

На правах рукописи

БЕЛОУСОВ Артём Евгеньевич



**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА
РЕДУЦИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В
СИСТЕМЕ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ
ПОМОЩИ ДЕТАНДЕРОВ ОБЪЕМНОГО ТИПА**

*Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент

Самигуллин Гафур Халафович

Официальные оппоненты:

Медведева Оксана Николаевна

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика», профессор

Рассохин Виктор Александрович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели», профессор

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится 11 апреля 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.13 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 11 февраля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ТАНАНЫХИН
Дмитрий Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Система газораспределения России расширяется и увеличивается количество пунктов редуцирования газа (ПРГ), требующих бесперебойного электроснабжения.

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 года №321 об утверждении государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики», а также Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, целью энергетической политики России является эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора.

В процессе редуцирования в дросселирующих регуляторах давления ПРГ поток газа теряет свою энергию, которую можно утилизировать и преобразовать в электроэнергию для обеспечения автономности систем связи, контроля, управления, освещения и сигнализации, повысив, тем самым, эффективность системы газораспределения.

Существующие средства утилизации энергии потока газа на основе детандер-генераторов динамического типа в сетях газораспределения работают неудовлетворительно из-за недостаточных величин расхода и высокой неравномерности отбора газа потребителями.

Поэтому задача совершенствования способа редуцирования природного газа в системе газораспределения для обеспечения автономности электропотребляющих систем ПРГ является актуальной. Её решением может стать использование детандеров объемного типа.

Степень разработанности темы исследований

Первый детандер, построенный французским ученым Ж.Клодом в 1902-1904 гг., был поршневым. Детандеры объемного типа (поршневые, винтовые, спиральные), как и турбодетандеры, наиболее широко применяются в холодильной технике.

Детандеры более редких видов роторно-поршневых объемных машин разрабатывались в 1980-1990 гг. в институтах НАМИ, ВНИИМотопром и СКБ РПД ВАЗ.

Вопросами создания детандер-генераторов объемного типа для энергосбережения занимались Аксенов Д. Т., Прилуцкий А.И., Герцен А. Н., Зарницкий Г.Э. и Репин Л.А.

Для использования в сетях газораспределения существуют опытные образцы шестеренных детандер-генераторов производства ООО «Газпром ВНИИГАЗ» мощностью 2,5 кВт и ООО «ИНЖПРОГРУПП» мощностью 0,5 ÷ 5,0 кВт, а также разработанный в ИПУ РАН способ утилизации энергии сжатого газа на основе объемно-роторной лопастной машины. Изучением применения героторных и спиральных детандеров в настоящее время занимаются в ООО «РЕАМ-РТИ» и МГТУ им. Баумана.

В США и Европе с 2007 года героторные детандеры объемного типа широко применяются в генерирующих установках. За рубежом наибольшая степень разработанности наблюдается при использовании винтовых детандеров (Langson Energy, США), кроме этого, ведутся разработки поршневых, пластинчатых и, так называемых, «квази-турбин».

Анализ существующих исследований и патентной документации показал, что использование объемных детандеров для редуцирования с попутной утилизацией энергии потока природного газа осложняется проблемами эксплуатации в нестационарных условиях малых величин расходов и перепадов давлений.

Цель диссертационной работы

Совершенствование процесса редуцирования природного газа в сетях газораспределения путём применения объемных расширительных машин, позволяющих утилизировать энергию газового потока.

Основные задачи исследования

1. Выполнить анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов в области утилизации энергии природного газа при понижении его давления в пунктах редуцирования (ПРГ).

2. Разработать математическую модель процесса редуцирования природного газа с помощью детандер-генераторного регулятора объёмного типа (ДГР) в нестационарных условиях с последующим определением его геометрических параметров, устойчивости функционирования и эффективности утилизации энергии потока газа.

3. Выполнить экспериментальные исследования процессов редуцирования и утилизации энергии газового потока с использованием ДГР.

4. Разработать методику определения параметров процесса редуцирования в ДГР, обеспечивающих эффективность утилизации энергии природного газа, с учётом прогнозных данных о неравномерностях его потребления.

5. Провести технико-экономический анализ эффективности применения способа редуцирования и утилизации энергии с помощью ДГР в системе газораспределения.

Идея работы

Обеспечить требуемый уровень выходного давления, а также утилизировать энергию потока природного газа при расходах $10 \dots 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ и перепадах давлений $0,025 \dots 0,295 \text{ МПа}$ в сетях газораспределения можно путём редуцирования природного газа с использованием объёмных расширительных машин.

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель процесса редуцирования газа в объёмном детандере в условиях нестационарного режима отбора газа и изменения давления питающего трубопровода.

2. Получены новые зависимости, устанавливающие связь между величинами давления и температуры газа до и после ДГР, его расхода, мощности утилизации, частоты вращения и радиуса ротора детандер-генераторного регулятора объёмного типа.

Защищаемые научные положения

1. Повышение эффективности процесса редуцирования в случае нестационарного движения газа при перепадах давлений от 0,025 МПа до 0,295 МПа и расходах 10 ... 500 нм³/ч достигается путем понижения давления с попутной утилизацией энергии природного газа в объемном детандер-генераторном регуляторе (ДГР) для получения электроэнергии.

