



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт ИЭВТ  
Кафедра ПТС


**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**(бакалаврская работа)**

Направление 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
(код и наименование)

Направленность (профиль) Промышленная теплоэнергетика

Форма обучения очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

Тема: **Разработка математической модели автономного источника электроснабжения газорегуляторных пунктов на базе роторного детандер-генераторного агрегата малой мощности в среде Aspen HYSYS.**

Студент ФП-06-16  Дронов С.А.  
группа подпись фамилия и инициалы

Научный руководитель Доцент, к.т.н. преподаватель  Федюхин А.В.  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

Консультант \_\_\_\_\_  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

Консультант \_\_\_\_\_  
уч. степень должность подпись фамилия и инициалы

«Работа допущена к защите»

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
уч. степень звание подпись фамилия и инициалы

Дата \_\_\_\_\_

Москва, 2020



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Институт** \_\_\_\_\_ **ИЭВТ**  
**Кафедра** \_\_\_\_\_ **ПТС**

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**(бакалаврскую работу)**

**Направление** \_\_\_\_\_ **13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника**  
(код и наименование)

**Направленность (профиль)** \_\_\_\_\_ **Промышленная теплоэнергетика**

**Форма обучения** \_\_\_\_\_ **очная**  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Тема:** **Разработка математической модели автономного источника электроснабжения газорегуляторных пунктов на базе роторного детандер-генераторного агрегата малой мощности в среде Aspen HYSYS.**

**Студент** \_\_\_\_\_ **ФП-06-16** \_\_\_\_\_ **Дронов С.А.**  
группа \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ фамилия и инициалы

**Научный руководитель** \_\_\_\_\_ **Доцент, к.т.н. преподаватель** \_\_\_\_\_ **Федюхин А.В.**  
уч. степень \_\_\_\_\_ должность \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ фамилия и инициалы

**Консультант** \_\_\_\_\_  
уч. степень \_\_\_\_\_ должность \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ фамилия и инициалы

**Консультант** \_\_\_\_\_  
уч. степень \_\_\_\_\_ должность \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ фамилия и инициалы

**Зав. кафедрой** \_\_\_\_\_  
уч. степень \_\_\_\_\_ звание \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ фамилия и инициалы

**Место выполнения работы** \_\_\_\_\_ **Кафедра ПТС, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»**

## СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ЗАДАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Введение

---

Глава 1. Исследование технологии полезного использования перепада давления природного газа на ГРП с применением ДГА

---

Глава 2. Разработка принципиальной схемы включения детандера в ГРП и конструктивного исполнения агрегата

---

Глава 3. Создание математической модели блока ДГА в среде Aspen HYSYS

---

Заключение

---

## ПЕРЕЧЕНЬ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Количество листов \_\_\_\_\_

Количество слайдов в презентации \_\_\_\_\_

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Черных А.С. Повышение эффективности электроснабжения технологических объектов системы газораспределения за счет применения автономных источников электро-энергии на базе детандерных электроагрегатов с роторным и шестеренным приводом.

---

2. Агабабов В.С. Оценка эффективности использования детандер – генераторных агрегатов для получения электроэнергии / В.С. Агабабов Агабабов, В.С. Бестопливные детандер-генераторные установки: учебн. пособие / В.С. Агабабов, А.В. Корягин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

---

3. Кротевич В.А. Опыт создания автономной системы электропитания для газовой промышленности // Веб-сайт Тов. "ДП УКРГАЗТЕХ". – 2018.

---

4. Карасевич В.А. Перспективы применения автономных источников энергии при транспортировке и распределении газа / В.А. Карасевич, А.С. Черных, А.А. Яковлев // Научный журнал российского газового общества. – №1. – 2016. – С. 59-61.

---

5. Пятов И.С. Детандеры объемного типа // Двигатель. – №4. – 2009. – С. 54- 60.

### *Примечания:*

1. Задание брошюруется вместе с выпускной работой после титульного листа (страницы задания имеют номера 2, 3).
2. Отзыв руководителя, рецензия(и), отчет о проверке на объем заимствований и согласие студента на размещение работы в открытом доступе вкладываются в конверт (файловую папку) под обложкой работы.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГРП С ПРИМЕНЕНИЕМ ДГА .....	9
1.1 Актуальность использования ДГА в газораспределительных системах.....	9
1.2 Инновационность применения ДГА малой мощности в системах газораспределения и анализ рыночных трендов в данной области .....	14
1.3 Анализ и сравнение распространенных конструкций детандеров .....	15
1.3.1 История, конструкции и области применения поршневых детандеров. ....	16
1.3.2 История, конструкции и области применения турбодетандеров.....	20
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ДЕТАНДЕРА В ГРП И КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ АГРЕГАТА .....	25
2.1 Обзор принципиальных схем включения детандера в ГРП для выработки электроэнергии .....	25
2.2 Технические требования к разрабатываемой схеме включения ДГА в ГРП, детандеру и системе автоматики.....	30
2.2.1 Технические требования к разрабатываемой схеме включения ДГА в ГРП .	30
2.2.2 Технические требования к детандеру .....	31
2.2.3 Технические требования к системе автоматического управления, контрольно-измерительным приборами и автоматике, диспетчеризации и связи .....	31
2.2.4 Регулирование ДГУ. Требования к выходным параметрам ДГУ. Алгоритм регулирования ДГУ.....	34
2.3 Разработка принципиальной схемы включения детандера в ГРП .....	36
2.4 Разработка конструктивного исполнения агрегата .....	40
2.5 Описание конструктивной части ДГА .....	43
2.5.1 Общие сведения.....	43
2.5.2 Корпус ДГА .....	43
ГЛАВА 3. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЛОКА ДГА В СРЕДЕ ASPEN HYSYS.....	45
3.1 Статическая модель блока ДГА, работающая в теплый и холодный периоды года.....	45
3.2 Динамическая модель блока ДГА .....	56

3.3 Оценка величины электроэнергии, сэкономленной за счет применения на ГРП ДГА малой мощности в роли автономного источника электроснабжения .....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	66
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	67
Приложения.....	68

## **Аннотация**

В данной работе основной целью является изучение теоретической возможности полезного использования перепада давлений транспортируемого природного газа в газораспределительных системах при помощи детандер-генераторного агрегата малой мощности для покрытия собственных нужд ГРП в среде Aspen HYSYS. Главная цель работы разделена на подзадачи, решением которых является выбор технологической схемы включения ДГА в ГРП, а также выбор конструктивного исполнения ДГА. Созданы математические модели в статическом и динамическом режимах в среде Aspen HYSYS. Получены зависимости электрической мощности ДГА от доли основного потока газа, подаваемого на ДГА для теплого и холодного периодов года. Получены зависимости, показывающие изменение во времени параметров ДГА и регулирующего клапана в случае автоматического управления расходом газа, направляемого на ДГА.

## **Abstract**

In this paper, the main goal is to study the theoretical possibility of the beneficial use of the pressure difference of the transported natural gas in gas distribution systems using a low-power expander-generator unit to cover the own needs of GDP in an Aspen HYSYS medium. The main goal of the work is divided into subtasks, the solution of which is the choice of the technological scheme for the inclusion of EGU in hydraulic fracturing, as well as the choice of the design of the EGU. Mathematical models are created in static and dynamic modes in the Aspen HYSYS environment. The dependences of the EGU electric power on the fraction of the main gas flow supplied to the EGU for warm and cold periods of the year are obtained. Dependences are obtained that show the time variation of the EGU and control valve parameters in the case of automatic control of the gas flow directed to the EGU.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы в следствие повышения спроса на различные энергоресурсы, большое внимание к себе привлекает проблема рационального использования энергии, что в свою очередь влечет за собой и проблемы, связанные с энергосбережением в различных сферах энергетической деятельности, в том числе и в системах газотранспорта и газораспределения, а также использования нетрадиционных источников энергии. Говоря о программах энергосбережения, следует отметить, что одной из ключевых мер по энергосбережению является рациональное использование вторичных энергоресурсов (ВЭР). Особое внимание следует уделить как энергосбережению, так и увеличению энергоэффективности транспортируемого природного газа, к чему и побуждает Федеральный Закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 N 261-ФЗ (последняя редакция).

В нашей стране создана и функционирует самая обширная и масштабная газотранспортная и газораспределительная сети в мире. На долю ПАО «Газпром» приходится около 70% объемов добычи газа в стране. Протяженность лишь магистральных сетей составляет 160 тысяч километров, помимо этого ПАО «Газпром» имеет в совокупности огромное количество газораспределительных организаций. При транспортировке природного газа по магистральным трубопроводам, давление в них должно составлять несколько десятков атмосфер, чаще всего около 75 атмосфер. Потребителю же требуется природный газ с давлением существенно ниже, чем в магистральном газопроводе, поэтому часть давления транспортируемого газа редуцируется на газораспределительных станциях (ГРС) от значения 7,5 МПа до 1,2÷1,5 МПа, далее происходит повторное понижение давления газа на газораспределительных пунктах (ГРП) от 1,2 МПа до 0,2 МПа.

Сброс давления на классических ГРС и ГРП происходит с помощью дроссельных устройств, в которых безвозвратно теряется и никак не используется весь потенциал перепада давлений природного газа. Одним из решений задачи энергосбережения в системах газоснабжения – это использование детандер-генераторного агрегата (ДГА), устанавливаемого вместо дросселирующих устройств на ГРП или ГРС, в этом случае детандер будет являться генератором так называемой бестопливной электроэнергии, получаемой в электрогенераторе. Детандер-генераторные агрегаты, являющиеся утилизаторами избыточной энергии транспортируемого природного газа на ГРС или ГРП, также могут применяться и в роли газового двигателя. Возможная эксплуатация ДГА возможна не только в схемах ГРС или ГРП, а также и на компрессорных станциях. К явному положительному аспекту применения данного способа редуцирования природного газа можно отнести то, что газ после прохождения через детандер, в котором он используется лишь в качестве рабочего тела, поступает далее по газопроводам к потребителю, он не сжигается, следовательно, наблюдается полное отсутствие вредных выбросов в окружающую среду. С каждым годом детандеры становятся все более и более перспективной областью для исследований, но, к сожалению, рынок ДГА малой мощности (менее 5 кВт) почти не востребован в сравнении с ДГА мощностью от 1,5÷7 МВт.



# **ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГРП С ПРИМЕНЕНИЕМ ДГА**

## **1.1 Актуальность использования ДГА в газораспределительных системах**

Российская Федерация занимает первое место в мире среди стран по площади, которая составляет 17 125 191 км<sup>2</sup>, а также находится в списке мировых лидеров по добыче природного газа. Наша Родина богата залежами полезно-ископаемых ресурсов, в числе которых находится природный газ. В особенности им богата Западная Сибирь, в ней находятся около 90% запасов природного газа.

По данным Министерства энергетики Российской Федерации по состоянию на 01.01.2020, добычу природного и попутного нефтяного газа на территории страны осуществляют 251 добывающее предприятие, в том числе:

- 80 входящих в состав вертикально-интегрированных нефтяных холдингов (ВИНК);
- 15 дочерних компаний в составе Газпром;
- 9 структурных подразделений НОВАТЭК;
- 144 независимых нефтегазодобывающих компании;
- 3 предприятия, работающие на условиях соглашений о разделе продукции (операторы СРП).

В 2019 году суммарная добыча природного и попутного нефтяного газа в Российской Федерации увеличилась на 1,7% (+12,4 млрд м<sup>3</sup> к 2018) и достигла рекордного за последние 19 лет уровня – 737,8 млрд м<sup>3</sup>. Добыча газа в России в 2010–2019 гг. в млрд м<sup>3</sup> показана на рисунке 1.

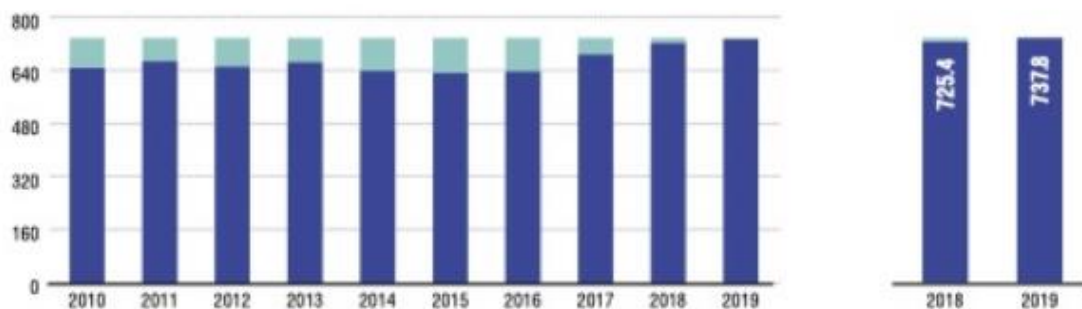


Рисунок 1. Динамика добычи природного и попутного нефтяного газа в России в 2010–2019 гг. в млрд м<sup>3</sup>

Для транспорта «голубого топлива» тому или иному потребителю существуют газораспределительные станции (ГРС), газораспределительные пункты (ГРП), компрессорные станции (КС) и т.д., которые в совокупности образуют единую газотранспортную систему (ГТС). Из рисунка 1 наблюдается тенденция в увеличении уровня добычи и потребления природного газа за последние годы, данный факт негативно сказывается на затратах энергии и средств, направленных на подготовку газа, а также на его транспортировку и добычу. Следовательно, появляется необходимость в повышении не только энергоэффективности, но и экономичности систем газотранспорта и газопотребления.

Прогнозы ученых гласят, что к 2030 году потребление газа в мире увеличится в 2 и более раза, по сравнению с нынешним значением, а доля газа в производстве электроэнергии и тепла составит около 60% [1].

Множество газораспределительных объектов расположено в разных уголках нашей страны. Для их стабильного функционирования им необходима электроэнергия, которая в большинстве случаев доставляется по привычным нам воздушным линиям электропередач (ВЛЭП). В зависимости от удаленности ГРП и области его присоединения к стационарной электросети, стоимость строительства ВЛЭП будет увеличиваться с каждым километром. Стоимость 1 км ВЛЭП оценивается в 10 млн. рублей, но окончательная цена может быть и выше. Дополнительные финансовые затраты приходятся на плату за присоединение к

электрической сети, которые варьируются от технической возможности и составляют около 1 млн. рублей за кВт установленной мощности. Для работы электрооборудования, находящегося на ГРП, необходимо также закупать электроэнергию. На ГРП основными потребителями электроэнергии являются:

- Системы освещения и электрообогрева;
- охранная и пожарная системы безопасности;
- приборы управления запорно-регулирующей арматурой.

В совокупности, перечисленные выше электроприемники, суммарно потребляют мощность менее 5 кВт, их номинальное напряжение не превышает 28 В. При питании электроприемников от электросети переменного тока с фазным напряжением 220В и линейным 380В, используются различные понижающие преобразователи, необходимые для их функционирования. В них в виде тепла рассеивается избыточная энергия.

В связи с различными факторами, техническими или природными, снабжение электроэнергией (например, ГРП) может быть прервано или же электроэнергия будет низкого уровня качества. ГРП, потребляющий электроэнергию от автономного источника питания будет иметь ряд преимуществ. При создании такого рода системы электроснабжения, необходимо создать перечень требований, которым бы она подчинялась [2]:

- Простота в обслуживании;
- автономность;
- ресурс работы более 5 лет без перерывов;
- независимость качества получаемой электроэнергии от внешних условий среды.

