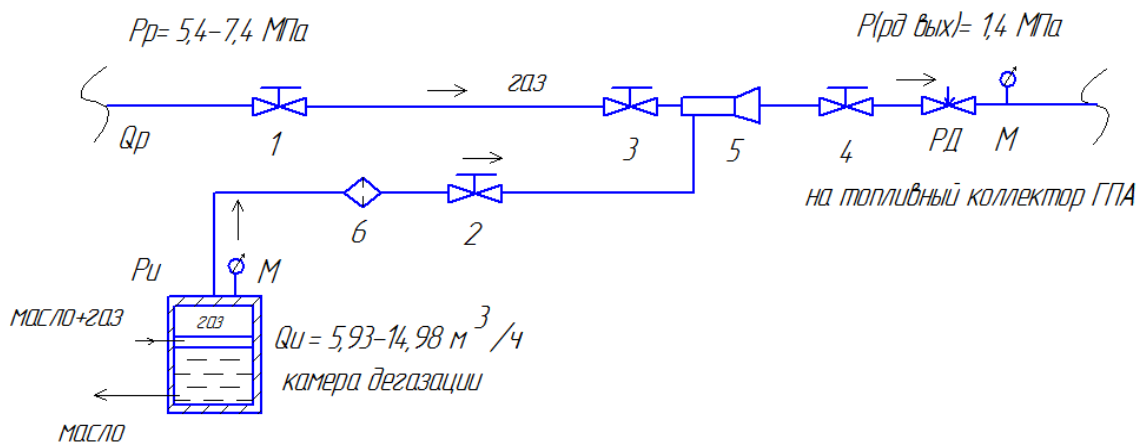
При измерении скорости истекаемого из свечи газа при помощи анемометра учитывались потери паров масла. Проведенный анализ показывает, что доля паров масла в выбросе метана для ГПА ГТК-10М «Рекон» составляет всего 0,0008 %. Доля паров масла находится в пределах погрешности средств измерений, поэтому влиянием содержания паров масла в газе на оценку величины потерь природного газа можно пренебречь.

Оценка и снижение выбросов метана в атмосферу с целью минимизации негативного воздействия на окружающую среду и уменьшения воздействия на климат являются основными задачами экологической политики ПАО «Газпром» и Российской Федерации в целом.

На цели охраны окружающей среды ПАО «Газпром» ежегодно направляет значительные финансовые средства, проводит мероприятия по снижению выбросов парниковых газов, поэтому меры по сокращению выбросов метана являются необходимыми.

Рациональное использование теряемого газа дает возможность получить выгоду от экономии сырья и сокращения экологических платежей.

В работе обоснована возможность применения эжекционной установки для сохранения газа, сбрасываемого из камеры дегазации ЦБК в атмосферу (рисунок 4).



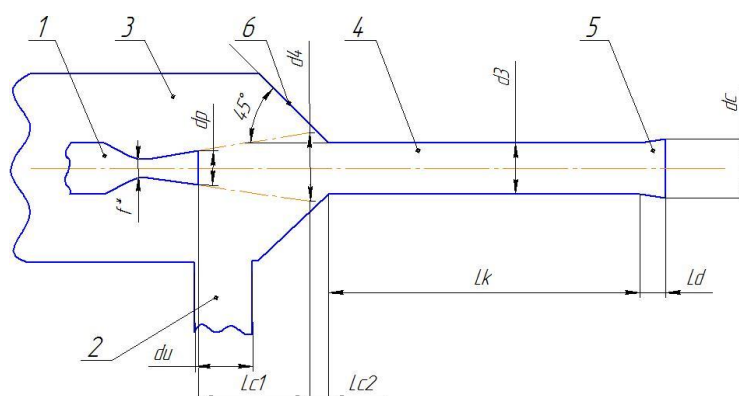
М – манометры; РД – регулятор давления; 1-4 – краны; 5 – эжектор, 6 – фильтр

Рисунок 4 – Схема эжекционной установки

Сложность математического описания всех процессов, происходящих в эжекторах с трехмерным течением, и высокая стоимость проведения экспериментов с газами, отличными от воздуха, делают целесообразным использование методов моделирования CFD (Computational Fluid Dynamics) для изучения процессов течения газов в эжекторах.