2. Определение параметров процесса редуцирования с использованием ДГР для обеспечения эффективности утилизации энергии природного газа в диапазонах входных давлений от 0,03 МПа до 0,3 МПа и мощностей, требуемых электрооборудованию пунктов редуцирования (ПРГ), в пределах от 0,02 кВт до 4,0 кВт необходимо производить с использованием разработанной математической модели и полученных зависимостей механических характеристик ДГР от газодинамических параметров потока газа до и после ПРГ.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный способ исследований, включающий теоретические и экспериментальные методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов; разработку математической модели и её решение с помощью Wolfram Mathematica; проведение экспериментов на основе созданной натурной модели линии редуцирования, оснащенной регулируемым детандером объемного типа.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена: результатами лабораторных исследований; сопоставлением теоретических и экспериментальных исследований с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Практическая значимость работы

1. Обосновано применение способа редуцирования природного газа с помощью детандер-генераторных регуляторов объемного типа (ДГР) в системе газораспределения, а также разработаны устройства для его реализации (патент РФ 2620624, патент РФ 2662784).

2. Разработана методика определения параметров процесса редуцирования в ДГР, обеспечивающих эффективность утилизации энергии природного газа, с учётом прогнозных данных о неравномерностях его потребления.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 23-25 апреля 2014 г.), 55-ой Научной международной конференции (г. Краков, 11 декабря 2014 г.), IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 16-18 ноября 2016 г.), 71-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ 2017» (г. Москва, 18-20 апреля 2017 г.), Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018» (г. Санкт-Петербург, 12-13 апреля 2018 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, 3 из которых в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК. Получены 2 патента на изобретение.

Личный вклад соискателя

Обосновано применение способа редуцирования природного газа в системе газораспределения при помощи ДГР и предложены устройства для его реализации; разработана математическая модель процесса редуцирования газа в ДГР при нестационарных условиях его питания; создана натурная модель линии редуцирования, оснащенной ДГР; проведены экспериментальные исследования; разработана методика определения радиуса и частоты вращения ротора ДГР.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 127 страницах текста, состоит из введения, четырёх глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 100 источников и 5 приложений, содержит 54 иллюстрации и 25 таблиц.

Автор выражает благодарность наставнику Кабанову О.В.,

научному руководителю Самигуллину Г.Х. и профессору Николаеву А.К. за помощь в работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, её научная новизна, практическая значимость, определены цель и задачи исследования.

В первой главе проведен анализ основных факторов, влияющих на процесс редуцирования. Проанализированы потребности пунктов редуцирования газа (ПРГ) и станций электрохимической защиты (ЭХЗ) в электроэнергии. Рассмотрены основные недостатки способа редуцирования дросселированием: потери энергии потока газа, сложность точного поддержания рабочего давления, ручное управление режимами течения газа.

Проанализированы способы редуцирования и обеспечения автономности электроснабжения ПРГ и ЭХЗ при помощи следующих устройств: термоэлектрогенераторов, микрогазотурбинных электрогенераторов, турбодетандеров различного вида, вихревых труб и устройств, использующих возобновляемые источники энергоресурсов.

Во второй главе приводятся теоретические исследования работы линии детандерного редуцирования в нестационарных условиях.

Предложены технические решения и устройства (рис. 1) для реализации способа редуцирования природного газа в системе газораспределения при помощи детандер-генераторных регуляторов объемного типа (ДГР), обеспечивающего поддержание давления газа на выходе из ПРГ с попутной утилизацией энергии потока газа.

Регулирование происходит путём перераспределения потоков газа между детандером 6 и регулирующим клапаном 8 в зависимости от степени его открытия пропорционально отклонению величины давления газа на выходе из ПРГ от заданной величины. Кроме этого, регулирование может осуществляться корректированием расхода газа через детандер вследствие увеличения или уменьшения частоты вращения его ротора при изменении момента сопротивления генератора посредством варьирования отбираемой от него мощности.

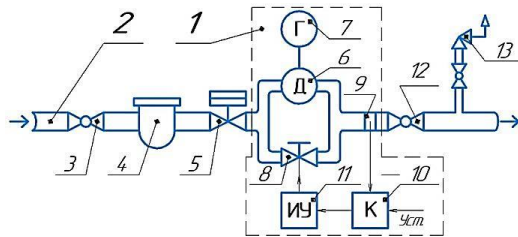


Рисунок 1. Принципиальная схема линии редуцирования (Патент РФ 2620624):
 1 – ДГР; 2 – линия редуцирования; 3 – входная запорная арматура; 4 – устройство очистки; 5 – предохранительный запорный клапан; 6 – объемный детандер;
 7 – электрогенератор; 8 – регулирующий клапан; 9 – датчик давления;
 10 – контроллер; 11 – исполнительное устройство регулирующего клапана;
 12 – выходная запорная арматура; 13 – предохранительный сбросной клапан.

На примере пластинчатой расширительной машины (рис. 2) была разработана математическая модель процесса редуцирования давления природного газа с использованием ДГР в условиях неравномерного отбора газа потребителями и изменения давления питающего трубопровода, включающая в себя логические условия перехода замкнутых между рабочими лопатками объемов газа через зоны нагнетания – расширения – выхлопа.

