

На правах рукописи



ГАДЕЛЬШИНА АГАТА РУБЭНОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ
И ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ
НА ГАЗОПРОВОДАХ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2017

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Китаев Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Велиюлин Ибрагим Ибрагимович,**
доктор технических наук, академик РАЕН,
ООО «ЭКСИКОМ», первый заместитель
генерального директора – главный инженер
(г. Москва)

Михайлов Алексей Евгеньевич,
кандидат технических наук,
Уфимский государственный авиационный
технический университет / факультет
"Авиационных двигателей, энергетики и
транспорта", заместитель декана
по научной работе (г. Уфа)

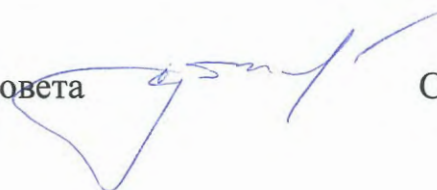
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
технический университет имени
Ю.А. Гагарина»

Защита состоится 7 декабря 2017 года в 14.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.289.04 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 <http://rusoil.net>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение энергоэффективности объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является одним из приоритетных направлений в государственной экономической политике Российской Федерации (РФ). Основным документом, ставящим цели и задачи долгосрочного развития энергетического сектора, является Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. В документе, в частности, уделено особое внимание задаче, без решения которой энергетический сектор неизбежно будет сдерживать социально-экономическое развитие нашей страны, – снижению удельной энергоемкости экономики.

Актуальность внедрения инновационных энергосберегающих технологий определена нормативно-распорядительными документами не только федерального, но и корпоративного уровня. В Концепции энергосбережения и повышения энергетической эффективности ПАО «Газпром» на 2011–2020 г.г. определен потенциал энергосбережения в 28,2 млн. т у. т., реализовать который можно только в случае стопроцентной модернизации основного технологического оборудования, что на практике осуществить невозможно в силу финансовых ограничений.

Объемы реконструкции компрессорных станций (КС) оцениваются в 4,0–5,0% от существующих мощностей в год, при этом потребности газоперекачивающей техники для реконструкции и технического перевооружения КС оцениваются в 1,5 млн. кВт/год установленной мощности. Кроме того, в соответствии с приказом Минэнерго «Об утверждении требований к форме программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности организаций...» при разработке программ энергосбережения необходимо выделение мероприятий, основной целью которых является энергосбережение и повышение энергетической эффективности.

Таким образом, при нарастающих темпах старения эксплуатируемого оборудования и значительных энергозатратах на магистральный транспорт газа

возрастает потребность в инновационных энергосберегающих технологиях, которые позволят достичь экономически реализуемого потенциала энергосбережения для осуществления основной стратегической задачи – снижения энергоёмкости валового внутреннего продукта РФ.

Степень разработанности темы

Исследования в области энергетически эффективной эксплуатации КС отражены в работах следующих отечественных авторов: Поршакова Б.П., Бикчентая Р.Н., Апостолова А.А., Загорученко В.А., Седых А.Д., Вассермана А.А., Зарицкого С.П., Степанова О.А., Лопатина А.С., Никишина В.И., Шотиди К.Х., Толстова А.Г., Калинина А. Ф., Белокопя Н.И., Ванчина А.Г., Купцова С.М., Микаэляна Э.А., Сарданашвили С.А. (РГУ им. И.М. Губкина), Гриценко А.И., Галиуллина З.Т., Ишкова А.Г., Харионовского В.В., Леонтьева Е.В., Козлова С.И., Синицина Ю.Н., Цегельникова Л.С., Щуровского В.А. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), Байкова И.Р., Шаммазова А.М., Гаррис Н.А., Галлямова А.К., Гольянова А.И., Китаева С.В. (Уфимский государственный нефтяной технический университет), В.А. Иванова (Тюменский государственный нефтегазовый университет), Христича А.В. (Киевский политехнический институт) и многих других ученых, результаты научного поиска которых служат развитию газовой отрасли и повышению её энергоэффективности.

Вопросам энергоэффективной эксплуатации оборудования МГ посвящены исследования зарубежных авторов, таких как Uhl A. E. (Американская газовая ассоциация), Harrison M.R., Williamson H.J., Campbell L.M. (Институт газовых технологий и Агентство по охране окружающей среды США), Jeffery B. Greenblatt (Национальная лаборатория имени Лоуренса в Беркли), DeSteese, J.G., Geffen, C.A., Lelieveld, J., Lechtenbohmer, S.; Assonov, S. S.; Brenninkmeije (Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория), C. Borraz-S´anchez (Лос-Аламосская национальная лаборатория), США, Osiadacz A. J. (Институт науки и технологий Университета Манчестера), Великобритания и других.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертации соответствует 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

Повышение эффективности технологий снижения потерь природного газа при организации и проведении ремонтов на магистральных газопроводах.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

1 Исследование динамики изменения объема перекачки природного газа по магистральным газопроводам (МГ) в условиях переменных нагрузок для прогнозирования режимов и схем работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

2 Уточнение расчета расхода топливного газа для планирования технологических режимов работы КС магистральных газопроводов.

3 Разработка технологии откачки природного газа из отключаемого в ремонт участка МГ компрессорной станцией с разнотипными ГПА.

4 Разработка способа, позволяющего повысить эффективность принятия решений при выборе варианта сохранения природного газа при выводе в ремонт участков газопроводов большого диаметра.

5 Повышение энергетической эффективности центробежных компрессоров в составе ГПА уменьшением рециркуляции природного газа.