С целью моделирования течения газового потока, расчета параметров течения газа в эжекционной установке средствами программного обеспечения были

поставлены и решены задачи определения достижимого коэффициента эжекции, а также найдены размеры характерных сечений эжектора (рисунок 5).



- 1 – сопло потока высокого давления; 2 – сопло потока низкого давления;
 3 – цилиндрический корпус приемной камеры; 4 – камера смешения;
 5 – диффузор; 6 – конический переход от приемной камеры к камере смешения;
 r^* – критическое сечение рабочего сопла;
 L_{c1} , L_{c2} , L_k , L_d – длины камеры смешения, свободной струи и диффузора;
 d_p , d_u , d_3 , d_4 , d_c – диаметры рабочего и эжектируемого потоков, камеры смешения, свободной струи и на выходе диффузора

Рисунок 5 – Газовый эжектор

На Рисунке 6 приведено распределение полного давления в проточной части эжектора, полученное в программном комплексе ANSYS Fluent.

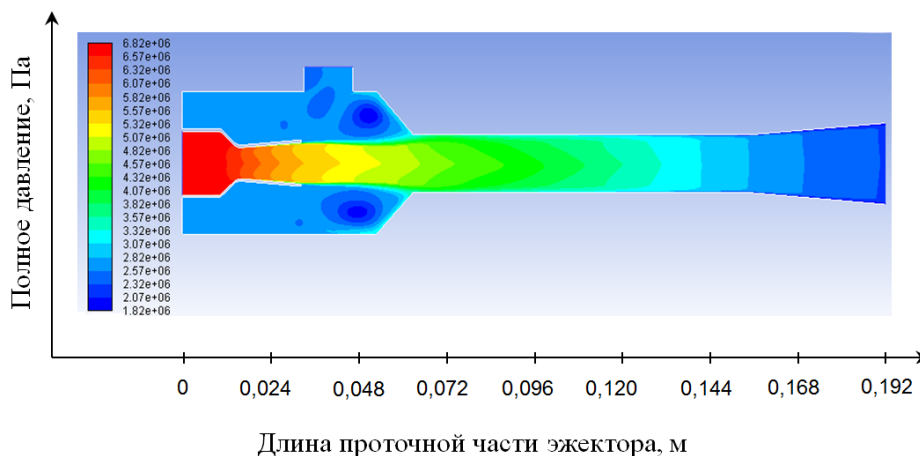


Рисунок 6 – Распределение полного давления в проточной части эжектора

Течение потока газа в эжекторе было определено как стационарное турбулентное течение сжимаемого идеального газа (метан).

При моделировании задавались значения полного давления и температуры активного газа (в зависимости от режима работы КС и места отбора газа: до или

после компримирования) и значения входной скорости потока пассивного газа.

В результате расчетов были найдены значения давления и температуры газа на выходе из газоструйного эжектора (2,043-2,145 МПа- при отборе активного газа на входе в КС и 2,2-2,3 МПа -при отборе активного газа на выходе КС). Температура газа соответственно равна 293,2-298,4 К и 315,9-326,0 К.

В третьей главе разработан способ принятия решений по выбору устанавливаемого на КС оборудования при реконструкции на основе метода анализа иерархий в условиях отклонения значений объема транспортируемого газа от проектных значений.

В целях снижения затрат на собственные технологические нужды в последние годы ПАО «Газпром» производит замену морально и физически устаревших газоперекачивающих агрегатов, эксплуатируемых на компрессорных станциях. Коэффициент полезного действия агрегатов нового поколения достигает 36%.

Ожидаемая экономия энергозатрат при использовании различных типоразмеров современных ГПА по сравнению с агрегатами, находящимися в длительной эксплуатации, составляет от 15 до 40%, причем повышение КПД газоперекачивающих агрегатов на 1% приводит к снижению расхода топливного газа на 1,4 млрд м³ в год. При реализации программы реконструкции КС количество и тип устанавливаемых агрегатов определяется при проектных параметрах работы газопроводов.

Анализ фактических данных показывает увеличение сезонной неравномерности и снижение загрузки магистральных газопроводов (МГ). В работе показано, что за последние 19 лет объем перекачиваемого газа по Новопсковскому коридору МГ, по которому перекачивается 1/5 часть всего добываемого в России газа, сократился на 21,5% .