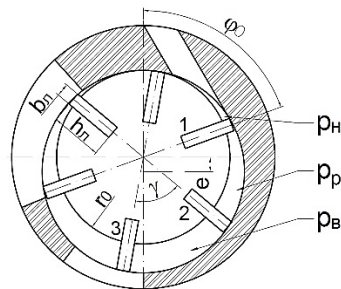


Рисунок 2. Поперечный разрез пластинчатого детандера: 1 – рассматриваемая лопатка №1; 2 – рассматриваемая лопатка №2; e – эксцентриситет; r_0 – радиус ротора детандера; γ – угол между двумя соседними лопатками; ϕ_0 – угол конца зоны нагнетания b_l, h_l – толщина и высота лопатки; p_n, p_p, p_v – соответственно давления природного газа в камерах нагнетания, расширения и выхлопа детандера

Математическая модель (1) с учётом применения пропорционально-интегрального закона регулирования в системе

стабилизации частоты вращения ротора ДГР (а) или давления за ПРГ (б) имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 j_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = p_{\text{н}} l h_1 \left(r_0 + \frac{h_1}{2} \right) + p_{\text{п}} l (h_2 - h_1) \left(r_0 + h_1 + \frac{h_2 - h_1}{2} \right) - p_{\text{в}} l h_2 \left(r_0 + \frac{h_2}{2} \right) - \\
 \quad - \Psi \cdot \sigma m_{\text{л}} r_{\text{цт}} \cdot \omega^2 (r_0 + h_{\text{ср}}) - M_{\text{Г}}; \\
 \frac{dp_{\text{н}}}{dt} = \frac{k}{V_{\text{н}}} \left(RT_1 G_{\text{н}} - p_{\text{н}} \cdot \frac{dV_{\text{н}}}{dt} \right); \\
 \frac{dp_{\text{п}}}{dt} = \frac{p_{\text{п}}}{z_{\text{п}}} \frac{dz_{\text{п}}}{dt} - \frac{p_{\text{п}} (Rz_{\text{п}} + c_{\text{в}})}{V_{\text{п}} c_{\text{в}}} \cdot \frac{dV_{\text{п}}}{dt}; \\
 \frac{dp_{\text{в}}}{dt} = \frac{p_{\text{в}}}{z_{\text{в}}} \frac{dz_{\text{в}}}{dt} - \frac{kRT_{\text{в}} z_{\text{в}}}{V_{\text{в}}} G_{\text{в}} - \frac{p_{\text{в}} (Rz_{\text{в}} + c_{\text{в}})}{V_{\text{в}} c_{\text{в}}} \frac{dV_{\text{в}}}{dt}; \\
 \frac{dp_{\text{с}}}{dt} = \frac{p_{\text{с}}}{z_{\text{с}}} \frac{dz_{\text{с}}}{dt} + \frac{z_{\text{с}} R k}{V_{\text{с}}} (T_{\text{в}} G_{\text{в}} + T_{\text{рк}} G_{\text{рк}} - T_{\text{с}} G_{\text{п}}) \\
 \quad \text{(а) } \frac{dI}{dt} = K_i [\omega(t) - \omega_0] \\
 \quad \text{(б) } \frac{dI}{dt} = K_i [p_{\text{п}}(t) - p_0] \\
 \frac{dT_{\text{н}}}{dt} = \frac{(kT_1 - T_{\text{н}}) z_{\text{н}} R T_{\text{н}}}{p_{\text{н}} V_{\text{н}}} G_{\text{н}} - \frac{z_{\text{н}} R T_{\text{н}}}{c_{\text{в}} V_{\text{н}}} \frac{dV_{\text{н}}}{dt}; \\
 \frac{dT_{\text{п}}}{dt} = - \frac{z_{\text{п}} R T_{\text{п}}}{c_{\text{в}} V_{\text{п}}} \frac{dV_{\text{п}}}{dt}; \\
 \frac{dT_{\text{в}}}{dt} = - \frac{(k+1) z_{\text{в}} R T_{\text{в}}^2}{p_{\text{в}} V_{\text{в}}} G_{\text{в}} - \frac{z_{\text{в}} R T_{\text{в}}}{c_{\text{в}} V_{\text{в}}} \frac{dV_{\text{в}}}{dt} \\
 \frac{dT_{\text{с}}}{dt} = \frac{z_{\text{с}} R T_{\text{с}}}{p_{\text{с}} V_{\text{с}}} \left((kT_{\text{в}} - T_{\text{с}}) G_{\text{в}} + (kT_{\text{рк}} - T_{\text{с}}) G_{\text{рк}} - (k-1) T_{\text{с}}^2 G_{\text{п}} \right)
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $T_{\text{н}}$, $T_{\text{п}}$, $T_{\text{в}}$ – соответственно температуры природного газа в камерах нагнетания, расширения и выхлопа ДГР; $G_{\text{н}}$, $G_{\text{в}}$ – массовые расходы нагнетания природного газа в ДГР и из него; $z_{\text{н}}$, $z_{\text{п}}$, $z_{\text{в}}$ – соответственно сжимаемости природного газа в камерах нагнетания, расширения и выхлопа; $V_{\text{н}}$, $V_{\text{п}}$, $V_{\text{в}}$ – соответственно объемы камер нагнетания, расширения и выхлопа; $j_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции ротора ДГР; ω – частота вращения ротора детандера; l – ширина рабочей лопатки детандера; dV – элементарный объем рабочей полости пластинчатого детандера; h_1 , h_2 – соответственно высоты выступов из ротора лопатки №1 и №2 (рис. 2), с углом поворота на γ большим чем у лопатки h_1 ; r_0 – радиус ротора детандера; Ψ – количество лопаток; σ – коэффициент трения скольжения лопаток о статор; $m_{\text{л}}$ – масса одной лопатки; $M_{\text{Г}}$ – момент сопротивления генератора; $p_{\text{с}}$, $z_{\text{с}}$, $T_{\text{с}}$ – давление, сжимаемость и температура газа после