6 Совершенствование метода расчета необходимого объема газа на продувки при выводе участков МГ в ремонт и пуске в работу после завершения работ.

Методы решения задач

При решении поставленных задач использовались следующие методы: вероятностно-статистические, «иерархий», решения оптимизационных задач и задач управления.

Научная новизна

1 Установлено наличие случайных составляющих в динамике изменения сезонных колебаний расхода газа в магистральном газопроводе и предложено учитывать характеристики стационарной случайной функции при прогнозировании объемов перекачки газа.

2 Получена аналитическая зависимость для определения остаточного давления газа в газопроводе по разности высотных отметок между местом производства работ и продувочным газопроводом и диапазону допустимых значений давления.

3 Разработана математическая модель для планового расчета объема природного газа на продувки участков газопроводов перед пуском их в эксплуатацию, учитывающая протяженность участка, атмосферное давление и температуру.

Теоретическая и практическая значимость работы

По результатам работы сформулированы следующие теоретически значимые выводы, рекомендации и предложения: метод прогнозирования объема перекачки природного газа по МГ, учитывающий сезонную, суточную и часовую неравномерность газопотребления; технология откачки газа из отключаемого в ремонт участка МГ компрессорной станцией, оснащенной разнотипными ГПА; способ повышения точности расчета расхода топливного газа на ГПА для планирования технологических режимов, учитывающий атмосферные условия; аналитическая функция для прогнозного расчета объема газа на продувки отремонтированных участков МГ; метод выбора схемы работы ГПА при

откачке газа из отключаемого в ремонт участка МГ; аналитическая функция для определения остаточного давления газа в МГ перед выводом в ремонт.

Применение рекомендуемых оптимальных схем ускоренной откачки транспортируемого природного газа позволило утилизировать дополнительный объем газа за счет достижения наименьшего остаточного давления в отключаемом участке МГ и последующей откачки его на собственные технологические нужды (СТН) соседнего компрессорного цеха. Данные рекомендации были использованы в ООО «Газпром трансгаз Уфа» 29 апреля 2016 года перед проведением капитального ремонта участка МГ «Уренгой–Петровск» (2035,1 – 2043,3 км) при откачке газа из контура КС-19 на топливный газ ГПА КС-6. Согласно акту № 2 от 30.04.2016 учета израсходованного газа на СТН в Шаранском ЛПУ МГ при проведении организационно-технических мероприятий запас газа в участке МГ до откачки составлял 1024,84 тыс. м³, объем стравливаемого газа составил 653,03 тыс. м³, объем сэкономленного газа – 371,81 тыс. м³ (1,4 млн. руб.).

Предложенные рекомендации выбора режимов работы разнотипных ГПА при включении их по схеме в «параллель» для откачки природного газа из участка МГ перед выводом в его ремонт позволяют снизить расход топливного газа на работу газотурбинной установки на величину до 2% от нормативного расхода, обеспечивая при этом дополнительный энерго- и ресурсосберегающий потенциал эксплуатируемого оборудования.

Рекомендации по выбору режимов разнотипных ГПА используются Башкирским управлением ООО «Газпром газнадзор» с 22 января 2016 года при проведении:

- контроля за эффективным использованием газа при проверке соблюдения Планов мероприятий по энергосбережению ООО «Газпром трансгаз Уфа» и ООО «Газпром трансгаз Чайковский»;

- производственного экологического контроля в составе системы экологического менеджмента при проверке соблюдения требований природоохранного законодательства.

Предложенные оптимальные схемы ускоренной откачки транспортируемого природного газа позволяют получить дополнительный (до 28%) объем газа в пересчете на объем газа в ремонтируемом участке за счет достижения наименьшего остаточного давления в отключаемом участке МГ и последующей поставки его потребителям.

Выбор схемы откачки производится по функции полезности и «весовым» коэффициентам с учетом ранжирования важности рассматриваемых критериев: «объема откачки», «времени откачки» и «расхода газа».

Данные рекомендации использовались ОАО «Специализированное управление № 2» в августе 2016 года при проведении капитального ремонта МГ «Чусовой–Березники–Соликамск 1, 2».

Результаты выполненных в диссертационной работе исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при выполнении выпускных квалификационных работ студентами, обучающимися по направлению «Нефтегазовое дело».

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных, а также оригинальных методов и методик, экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения работы докладывались на 66-ой научно-технической конференции УГНТУ, г. Уфа, апрель 2015 г.; X-ой международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт–2015» (г. Уфа, 2015 г.); VII-ой международной научно-практической конференции «Газораспределительные станции и системы газоснабжения» (г. Москва, 19–23 октября 2015 г.); VIII-ой международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники–2015» (г. Уфа, ноябрь 2015 г.); 67-ой научно-технической конференции УГНТУ (г. Уфа, апрель

2016 г.); XX-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (г. Уфа, 23–25 марта 2016 г.); Международной научной конференции «Европейская наука и технологии» (г. Мюнхен, Германия, 2016 г.); XI-ой международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт–2016» (г. Уфа, 2016 г.); XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2017» (г. Уфа, 2017 г.).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 20 работ, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, 3 статьи в научно-технических журналах, 8 докладов в сборниках научно-технических конференций, 2 патента на полезную модель и изобретение.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций; содержит 150 страниц машинописного текста, в том числе 28 таблиц, 62 рисунка, библиографический список использованной литературы из 140 наименований и 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, раскрыта актуальность темы исследования. Отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дано краткое содержание работы.