Классификация автономных источников электроснабжения для газовой промышленности [2] представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Классификация автономных источников электроснабжения для газовой промышленности

Одним из направлений энергосбережения, а также повышения уровня надежности систем газоснабжения, которое становится все более актуальным и интересным для исследований, является применение автономных источников электроснабжения в ГТС. В роли такого источника может выступать детандер-генераторный агрегат, устанавливаемый на ГРП вместо дросселирующего устройства. В детандер-генераторном агрегате происходит снижение значений температуры и давления газа, его кинетическая энергия преобразуется в механическую энергию вращения ротора, соединенного с валом генератора, в котором и вырабатывается электроэнергия. После ДГА газ продолжает путь к потребителю. Важно заметить, газ при этом не сжигается, что позволяет полностью исключить вероятность загрязнения окружающей среды вредными выбросами.

Несмотря на положительные стороны возможной эксплуатации ДГА вместо дросселирующего устройства, важно понимать и недостатки данной расширительной машины, которые накладывают невозможность ее использования в определенных условиях. Погодные условия в летний и зимний периоды отличны вследствие географического расположения нашей страны. В разное время года значения параметров давления газа в газопроводе, а также его расход и температура

отличаются значительно. Переменчивость параметров газа в зависимости от времени года побуждает применение на ГРП детандеров малой мощности (0,5÷5 кВт) для покрытия собственных нужд здания.

По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации суммарное количество вредных выбросов, содержащихся в атмосферном воздухе на период 2017 года практически не изменился относительно 2010 года, динамика загрязнения атмосферы вредными веществами от стационарных и передвижных источников показана на рисунке 3.

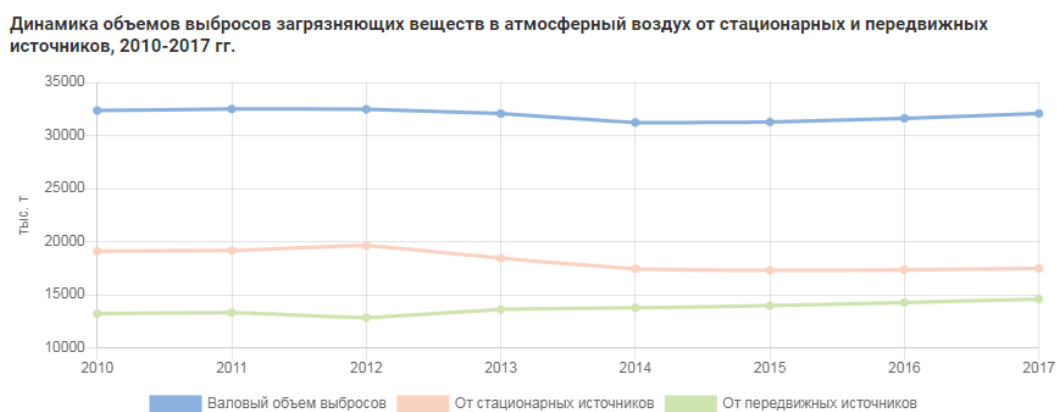


Рисунок 3. Динамика загрязнения атмосферы вредными веществами от стационарных и передвижных источников на 2010-2017 гг

Исходя из данных СО ЕЭС-системного оператора единой электроэнергетической системы России – общая установленная мощность ТЭС нашей страны на период 1 января 2019 года составляет 164,6 ГВт. Это говорит о том, большое число электростанций, расположенных на территории РФ, ежедневно выбрасывают в атмосферу огромное количество вредных веществ, так как топливом, на котором работают ТЭС и ТЭЦ, являются: уголь, природный газ, мазут (на данный момент данный вид топлива практически не применяется). Наибольший ущерб окружающей среде наносят станции, работающие на твердом топливе (угле), газовые котлы менее вредны, но их влияние на состояние атмосферы нельзя недооценивать. В совокупности, эти факторы никаким образом не улучшают состояние окружающей среды. Рассматривая возможность использования на ГРП

автономного источника электроэнергии (ДГА любой мощности), негативный акцент влияния на состояние окружающей среды будет полностью исключен. Теоретическое представление о том, что ДГА различной мощности в зависимости от того, какие задачи он решает, будут установлены на большую долю от общего числа газораспределительных объектов в нашей стране, позволит получать немалое количество энергии, которая будет использоваться для тех или иных нужд.

### **1.2 Инновационность применения ДГА малой мощности в системах газораспределения и анализ рыночных трендов в данной области**

В отличие от турбоагрегатов, ДГА с приводом от роторного детандера может служить для выработки электроэнергии при его использовании на газопроводе с незначительным отбором газа  $\approx 100 \div 200 \text{ м}^3/\text{час}$  и с давлением газа на входе порядка 0,08 МПа. Для уменьшения потерь электроэнергии в процессе ее преобразования и повышения надежности всей системы, целесообразно применять низковольтный генератор, который будет обеспечивать питанием потребителей электроэнергии на ГРП постоянным напряжением от 12 до 24 В (так как почти все электроприемники-низковольтные), что позволит отказаться от понижающих преобразователей и другого вспомогательного оборудования. При необходимости низковольтный генератор можно объединить в параллельную работу с аккумуляторными батареями.

В настоящий момент ведутся разработки в области автономного электроснабжения в ГТС на основе различных устройств такой же мощности. Наиболее распространены варианты электроснабжения детандерными электроагрегатами с приводом генератора от турбины либо от микротурбины. Но серийного применения в системах газораспределения нет. На объекте, где необходимо снабжать электроэнергией низковольтную аппаратуру с незначительным энергопотреблением (телеметрия и АСУТП) в роли автономного источника электроэнергии применяются нетрадиционные источники энергии:

- а) солнечные батареи;
- б) установки, работающие от энергии ветра;
- в) совместное использование солнечных батарей и ветроустановок.

Данные источники электроэнергии, которые эксплуатировались на различных объектах с довольно малым энергопотреблением (чаще всего дорожная инфраструктура) не зарекомендовали себя в роли надежного и бесперебойного автономного источника электрической энергии, так как их эффективность напрямую зависит от географического и климатического факторов, что заставляет сделать вывод о нецелесообразности использования данных технологических решений для их применения на объектах транспорта и распределения природного газа. Из выше перечисленных возможных решений задачи внедрения автономных источников электроэнергии в ГТС, наибольшее внимание акцентируется на детандер-генераторных агрегатах, что и делает данную область актуальной на сегодняшний день.

Установками подобного рода занимаются различные предприятия, в числе которых находится НПП «Газэлектроприбор» (Москва), данным предприятием создаются и вводятся в эксплуатацию турбодетандерные установки, применяемые как на ГРП, с диапазоном мощностей  $0,01 \div 10$  кВт, так и на ГРС с диапазоном мощностей  $2 \div 30$  кВт. В второй половине 2000-х годов на территории России и Туркменистана было запущено в работу 50 установок с турбодетандерами на ГРС и ГРП.

### **1.3 Анализ и сравнение распространенных конструкций детандеров**

В настоящее время, благодаря развитию научно-технического прогресса, длившегося столетиями, человеком используются различные технологические машины и агрегаты, без которых не смогла бы существовать любая отрасль мировой промышленности. Одни машины созданы для того, чтобы облегчить работу человека, а также чтобы выполнять работу, которую не под силу сделать человеку, другие служат для выработки энергии различных ее видов, в большей

степени тепловой и электрической, которую человечество научилось использовать для своего блага.

Говоря о генерации электроэнергии, а именно ее генерации в газораспределительных системах с помощью детандер-генераторных агрегатов, следует отметить, что в наши дни существуют различные конструктивные решения расширительных машин в том числе и детандеров. Классификация расширительных машин показана на рисунке 4. [5].

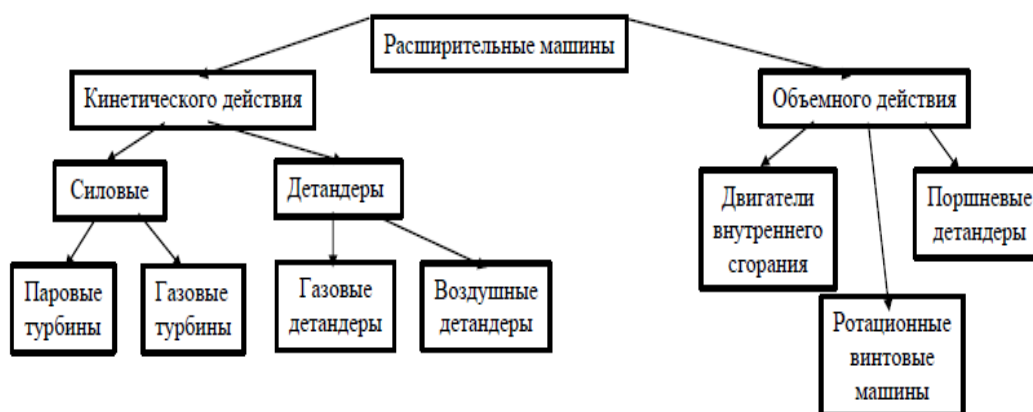


Рисунок 4. Классификация расширительных машин

Область рационального применения детандеров зависит от:

- его типа и конструктивного исполнения;
- эксплуатационных условий;
- типа установки;
- технических и экономических показателей.

Наибольшую популярность в различных сферах промышленности приобрели турбодетандеры и поршневые детандеры, а винтовые, в свою очередь, широкого применения не нашли.

### 1.3.1 История, конструкции и области применения поршневых детандеров.

Первые мысли о создании расширительной машины для охлаждения газа путем его адиабатного расширения зародились у французского ученого Жака



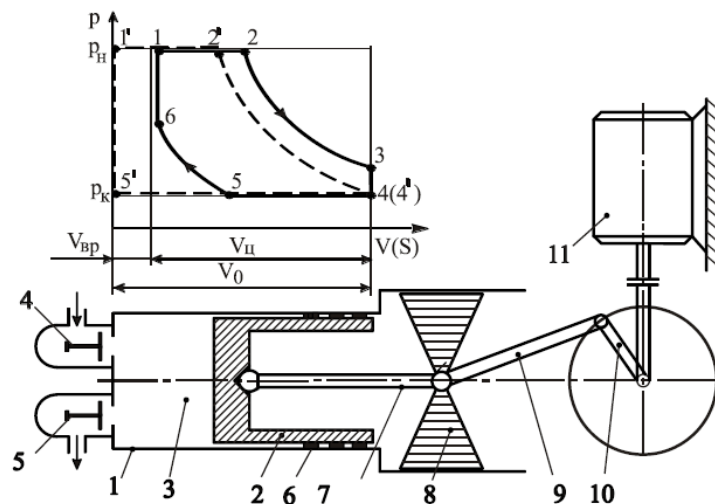
Клода еще в первом десятилетии XIX века. Создать первый рабочий поршневой детандер ему удалось в 1902-1904 годах. Его предназначением являлось использование в кислородных установках среднего давления того времени. Поршневой детандер Клода в качестве рабочего тела имел воздух с давлением 4 МПа, который изначально охлаждался до температуры порядка 135 К.

Спустя некоторое время в Германии в 1907-1915 гг. Гейляндтом была создана поршневая расширительная машина высокого давления. В отличие от детандера Клода, данный детандер работал на воздухе, имевший давление на входе около 16 МПа, а температура была близка к температуре внешней среды. На ряду с Клодом и Гейляндтом, пройти мимо вопросов создания и усовершенствования поршневых детандеров, не смог и один из советских ученых, академик П.Л.Капица. В 1934 году им был создан первый поршневой низкотемпературный гелиевый детандер.

Работы этих ученых в области поршневых детандеров стали отправной точкой ходе развития поршневых расширительных машин, которые в большинстве своем применялись для воздуходелительных установок, а также широко использовались в криогенной технике. В течение времени в Советском Союзе и за его пределами стали рождаться различные исследовательские институты, продолжавшие разрабатывать и модифицировать, существующие в то время поршневые детандеры. К ним относился и институт физических проблем, в котором под руководством П.Л.Капицы исследование поршневых детандеров продолжалось Даниловым И.Б. и Ковачевым В.Т.

Разработки различных новых конструкций поршневых детандеров ведутся и в XXI веке, в Санкт-Петербурге на заводе «Компрессор» разработаны быстроходные поршневые детандеры с самодействующим клапаном, отличающиеся сокращенными габаритами и массой, но они имеют меньшую эффективность работы в сравнении с клапанными детандерами.

Поршневым детандером называется тепловая расширительная машина, относящаяся к типу машин объемного действия. Внутри детандера с определенной периодичностью происходит расширение рабочего тела в цилиндре за счет перемещения поршня. Открытие и закрытие клапанов в таких машинах чаще всего происходит принудительно с помощью приводов клапанов, но бывают варианты конструкций без клапанов, замененные окнами или отверстиями. Устройство поршневого детандера и диаграмма рабочего тела изображены на рисунке 5 [4].



1–цилиндр; 2–поршень; 3–рабочий объем цилиндра; 4, 5–впускной и выпускной клапаны соответственно; 6–уплотнение; 7–шток; 8–крейцкопф; 9–шатун; 10–кривошипный механизм; 11–генератор.

Рисунок 5. Конструкция диаграмма рабочего тела поршневого детандера

В поршневом детандере имеется существенное отличие реальных процессов от идеального. На рисунке 5 показана теоретическая диаграмма поршневого детандера (клапанного), у которого вредный объем  $V_{вп} = (0,04 - 0,12)V_{ц}$ .

Цикл в диаграмме, показанной на рисунке 5 состоит из шести процессов:

1. процесс 1-2 – заполнение цилиндра газом при начальном давлении  $P_H$ , впускной клапан в открытом состоянии;

2. процесс 2-3 – расширение газа от давления  $P_n$  до промежуточного значения давления  $p_3$ , впускной и выпускной клапаны закрыты;
3. процесс 3-4 – выхлоп газа, впускной клапан открыт;
4. процесс 4-5 – выталкивание газа в газопровод, выпускной клапан открыт;
5. процесс 5-6 – обратное сжатие после закрытия выпускного клапана;
6. процесс 6-1 – подача сжатого газа в цилиндр, впускной клапан открывается.

Уплотнение 6 необходимо для уменьшения утечек сжатого газа. Крейцкопф 8 снимает нормальные усилия, действующие на цилиндр 3, которые возникают от движения кривошипно-шатунного механизма 9 и 10. Внутренняя энергия рабочего тела в результате его расширения передается с помощью поршня механизму движения с последующим ее преобразованием в электричество в генераторе 11. Величина внутренней энергии, которая передается механизму движения, определяется рабочей диаграммой, вид которой зависит от конструкции механизма газораспределения. Он определяет также и эффективность детандера.

Конструкция поршневых детандеров весьма разнообразна. Имеются машины с наличием впускного и выпускного клапанов, которые открываются и закрываются с помощью кулачкового механизма, располагающегося на валу. Данная конструкция больше всего распространена в криогенных установках.

Цикл данной установки шестифазный, за счет этого в такой машине рабочий процесс протекал весьма эффективно. Но у такого детандера есть недостаток, заключающийся в системе газораспределения, даже при малых скоростях поршня, что является следствием увеличения металлоемкости агрегата.

Также существуют конструкции поршневых детандеров с измененной системой газораспределения. Впускной и выпускной клапаны заменены на окна, это модернизация позволила увеличить частоту вращения вала и цикл у такой установки четырех фазный.

Поршневые детандеры можно разделить на три основные группы [4]: детандеры с клапанной системой газораспределения (с внешним приводом клапанов; с внутренним приводом клапанов; с самодействующими клапанами), с бесклапанной системой газораспределения и с смешанным газораспределением.