Отклонение режимов работы ГПА от проектных, приводит к повышению расхода топливного газа на нужды перекачки и к снижению экономических показателей работы КС.

В связи с этим в работе разработан способ принятия решения при выборе

оптимальной компоновки компрессорных цехов в условиях отклонения от проектных значений объемов транспортировки газа.

Для разработки способа применен метод анализа иерархий (МАИ), который позволяет учитывать информацию не только количественного типа, но и качественного, такую как «лучше» или «хуже», «значительно лучше» и т.п. Благодаря специально введенным баллам и шкалам качественная оценка переводится на количественную, что позволяет унифицировать поступающую информацию. Этапы практической реализации процедур МАИ представлены на Рисунке 7.

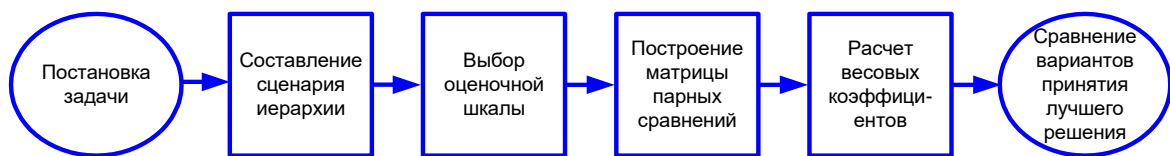


Рисунок 7 – Алгоритм реализации метода анализа иерархий

Увеличение единичной мощности агрегатов может ограничивать возможность применения рациональных режимов и схем включения агрегатов на КС в условиях переменных режимов работы газопроводов.

Рассмотрим пример при замене ГПА стационарного типа ГТК-10-4. Агрегаты установлены на КС по восемь. Рассматривались два варианта компоновки ГПА на КС-6 (1 схема: ГПА-12р (3 шт.) и ГПА-16р (2 шт.) серии «Урал», действующая на данный момент времени и 2 схема: ГПА-25р (3 шт.) серии «Урал» как возможный вариант компоновки ГПА на компрессорной станции).

На основе применения метода иерархий для сравнения альтернативных схем компоновки получена матрица сравнения критериев (рисунок 8).

Итогом анализа является выбор альтернативы с соответствующим наименьшим значением обобщенного приоритета (функции полезности), который рассчитывается по формуле:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i V_{ji}, \quad (6)$$

где V_j – обобщенный приоритет альтернативы (функция полезности);

W_i – вес i -го критерия;

V_{ji} – нормированное значение j -ой альтернативы по i -му критерию.