В первой главе диссертации произведен анализ нормативной базы по энергосбережению, существующих энергосберегающих технологий в магистральном транспорте газа и перспективы развития энергосберегающих технологий, рассмотрены методы моделирования характеристик, применяемых в магистральном транспорте природного газа, сформулированы задачи диссертационных исследований.

Единая система газоснабжения (ЕСГ) Российской Федерации является крупнейшим в мире непрерывно развивающимся технологическим комплексом (таблица 1), включающим 171,4 тыс. км МГ и газопроводов-отводов, 253 ли-

нейных КС, на которых установлено 3852 газоперекачивающих агрегатов общей мощностью в 46,7 тыс. МВт.

Таблица 1 – Динамика развития газотранспортной системы РФ по основным газотранспортным активам ПАО «Газпром»

| №п/п | Параметр | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Протяженность МГ и отводов в однониточном исчислении, тыс. км | 161,7 | 164,7 | 168,3 | 168,9 | 170,7 | 171,2 | 171,4 |
| 2 | Число линейных КС, шт. | 215 | 211 | 222 | 247 | 250 | 250 | 253 |
| 3 | Число ГПА, шт. | 3659 | 3630 | 3738 | 3820 | 3825 | 3829 | 3852 |
| 4 | Установленная мощность ГПА, тыс. МВт | 42,1 | 41,7 | 43,9 | 45,9 | 46,1 | 46,2 | 46,7 |

Таким образом, в условиях увеличения объемов транспортировки газа при нарастающих темпах старения эксплуатируемого оборудования и роста удельного веса энергозатрат в себестоимости газа при сохраняющейся тенденции падения пластового давления на основных месторождениях Западной Сибири, в газотранспортной отрасли возрастает потребность в инновационных энергосберегающих технологиях, которые позволят достичь экономически реализуемого потенциала энергосбережения для осуществления основной стратегической задачи – снижения энергоемкости внутреннего валового продукта РФ.

По результатам исследований, проведенных в первой главе диссертационной работы, сделаны следующие основные выводы:

1) в газотранспортной отрасли существует потребность в способах и программных средствах, которые дали бы возможность оперативно, в режиме реального времени, рассчитать перспективные плановые показатели транспорта и расхода газа на собственные нужды КС;

2) значительную экономию топливно-энергетических ресурсов можно получить совершенствованием технологических процессов при организации и производстве работ на газопроводах большого диаметра, связанных с сокращением нерациональных потерь газа.

Во второй главе диссертации произведены статистические оценки вида распределения данных по объему перекачки газа по Новопсковскому трехниточному коридору магистральных газопроводов, по которому перекачивается 1/5 часть всего добываемого в РФ природного газа. Получены рекомендации по прогнозированию объемов перекачки природного газа по магистральным газопроводам в условиях снижения загрузки.

Решение задач энергоэффективного обеспечения магистрального транспорта природного газа в условиях снижения загрузки магистральных газопроводов сопровождается усложнением технологий и совершенствованием систем управления потоками газа и выбором рациональных режимов работы оборудования.

Для получения достоверных результатов нормирования и планирования режимов работы КС и схем включения ГПА, проводимой на основе теоретических расчетов, необходимо использовать фактические данные по выбранным критериям за сравнительно продолжительные промежутки времени. Основным целевым показателем в магистральном транспорте природного газа является объем перекачки в единицу времени.

На рисунке 1 приведено распределение показателей неравномерности подачи газа по Новопсковскому коридору МГ.

Наиболее наглядно неравномерность подачи газа в течение года характеризуется показателем β , описывающим относительную величину изменения колебаний в подаче газа по газопроводу в течение года.

Из рисунка 1 следует, что, несмотря на наличие буферных потребителей газа и подземных газохранилищ, значение показателя β варьируется в значительных пределах 0,061–0,375. Неравномерность подачи газа особенно существенно увеличилась в последнее десятилетие, например в 2015 году (по сравнению с 1996 годом) неравномерность подачи газа, характеризуемая показателем β , возросла на 16,4%.

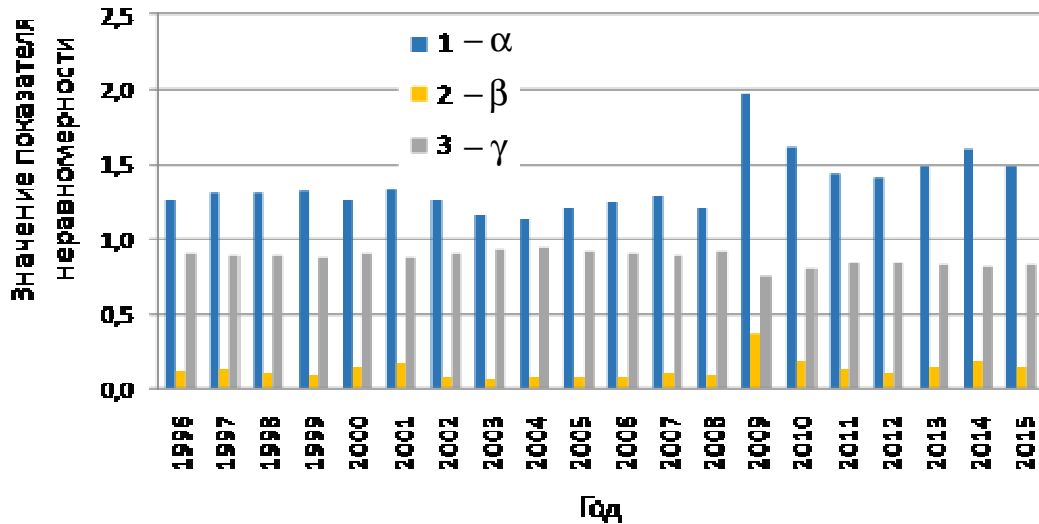


Рисунок 1 – Годовые показатели расхода газа по Новопсковскому коридору МГ

Снижение объемов перекачки с одновременным увеличением неравномерности подачи газа может быть причиной повышенного расхода топливного газа на нужды перекачки и снижения экономических показателей вследствие изменения параметров работы КС.