У каждого вида поршневых детандеров есть свои положительные и отрицательные стороны. В общем случае, поршневые детандеры распространены в циклах с высокими давлениями. Такая машина обойдется дешевле заказчику, нежели турбодетандер, вследствие более обширной унификации деталей и простоты их изготовления.

### **1.3.2 История, конструкции и области применения турбодетандеров**

Турбодетандеры в промышленности активно начали использовать в 30-х годах XX века. Адиабатный КПД первых турбодетандеров находился в пределах 60%, так как они относились к типу осевых расширительных машин, в связи с чем расходы через них были малыми [4].

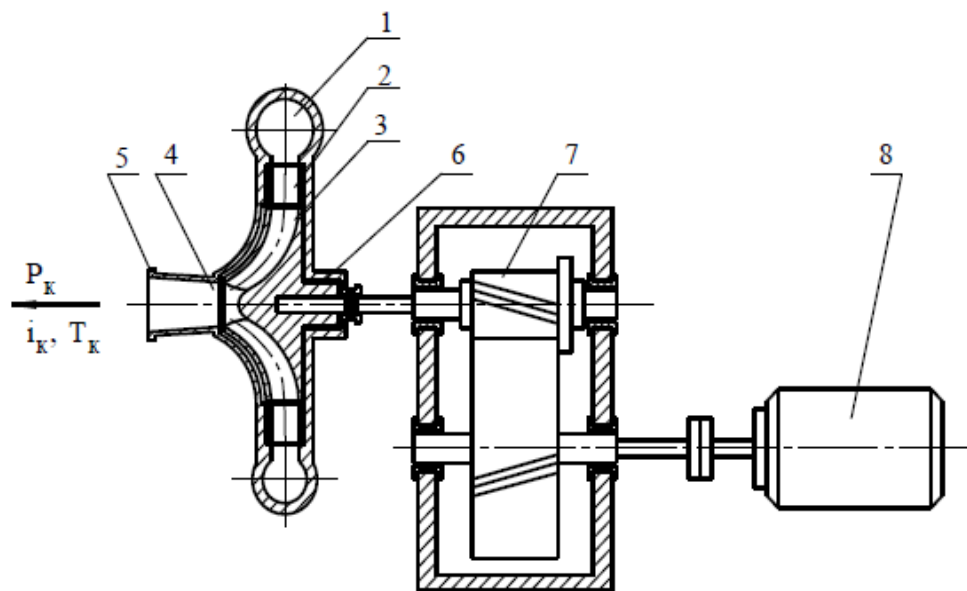
Значение адиабатного КПД турбодетандера, равное 60%, считалось недостаточным по мнению некоторых ученых и пробуждало в них стремление к его повышению. Конструкция центростремительного турбодетандера с короткими лопатками активного типа была предложена немецким инженером Зерковцем в 1935 году. Используя его идею, фирма «Линде» строила турбодетандеры различных конфигураций, у которых адиабатный КПД достигал уже 65, а иногда все 70%. Через 4 года в 1939 году П.Л.Капицей была создана версия центростремительного турбодетандера активного типа, но уже с длинными лопатками. Адиабатный КПД такой машины подошел к значению 80% и выше. На данный момент по этой схеме изготавливают турбодетандеры как отечественные, так и заграничные фирмы [4].

Турбодетандер представляет собой расширительную машину кинетического действия. В названии этой машины сочетаются два слова: «турбина» – двигатель

лопаточного типа, в котором энергия потока рабочего тела преобразовывается в механическую, и слово «детандер», которое берет корни от французского слова «detandre», что в переводе означает расширять сжатое. По своей сути турбодетандер и турбина представляют собой одну и ту же машину, но различаются они тем, что турбина имеет задачу вырабатывать механическую энергию, а задача турбодетандера – это выработка холода [3].

Утилизационными турбодетандерными установками (УТДУ) называются установки, вырабатывающие механическую энергию за счет процесса расширения газа и служащие приводом электрогенератора, такие установки также называются детандер-генераторными агрегатами [4]. В качестве рабочего тела в турбодетандерах чаще всего наблюдается природный газ, который в свою очередь состоит представляет собой смесь различных углеводородов, а также других веществ. Содержание метана в природном газе находится в пределах 70÷98 %, остальные компоненты могут быть в виде более тяжелых углеводородов, гелия, водорода и др.

Принципиальная схема турбодетандера радиального типа изображена на рисунке 6.



1–входной патрубком; 2–направляющий или сопловой аппарат; 3–рабочее колесо; 4–диффузор; 5–корпус; 6–элементы уплотнения; 7–редуктор; 8–электрогенератор

Рисунок 6. Принципиальная схема турбодетандера радиального типа

Рабочее тело поступает в входной патрубок 1 после чего проходит через сопловой аппарат 2, где происходит увеличение кинетической энергии потока газа за счет увеличения его скорости, газ воздействует на рабочее колесо 3, приводя его в вращение. Движение потока рабочего тела в колесе показано на рисунке 7. Далее охлажденный газ покидает корпус детандер-генераторного агрегата 5 через диффузор 4. Уплотнение 6 необходимо для герметизации машины, для недопущения утечек газа. Наличие редуктора 7 обуславливается необходимостью снижения числа оборотов ведомого вала, который связан с генератором 8, так ведущий вал имеет большое число оборотов. Турбодетандеры по типу конструктивного решения могут быть как одноступенчатыми, так и многоступенчатыми.

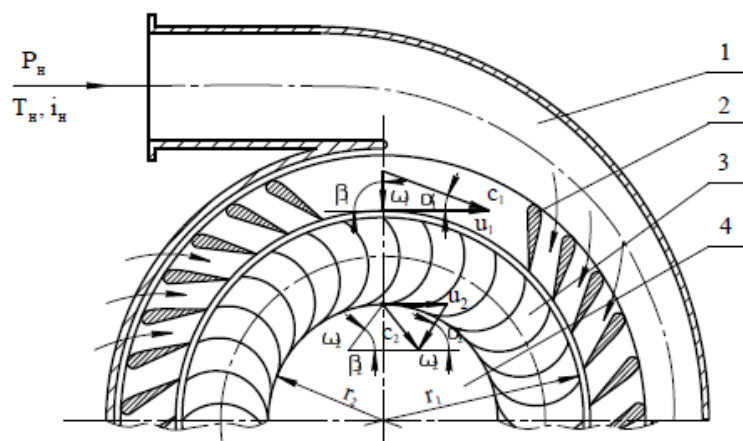


Рисунок 7. Движение потока в рабочем колесе турбодетандера

Классифицировать турбодетандеры можно по следующим критериям [4]:

1) По значению величины входного давления:

- низкого давления ( $P_n = 0,3 - 1,5$  МПа);
- среднего давления ( $P_n = 3 - 7$  МПа);

- высокого давления ( $P_H = 10 - 20$  МПа).

2) По характеру процесса расширения:

- активного действия (в сопловом аппарате уменьшаются давление, температура и энтальпия газа, скорость потока растет до значения выше скорости звука. В механическую энергию преобразуется только кинетическая энергия потока;
- реактивного действия (уменьшение давления, температуры и энтальпии газа происходит и в сопловом аппарате, и в рабочем колесе, однако, скорость потока не превышает местную скорость звука. В механическую энергию преобразуется как кинетическая, так и внутренняя энергия потока газа.

3) По направлению движения потока:

- радиальные: центростремительные и центробежные;
- осевые;
- радиально осевые.

4) По состоянию рабочего тела:

- газовые;
- парожидкостные.

5) По числу ступеней:

- одноступенчатые;
- двухступенчатые.

Турбодетандеры нашли применение в различных сферах энергетики, в частности и в газовой промышленности. Турбодетандеры в газовой промышленности применяются для:

- выработки электрической энергии на ГРС за счет полезного использования перепада давлений транспортируемого природного газа;
- проворачивания ротора газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата (ГПА) в режиме останова для его охлаждения, а также пуска ГПА;

- охлаждения природного газа за счет процесса расширения в турбине в установках для ожижения газа;
- приводов компрессоров высокого давления, необходимых для отправки газа в хранилища, располагаемые под землей.

Турбодетандер, как и любое техническое устройство, имеет свои плюсы и минусы. Турбодетандеры высокой мощности имеют высокий КПД проточной части (70÷80%), малые сроки окупаемости. К недостаткам можно отнести высокие расходы газа (от 20000 нм<sup>3</sup>/ч), низкую температуру газа на выходе из агрегата (на 50÷70°С ниже входной), чувствительность к колебаниям входных параметров.

Из всего выше сказанного назревает необходимость о правильном подборе или же разработке расширительной машины, которая бы зарекомендовала себя в роли эффективного, надежного и в то же время простого в плане монтажа и эксплуатации автономного источника электроэнергии на ГРП. Прежде чем анализировать целесообразность применения того или иного агрегата в качестве автономного источника электроэнергии на ГРП, необходимо выбрать наиболее рациональную схему включения этого устройства в ГРП.



## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ДЕТАНДЕРА В ГРП И КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ АГРЕГАТА**

### **2.1 Обзор принципиальных схем включения детандера в ГРП для выработки электроэнергии**

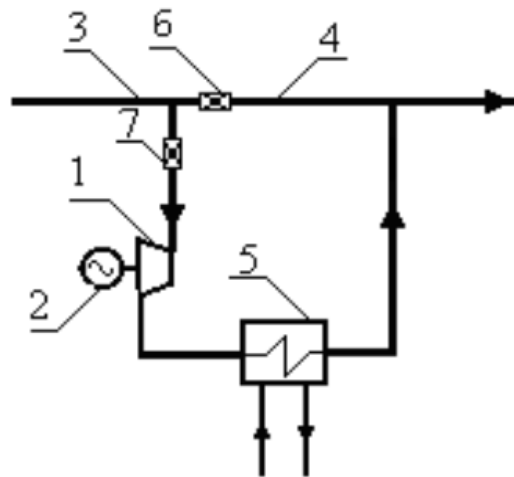
В газотранспортной системе Российской Федерации находятся множество газораспределительных станций и газораспределительных пунктов, служащие для изменения параметров транспортируемого природного газа от параметров, которые присущи ему при нахождении в магистральной сети до параметров, необходимых потребителю. В зависимости от их географического расположения, на том или ином ГРП применяются различные источники электроснабжения, чаще всего это газотурбинные установки, но также встречаются и объекты, на которых электрическую энергию получают при помощи как возобновляемых источников энергии, так и при помощи автономных источников электроснабжения, работающие на полезном использовании вторичных энергоресурсов. Примером такого источника служит детандер-генераторный агрегат.

Применение детандер-генераторного агрегата в той или иной схеме на объекте прежде всего зависит от условий его эксплуатации и от конструктивных особенностей агрегата. Выбор схемы включения ДГА в ГРП также зависит от целей и задач, для решения которых он применяется.

Наиболее распространенные варианты включения ДГА в ГРП имеют теплообменный аппарат, находящийся перед ДГА, который предварительно подогревает газ перед его подачей в детандер-генераторную установку. Такой подогрев газа можно реализовать с использованием энергии топлива или при помощи низкопотенциальных источников теплоты, в этом случае сжигания топлива не происходит и поэтому детандер-генераторные установки, работающие по такой схеме, получили название «бестопливные» [8].

Бестопливные установки на базе детандер-генераторных агрегатов описаны в [8, 11]. Исследование различных схем включения ДГА в ГРП показало, что в

большинстве случаев детандер-генераторный агрегат принято располагать параллельно с дросселирующим устройством, такой способ позволяет редуцировать давление природного газа с применением и ДГА и дросселирующего устройства, что также повышает надежность системы в целом. Следует отметить, что помимо схем с применением теплообменного аппарата перед ДГА, бывают и технические решения, исключающие предварительный подогрев газа на входе в ДГА. Принципиальная схема одной из таких установок представлена на рисунке 8.



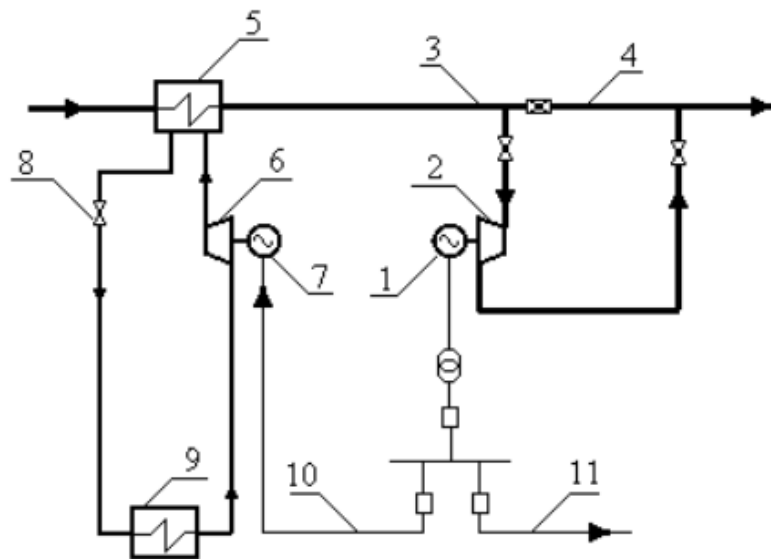
1-детандер; 2-электрогенератор; 3-газопровод высокого давления; 4-газопровод низкого давления; 5-теплообменный аппарат; 6, 7- дросселирующее устройство.

Рисунок 8. Принципиальная схема детандер-генераторной установки без предварительного подогрева газа

В данной схеме дросселирующее устройство 7 необходимо для предварительного дросселирования потока газа на входе в детандер, так как при условии его отсутствия температура газа по окончании процесса расширения может достигать значения  $-80^{\circ}\text{C}$ , которое недопустимо по нормам эксплуатации оборудования. За счет предварительного дросселирования снижается давление газа и температурный перепад в ДГА. Достижение требуемой температуры газа после ДГА в  $-30^{\circ}\text{C}$  осуществляется при помощи теплообменного аппарата 5, подогревая природный газ, с его помощью предусмотрено получение холода для потребителя.

Применение такой схемы включения ДГА целесообразно на ГРС или ГРП с незначительным отношением входного и выходного давлений. Однако, такое решение неэффективно с экономической точки зрения, что и побуждало разрабатывать схемы, в которых подогрев газа осуществляется перед ДГА.

Подогрев газа перед ДГА можно осуществить различными способами, встречаются схемы бестопливных установок, в которых подогрев реализован с применением теплонасосных установок (ТНУ). Такое технологическое решение представлено на рисунке 9.