воссоединения потоков, прошедших через детандер и регулирующий клапан; V_c – рассматриваемый объем зоны воссоединения потоков; $G_{рк}$ – массовый расход газа через регулирующий клапан; $G_{п}$ – массовый расход газа через трубопровод потребителей; $I(t)$ – интегральное звено закона регулирования.

Для решения разработанной математической модели (1) были использованы логические условия (2), основанные на применении счетчика поворотов ротора детандера (n) на угол γ , обеспечивающие непрерывность расчета процесса последовательного прохождения газа через рабочие камеры объемного детандера. Начальные значения физических величин, характеризующих состояние природного газа в каждой последующей камере, приравниваются к конечным значениям этих величин в предыдущей камере:

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \begin{cases} n + 1, \text{ если } \varphi = \varphi_0 + (n + 1)\gamma \\ n, \text{ в других случаях} \end{cases} \\ p_n = \begin{cases} p_1, \text{ если } p_n \geq p_1 \\ p_n, \text{ в других случаях} \end{cases} \\ p_p = \begin{cases} 0, \text{ если } (n + 2)\gamma < \varphi < \varphi_0 + n\gamma \\ p_n, \text{ если } \varphi = \varphi_0 + n\gamma \\ p_p, \text{ в других случаях} \end{cases} \\ p_v = \begin{cases} p_p, \text{ если } \varphi = (n + 2)\gamma \\ p_c, \text{ если } p_v \leq p_0 \\ p_v, \text{ в других случаях} \end{cases} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где φ – угол поворота ротора объемного детандера.

Логические условия включены в цикл явного 4-хэтапного метода расчета системы дифференциальных уравнений Рунге-Кутты, выполненного в среде Wolfram Mathematica.

Модель позволяет рассчитать изменение

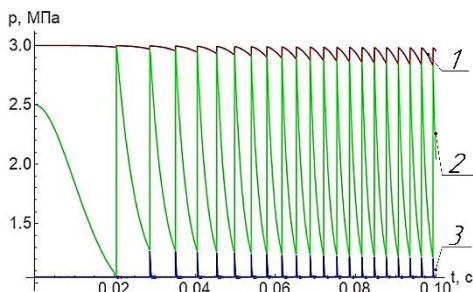


Рисунок 3. Разгон ДГР: 1 – изменение давления в зоне нагнетания; 2 – в зоне расширения; 3 – в зоне выхлопа

газодинамических параметров газа в любой момент времени прохождения им ДГР (рис. 3).

В качестве примера возмущения для определения устойчивости функционирования ДГР создавалось ступенчатое изменение величины отбора газа потребителями в диапазоне $\pm 30\%$, а также величины входного давления в диапазоне $\pm 5\%$ от значений в установившемся режиме. Показано, что, с учетом линейной расходной характеристики регулирующего клапана, параметры линии редуцирования не выходят за допустимые пределы (на рис. 4 – 5: 1 – частота вращения ротора ДГР; 2 – давление за ДГР).

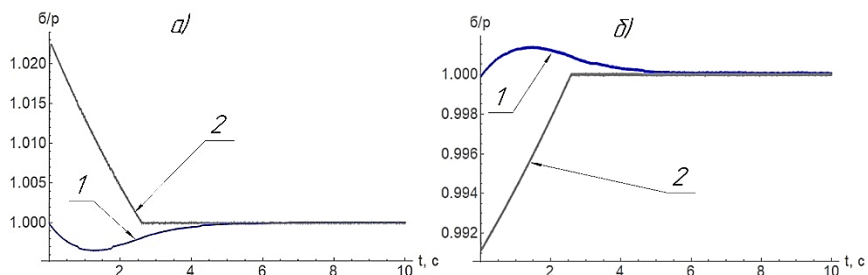


Рисунок 4. Переходные процессы после возмущений
а) Понижения отбора газа потребителями; б) Повышения отбора газа