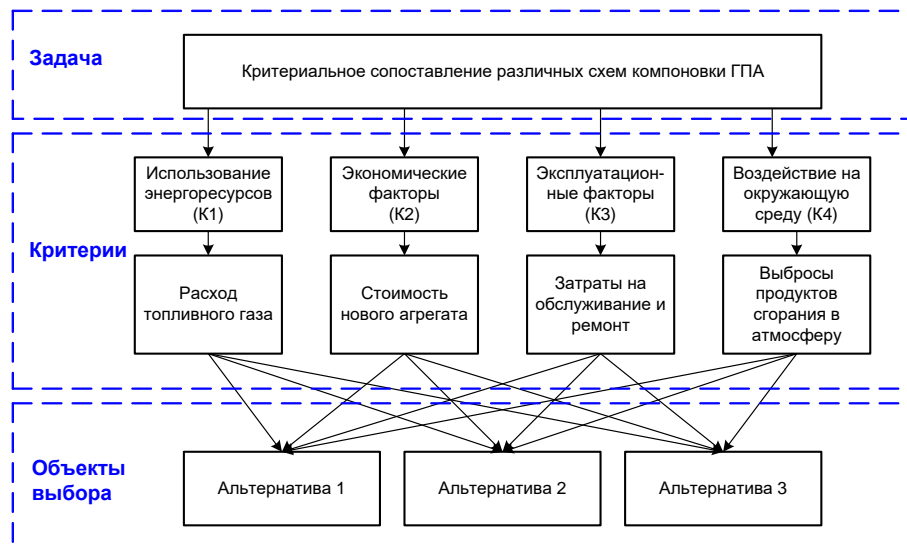


Рисунок 8 – Схема иерархии для выбора оптимальной схемы компоновки ГПА

По результатам анализа установлено, что, несмотря на сезонную неравномерность расхода газа по МГ, удельный расход топливного газа при компоновке КС агрегатами с большой единичной мощностью всегда меньше, чем при компоновке агрегатами меньшей мощности. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что предпочтительным вариантом компоновки рассматриваемой КС будет альтернатива А2, для которой значение функции полезности имеет минимальное значение – 0,281. Альтернатива А2 предусматривает компоновку КС с тремя агрегатами ГПА-25р серии «Урал», из которых два будут находиться в работе по схеме 2×1. Таким образом, наиболее целесообразной из условия минимизации затрат на эксплуатацию будет компоновка КС с увеличенной единичной мощностью агрегатов.

На основе экспериментальных данных также получено, что тепловая эффективность длительно эксплуатируемых АВО газа на МГ снижена и не восстанавливается периодической очисткой трубных пучков, при этом может быть рассмотрен вариант замены аппаратов в период замены ГПА при реконструкции КС.

Установлено, что наилучшим вариантом выбора типа АВО газа для замены будет альтернатива применения аппарата типа 2АВГ-75с, для которой значение функции полезности имеет минимальное значение – 0,18.

Показано, что наилучшим вариантом выбора типа ПУ для замены будет альтернатива применения ПУ типа ГП 628, для которой значение функции полезности имеет минимальное значение – 0,21.

В четвертой главе проведен анализ методов определения показателей энергоэффективности работы газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях, разработана методика определения показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов при ограниченном объеме исходной информации, предложен способ определения базовых эксплуатационных характеристик газотурбинных установок, применяемых при реконструкции на КС.

Для оценки эффективности расходования ТЭР ГПА применяют показатели энергоэффективности. Коэффициент полезного действия ГПА показывает, насколько совершенны процессы превращения и преобразования энергии.

Удельный расход топливного газа характеризует величину расхода природного газа (электроэнергии) газоперекачивающим агрегатом на единицу выполняемой полезной работы.

Так как основным типом привода ЦБК являются газотурбинные установки (86,5 %), то в работе рассматривались показатели энергетической эффективности ГПА с газотурбинным приводом.

В настоящее время КС оснащены компьютерными системами мониторинга, которые способны производить измерения, запись и хранение информации о текущих физических параметрах работы агрегатов КС. Параметры x_i записываются в виде временных рядов с равным интервалом Δt между измерениями.

В работе описана разработка способа расчета показателей эффективности ГПА в условиях доступного или ограниченного объема параметров, контролируемых штатной системой автоматики.

В настоящее время для решения различных задач широко применяются «интеллектуальные» алгоритмы, основанные на нейронных сетях. Основу алго-

ритма составляет целевая функция, определенная для всех p пар обучающих выборок (x_j, d_j) , в виде:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p \left[\sum_{i=1}^k w_i \varphi_i(x_j) - d_j \right]^2, \quad (7)$$

где $\varphi_i(x) = \exp\left[-\frac{1}{2} [Q_i(x - c_i)]^T [Q_i(x - c_i)]\right]$, при этом матрица Q_i имеет произвольную структуру.

Нахождение целевой функции (7) обычно производится методом градиентной оптимизации, при этом необходимо прежде всего получить вектор градиента целевой функции относительно всех параметров сети. Для расчета градиента можно использовать метод сопряженных графов, позволяющий определять любой компонент градиента на основе анализа исходного или сопряженного с ним графа сети. В качестве источника возбуждения в сопряженном графе выступает разностный сигнал $(y-d)$, представляющий собой величину фактического рассогласования. Конкретные составляющие градиента определяются непосредственно по информации о графах:

$$\frac{\partial E}{\partial w_0} = y - d; \quad (8)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_i} = \exp(-0,5 \cdot u_i) \cdot (y - d); \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_j^{(i)}} = v_j^{(i)} = \exp(-0,5 \cdot u_i) w_i (y - d) \sum_{k=1}^N Q_{kj}^{(i)} z_k^{(i)}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial Q_{kj}^{(i)}} = v_j^{(i)} z_j^{(i)} = -\exp(-0,5 \cdot u_i) w_i (y - d) (x_k - c_k^{(i)}) z_j^{(i)}, \quad (11)$$

где $z_j^{(i)} = \sum_{k=1}^N Q_{kj}^{(i)} (x_k - c_k^{(i)})$, $u_i = \sum_{k=1}^N [z_k^{(i)}]^2$.