Получены рекомендации по прогнозированию объема перекачки природного газа по МГ в условиях снижения загрузки. На основе гипотезы о нормальном распределении, установлено, что с вероятностью 99,97% среднемесячный объем перекачки природного газа по Новопсковскому трехниточному коридору МГ составляет не менее 4114,969 млн.м³/мес.

Так как динамика объема перекачки имеет случайную составляющую, то для моделирования зависимости объема перекачки природного газа по МГ предложено использовать характеристику стационарной случайной функции – спектральную плотность:

$$Q_k(\tau) = \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^n \sqrt{Q_i^2 + Q_{i+1}^2} \sin(\omega_j \tau + \phi_j) . \quad (1)$$

На рисунке 2 приведена зависимость объема перекачки за два года (2014–2015 гг.).

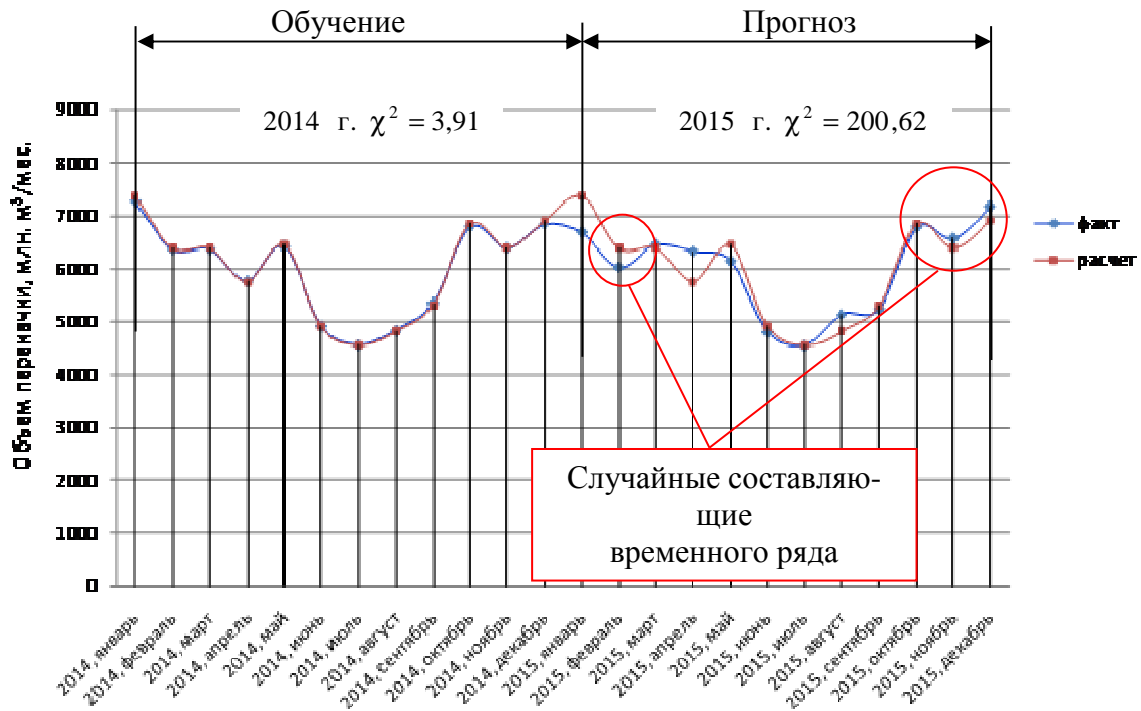


Рисунок 2 – Зависимость изменения объема перекачки природного газа за 2014–2015 гг.

(обучение модели произведено по данным одного года 2014 г.)

Как следует из рисунка, при обучении функции критерий χ^2 составил величину 3,91, при прогнозе на год – 200,62, что является приемлемым результатом с вероятностью, равной 99,7. Предлагаемая стационарная случайная функция достаточно хорошо учитывает гармонические колебания временного ряда (сезонную неравномерность газопотребления) и случайные составляющие (часовую и суточную неравномерность газопотребления).

При планировании технологических режимов работы КС производился расчет расхода топливного газа. Расход топливного газа на ГПА, тыс. м³/ч, определяется по формуле:

$$q_{\text{тр}} = q_{\text{тр}}^0 \left(0,75 \frac{N_i}{N_e^0} + 0,25 K_{p0} \sqrt{\frac{T_a}{288}} \right) K_{\text{тр}} \cdot K_n, \quad (2)$$

где $q_{\text{тр}}^0 = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot N_e^0}{\eta_e \cdot Q_H^{\text{тр}}}$ – номинальный расход топливного газа;

$K_{\text{ГТУ}}$ – коэффициент технического состояния ГТУ по топливному газу;

N_i – мощность, потребляемая ЦБК, МВт;

T_a – расчетная температура атмосферного воздуха (принимают равной средней температуре атмосферного воздуха расчетного периода (без поправок) $T_a^{\text{ср.}}$ согласно СП 131.13330.2012), °С;

η_e – номинальный КПД ГТУ;

$Q_{\text{н}}^{\text{Г}}$ – низшая теплота сгорания топливного газа, кДж/нм³.