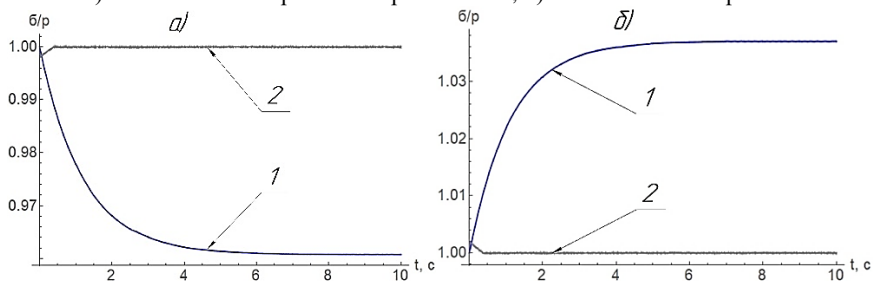


Рисунок 5. Переходные процессы после возмущений
а) Понижения давления питающего газопровода; б) Повышения давления

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований газодинамических и механических параметров детандерного редуцирования, а также апробации модели (1), которые были получены на экспериментальной установке (рис. 6),

схема которой выполнена в соответствии с патентами РФ 2620624 и 2662784 (рис. 1).

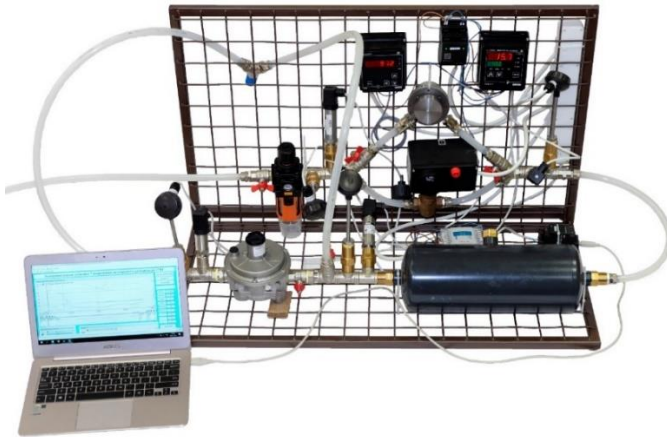


Рисунок 6. Экспериментальная установка

По результатам опытов были получены регрессионные уравнения зависимости частоты вращения ротора детандера (ω^3) от давлений до (p_1) и после (p_c) детандер-генераторного регулятора для 4-х диапазонов давлений: 1 – $p_1 = 50 \div 80$ кПа, $p_c = 15 \div 25$ кПа; 2 – $p_1 = 80 \div 130$ кПа, $p_c = 25 \div 35$ кПа; 3 – $p_1 = 130 \div 210$ кПа, $p_c = 35 \div 55$ кПа; 4 – $p_1 = 210 \div 340$ кПа, $p_c = 55 \div 85$ кПа. Диапазон перепадов давлений составил: $\Delta p_d = 25 \div 285$ кПа.

На основании этих регрессионных уравнений были рассчитаны зависимости для определения утилизированной мощности (N_d^3) и расхода газа через детандер (Q_d^3) (рис. 7а).

Был проведен анализ и сравнение эффективности двух вариантов устройств для реализации способа редуцирования (рис. 8б, 7б, табл. 1):

1. приоритетное выполнение объемным детандер-генераторным регулятором (ДГР) функции утилизационной установки в случае стабилизации системой регулирования частоты вращения его ротора при использовании дополнительного регулятора давления (РД) для поддержания давления на выходе из ПРГ;

2. одновременное выполнение ДГР функций утилизационной установки и РД в случае самостоятельной стабилизации давления на выходе из ПРГ.

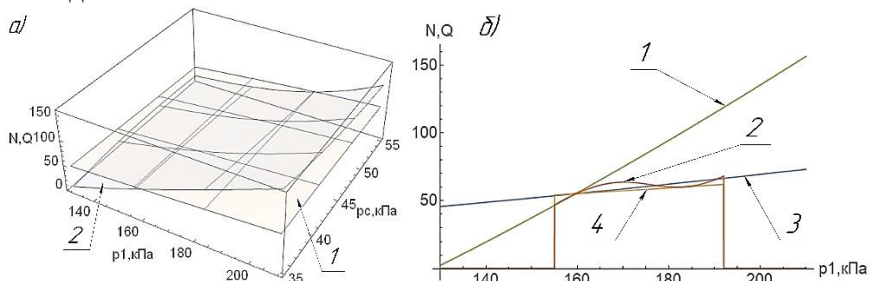


Рисунок 7. Характеристики на примере диапазона давлений $p_1 = 130 \div 210$ кПа, $p_c = 35 \div 55$ кПа.

- а) 1 – частота вращения ротора ДГР, об/с; 2 – мощность ДГР, Вт;
 3 – объемный расход через детандер, $\text{м}^3/\text{ч}$
 б) 1 – мощность ДГР (вариант 2), Вт; 2 – мощность ДГР (вариант 1), Вт;
 3 – расход газа через детандер (вариант 2), $\text{м}^3/\text{ч}$; 4 – расход (вариант 1), $\text{м}^3/\text{ч}$