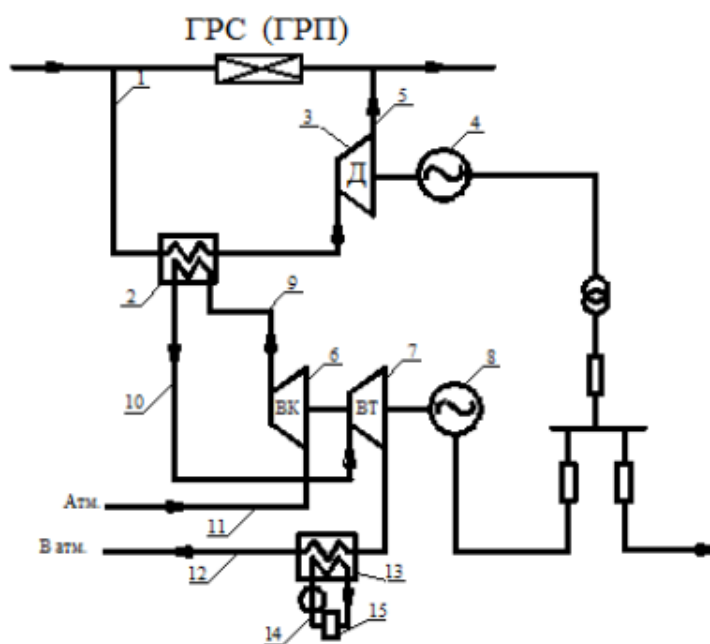
1-генератор; 2-детандер; 3-газопровод высокого давления; 4-газопровод низкого давления; 5-конденсатор ТНУ; 6-компрессор ТНУ; 7-электродвигатель; 8-дресселирующее устройство; 9-испаритель ТНУ; 10-электрическая связь генератора и электродвигателя; 11-электроэнергия к потребителю

Рисунок 9. Принципиальная схема детандер-генераторной установки с предварительным подогревом газа перед ДГА с помощью ТНУ

Транспортируемый природный газ под давлением направляется в конденсатор ТНУ 5, процесс подогрева газа осуществляется за счет энергии низкопотенциального источника теплоты. Далее уже подогретый газ поступает в детандер, в котором полученная работа в процессе расширения газа преобразуется

в электроэнергию в генераторе 1. Выработанная генератором электроэнергия частично расходуется на привод компрессора теплонасосной установки, остальная электроэнергия направляется к потребителю. В сеть отдается мощность в диапазоне  $50 \div 80\%$ , в зависимости от входной температуры газа в систему и от температуры НИТ.

Вследствие существования различных энергетических установок и машин, подогрев газа можно осуществить за счет использования различных вариантов сочетания того или иного оборудования. Теплонасосные установки не исключение, они также бывают разных типов. Процесс подогрева газа можно реализовать при помощи воздушных ТНУ, это показано на рисунке 10.

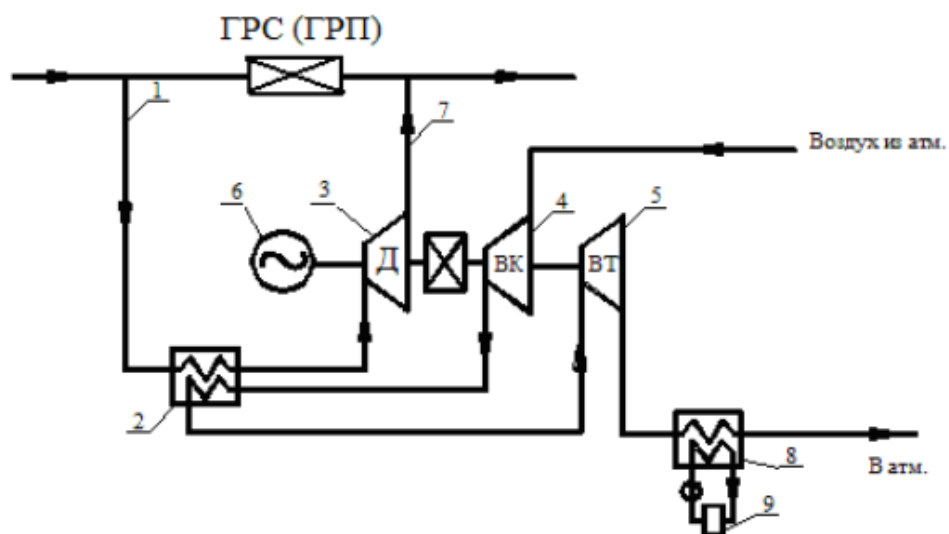


1-газопровод высокого давления; 2-теплообменный аппарат; 3-детандер; 4-генератор; 5-газопровод низкого давления; 6-воздушный компрессор; 7-воздушная турбина; 8-электродвигатель; 9-трубопровод горячего воздуха; 10-воздуховод высокого давления; 11, 12-воздуховод низкого давления, 13-теплообменный аппарат; 14-контур циркуляции хладагента; 15-потребитель холода

Рисунок 10. Принципиальная схема детандер-генераторной установки с предварительным подогревом газа перед ДГА с помощью воздушной ТНУ

Схема работает следующим образом: природный газ, движущийся по газопроводу высокого давления 1, направляется в теплообменный аппарат 2, в котором нагревается с помощью горячего воздуха, температура воздуха повышается механическим путем в компрессоре 6, компрессор выбирается исходя из значения температуры воздуха на выходе, она должна быть выше необходимой температуры подогрева газа. Привод компрессора приводится в действие с помощью воздушной турбины 7 и электродвигателя 8. Воздух, отдав свое тепло в теплообменнике направляется в воздушную турбину 7, после чего выходит в атмосферу по трубопроводу 12. Теплообменник-утилизатор холода 13 соединен с потребителем холода посредством контура хладагента 14. Компрессор 6, турбина 7 и электродвигатель 8 объединены между собой за счет кинематической связи. Использование с данной схеме воздушной турбины 7 обуславливается снижением мощности электродвигателя.

На рисунке 11 изображена модернизированная схема установки, которая была показана на рисунке 10.



1-газопровод высокого давления; 2-теплообменный аппарат; 3-детандер; 4-воздушный компрессор; 5-воздушная турбина; 6-генератор; 7-газопровод низкого давления; 8-теплообменный аппарат; 9-холодильная установка

Рисунок 11. Принципиальная схема детандер-генераторной установки с предварительным подогревом газа перед ДГА с помощью воздушной ТНУ (одновальная)

Преимущества данной схемы относительно схемы, показанной на рисунке 10 обусловлена повышенной эффективностью, так как воздушный компрессор, воздушная турбина и генератор соединены кинетической связью с помощью одного вала.

## **2.2 Технические требования к разрабатываемой схеме включения ДГА в ГРП, детандеру и системе автоматики**

### **2.2.1 Технические требования к разрабатываемой схеме включения ДГА в ГРП**

Разрабатываемая схема включения ДГА в ГРП обязана подчиняться ряду технических требований:

1. ДГА должен присоединяться параллельно основной редуцирующей линии ГРП.
2. Подключение и работа ДГА не должна никаким образом влиять на функционирование и производительность ГРП по расходу газа и выходному давлению в линии потребителей.
3. Должны предусматриваться линии продувки (свечи) газового тракта детандера.
4. Автоматика безопасности должна обеспечивать автоматический незамедлительный останов ДГА при:
  - Резком увеличении частоты вращения роторов детандера свыше  $5500 \text{ мин}^{-1}$ ;
  - превышении давления газа на входе в детандер свыше  $6 \text{ кгс/см}^2$ ;
  - превышении напряжения на клеммах АКБ свыше  $30 \text{ В}$ ;
  - повышении концентрации метана в помещении ГРП выше допустимого;
  - срабатывании охранной сигнализации.

Вышеперечисленные ситуации, ведущие за собой останов ДГА, ни в какой степени не должны отразиться на работе ГРП.

5. Должны быть приняты меры по недопущению повышения давления газа на стороне потребителей (низкое давление).

### **2.2.2 Технические требования к детандеру**

ДГУ при работе в номинальном режиме должна обеспечивать следующие основные характеристики:

1. Номинальное напряжение – 28 В постоянного тока; 230 В переменного тока частотой 50 Гц (при наличии инвертора напряжения).
2. Номинальная мощность – 1000 Вт.
3. Кратковременная мощность при набросе нагрузки (не более 30 с) – 1300 Вт.
4. Номинальный ток нагрузки при напряжении 28 В на клеммах генератора – 36 А.
5. Номинальная частота вращения – 5000 мин<sup>-1</sup>.
6. Максимальная частота вращения – 5500 мин<sup>-1</sup> (при превышении данного предела происходит автоматическое отключение подачи природного газа на вход детандера).
7. Номинальное рабочее давление газа на входе в детандер – 0,3-0,4 МПа (3-4 кгс/см<sup>2</sup>);).
8. Минимальное давление газа на входе в ДГУ, при котором достигается устойчивая работа генератора – не менее 0,08 МПа (0,8 кгс/см<sup>2</sup>);).
9. Номинальный расход газа через детандер – 100 м<sup>3</sup>/ч.
10. Верхний предел входного давления природного газа 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>).

### **2.2.3 Технические требования к системе автоматического управления, контрольно-измерительным приборами и автоматике, диспетчеризации и связи**

### Общие требования

Система автоматического управления (САУ) должна обеспечивать нормальное функционирование ДГУ в полностью автоматическом режиме в соответствии с требованиями по электроснабжению ГРП.

САУ должна предусматривать дистанционный контроль рабочих параметров и дистанционное управление работой ДГУ в режиме реального времени.

САУ должна предусматривать экстренный останов установки как непосредственно с пульта управления, так и дистанционно.

Система наряду с автоматическим должна предусматривать режим ручного управления оператором ГРП непосредственно с пульта управления. Ручной режим подразумевает запуск и останов ДГУ, отслеживание рабочих параметров на дисплее пульта управления. Автоматика безопасности при этом должна функционировать в автоматическом режиме и обеспечивать экстренный (аварийный) останов ДГУ при наступлении хотя бы одного из событий, перечисленных ниже.

### Панель управления (пульт управления)

Панель управления ДГУ должна содержать следующие органы управления:

1. Клавишу экстренного (аварийного) останова.
2. Клавиши ручного запуска и останова ДГУ.
3. Выключатель нагрузки.
4. Выключатель системы возбуждения генератора.
5. Переключатель режимов работы ДГУ «Автоматический/Ручной».

Панель управления должна содержать средства световой и звуковой сигнализации, срабатывающей при:

1. Превышении давления газа на входе в детандер выше допустимого 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>).
2. Снижении давления газа ниже 0,1 МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>).
3. Превышении частоты вращения генератора свыше 5500 мин<sup>-1</sup>.



4. Превышении напряжения на клеммах АКБ свыше 30 В.
5. Снижении напряжения на клеммах АКБ ниже 20 В.
6. Резком снижении частоты вращения генератора до 0 мин<sup>-1</sup> (самопроизвольный останов, заклинивание детандера).
7. Превышении допустимой концентрации метана в помещении ГРП свыше 10 % НКПР (сигнал концентрации метана может поступать со штатной системы безопасности ГРП или с самостоятельного датчика концентрации СН<sub>4</sub>, входящего в состав САУ).
8. Срабатывании охранной сигнализации ГРП (несанкционированном проникновении в помещение ГРП).

При наступлении хотя бы одного из вышеперечисленных событий должен незамедлительно произойти экстренный (аварийный) останов ДГУ, а информация о событии должна быть продублирована сигналом на пульт аварийно-диспетчерской службы ГРО посредством применяемых телекоммуникационных каналов связи.

Повторный пуск ДГУ возможен только после прибытия представителей аварийно-диспетчерской службы ГРО на ГРП и устранения причины аварийного останова с обязательной предпусковой продувкой газового тракта детандера в соответствии с регламентом.

Панель управления должна быть снабжена дисплеем, отображающим последовательно или по вызову следующие параметры:

1. Давление газа на входе в детандер, МПа.
2. Давление газа на выходе из детандера, МПа.
3. Объемный расход газа через детандер, м<sup>3</sup>/ч.
4. Температура газа на входе в детандер, °С.
5. Температура газа на выходе из детандера, °С.
6. Частота вращения вала генератора, мин<sup>-1</sup>.
7. Напряжение на клеммах АКБ, В.

8. Напряжение в сети переменного тока, В (при наличии DC/AC инвертора напряжения).
9. Электрическая мощность, отдаваемая в нагрузку, Вт.
10. Время работы с момента запуска ДГУ, с.

#### Дистанционное управление и контроль работы ДГУ. Диспетчеризация.

Система автоматического управления должна предусматривать возможность дистанционного управления и контроля рабочих параметров ДГУ посредством передачи информации по телекоммуникационным каналам связи. Параметры и события, перечисленные выше должны передаваться на пульт аварийно-диспетчерской службы ГРО через применяемые в ГРО интерфейсы передачи данных или посредством беспроводной связи (GSM-предпочтительно).

Отображение параметров, сигнализация и управление ДГУ должны осуществляться со стандартного ПК через специально разработанное приложение.

### **2.2.4 Регулирование ДГУ. Требования к выходным параметрам ДГУ.**

#### **Алгоритм регулирования ДГУ**

Задачей автоматического регулирования ДГУ является поддержание номинальных выходных параметров: напряжение на клеммах АКБ и уровень мощности, отдаваемой внешней нагрузке, при изменяющихся входных параметрах-давлении газа на входе и расходе газа через детандер.

Напряжение на клеммах АКБ должно поддерживаться в диапазоне 24-28 В +/- 0,5 В при изменяющейся внешней электрической нагрузке во всем рабочем диапазоне (0-1000 Вт), а также изменяющемся расходе газа через детандер.

Поддержание напряжения на клеммах АКБ в заданном диапазоне и обеспечение должного заряда АКБ обеспечивается интегральным регулятором напряжения типа 621.3702 (7921.3702).

Система автоматического регулирования ДГУ может быть реализована в двух вариантах исполнения:

- 1) С пусковым и рабочим отсечными электромагнитными клапанами;

2) с регулирующим и отсечным электромагнитными клапанами.

В любом случае должно быть обеспечено качественное регулирование выходных параметров, защита детандера от гидравлического удара при пуске и резких сбросах/набросах внешней электрической нагрузке, а также экстренный (аварийный) останов (см. п. «Панель управления»).

Система автоматического регулирования ДГУ с пусковым и рабочим отсечными электромагнитными клапанами.

Данный вариант исполнения предполагает использование двух отсечных запорных электромагнитных клапана различного проходного сечения (Ду 15 для пускового и Ду 25 для рабочего), включенных параллельно. Исходное состояние – нормально закрытое. При данном варианте реализуется дискретное регулирование расхода газа через детандер при изменяющейся внешней электрической нагрузке.

Порядок работы ДГУ.

В исходном состоянии пусковой и рабочий клапаны нормально закрыты, подача газа на вход детандера не осуществляется. При запуске ДГУ контроллер проверяет входные параметры. При давлении газа на входе в детандер в диапазоне 0,1-0,4 МПа, напряжении на клеммах АКБ менее 26,5 В, но не ниже 20 В, отсутствии запрещающих (аварийных) сигналов от системы загазованности и охранной сигнализации ГРП контроллер подает напряжение на обмотку пускового клапана, клапан открывается. Если в течение приблизительно 45-60 секунд после открытия пускового клапана напряжение на клеммах АКБ не достигнет 26,5 В, а частота вращения генератора при этом не превышает  $5500 \pm 100 \text{ мин}^{-1}$  (предел отсечки) контроллер подает напряжение на обмотку рабочего клапана, клапан открывается. При достижении напряжения на клеммах АКБ  $28 \pm 0,5 \text{ В}$  и удержании этой величины неизменной в течение примерно 45-60 секунд, контроллер закрывает рабочий клапан. Если в течение примерно 4 минут величина падения напряжения на клеммах АКБ не превысит 0,5 В контроллер закрывает пусковой клапан, подача газа в детандер полностью прекращается, ДГУ

останавливается. При падении напряжения на клеммах АКБ ниже 26,5 В рабочий цикл повторяется. В случае экстренного (аварийного) останова ДГУ оба клапана должны закрыться одновременно.

Система автоматического регулирования ДГУ с регулирующим и отсечным электромагнитными клапанами.