В работе установлено, что использование в расчетах прогнозной температуры $T_a^{\text{ср.}}$ с применением функции (1) позволяет повысить точность расчета расхода топливного газа на 5%.

В третьей главе диссертации предложен способ оптимизации режимов работы разнотипных ГПА, установленных на КС, выполнен анализ возможных схем включения ГПА, получен способ принятия решения выбора наилучшего варианта схемы включения ГПА при откачке газа из отключаемого в ремонт участка МГ.

В последнее время компрессорные станции при реконструкции оснащаются разнотипными агрегатами, которые наилучшим образом обеспечивают эффективность компримирования газа, но при этом усложняется выбор и поддержание рациональных режимов работы разнотипных агрегатов при их работе в «параллель».

Предусматривается откачка газа разнотипными ГПА, работающими по схеме в «параллель», при этом режим работы ГПА устанавливается при работе ГТУ и ЦБК в области их максимального коэффициента полезного действия (КПД).

На рисунке 3 приведена схема откачки газа из отключаемого в ремонт участка МГ 2020,2-2–043,3 км протяженностью 23,1 км.

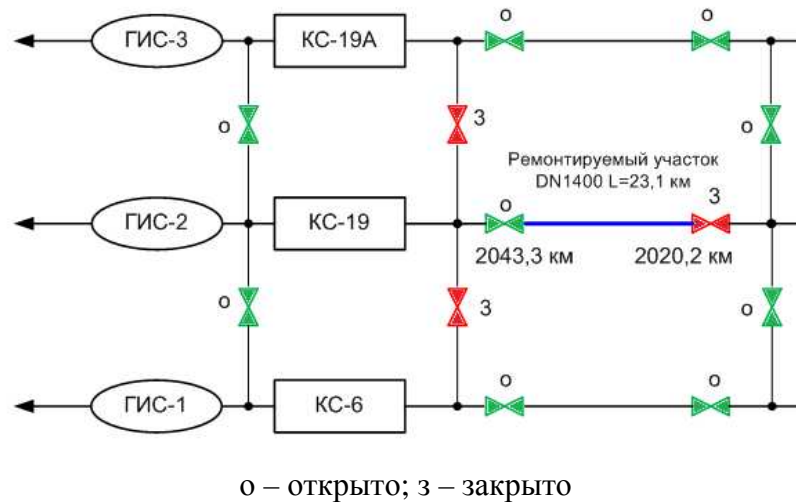


Рисунок 3 – Схема отключения газа из отключаемого в ремонт участка МГ

При отключке газа из отключаемого участка МГ на КС-6 работали в «параллель» два агрегата ГПА-12р «Урал» и ГПА-16р «Урал» с полнонапорными центробежными компрессорами СПЧ 370 1,45/76-12/6500 и СПЧ 370 1,4/76-16/5300 соответственно. Расчетная схема включения ГПА представлена на рисунке 4.

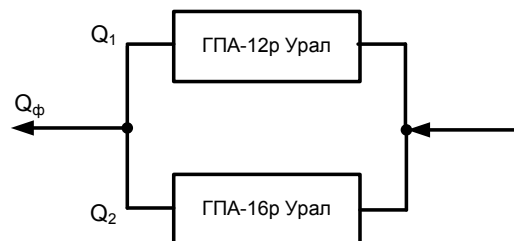


Рисунок 4 – Расчетная схема включения ГПА на КС-6

В таком случае оптимальная подача каждого из ГПА в группе параллельно работающих (с точки зрения максимального суммарного КПД) определена как:

$$Q_i = \frac{\ln(\alpha_i b_i)}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i}} \cdot (Q_\phi - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i} \ln(\alpha_i b_i)) \cdot \quad (3)$$

В среднем за время отключки увеличение КПД за счет оптимизации составит 0,1%. Максимальное значение увеличения КПД может составить до

2,0% для случая отклонения частоты вращения вала ЦБК от номинальных значений.

Экономия топливного газа при откачке газа двумя параллельно работающими агрегатами ГПА-12р «Урал» и ГПА-16р «Урал» при времени откачки 10 минут составит 115,8 м³. Количество откачанного из участка газа составит 573 тыс. м³. При тарифе на природный газ 3,8 руб./м³ энергосберегающий эффект в денежном выражении составит 2,2 млн. руб.

В период реконструкции на КС могут эксплуатироваться ГПА с неполнонапорными ЦБК совместно с ГПА, имеющими полнонапорные ЦБК.

Например, на КС-19 с учетом проведенного анализа возможны следующие схемы включения ГПА при откачке газа:

1 Последовательное включение двух агрегатов ГПА-10 «Волна» по схеме (1×2) – В1;

2 Последовательное включение двух групп агрегатов ГПА-10 «Волна» по схеме (2×2) – В2;

3 Откачка одним агрегатом ГПА-16р «Уфа» по схеме (1×1) – В3;

4 ГПА-16р «Уфа», включенный в «параллель» с группой (двух) последовательно включенных агрегатов ГПА-10 «Волна» по схеме (1×2, 1×1) – В4;

5 Последовательное включение трех агрегатов ГПА-10 «Волна» по схеме (1×3) – В5;

6 Последовательное включение двух групп по три агрегата ГПА-10 «Волна» по схеме (2×3) – В6.