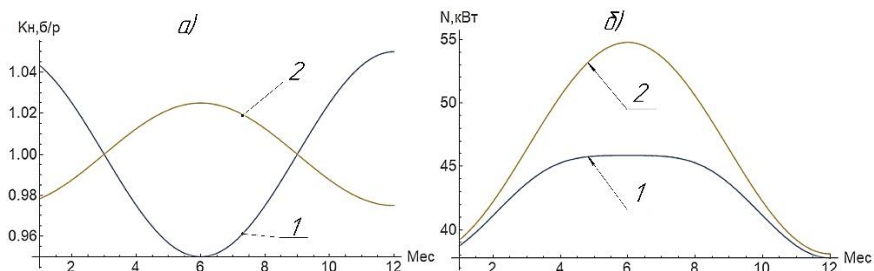


Рисунок 8. а) 1 – пример неравномерности отбора газа потребителями по месяцам;
 2 – пример изменения давления газа в питающей магистрали
 б) 1 – утилизированная мощность (вариант 1), кВт · ч; 2 – утилизированная мощность (вариант 2), кВт · ч

Интегральные коэффициенты полезного действия ($\eta_{\text{год}}^\omega$ и $\eta_{\text{год}}^{p_c}$) рассчитываются как отношения интегральных утилизированных мощностей (3,4) к интегральной располагаемой мощности за год (5) с учетом неравномерностей отбора газа потребителями и изменения давления питающего трубопровода (6) (рис. 8а). Коэффициенты неравномерности отбора газа потребителями и давления питающего газопровода за год

$$K_{Q,p}^H = 1 + 0,5[(K_M^{max} - 1) + (K_M^{min} - 1)] \cos\left(\frac{2\pi \cdot 730 \cdot \tau}{8760}\right), \quad (6)$$

где K_M^{max} и K_M^{min} – соответственно максимальный и минимальный коэффициент неравномерности.

Интегральные утилизированные мощности за год:

$$N_{год}^\omega = \int_1^{12} N_d^\omega(\tau) d\tau; \quad (3)$$

$$N_{год}^{p_c} = \int_1^{12} N_d^{p_c}(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $N_d^\omega(\tau)$ и $N_d^{p_c}(\tau)$ – соответственно утилизированные ДГР мощности по месяцам для вариантов 1 и 2 (см. выше); τ – месяц.

Интегральная располагаемая мощность за год

$$N_{год} = \int_1^{12} z_{cp} \frac{k}{k-1} RT_1(\tau) \left[1 - \left(\frac{p_2(\tau)}{p_1(\tau)} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] d\tau, \quad (5)$$

где z_{cp} – средний коэффициент сжимаемости газа; $p_1(\tau)$, $p_2(\tau)$ – соответственно давления газа до и после ПРГ; $T_1(\tau)$ – температура газа на входе в ПРГ.

Таблица 1 – Располагаемые и утилизированные мощности за год

№	p_1	p_c	$N_{год}$	$N_{год}^\omega$		$N_{год}^{p_c}$	
	кПа	кПа	кВт·ч	кВт·ч	$\eta_{год}^\omega, \%$	кВт·ч	$\eta_{год}^{p_c}, \%$
1	50 ÷ 80	15 ÷ 25	1847,4	83,3	4,5	96,9	5,2
2	80 ÷ 130	25 ÷ 35	3585,1	257,8	7,2	208,8	5,8
3	130 ÷ 210	35 ÷ 55	9371,5	481,3	5,1	518,3	5,5
4	210 ÷ 340	55 ÷ 85	22199,7	1798,5	8,1	2264,6	10,2

Результаты анализа (табл. 1) показывают большую эффективность варианта одновременного выполнения ДГР ролей утилизационной установки и РД.

В четвертой главе разработана методика определения радиуса и частоты вращения ротора ДГР, а также выполнен технико-экономический анализ эффективности применения способа понижения давления и утилизации энергии с помощью ДГР в системе газораспределения.

Используя математическую модель (1) были проведены численные виртуальные эксперименты. При помощи регрессионного анализа их результаты были обработаны с получением зависимостей частоты (ω^T), утилизированной мощности (N_d^T), расхода газа через детандер (Q_d^T) и величины отклонения частоты вращения ротора ДГР

от уставки при создании ступенчатого изменения давления на выходе из ПРГ ($d\omega^T$) от давлений до (p_1) и после (p_c) ДГР, а также от радиуса его ротора (r_0) (рис. 9). На основе этих зависимостей следует осуществлять подбор характеристик ДГР под требуемые параметры редуцирования и качества генерируемой электроэнергии.

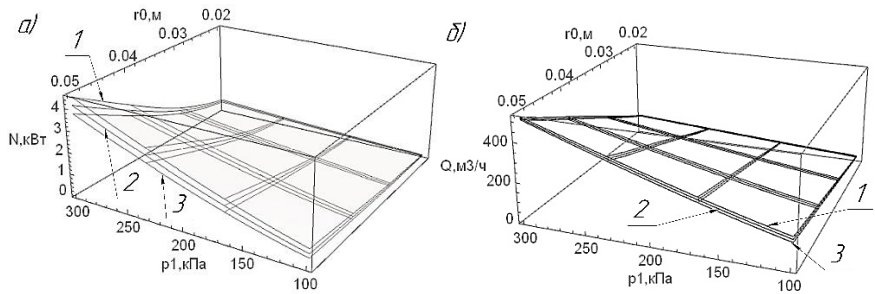


Рисунок 9. Визуализация полученных зависимостей для трёх уровней давлений за детандерным регулятором: 1 – $p_c = 2$ кПа; 2 – $p_c = 16$ кПа; 3 – $p_c = 30$ кПа
 а) Мощность детандера в зависимости от радиуса его ротора и входного давления;
 б) Расход через детандер в зависимости от радиуса его ротора и входного давления.