Для обучения использовалась трехслойная нейронная сеть. Первый слой – набор входных параметров работы ГПА: x_1 – давление масла на входе в ГТУ, Па; x_2 – средняя температура за газогенератором (ГГ), °С; x_3 – температура газа на выходе из ЦБК, °С; x_4 – давление газа на выходе из ЦБК, Па; x_5 – частота вращения ротора силовой турбины (СТ), об/мин; x_6 – частота вращения ГГ, об/мин; x_7 –

давление воздуха за компрессором, Па; x_8 – температура газа за СТ, °С; x_9 – степень повышения давления в ЦБК; x_{10} – давление масла смазки ЦБК, Па.

Выбранные параметры x_i имеют наибольшую корреляционную взаимосвязь с удельным расходом топливного газа $E_{\text{тг}}^{\text{ГТУ}}$ – третий слой, предварительно рассчитанным по параметрам газа в ЦБК.

Как видно из Рисунка 9, характеристика, полученная с использованием параметров работы ГПА, хорошо соотносится с характеристикой удельного расхода топливного газа, рассчитанной по параметрам газа в ЦБК, средняя квадратичная погрешность составляет 1,0 %.

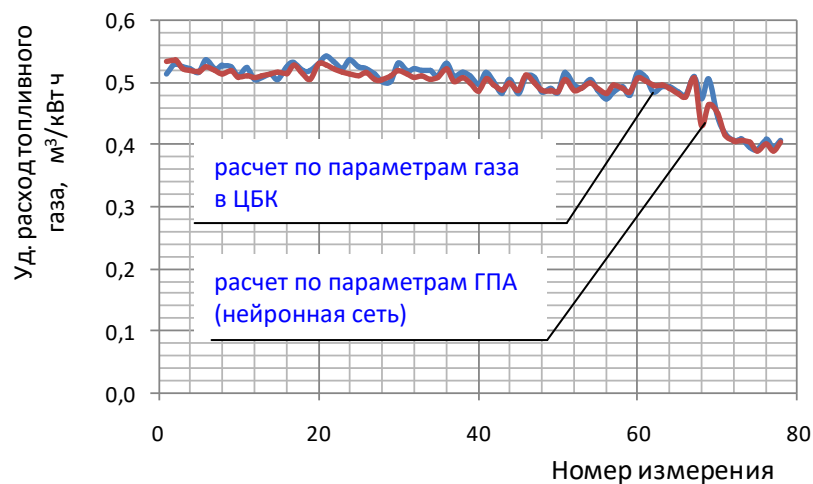
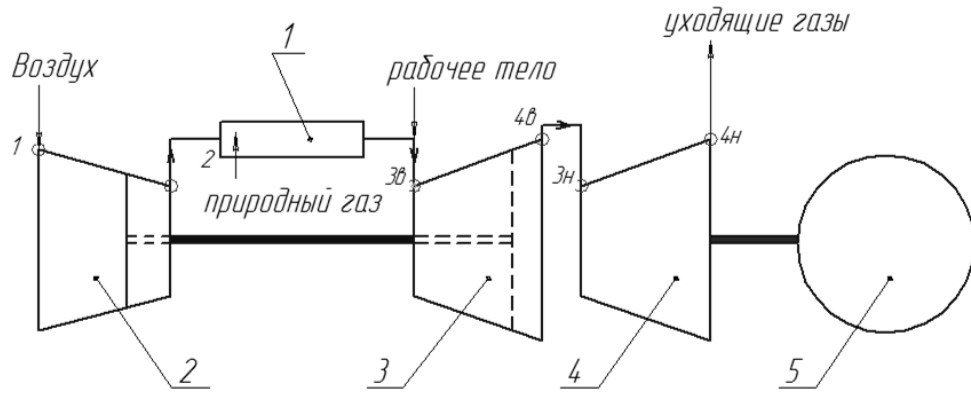


Рисунок 9 – Динамика изменения зависимости удельного расхода топливного газа для ГПА №14

Представляет интерес применение нейронной сети для определения удельного расхода топливного газа другого агрегата – ГПА №15. Средняя квадратичная погрешность моделирования составила 4,2% и не увеличилась по сравнению с агрегатом №14, для которого производилось обучение нейронной сети.