Вместе с тем каждый вариант, обеспечивая определенный уровень технологических показателей работы системы (объем откачанного газа, количество ГПА при откачке, схема включения), характеризуется определенным уровнем экономической и экологической эффективности.

Количество показателей при откачке газа может быть и большим, при этом принятие решения по такому большому количеству показателей осуществить достаточно затруднительно.

Для поддержки принятия решения, выбора схемы включения ГПА при откачке газа из отключаемого в ремонт участка МГ в работе применен метод анализа иерархий.

При использовании данного метода возможные схемы включения ГПА при откачке газа представляются альтернативными вариантами. Определим следующие критерии выбора приоритетной схемы:

- объем откачанного газа;
- время откачки;
- расход топливного газа за время откачки.

Предположим, что некое конкретное лицо, принимающее решение (ЛПР), сравнивает попарно критерии с точки зрения их сравнительной важности. Запишем результаты сравнений в виде таблицы 2, в которой, например утверждение вида «объем откачки в 2 раза важнее времени откачки» записывается в виде дроби 2/1.

Таблица 2 – Результаты сравнений критериев с точки зрения их сравнительной важности

| Критерий | Объем откачки | Время откачки | Расход топливного газа за время откачки |
|---|---------------|---------------|---|
| Объем откачки | 1/1 | 2/1 | 3/1 |
| Время откачки | 1/2 | 1/1 | 4/1 |
| Расход топливного газа за время откачки | 1/3 | 1/4 | 1/1 |

Веса выбранных критериев составили следующие значения: $w_1=0,46$ (объем откачанного газа), $w_2=0,42$ (время откачки), $w_3=0,12$ (расход топливного газа за время откачки).

Таким образом, с учетом предпочтения ЛПР, аналитическая процедура рекомендует ему выбрать стратегию В4, т.е. откачку газа по варианту: ГПА-16р «Уфа», включенный в «параллель» с группой (двух) последовательно включенных агрегатов ГПА-10 «Волна», схема 1×2 и 1×1.

В четвертой главе диссертации предложены рекомендации по техническому обеспечению эффективности работы ГПА при реализации ресурсосберегающих мероприятий; получена аналитическая зависимость для расчета расхода природного газа на продувки при производстве работ на газопроводах для планирования расхода газа на СТН; получена аналитическая функция, позволяющая в зависимости от разности высотных отметок между местом проведения работ, продувочным (свечным) газопроводом и допустимой зоной определить остаточное давление в газопроводе.

Конструкция ЦБК предусматривает наличие байпаса газа из разгрузочной задуммисной полости в камеру всасывания ЦБК, направленные на обеспечение симметричности смешения основного и перепускаемого потоков газа и достижение равномерности распределения поля скоростей между ними на входе в рабочее колесо, в которых перепуск осуществляется через трубопровод; через полость колена диффузора компрессора и кольцевой зазор между стенкой диафрагмы статорной части и покрывным диском рабочего колеса; через коллектор в крышке корпуса и газоход; через разделительное ребро с внутренней полостью и газоход.

Общий недостаток выше упомянутых устройств заключается в низких значениях КПД и величины политропной работы сжатия из-за неэффективной циркуляции уже компримированного газа в сменной проточной части (СПЧ) ЦБК.

Результатом предлагаемого технического решения являются: снижение неэффективной циркуляции газа в СПЧ ЦБК; повышение КПД за счет уменьшения температуры газа во всасывающей камере ЦБК и снижения эксплуатационных затрат на сжатие; обеспечение подогрева поступающего в аккумулятор масла в период суточных и сезонных колебаний температуры окружающего воздуха; обеспечение подогрева газа, поступающего на СТН, в требуемом температурном диапазоне перед входом в блок топливного и пускового газа (БТПГ).

Технический результат достигается тем, что в действующий байпас газа между разгрузочной задуммисной полостью и камерой всасывания ЦБК врезают дополнительные контуры, в качестве которых используют газопроводы для отвода газа, соответствующего по своим параметрам (давление и температура) компримированному газу, в линии перепуска газа в нагнетательный газопровод и в систему топливного газа на ГПА.

В работе показано, что при реализации предлагаемого технического решения, за счет уменьшения неэффективной рециркуляции природного газа с выхода на вход ЦБК увеличение КПД центробежного компрессора составит не менее 0,7%.

Экономия топливного газа на ГПА за счет увеличения КПД ЦБК при реализации технического решения составит 12,5 м³/ч (300 м³/сут.). При внедрении данного технического решения на четырех ГПА, работающих на КС в среднем в течение года, экономия топливного газа составит не менее 400 тыс. м³.

После проведения капитального ремонта МГ производится вытеснение воздуха из участка природным газом при давлении не более 0,1 МПа или азотом при давлении не более 0,15 МПа в месте подачи. Вытеснение считается законченным, если содержание кислорода в выходящей газовой смеси не превышает 2% (по объему). По окончании вытеснения газовой смеси продувочная свеча закрывается.

В настоящее время в ПАО «Газпром» применяется отечественный газоанализатор АНК-7631 Микро-О₂-ВД с выносными датчиками для контроля содержания кислорода в выходящей газовой смеси, с помощью которого удастся значительно сократить расчетное время продувки для полного вытеснения газовой смеси и снизить потери газа при продувках.

При планировании принимается на продувку трехкратный объем газа, по факту получается меньшее время и объем газа, необходимого на продувку. В этих условиях актуальной является задача прогнозного расчета объема и времени на продувку участков МГ перед пуском в работу.