Данный вариант исполнения предполагает реализацию плавного регулирования подачи газа на вход детандера (расхода газа через детандер) путем изменения степени открытия регулирующего клапана в зависимости от мощности внешней электрической нагрузки и уровня напряжения на клеммах АКБ (степени их заряженности) в диапазоне 24-28,5 В. Отсечной клапан в данном варианте исполнения обеспечивает экстренный (аварийный) останов ДГУ. Отсечной клапан устанавливается на газовом тракте перед регулируемым клапаном по ходу движения газа. Оба клапана должны быть взрывозащищенного исполнения.

Допускается применение электромагнитного клапана взрывозащищенного исполнения, сочетающего в себе функции плавного регулирования и мгновенного перекрытия потока газа (функция отсечного клапана).

### **2.3 Разработка принципиальной схемы включения детандера в ГРП**

Рассмотренные в п. 2.1 принципиальные схемы бестопливных установок на базе ДГА включают в себя системы подогрева газа, дополнительные контуры для получения холода, вспомогательное оборудование в виде воздушных турбин и воздушных компрессоров, теплообменных аппаратов. Подобного рода технологические решения негативно сказываются на стоимости как оборудования отдельно, так и всей системы в целом. Применение большого количества оборудования в схеме усложняет эксплуатацию, а также обслуживание. В совокупности надежность системы снижается. Также следует отметить, что такие установки рассчитаны на большую мощность. Подобные схемы также требуют под свое расположение довольно обширную площадь. В связи с этим актуально направление разработки принципиальной схемы включения ДГА малой мощности

в ГРП, которая полностью бы решала все поставленные задачи, была максимально простой, экономичной, но в то же время и эффективной.

Так как в рамках исследования в данной работе лежит цель изучения возможности включения в схему ГРП ДГА малой мощности, то для разработки принципиальной схемы включения были сформулированы следующие предпосылки: в схему ГРП включается ДГА малой мощности, следовательно, перепад температур на входе и выходе из агрегата будет незначительный, что позволяет отказаться от различных схем подогрева газа, в которых присутствуют различные вспомогательные агрегаты и установки. Примером решения поставленной задачи может служить схема, изображенная на рисунке 12. В такой схеме ДГА включается параллельно штатному регулятору давления. Подобное решение целесообразно в условиях низкой неравномерности отбора газа потребителями.

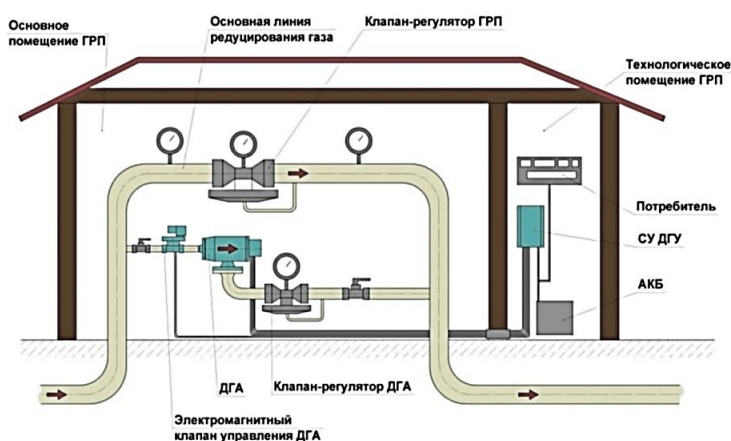
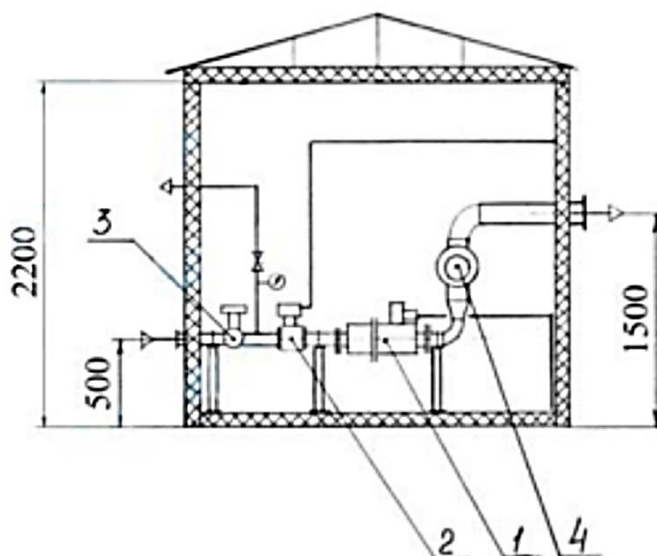


Рисунок 12. Схема включения ДГА параллельно штатному регулятору давления газа

Помимо схемы на рисунке 12 возможно применение схемы включения ДГА после штатного регулятора давления (рисунок 13). Данное решение позволяет уменьшить негативное влияние пониженной температуры на РД, но в свою очередь подразумевает применение ДГА малой мощности [14]. У данной схемы есть

недостаток в виде невозможности механической стабилизации частоты вращения агрегата, если отбор газа потребителями принимает неравномерный характер.



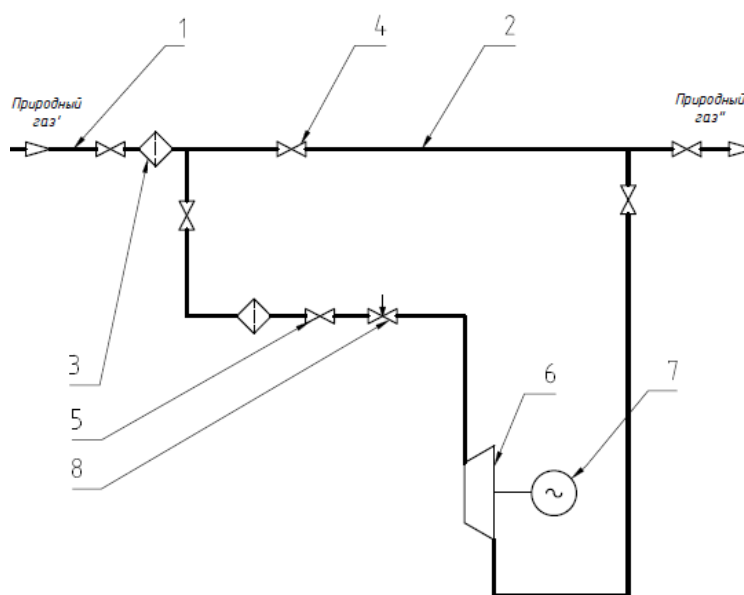
1-турбодетандер; 2-регулятор давления; 3-клапан запорный предохранительный;  
4-клапан сбросной предохранительный;

Рисунок 13. Схема включения ДГА за регулятором давления газа

В данной бакалаврской работе рассматривается схемное решение включения детандер-генераторного агрегата малой мощности в схему ГРП, изображенной на рисунке 14. В такой схеме теоретически можно применять детандер-генераторные агрегаты малой мощности, работающие на незначительных перепадах давления, выработанной в таком ДГА электроэнергии (всего несколько кВт) достаточно для покрытия собственных нужд ГРП. В отличие от схем, описанных в п.2.1, данная схема не загромождена дополнительным технологическим оборудованием. Отказ от системы подогрева газа до или после детандер-генераторного агрегата обуславливается незначительным охлаждением газа после прохождения линии редуцирования.

Актуальность и новизна работы заключается в разработке как схемы включения ДГА в ГРП, так и конструкторского исполнения ДГА, так как

производство и повсеместная эксплуатация такого рода машин не распространены в нашей стране.



1-газопровод высокого давления; 2-газопровод низкого давления; 3-газовый фильтр; 4-дросселирующее устройство; 5-запорная арматура; 6-ДГА; 7-электрогенератор; 8-регулирующий клапан

Рисунок 14. Принципиальная схема детандер-генераторной установки малой мощности для электроснабжения ГРП

Природный газ, транспортируемый по газопроводу высокого давления 1, проходит через газовый фильтр 3, после чего разделяется на два потока. Большая часть газа направляется в регулятор давления 4, в котором происходит снижение давления газа до требуемого значения. Остальная часть газа, пройдя через газовый фильтр, поступает на вход детандер-генераторного агрегата 6, в котором в процессе расширения снижается давление и температура газа, кинетическая энергия потока преобразуется в механическую энергию вращения вала генератора 7, вырабатывающего электроэнергию. В зависимости от времени года, давление в газопроводе высокого давления будет различным. В летний период давление в газопроводе высокого давления выше, в сравнении с зимним периодом. Связано

это с тем, что в летний период суммарное потребление газа потребителями в разы ниже, нежели зимой.

#### **2.4 Разработка конструктивного исполнения агрегата**

Изучив эксплуатационные и конструкционные особенности поршневых детандеров и турбодетандеров, а также основные области их применения, описанные в п.1.3.1 и 1.3.2, назревает вывод о том, что для решения одной из задач, поставленной в данной работе (выработка электроэнергии на ГРП с применением детандерного генератора малой мощности), необходимо понять, какое конструктивное исполнение детандер-генераторного агрегата целесообразно применять.

Поршневые детандеры хоть и имеют преимущество перед турбодетандерами в виде меньших финансовых затрат для их изготовления в единичном экземпляре или в мелких сериях, а также меньших затрат главного человеческого ресурса-времени, но такие машины чаще всего имеют большие габариты и их область применения ограничена циклами высокого давления.

Поршневые детандеры работают при давлении сжатия  $P=20$  МПа и применяются в установках относительно небольшой мощности, так как им требуется большой расход энергии. Наиболее распространены такие машины в циклах ожижения газов. К тому же, подобного опыта получения электроэнергии на ГРП в отечественной и мировой практике не наблюдается. Выше перечисленные факторы предполагают нецелесообразность применения поршневых расширительных машин в рассматриваемых условиях.

Турбодетандеры, в отличие от поршневых машин, нашли широкое применение в газовой промышленности, в том числе они применяются для выработки электроэнергии на ГРП. Так как турбодетандеры на протяжении всего времени своего существования были интересной областью для исследований в разных странах немалым количеством ученых, что и позволило достичь у современных агрегатов адиабатический КПД в пределах 85%. В настоящее время



уже достаточно хорошо изучены как вопросы создания технологических схем с применением турбодетандеров и аэродинамические закономерности, используемые при их проектировании и эксплуатации, однако еще остается немало вопросов, которые требуют дополнительных исследований.

Турбодетандеры достаточно хорошо зарекомендовали себя в газовой отрасли не только в нашей стране, но и за рубежом. Однако, диапазон вырабатываемой турбодетандерами электрической мощности варьируется в широких пределах. Например, ведущий производитель турбодетандеров американская корпорация Rotoflow имеет работающие турбодетандеры мощностью от 50 до 15000 кВт. Аналогичные проекты имеются и у других производителей данного оборудования. Стоимость турбодетандерных агрегатов обуславливается сложной конструкцией агрегата, в особенности, его проточной части.

Разработки турбодетандеров малой мощности на данный момент не имеют высокой степени популяризации. НПП «Газэлектроприбор» (Москва) является одним из немногих предприятий, специалисты которого трудятся над созданием и внедрением в эксплуатацию турбодетандеров для электроснабжения ГРС и ГРП с мощностями от 2 до 30 кВт и от 0,01 до 10 кВт соответственно. Разработкой ДГА малой мощности также занимается ООО «Дельта П», но подобные технологии пока не набрали достаточной популяризации.

Для полезного использования избыточного давления природного газа разрабатываются и производятся в диапазоне 0,3...17 МВт утилизационные турбодетандерные установки. Известно, что потенциально наибольшую потребность для регионов и производств представляют генерирующие установки малой (8...300 кВт) и средней (до 1000 кВт) мощности, для которых характерны выбросы отработавших газов с температурой порядка от 150 до 400 °С. Турбодетандеры, применяемые в составе установок указанной мощности, имеют низкие КПД, что при высокой стоимости контрольно-регулирующих систем и больших затратах на инфраструктуру и подготовку персонала делает их

недостаточно рентабельными. Поэтому более привлекательными являются детандеры объемного типа [10]. Преимущества и инновационность этих агрегатов описаны в п.1.2.

Основываясь на выше сказанное, можно сделать вывод, что поршневые детандеры и турбодетандеры, имея свои плюсы и минусы, не являются агрегатами, применение которых являлось бы целесообразным для выработки электроэнергии на ГРП с целью покрытия затрат электроэнергии на собственные нужды. Следовательно, рождается необходимость в разработке детандер-генераторного агрегата объемного действия.

В рамках данной бакалаврской работы в роли автономного источника электроснабжения ГРП выступает роторный кулачковый ДГА малой мощности, конструктивное исполнение которого предоставлено в приложении 1. Агрегатами аналогичной конструкции занимаются сотрудники ООО «Дельта П».

Работа над чертежом (приложение 1) роторного кулачкового ДГА производилась в двухмерной системе автоматизированного проектирования AutoCAD, разработанной компанией Autodesk.

В приложении 1 позициями 1-26 обозначены: 1–ведущий ротор; 2–ведомый ротор; 3–шестерня косозубая ведущая; 4– шестерня косозубая ведомая; 5–кожух; 6–корпус роторов; 7–подшипники; 8–уплотнения; 9–фланец присоединительный; 10–входной патрубков; 11–фланец корпуса роторов; 12–ротор ведущий; 13–ротор ведомый; 14–корпус муфты; 15–крышка роторов; 16–муфта соединительная; 17–генератор; 18–корпус генератора; 19–корпус муфты; 20–выходной патрубков; 21–крышка генератора; 22–коробка выводов; 23–крышка; 24–гайка; 25–трубка выводов от генератора; 26–крышка.

## **2.5 Описание конструктивной части ДГА**

### **2.5.1 Общие сведения**

Образец детандер-генераторного агрегата (приложение 1) состоит из роторного детандера и индукторного генератора переменного тока, расположенного в взрывозащитной герметичной оболочке. Ведущий и ведомый роторы 1, 2 приводятся в вращение за счет расширения потока газа, который поступает в ДГА через входной патрубок 10. Роторы 1, 2 удерживаются в корпусе за счет подшипников 7. Крутящий момент с ведущего ротора 1 посредством муфты 16 передается на вал генератора, расположенного в корпусе генератора 17. Скорость вращения роторов синхронизируется с помощью косозубых шестерней 3, 4, которые расположены на передних торцах роторов. На рабочую поверхность шестерней предполагается нанесение антифрикционного материала, следовательно, исключается необходимость использования жидких и других видов смазочных материалов. Рабочая полость шестерней изолирована от шестерней изнутри с помощью уплотнений 8 для предотвращения проникновения газа. Снаружи полость шестерен закрыта крышкой 5.

### **2.5.2 Корпус ДГА**

У образца (приложение 1) взрывоопасная оболочка состоит из четырех стальных корпусов: корпуса роторов детандера 6, корпуса муфты 14, корпуса генератора 18 и корпуса распределительной коробки 22. Сопряжение корпусов реализовывается болтовыми соединениями.

Поступление газа в ДГА реализуется через входной патрубок 10, располагающийся на корпусе роторов детандера 6. Поток рабочего тела имеет строго перпендикулярное направление относительно оси вращения роторов 1, 2. Редуцируемый поток газа, проходя через корпус муфты 14, направляется в корпус генератора 18, тем самым охлаждая его. При помощи выходного патрубка 20, расположенного на корпусе генератора 18, газ покидает ДГА. Входной и выходной патрубки соединены с корпусами и с фланцами сваркой. Выводы из

корпуса распределительной коробки 22 необходимы для выводов кабелей электрического соединения генератора с внешними силовыми цепями и цепями управления.