В работе предложен алгоритм определения базовых эксплуатационных характеристик ГТУ двухвального типа (рисунок10), применяемых при реконструкции ГПА на КС. Разработаны аналитические функции для расчета теплоемкости и энтальпии газов в проточной части ГТУ, входящие в алгоритм с учетом температуры и коэффициента избытка воздуха.



- 1 – камера сгорания; 2 – компрессор; 3 – турбина газогенератора (ГГ);
 4 – силовая турбина (СТ); 5 – ЦБК;
 1, 2, 3в, 4в, 3н, 4н – характерные точки контроля параметров работы ГТУ

Рисунок 10 – Принципиальная схема ГПА с двухвальной ГТУ

Аналитическая зависимость теплоемкости отходящего газа от температуры газа (T_{Γ}) и коэффициента избытка воздуха (α) имеет вид:

$$c_p = 0,46 \cdot T_{\Gamma}^{0,146} \cdot \alpha^{-0,045} . \quad (12)$$

Зависимость энтальпии отходящего газа (T_{Γ}) от температуры и коэффициента избытка (α) воздуха имеет вид:

$$i_{\Gamma} = 0,00049 \cdot T_{\Gamma}^{2,07} \cdot \alpha^{-7,62} . \quad (13)$$

Для получения аналитических моделей использовалась функция Кобба-Дугласа, являющаяся моделью сложной степенной регрессии и в общем случае имеющей вид:

$$y_i = f(x_1 \dots x_i) = \beta_0 \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot x_i^{\beta_i} \cdot \varepsilon . \quad (14)$$

В частном случае функция устанавливает зависимость исследуемой переменной от двух факторов:

$$f(x, y) = z = A \cdot x^{\alpha} \cdot y^{\beta} , \quad (15)$$

где A, α, β – коэффициенты эластичности (аппроксимации);

z, x, y – переменные в трехмерной системе координат.

Сопоставление исходных и расчетных данных показывает, что погрешность расчета по моделям (12) и (13) не превышает 1,0 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведено экспериментальное исследование по оценке количественных потерь природного газа через свечи из камер дегазации ЦБК Н370-18-1 в составе ГПА типа ГТК-10М «Рекон». Установлена новая закономерность, представленная в виде эмпирической зависимости потерь природного газа из камеры дегазации центробежных компрессоров ГПА от наработки после капитального ремонта. Для ГПА ГТК-10М «Рекон» с наработкой ЦБК, равной $0,18 \div 22,94$ тыс. ч., потери газа через свечи составили $5,93 \div 14,13$ м³/ч, при нормативном значении, равном $15,43$ м³/ч. Разработана математическая модель для расчета потерь газа через свечи камеры дегазации, учитывающая наработку ЦБК после капитального ремонта, коэффициент технического состояния ЦБК и объемную концентрацию метана в свече. Средняя квадратичная погрешность функциональной зависимости составляет не более 3,0 %.

2 Предложено техническое решение по экономии природного газа сбрасываемого в атмосферу из камеры дегазации ЦБК путем подачи его в систему топливного газа ГПА с помощью эжектора. Предложен вариант конструкции и геометрические размеры эжектора. КПД рассчитываемого эжектора составляет 25,2 %. Экономический эффект при улавливании сбрасываемого газа в атмосферу по всему парку ГПА типа ГТК-10М «Рекон» ПАО «Газпром» по предварительным расчетам составит 312,2 млн руб./год. Срок окупаемости эжекционной установки при оснащении всех ГПА на одной компрессорной станции составит 4,5 года.

3 Предложен способ принятия решения при выборе оптимальной компоновки компрессорных станций основным оборудованием в условиях неравномерности магистрального транспорта газа. На примере реконструкции КС установлено, что при выборе оптимальной компоновки ГПА предпочтительнее вариант компоновки КС с тремя агрегатами ГПА-25р серии «Урал». Наилучшим вариантом выбора типа АВО газа для замены является применение аппарата типа 2АВГ-75с. Показано, что при замене ПУ наилучшим вариантом выбора является применение ПУ типа ГП 628.