С помощью стандартных алгоритмов решения задач линейного программирования определены коэффициенты K_k в линейном уравнении множественной регрессии:

$$V_{\text{пр.}(p)} = K_0 + \sum_{k=1}^N K_k X_k = K_0 + K_1 \cdot L_{\text{уч.}} + K_2 \cdot P_a + K_3 \cdot t_a \quad (4)$$

$$\text{из условия } \sum_{i=1}^n (V_{\text{пр.}(p)i}(X) - V_{\text{пр.}(ф)i}(X))^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где n – объем выборки.

На рисунке 5 представлены зависимости $V_{\text{пр.}}$, полученные по фактическим данным и по уравнению регрессии (4).

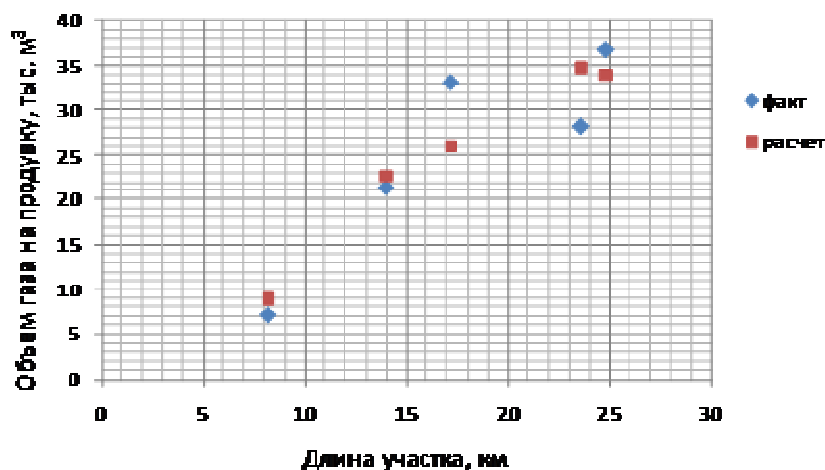


Рисунок 5 – Зависимости изменения $V_{\text{пр.}}$, полученные по фактическим данным и по уравнению регрессии

Сравнение расчетных и экспериментальных данных (рисунок 4) показывает хорошую сходимость результатов. Коэффициент согласия χ^2 составляет величину 3,93 (отклонение 0,5%).

Получена математическая функция, позволяющая в зависимости от разности высотных отметок между местом проведения работ и продувочным газопроводом (z), допустимой зоной ($P_{\text{кр}}$) определить остаточное давление в газопроводе ($P_{\text{м}}$):

$$P_{\text{м}} = 0,54 \cdot z + P_{\text{кр}} - 0,04. \quad (6)$$

Сопоставление экспериментальных и модельных данных показывает, что средняя квадратическая погрешность расчета по предлагаемой модели составляет в среднем 3%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Сформулированы рекомендации по прогнозированию объема перекачки природного газа по МГ в условиях снижения загрузки. Подтвердив гипотезу о нормальном распределении, мы установили, что среднемесячный объем перекачки газа по трехниточному Новопсковскому коридору МГ DN 1400 составит не ниже 4114,969 млн м³/мес. Предложен способ, позволяющий прогнозировать объем перекачки природного газа по МГ, учитывающий сезонную, суточную и часовую неравномерность газопотребления (гармонические колебания со случайными амплитудами и случайными фазами).

2 Предложен способ повышения точности расчета расхода топливного газа на ГПА для планирования технологических режимов, учитывающий случайные составляющие атмосферных параметров. Проведенный анализ показал, что использование в расчетах прогнозной температуры с применением предлагаемой функции позволяет повысить точность расчета расхода топливного газа на 5%.

3 Разработана усовершенствованная технология откачки газа из отключаемого в ремонт участка компрессорной станцией, оснащенной разнотипными ГПА. Предусматривается откачка газа разнотипными агрегатами, работающими по схеме «в параллель», при этом режим работы агрегатов устанавливается в области максимального коэффициента полезного действия. Показано, что максимальная величина увеличения КПД может достигать 2%.

4 Предложен способ принятия решения выбора схемы включения ГПА при откачке газа из отключаемого в ремонт участка МГ, основанный на методе анализа иерархий. Выбор альтернативной схемы включения ГПА при откачке газа производится по функции полезности, полученной с учетом весовых коэффициентов, учитывающих важность рассматриваемых критериев, таких как «объем откачки газа», «время откачки», «расход топливного газа за время от-

качки». Установлено, что могут применяться трехступенчатые схемы включения агрегатов, при этом дополнительный объем откаченного газа за счет достижения меньшего остаточного давления в отключаемом участке МГ составит до 28%.

5 Предложен и теоретически обоснован способ отбора газа из байпаса между разгрузочной задуммисной полостью и камерой всасывания ЦБК. Энергосберегающий эффект достигается сокращением объемов рециркуляции газа с выхода на вход ЦБК, при этом удается повысить КПД центробежного компрессора за счет снижения политропной работы сжатия. Установлено, что при реализации предлагаемого технического решения увеличение КПД центробежного компрессора составит 0,7%.

6 На основе фактических статистических данных получена аналитическая функция для прогнозного расчета объема газа на продувки отремонтированных участков МГ. Получена аналитическая функция, позволяющая в зависимости от разности высотных отметок между местом проведения работ и продувочным газопроводом в зоне допустимых значений давления определить остаточное давление в газопроводе. Сопоставление исходных (графических) и расчетных (аналитических) данных показывает, что средняя квадратическая погрешность расчета по предлагаемой функции составляет в среднем 3%.