Разработана методика определения радиуса и частоты вращения ротора детандер-генераторного регулятора объемного типа (ДГР), обеспечивающих оптимальные условия утилизации энергии потока газа в нестационарных условиях при поддержании давления за ПРГ на заданном уровне, использующая прогнозные данные о неравномерностях.

Зависимости мощности (7) и адиабатного КПД (8) от частоты вращения ротора ДГР имеют максимумы (рис. 8а), которым соответствуют функции частот $\omega_N = f(p_1, p_c, r_0)$ и $\omega_\eta = f(p_1, p_c, r_0)$.

Мощность детандера определяется по зависимости (рис. 10а)

$$N_d = \eta_d \omega \Psi A_d K_{л,,} \quad (7)$$

где Ψ – количество рабочих камер; η_d – механический КПД; $K_{л}$ – коэффициент учета толщины лопаток; ω – частота вращения ротора ДГР; $A_d = A_n + A_p - A_b - A_{тр}$ – работа газа, совершаемая во время его расширения в ДГР.

Адиабатный коэффициент полезного действия (рис. 10а) определяется по формуле

$$\eta_{ад} = \frac{N_{д}}{N_{потр}} \quad (8)$$

где $N_{потр}^{ад} = \frac{z_{ср} k p_{н.у}}{(k-1)T_{н.у}} T_1 \left(1 - \left(\frac{p_c}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) Q_{д}$ – теоретическая потребляемая мощность детандера.

Рассматриваемое время работы детандерного регулятора (ДГР) можно разделить на время с наилучшими условиями питания, когда возможна максимальная вырабатываемая мощность ($N_{д} \rightarrow \max$), и на время с наихудшими условиями, когда из-за снижения расхода газа через ДГР необходимо повысить КПД утилизации энергии потока газа ($\eta_{ад} \rightarrow \max$).

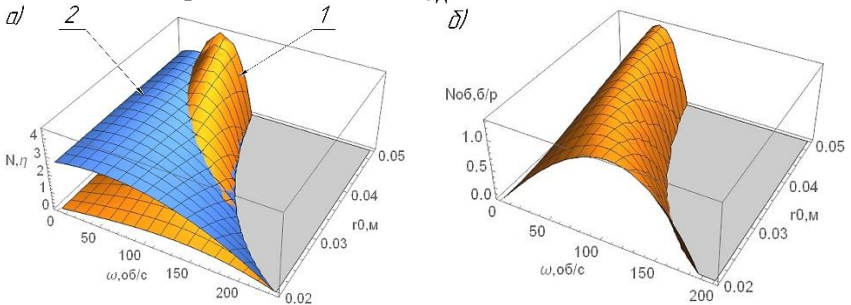


Рисунок 10. а) 1 – мощность, кВт; 2 – адиабатный КПД ($\cdot 10^{-1}$), %
 б) Зависимость обобщенной функции оптимизации от частоты вращения и радиуса ротора детандера

Таким образом, обобщенная функция максимизации мощности за рассматриваемый период времени рассчитывается по формуле (рис. 10б)

$$N_{об} = a_{л} \frac{N_{д}^{a_{л}}}{N_{д}^{Nmax}} + a_{х} \frac{N_{д}^{a_{х}}}{N_{д}^{\eta max}} \rightarrow \max,$$

где $N_{д}^{a_{л}}$ и $N_{д}^{a_{х}}$ – соответственно вырабатываемые мощности ДГР при лучшем и худшем питании; $N_{д}^{Nmax}$ и $N_{д}^{\eta max}$ – соответственно нормированные вырабатываемые мощности при ω_N и ω_{η} ; $a_{л} = \int (f(t) - K_M^0)$ и $a_{х} = \int (K_M^0 - f(t))$ – коэффициенты веса, учитывающие продолжительность и величину отклонения от среднего значения (рис. 11а).

Обобщенная функция максимизации $N_{об}$ имеет максимум при частоте вращения $\omega_{об}$ (рис. 11б). Однако, в зависимости от

условий питания реальная частота вращения ротора детандера, при поддержании давления на выходе в допустимом диапазоне, может варьироваться. Соответственно существуют максимально возможная (ω_{max}) и минимально возможная (ω_{min}), а также средняя возможная (ω_{cp}) частоты вращения ротора детандера, рассчитываемые на основании зависимостей, полученных путём обработки результатов численного виртуального эксперимента по модели (1).