4 Получена методика определения удельного расхода топливного газа по основным параметрам ГПА, контролируемым штатной системой автоматики, основанный на применении искусственных нейронных сетей в условиях недостатка информации. При обучении нейронной сети, по данным с вариацией параметров в обучающей выборке 20 %, погрешность обучения не превышает 1 %. Показано, что при использовании нейронной сети для расчета показателей энергоэффективности средняя квадратичная погрешность не превышает 5 %. Предложенная нейросетевая модель может быть интегрирована в стационарные системы мониторинга компрессорной станции.

Основные положения диссертационной работы отражены в следующих работах:

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1 Китаев, С. В. Экспресс-способ определения показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов / С. В. Китаев, Р. Р. Фарухшина // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – №1. – 2015. – С. 19 – 22.

2 Байков, И. Р. Определение показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов с применением нейронных сетей / И. Р. Байков, С. В. Китаев, Р. Р. Фарухшина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №1. – 2015. – С. 141 – 152.

3 Китаев, С.В. Выбор схем компоновки газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях методом анализа иерархий / С. В. Китаев, Р. Р. Фарухшина, О. В. Смородова // Нефтегазовое дело. – №1. – Т.15. – 2017. – С. 128 – 132.

4 Чучкалов, М. В. Экспериментальное определение потерь природного газа из камеры дегазации центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов / М. В. Чучкалов, Э. С. Иванов, И. Р. Байков, С.В. Китаев, Р. Р. Фарухшина // Газовая промышленность. – №1. – 2018. – С. 20 – 24.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2017612138. Китаев С. В., Фарухшина Р. Р., Мастобаев Б. Н. Расчет основных показателей двухвальной газотурбинной установки / ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; заявл. 27.12.2016; опубл. 15.02.2017.

В других изданиях

1 Фарухшина, Р. Р. Исследование способов повышения эффективности газоперекачивающих агрегатов / Р. Р. Фарухшина, С. В. Китаев // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России». – Уфа, 2014. – С. 224 – 226.

2 Китаев, С.В. Моделирование тепловой схемы газотурбинной установки / С. В. Китаев, Р. Р. Фарухшина // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России». – Уфа, 2014. – С. 226 – 227.

3 Китаев, С.В. К расчету показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов / С. В. Китаев, Р. Р. Фарухшина // Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России». – Уфа, 2015. – С. 330 – 332.

4 Фарухшина, Р. Р. Контроль показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации / Р.Р. Фарухшина, С. В. Китаев // Материалы X Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2015». – Уфа, 2015. – С. 214 – 216.

5 Фарухшина, Р. Р. К вопросу определения эффективной мощности газотурбинных установок в условиях эксплуатации / Р. Р. Фарухшина, С. В. Китаев

ев // Материалы VIII Международной научно - практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2015». – Т. 1. – Уфа, 2015. – С. 64 – 165.

6 Фарухшина, Р. Р. Выбор энергоэффективных схем компоновки компрессорных цехов при замене газоперекачивающих агрегатов / Р. Р. Фарухшина, С. В. Китаев // Материалы XI Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2016». – Уфа, 2016. – С. 154 – 156.

7 Фарухшина, Р. Р. Современные тенденции реконструкции компрессорных станций магистральных газопроводов / Материалы 67-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа, 2016. – С.479 – 481.

8 Фарухшина, Р. Р. Выбор схем компоновки компрессорных цехов с применением метода анализа иерархий / Материалы международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А. Х. Мирзаджанзаде. – Уфа, 2016. – С. 158 – 160.

9 Фарухшина, Р. Р. Разработка программного обеспечения для расчета параметров двухвальной газотурбинной установки / Р. Р. Фарухшина, С. В. Китаев // Материалы 68-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа, 2017. – Кн.1. – С. 594 – 595.

10 Китаев, С. В. Сокращение технологических потерь газа на компрессорной станции / С. В. Китаев, Р. Р. Фарухшина, О. В. Смородова // Материалы международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. – 2018. Т. 1. – С.461 – 464.

11 Фарухшина, Р. Р. Повышение эффективности газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях / Р. Р. Фарухшина, Д. В. Шадлов / Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и достижения науки и образования в XXI веке (естественные и технические науки)». – Самара: ООО НИЦ «Поволжская научная корпорация». – 2018. – 157 С.