Основные положения диссертационной работы отражены в следующих работах:

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ

1. Галикеев, А.Р. Повышение роли газораспределительных станций при реализации ресурсосберегающих технологий в магистральном транспорте газа / А.Р. Галикеев, С.В. Китаев, А.Р. Гадельшина // Территория "НЕФТЕГАЗ". – №9. – 2015. – С.28–32.

2. Галикеев, А.Р. Определение энергетической эффективности компрессорных станций на магистральных газопроводах / А.Р. Галикеев, С.В. Китаев, А.Р. Гадельшина // Территория "НЕФТЕГАЗ". – №10. – 2015. – С.72–75.

3. Гадельшина, А.Р. Современное состояние и перспективы развития технологий ресурсосбережения ПАО «Газпром» / А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев, А.Р. Галикеев // Территория "НЕФТЕГАЗ". – №12. – 2015. – С.136–139.

4. Гадельшина, А.Р. Экологический аспект решения проблемы ресурсосбережения в ПАО «Газпром» / А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев, А.Р. Галикеев // Территория "НЕФТЕГАЗ". – №7–8. –2016. – С.102–107.

5. Гадельшина, А.Р. Практическое решение задачи экономии природного газа путем выработки его разнотипными газоперекачивающими агрегатами, работающими по схеме в параллель / А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев, А.Р. Галикеев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – №1.– 2016. – С.5–8.

6. Гадельшина, А.Р. Исследование параметров работы газоперекачивающих агрегатов при выработке газа из отключенного смежного участка магистрального газопровода / А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев, А.Р. Галикеев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – №3. – 2016. –С.8–10.

7. Галикеев, А.Р. Техническое обеспечение эффективности эксплуатации газоперекачивающего оборудования в условиях реализации ресурсосберегающих мероприятий/ А.Р. Галикеев, С.В. Китаев С.В., А.Р. Гадельшина// Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – №2. –2017. – С. 5-8.

Патенты на полезную модель и изобретение

1. Патент на полезную модель РФ №161853. Китаев С.В., Гадельшина А.Р., Галикеев А.Р., Чучкалов М.В. Газоперекачивающий агрегат / ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; заявл. 17.12.2015; опубл. 10.05.2016.

2. Патент на изобретение РФ №2617523. Китаев С.В., Мастобаев Б.Н., Галикеев А.Р., Гадельшина А.Р. Способ управления работой компрессорной станции при выработке природного газа из отключаемого на ремонт участка магистрального газопровода/ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; заявл. 12.04.2016; опубл. 25.04.2017.

В других изданиях

1. Иванов, Э.С. Экспериментальное определение и моделирование расчетных характеристик аппаратов воздушного охлаждения газа на магистральных газопроводах / Э.С. Иванов, С.В. Китаев, А.Р. Гадельшина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №4. – 2015. – С.118–131.

2. Гадельшина, А.Р. Анализ эффективности применения мобильных компрессорных станций в магистральном транспорте газа / А.Р. Гадельшина, Р.Р. Сабитов, С.В. Китаев // Материалы 66-й научно-технической конференции. –УГНТУ. – Уфа, 2015. – С.133.

3. Китаев, С.В. Оптимизация режимов работы газоперекачивающих агрегатов в системах компримирования компрессорных станций / С.В. Китаев, А.Р. Гадельшина, Р.Р. Сабитов // Материалы X Международной учебно-научно-

практической конференции «Трубопроводный транспорт–2015». – УГНТУ. – Уфа, 2015. – С.116-117.

4. Галикеев, А.Р. Сбережение природного газа при устранении «энергетически узких мест» газотранспортной системы / А.Р. Галикеев, А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев // Материалы VIII Международной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники -2015»: в 3 т./редкол.: Исмаков Р.А. и др. – Уфа: УГНТУ, 2015. – С. 167–168.

5. Гадельшина, А.Р. Исследование работы компрессорной станции при выработке газа из отключаемого в ремонт участка газопровода большого диаметра / А.Р. Гадельшина // Материалы XI Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт–2016». – УГНТУ. – Уфа, 2016. – С.37–39.

6. Галикеев, А.Р. Применение инновационных энергосберегающих технических средств и технологий на газораспределительных станциях / А.Р. Галикеев, А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев // Материалы XI Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2016». – УГНТУ. – Уфа, 2016. – С.40–42.

7. Галикеев, А.Р. Анализ параметров перекачки природного газа по магистральным газопроводам / А.Р. Галикеев, А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России». – Уфа, 2016. – С.293-294.

8. Гадельшина, А.Р. Моделирование характеристик остаточного давления газа в участке газопровода большого диаметра при производстве ремонтных работ / А.Р. Гадельшина, А.Р. Галикеев, С.В. Китаев // Материалы Международной научной конференции «Европейская наука и технологии». – Мюнхен, Германия, 2016. – С.335-338.

9. Китаев, С.В. Прогнозирование объема перекачки природного газа при снижении загрузки магистральных газопроводов / С.В. Китаев, А.Р. Галикеев, А.Р. Гадельшина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №3.– 2016. – С.106–118.

10. Гадельшина, А.Р. Планирование параметров работы магистральных газопроводов с учетом стохастической составляющей временных трендов / А.Р. Гадельшина, С.В. Китаев, А.Р. Галикеев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №4. –2016. – С.83–103.

11. Гадельшина, А.Р. Исследование динамики перекачки природного газа по магистральным газопроводам/А.Р. Гадельшина // Материалы XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2017». – УГНТУ. – Уфа, 2017. – С.55–56.