Корпус генератора, а также все его токоведущие части не имеют электрического контакта с корпусом ДГА. Установка генератора в корпус ДГА выполняется с применением фланцев, кронштейнов и других крепежных деталей, изготовленных из электроизоляционных материалов. Кроме того, конструкция соединительной муфты привода предусматривает воздушный зазор или изолирующую вставку между валом генератора и выходным валом детандера. У данного образца ДГА в качестве материала корпусных деталей предполагается применять конструкционную сталь и механическую металлообработку.

## ГЛАВА 3. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЛОКА ДГА В СРЕДЕ ASPEN HYSYS

### 3.1 Статическая модель блока ДГА, работающая в теплый и холодный периоды года

Для оценки теоретической возможности полезного использования перепада давлений природного газа с целью получения электроэнергии при помощи агрегата, рассмотренного в п.2.4–2.5, используется среда Aspen HYSYS. Среда Aspen HYSYS представляет собой программный пакет, позволяющий моделировать различные технологические процессы в стационарном и динамическом режимах, который широко применяется как в отечественной, так и в мировой науке для решения широкого спектра задач.

Данный программный продукт обуславливает свою популярность удобством и простотой создания технологических схем любой направленности, а также их автоматизированным расчетом. Для расчета технологических схем и процессов, происходящих внутри того или иного аппарата, в HYSYS содержится широкий набор термодинамических пакетов, выбор которых зависит от рабочего тела, используемого в определенном этапе технологического процесса.

Постановка задачи для создания модели в статическом режиме для двух периодов года подразумевает под собой:

1. Определение требуемого количества природного газа, направляемого на линию к ДГА (доля от основного потока);
2. получение графической зависимости электрической мощности  $N_{Д}$ , генерируемой в ДГА, от количества природного газа, направленного в линию к ДГА (доля от основного потока).

Схема, представленная на рисунке 14, адаптирована под среду HYSYS и используется в качестве основы для создания моделей. Статическая модель с

соответствующими параметрами материальных потоков в теплый период года показана на рисунке 15.

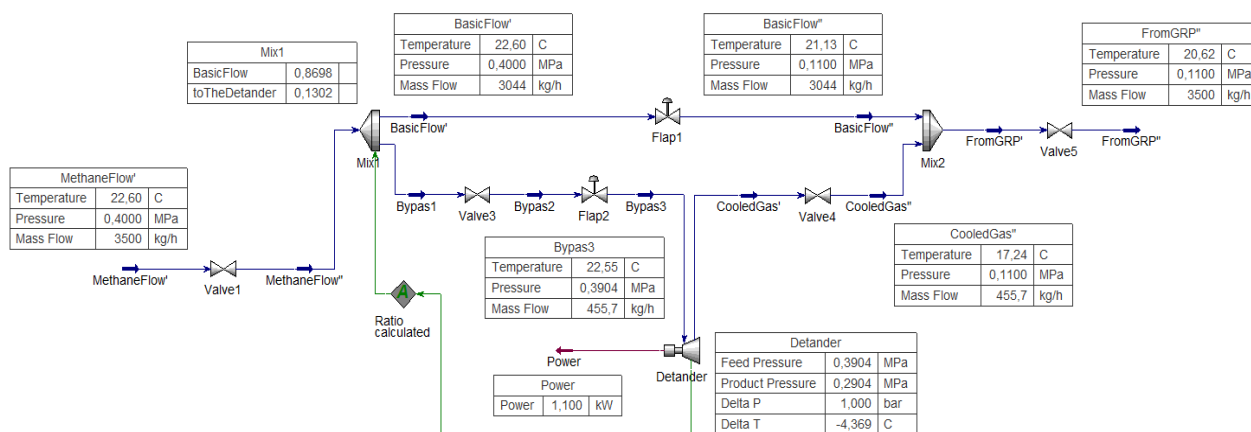


Рисунок 15. Модель для генерации электроэнергии на базе роторного ДГА малой мощности, работающая в теплый период года в среде Aspen HYSYS

В построенной модели применяется ДГА, конструкционное исполнение которого описано в п. 2.4–2.5. В связи с этим приняты следующие допущения: перепад давлений  $\Delta P$  в детандере принимается равным 0,1 МПа; адиабатный КПД детандера  $\eta_{ад} = 0,2$ .

Элементы модели (рис. 15), а также описание материальных потоков с соответствующими пояснениями сведены в таблицы 1, 2.

Таблица 1. Условные обозначения элементов статической модели в Aspen HYSYS

№	Обозначение элемента на схеме	Описание элемента
1		Материальный поток рабочего тела (природный газ, углеводороды, воздух, дымовые газы, вода и др.) с присвоенным ему названием.
2		Компонент запорной арматуры (задвижка), задается перепад давления на элементе, либо положение запорного элемента (открыт/закрыт).
3		Смеситель, предназначенный для разделения/смешения материальных потоков.

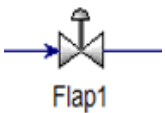
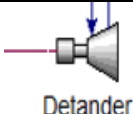
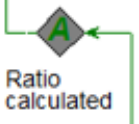


4		Компонент регулирующей арматуры (регулирующий клапан), задается степень открытия в процентах.
5		Расширительная машина. Задается перепад давлений в агрегате, его адиабатический/политропный КПД или требуемая получаемая мощность.
6		Инструмент под названием ADJUST, регулирующий выбранную переменную, пока целевая переменная не достигнет указанного пользователем значения.

Таблица 2. Описание материальных и энергетических потоков, используемых в статической модели в Aspen HYSYS

№	Обозначение потока на схеме	Описание элемента
1		Материальный поток природного газа, поступающего в ГПП с первоначальными входными параметрами (перед задвижкой 1)
2		Материальный поток природного газа, поступивший в ГПП (после задвижки 1).
3		Материальный поток природного газа, прошедший входное смесительное устройство, который направляется в основную линию редуцирования (перед регулирующим клапаном 1).
4		Материальный поток природного газа в основной линии редуцирования (после регулирующего клапана 2).
5		Материальный поток природного газа, прошедший смесительное устройство и направленный в вспомогательную линию редуцирования (перед задвижкой 3).
6		Материальный поток природного газа в вспомогательной линии редуцирования (после задвижки 3 и перед регулирующим клапаном 2).
7		Материальный поток природного газа в вспомогательной линии редуцирования, имеющий начальные параметры перед подачей в ДГА (после регулирующего клапана 2).
8		Энергетический поток в виде электроэнергии, полученной в ДГА.
9		Материальный поток охлажденного природного газа, прошедший ДГА (перед задвижкой 4).
10		Материальный поток охлажденного природного газа, прошедший ДГА (после задвижки 4).

11		Материальный поток природного газа, прошедший выходное смесительное устройство, представляющий собой смесь газовых потоков из основной и вспомогательной линий редуцирования (перед задвижкой 5).
12		Материальный поток природного газа, прошедший выходное смесительное устройство, представляющий собой смесь газовых потоков из основной и вспомогательной линий редуцирования, идущий к потребителю (после задвижки 5).

Процесс моделирования состоит из ряда последовательно выполняющихся операций. Прежде, чем приступить к созданию модели, пользователю необходимо задать состав начального материального потока. Выбрать можно как отдельное вещество, так и смесь, выбрав для этого 2 и более веществ. Для этого при загрузке программы в стартовом окне необходимо выбрать пункт **Component List** и пользователю предоставляется окно с набором веществ. Так как природный газ в большей степени состоит из метана, то для построения модели принимается допущение, что материальный поток на 100% состоит из метана. Следовательно, в окне выбирается вещество Methane. Окно выбора веществ изображено на рисунке 16.

Simulation Name	Full Name / Synonym	Formula
Methane	C1	CH4
Ethane	C2	C2H6
Propane	C3	C3H8
i-Butane	i-C4	C4H10
n-Butane	n-C4	C4H10
i-Pentane	i-C5	C5H12
n-Pentane	n-C5	C5H12
n-Hexane	C6	C6H14
n-Heptane	C7	C7H16
n-Octane	C8	C8H18
n-Nonane	C9	C9H20
n-Decane	C10	C10H22
n-C11	C11	C11H24
n-C12	C12	C12H26
n-C13	C13	C13H28
n-C14	C14	C14H30
n-C15	C15	C15H32
n-C16	C16	C16H34
n-C17	C17	C17H36
n-C18	C18	C18H38
n-C19	C19	C19H40
n-C20	C20	C20H42

Рисунок 16. Окно выбора веществ для задания материального потока

После того, как пользователь осуществил выбор необходимого вещества в соответствующем окне, следующим шагом является выбор термодинамического



пакета в пункте *Fluid Package*, с помощью которого среда HYSYS произведет полный комплекс расчетов. Каждый термодинамический пакет или их группа предназначены для расчета определенного класса веществ. Так как для построения исследуемой модели в качестве рабочего тела был выбран метан, поэтому из набора термодинамических пакетов выбирается пакет *Peng-Robinson*. Данный термодинамический пакет один из рекомендуемых для расчета углеводородов.

По окончании этапа выбора термодинамического пакета, пользователю открывается доступ к рабочей области среды HYSYS. Рабочая область представляет собой однотонный фон, на который необходимо помещать все необходимые элементы и материальные/энергетические потоки (синяя и красная стрелочки соответственно) исследуемой модели. Набор таких элементов располагается в окне *Palette*, изображенном на рисунке 17.

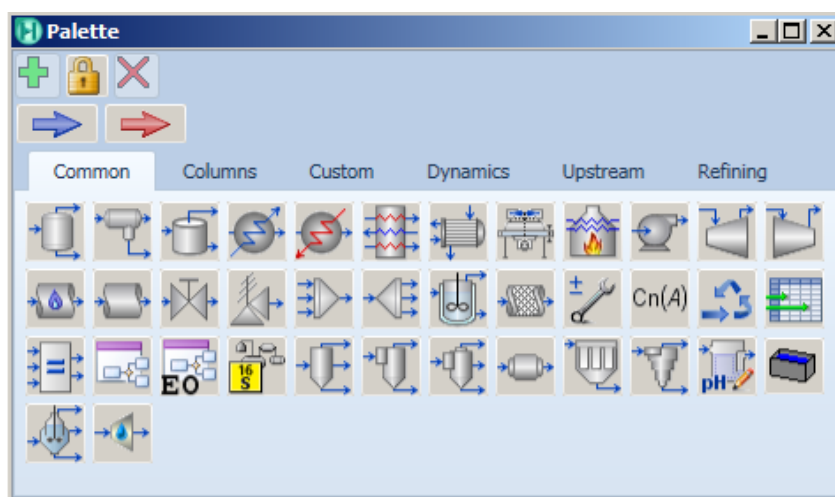


Рисунок 17. Окно выбора элементов модели и материальных/энергетических потоков

Так как в модели поток метана представляет собой материальный поток, следовательно, выбирается элемент «синяя стрелочка». В среде HYSYS при задании материального потока необходимо присвоить ему начальные параметры в количестве трех любых, относительно которых будет производиться расчет всех необходимых свойств и параметров.

Для моделей, работающих в теплый и холодный периоды года, значения температуры газа на входе в ГРП принимаются равными температуре наружного воздуха для города Москвы в соответствии с СНиП 23-01-99. Строительная климатология. (Статистика климатических данных). Для теплового периода года  $t_{\text{вх.}}^{\text{тепл.}} = 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $t_{\text{вх.}}^{\text{хол.}} = -15 \text{ } ^\circ\text{C}$  для холодного.

В соответствии с СП 62.13330.2011. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002 (измененная редакция N 1,2) выбирается газопровод высокого давления категории 2 с рабочим давлением в газопроводе от 0,3 МПа до 0,6 МПа. Величины давления для теплового и холодного периодов принимаются равными  $P_{\text{вх.}}^{\text{тепл.}} = 0,4 \text{ МПа}$  и  $P_{\text{вх.}}^{\text{хол.}} = 0,3 \text{ МПа}$  соответственно.

В разные периоды года значения давления в газопроводе, температуры и расхода природного газа различны. Расход природного газа в холодный период выше, чем в теплый период, поэтому давление газа в газопроводе в холодный период будет меньше, нежели в теплый. В связи с этим массовый расход природного газа  $G_T$  в теплый и холодный период условно равны соответственно 3500 и 5000 кг/ч.

Исходные параметры природного газа для теплового и холодного периодов отображены в таблице 3.

Таблица 3. Исходные параметры природного газа в модели в Aspen HYSYS для двух периодов

Период года	Температура газа, $^\circ\text{C}$	Давление газа, МПа	Расход газа, кг/ч
Теплый	22,6	0,4	3500
Холодный	-15	0,3	5000

Исходные параметры природного газа на входе в ГРП (в теплый период) добавляются в специальное окно свойств материального потока MethaneFlow' (рис. 18).

Worksheet	Stream Name	MethaneFlow	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	22,60	22,60
Composition	Pressure [MPa]	0,4000	0,4000
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	218,2	218,2
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	3500	3500
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	11,69	11,69
User Variables	Molar Enthalpy [kcal/kgmole]	-1,794e+004	-1,794e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	171,6	171,6
Cost Parameters	Heat Flow [kcal/h]	-3,914e+006	-3,914e+006
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	5146	5146
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Рисунок 18. Окно заданных параметров потока природного газа, входящего в ГРП (теплый период)

Данные, введенные вручную пользователем, отображаются жирным шрифтом синего цвета, остальные параметра рассчитываются средой HYSYS с помощью выбранного ранее термодинамического пакета. Внесенные вручную значения могут быть подвержены редактированию. Если пользователь наблюдает снизу окна полосу зеленого цвета с подписью «ОК», значит исходные данные введены корректно и можно продолжать работу, в ином случае полоса обретет желтый или красный цвет с указанием ошибки. Аналогично происходит работа с оставшимися элементами схемы.

Для определения части природного газа, которая будет отделена от основного потока и направлена к ДГА, в статическом режиме целесообразно использовать инструмент ADJUST, именуемый в модели *Ratio calculated*. Настройка инструмента производится в специализированном окне (рис. 19), в котором необходимо выбрать регулируемую переменную и целевую переменную. После чего устанавливаются минимальное и максимальное значения целевой переменной, а также допустимая погрешность величины целевой переменной.

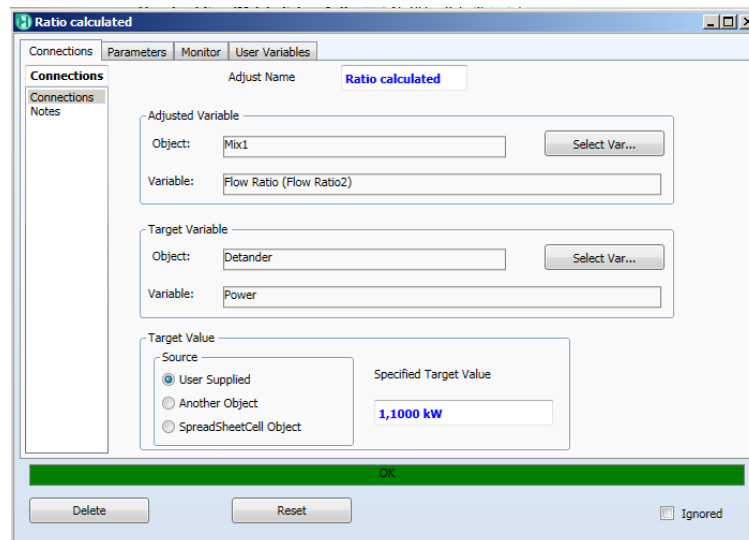


Рисунок 19. Окно настройки инструмента ADJUST

В качестве регулируемой переменной задается часть потока от основного, направляемая в ДГА, а целевой переменной является электрическая мощность, получаемая в ДГА. Значение целевой переменной  $N_D$  принимается равным 1,1 кВт. Если необходимые переменные выбраны верно и достижение заданного значения целевой переменной подошло к завершению, то пользователю в окне об этом сообщает зеленая полоса с подписью «ОК». В элементе модели, в котором задействована регулируемая переменная, ее значение фиксируется автоматически относительно значения целевой переменной. Полученное значение целевой переменной можно увидеть в соответствующей таблице в модели.