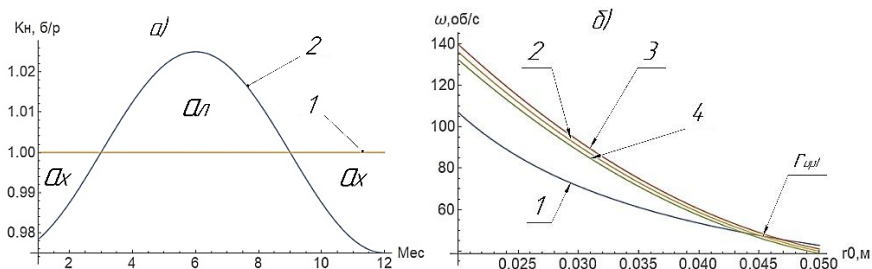


Рисунок 11. а) 1 – среднее значение коэффициента неравномерности за период (K_n^0); 2 – функция изменения коэффициента неравномерности ($f(t)$)
 б) Зависимости: 1 – средней частоты вращения, как решения обобщенной функции;
 2 – средней частоты вращения, построенной на основе допустимых отклонений выходного давления; 3 – частоты вращения в лучших условиях питания;
 4 – частоты вращения в худших условиях питания от радиуса ротора детандера

Пересечением линий зависимостей частот $\omega_{об}$ и ω_{cp} от радиуса ротора является точка, соответствующая значению величины радиуса ротора детандера объемного типа (рис. 9б), обеспечивающего эффективность утилизации энергии потока газа в нестационарных условиях при условии поддержания давления за ПРГ на заданном уровне.

Проведен технико-экономический анализ эффективности применения способа редуцирования с использованием ДГР. Исходные данные были приняты с учетом затрат на создание экспериментальной установки.

Если тариф на электроэнергию будет расти в среднем на 4,0% в год, а стоимость эксплуатационных затрат, соразмерно с инфляцией, – так же на 4,0% в год, то, при норме дисконта 20%, проект электрификация ГРП при помощи ДГА 1 кВт является целесообразным: срок окупаемости – 7 лет, индекс доходности – 0,28, внутренняя норма доходности 27,42%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате проведения диссертационных исследований было предложено решение народно-хозяйственной задачи, имеющей важное значение в области газораспределения. Научные результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. На основе выполненного анализа современного состояния эксплуатации пунктов редуцирования (ПРГ), с учётом выявленной необходимости совершенствования процесса понижения давления в нестационарных условиях газораспределения при перепадах давлений 0,025 ... 0,295 МПа и расходах 10 ... 500 $\text{нм}^3/\text{ч}$, обосновано применение способа редуцирования природного газа с помощью детандер-генераторных регуляторов объёмного типа (ДГР) и разработаны устройства для его реализации (патент РФ 2620624, патент РФ 2662784).

2. Разработана математическая модель процесса редуцирования газа в ДГР при условиях нестационарного режима отбора газа и изменения давления питающего трубопровода, позволяющая определять устойчивость функционирования ДГР, газодинамические характеристики газового потока, геометрические параметры элементов объёмного детандера и эффективность утилизации энергии природного газа.

3. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований были получены аналитические зависимости, устанавливающие связь между величинами давлений газа до p_1 и после ПРГ p_c , его расхода Q_d^T , утилизированной мощности N_d^T , частоты вращения ω^T и радиуса ротора r_0 ДГР, позволяющие определять основные характеристики ДГР с учётом требуемых параметров редуцирования.

4. Разработана методика определения технологических параметров редуцирования газового потока, основанная на использовании обобщённой функции максимизации мощности утилизации ДГР, с учётом адиабатного КПД, неравномерностей потребления природного газа, радиуса ротора детандера и частоты его вращения, обеспечивающих эффективность утилизации энергии потока газа в диапазоне мощностей от 0,02 кВт до 4,0 кВт.

5. Выполнен технико-экономический анализ эффективности применения способа редуцирования с помощью ДГР в системе газораспределения, который показал, что проект электрификация ПРГ при помощи ДГР 1 кВт имеет срок окупаемости – 7 лет, индекс доходности – 0,28.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В изданиях из перечня, рекомендованных ВАК
Минобрнауки России:**

1. Белоусов А.Е. Метод расчета динамических характеристик детандер-генератора объемного типа / А.Е. Белоусов, О.В. Кабанов, М.В. Волошин // Технологии нефти и газа. – 2016. – №3. – С. 51-55.

2. Белоусов А.Е. Моделирование газодинамических процессов, связанных с утилизацией энергии природного газа на малых пунктах редуцирования единой системы газоснабжения при помощи регулируемого детандер-генератора объемного типа / А.Е. Белоусов, Г.Х. Самигуллин // Территория Нефтегаз. – 2017. – №7-8. – С. 18-23.

3. Белоусов А.Е. Экспериментальные исследования процесса редуцирования природного газа с попутной утилизацией его энергии при помощи детандера объемного типа в нестационарных условиях / А.Е. Белоусов, Г.Х. Самигуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №5 (специальный выпуск 18). – 20 с.

Патенты на изобретения:

1. Пат. 2620624 Российская Федерация, МПК F17D 1/04 Детандер-генераторный агрегат с системой его регулирования / А.Е. Белоусов, О.В. Кабанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СПГУ – №2016128415; заявл. 12.07.2016; опубл. 29.05.2017, Бюл. №16.

2. Пат. 2662784 Российская Федерация, МПК F17D 1/04 Детандер-генераторный регулятор давления природного газа / А.Е. Белоусов, О.В. Кабанов, Г.Х. Самигуллин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СПГУ – №2017141301; заявл. 27.11.2017; опубл. 31.07.2018, Бюл. №22.