Для получения графической зависимости электрической мощности  $N_D$ , сгенерированной в ДГА, от доли потока газа, отделенного от основного, в HYSYS имеется инструмент под названием *Case studies*. Данный инструмент также применим только для моделей, изучаемых в статическом режиме. В качестве зависимой переменной выбирается электрическая мощность  $N_D$ , выработанная с помощью ДГА, роль независимой переменной выполняет часть потока газа от основного, направленная на байпасную линию. Выбор переменных для построения зависимости показан на рисунке 20.

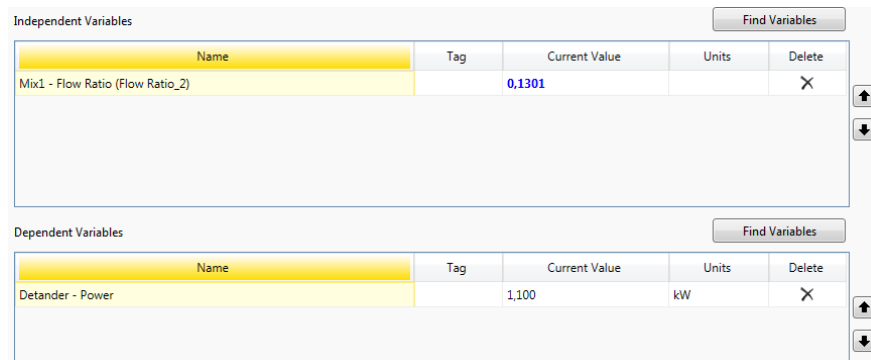


Рисунок 20. Окно задания переменных в инструменте Case Studies

После задания необходимых переменных для получения требуемой зависимости, следующим шагом является выбор числа точек, по которым и будет построена зависимость и определение диапазона независимой величины. В данном случае значения части потока, направляемого к ДГА, принимаются в диапазоне от 0 до 0,3. Если пользователем заданы верно все необходимые величины, инструмент выводит необходимую зависимость. Зависимость электрической мощности  $N_D$ , генерируемой в ДГА, от количества природного газа, направленного в линию к ДГА, для теплого периода года изображена на рисунке 21.

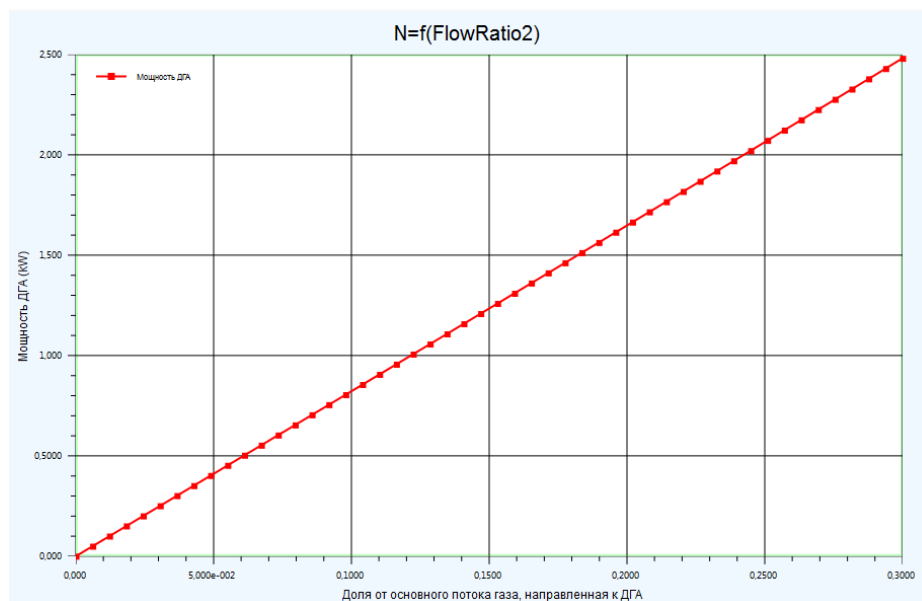


Рисунок 21. Зависимость электрической мощности  $N_D$ , генерируемой в ДГА, от количества природного газа, направленного в линию к ДГА (теплый период)

На полученной зависимости довольно четко отслеживается линейный характер изменения величины электрической мощности, вырабатываемой ДГА. Увеличение расхода газа в байпасной линии приводит к увеличению величины электрической мощности. Как видно из графика, для выработки 1,1 кВт электроэнергии в линию ДГА необходимо направлять 0,1302 от основного расхода газа, а именно: 13,02% от 3500 кг/ч, что составляет:

$$G_{\text{ДГА}}^T = 0,1302 \cdot 3500 = 455,7 \text{ кг/ч} \quad (3.1)$$

Такой же результат был получен с помощью инструмента ADJUST, который относительно значения целевой переменной  $N_{\text{Д}} = 1,1$  кВт, автоматически установил соотношение потоков в элементе Mix1 (86,98% на основную линию и 13,02 на линию к ДГА).

Аналогично производится работа с моделью, работа которой осуществляется в холодный период года. Статическая модель с соответствующими параметрами материальных потоков в холодный период года показана на рисунке 22.

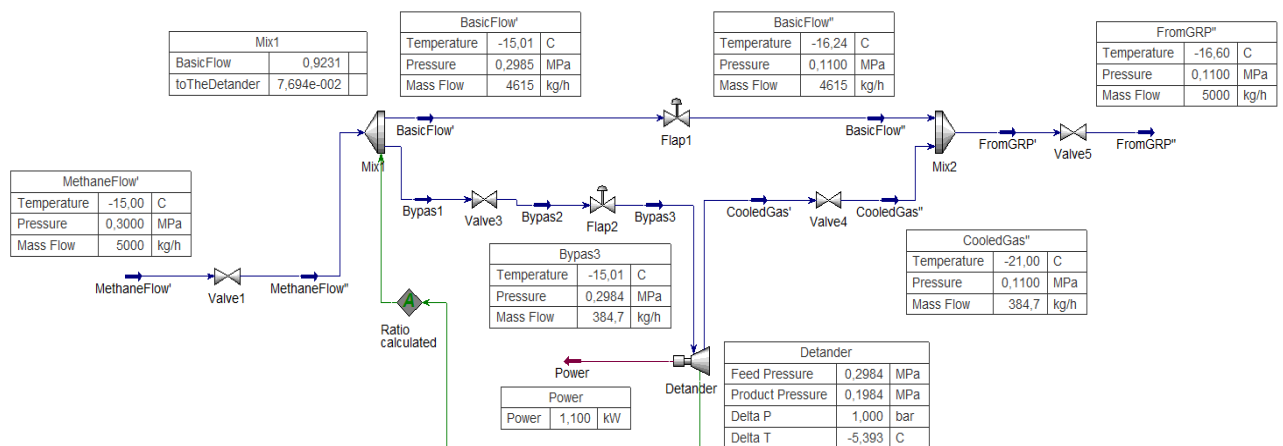


Рисунок 22. Модель для генерации электроэнергии на базе роторного ДГА малой мощности, работающая в холодный период года в среде Aspen HYSYS

При работе модели в холодный период значение целевой переменной также принимается равным 1,1 кВт. Инструмент ADJUST в этом случае зафиксировал, какую долю от основного потока необходимо направить на ДГА, для выработки

электрической мощности равной 1,1 кВт. При новых начальных условиях эта величина приняла новое значение, которое отображено в таблице на модели. Убедиться в достоверности полученного значения и получить новую зависимость электрической мощности, получаемой в детандере, можно также с помощью инструмента Case Studies. Зависимость получаемой в детандере электроэнергии от количества газа, направляемого к ДГА в холодный период года показана на рисунке 23.

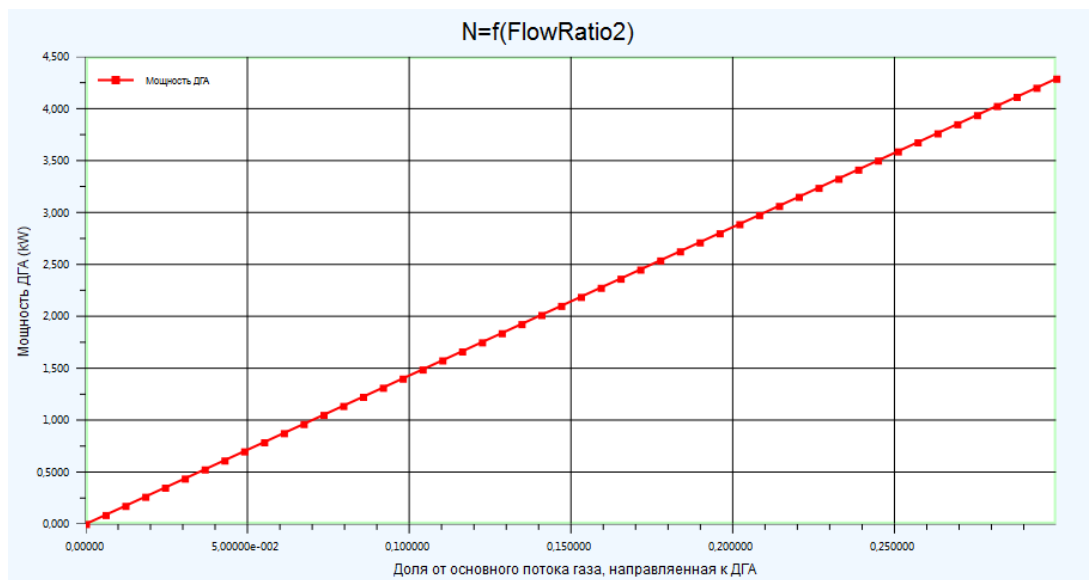


Рисунок 23. Зависимость электрической мощности  $N_d$ , генерируемой в ДГА, от количества природного газа, направленного в линию к ДГА (холодный период)

Из полученной зависимости видно, что для выработки 1,1 кВт электроэнергии в линию к ДГА необходимо направлять 0,07694 от основного расхода газа, а именно: 7,694% от 5000 кг/ч, что составляет:

$$G_{\text{ДГА}}^X = 0,07694 \cdot 5000 = 384,7 \text{ кг/ч} \quad (3.2)$$

Полученные зависимости показывают, что при работе моделируемой установки в холодный период года, расход газа на линию к ДГА для выработки фиксированного значения электрической мощности (1,1 кВт) будет ниже, чем в теплый период на величину:

$$\Delta G = G_{\text{ДГА}}^T - G_{\text{ДГА}}^X = 455,7 - 384,7 = 71 \text{ кг/ч} . \quad (3.3)$$

### 3.2 Динамическая модель блока ДГА

Статические модели в среде Aspen HYSYS хоть и позволяют пользователю отследить те или иные зависимости, увидеть все необходимые свойства материальных и энергетических потоков в любой точке модели, однако, арсенал статического режима моделирования не открывает перед пользователем более широкий спектр инструментов, необходимых для более детального изучения работы модели. Создание динамической модели на первых этапах выполняется аналогично статическому моделированию. Незначительные отличия наблюдаются несколько позже и проявляются эти отличия в: дополнительных настройках работы модели; управлении течением времени в модели; наличии новых элементов, которые возможно использовать в модели и др.

Постановка задачи для создания модели в динамическом режиме подразумевает под собой:

1. Установка контроллера на линию ДГА, управляющий расходом газа за счет изменения процента открытия регулирующего клапана;
2. получение зависимостей изменения параметров регулирующего клапана и мощности ДГА во времени.

Для перехода в динамический режим, на панели главного экрана необходимо выбрать режим *Dynamic*. Следующим шагом является запуск утилиты под названием *Dynamic Assistant*, которая проверяет конфигурацию модели и, если ошибок нет, пользователю предоставляется доступ к работе в режиме динамики. Для корректной работы и настройки скорости течения времени в модели, необходимо произвести первичную настройку модели в утилите *Integrator*, окно настроек которого показано на рисунке 24.



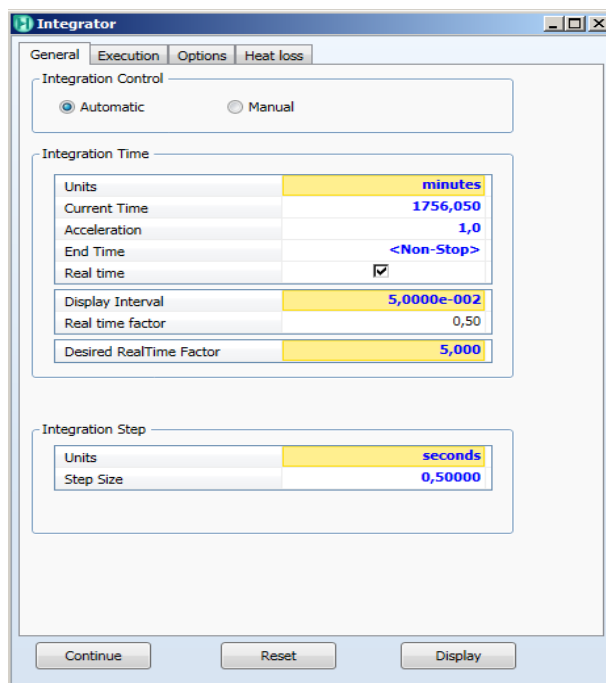


Рисунок 24. Окно настройки интегратора

Этот инструмент отвечает за частоту обновления параметров модели, скорость течения времени, степень его ускорения и др. После выполнения, описанных выше настроек, пользователь получает доступ к рабочей области модели. Выбор дополнительных элементов для динамического моделирования также, как и в режиме статики осуществляется в меню *Palette* (рисунок 25).

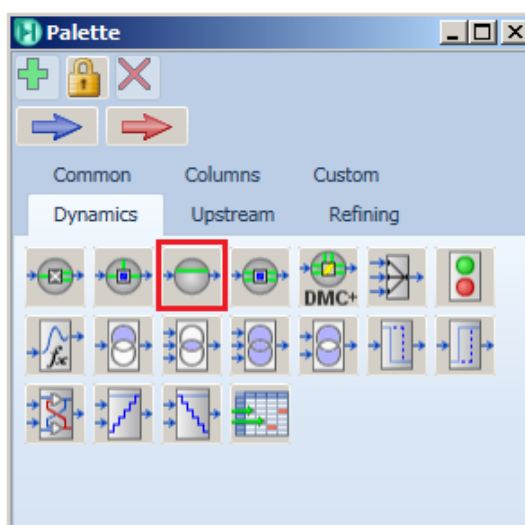


Рисунок 25. Меню Palette с доступными элементами для динамического моделирования

Необходимый контроллер, отвечающий за расход газа на детандер за счет изменения процента открытия регулирующего клапана обведен красной рамкой на рисунке 25. Модель для динамического режима работы после настройки необходимых параметров и добавления регулятора изображена на рисунке 26.

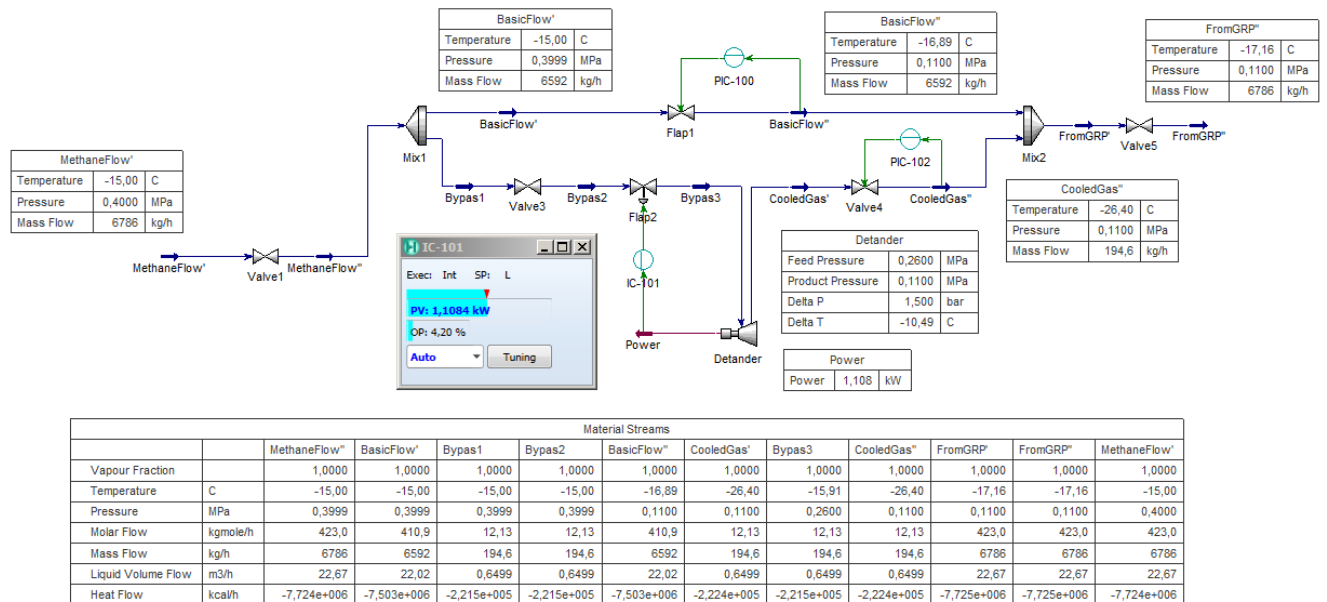


Рисунок 26. Модель для генерации электроэнергии на базе роторного ДГА малой мощности, работающая в динамическом режиме в среде Aspen HYSYS

Исходные данные для динамической модели были приняты относительно холодного периода года. Массовый расход газа в динамическом режиме подбирается автоматически, исходя от величины давления.

Для регулирования расхода газа, поступающего в ДГА используется контроллер IC-101, который относительно значения мощности ДГА, входящего в него, регулирует процент открытия клапана с целью поддержки фиксированного значения электрической мощности равного 1,1 кВт. Значения электрической мощности и соответствующего ей процента открытия в определенный момент времени отображаются в специализированном окне IC-101. Выбор переменной, за счет которой значение мощности ДГА будет варьироваться в зависимости от уставки, осуществляется в меню настройки контроллера (рисунок 27).

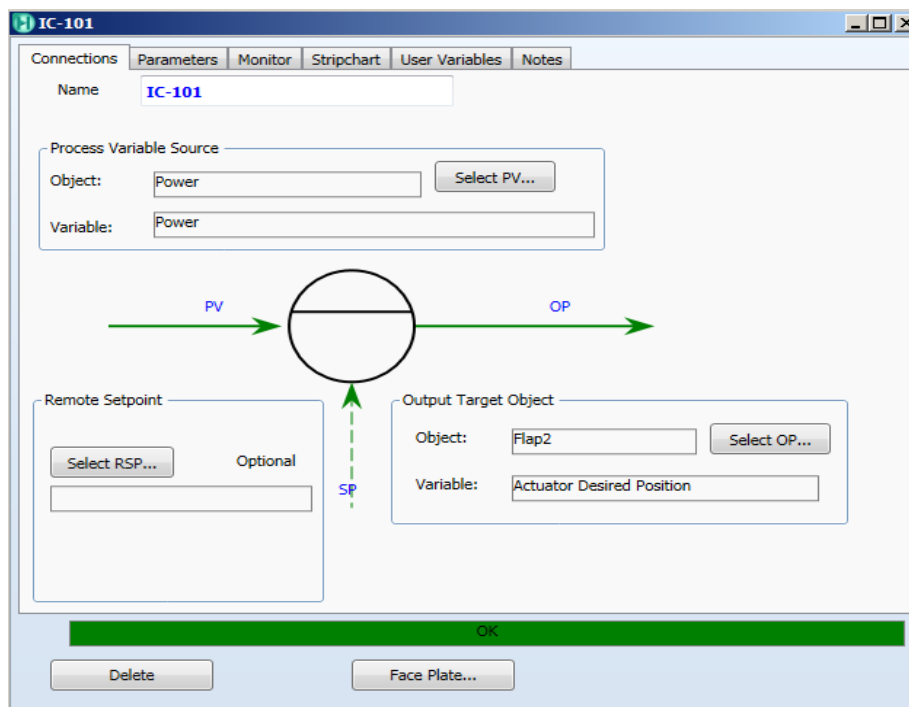


Рисунок 27. Меню настройки контроллера IC-101

При условии корректного заполнения всех необходимых меню и выбора различных переменных в элементах, пользователь может исследовать режимы работы модели. Для того, чтобы увидеть, как работает система регулирования подачи газа на ДГА, необходимо воспользоваться инструментом, доступным в динамическом режиме, который носит название *Strip Chart*. Для изучения работы системы регулирования подачи газа к ДГА, на график были добавлены следующие отображаемые величины:

- 1) Процент открытия регулирующего клапана IC-101 (синяя кривая);
- 2) массовый расход газа, поступающий к ДГА (зеленая кривая);
- 3) мощность ДГА (фиолетовая кривая);
- 4) уставка по мощности ДГА (красная пунктирная линия).

На рисунках 28–30 изображены зависимости изменения во времени величин, перечисленных выше.

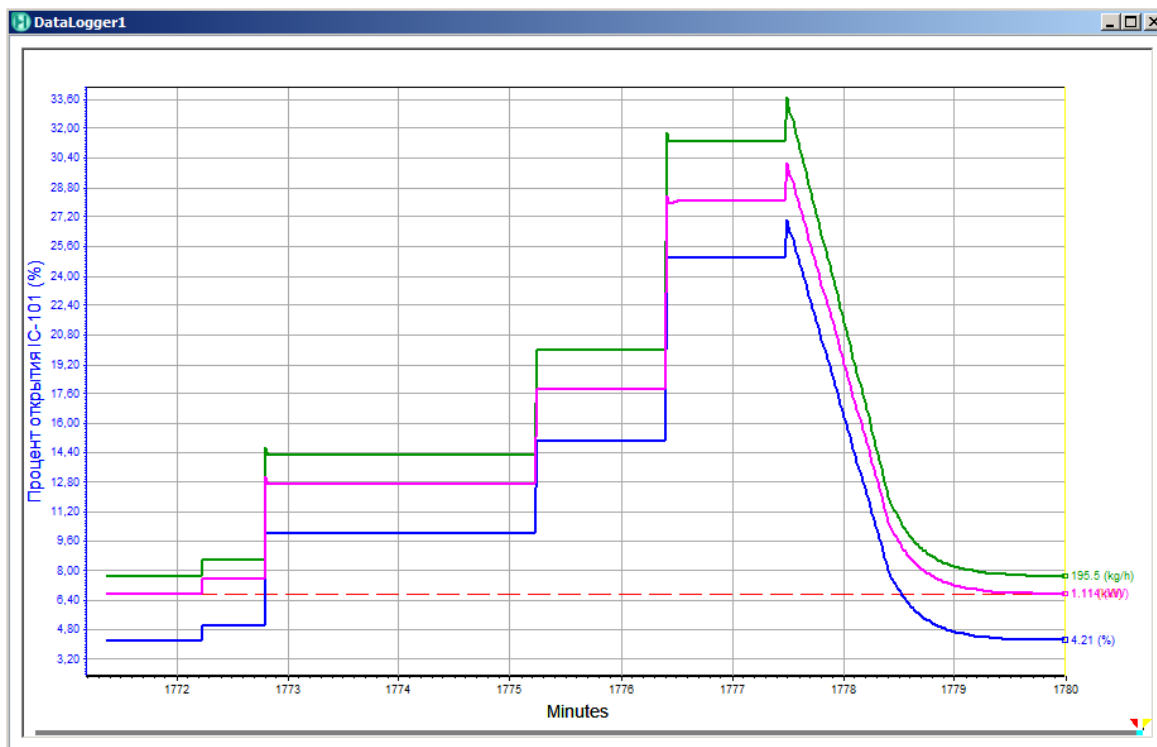


Рисунок 28. Шкала процента открытия регулирующего клапана IC-101 (начальное увеличение % открытия клапана)

На данной зависимости по оси ординат отображается шкала процента открытия регулирующего клапана IC-101. Переключение между отображаемыми шкалами любой из всех имеющихся кривых, осуществляется при нажатии на соответствующую кривую с присвоенным ей цветом.

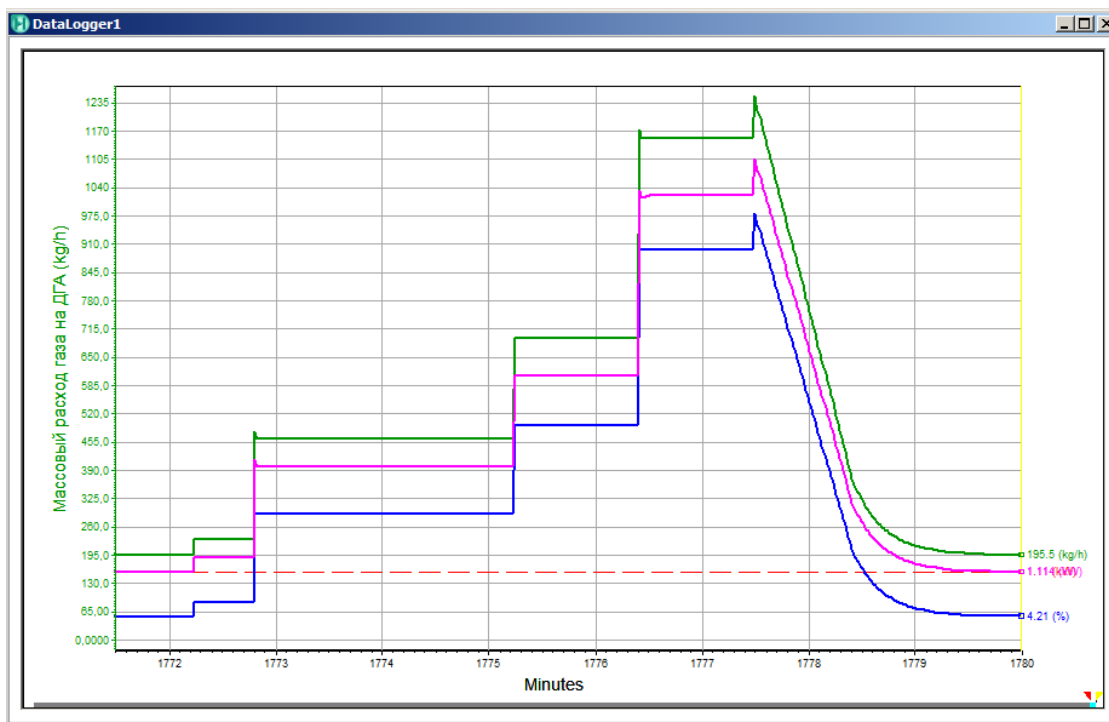


Рисунок 29. Шкала массового расхода газа, поступающего к ДГА (начальное увеличение % открытия клапана)

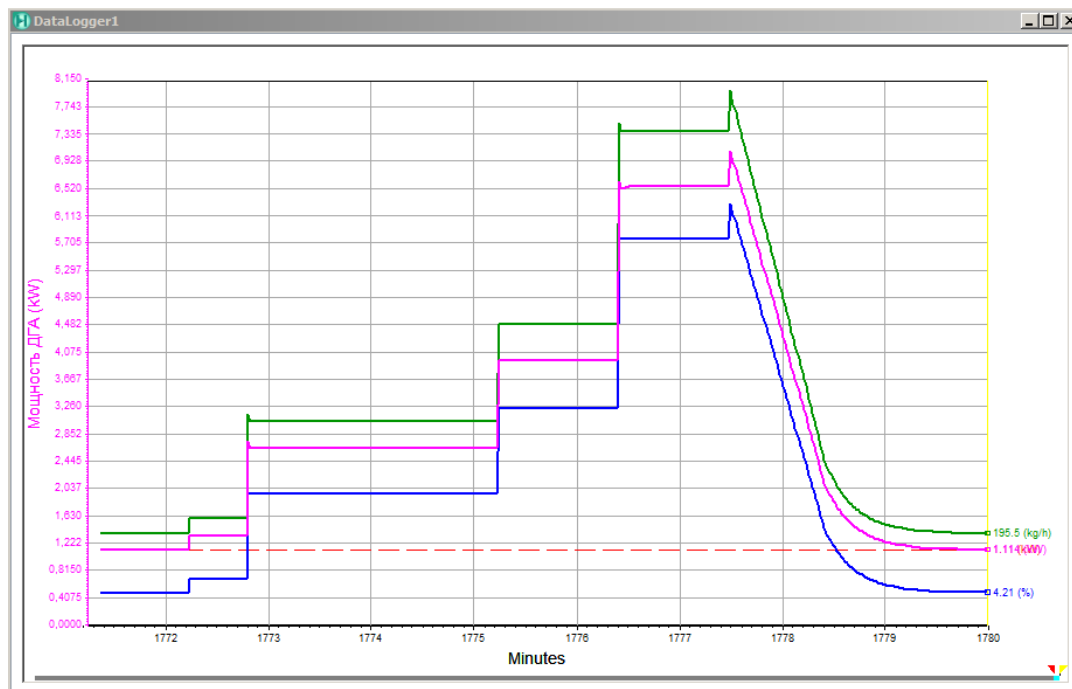


Рисунок 30. Шкала мощности ДГА (начальное увеличение % открытия клапана)

Получение зависимостей (рис.28–30) производилось пошаговым (ручным) увеличением процента открытия клапана, вследствие чего фиксировались

соответствующие значения мощности ДГА, которые также возрастали. Величина уставки (красная линия) всегда постоянна, так как она задается пользователем и не изменяется во времени. После нескольких шагов, регулятор был переведен в автоматический режим, на графике этому соответствует пик, после которого автоматика начала уменьшать процент открытия клапана, тем самым уменьшая генерируемую в ДГА мощность. Спустя некоторый отрезок времени величина мощности ДГА становится равна значению уставки (1,1 кВт) с соответствующими ей проценту открытия регулирующего клапана и массового расхода газа, после чего регулирование отсутствует и все величины приобрели вид прямой.

На рисунках 28–30 начало графиков задавалось за счет увеличения процента открытия регулирующего клапана, на которых имеется четкое разделение ручной работы с регулятором и автоматической. Аналогично зеркальная тенденция прослеживается на рисунках 31–33.

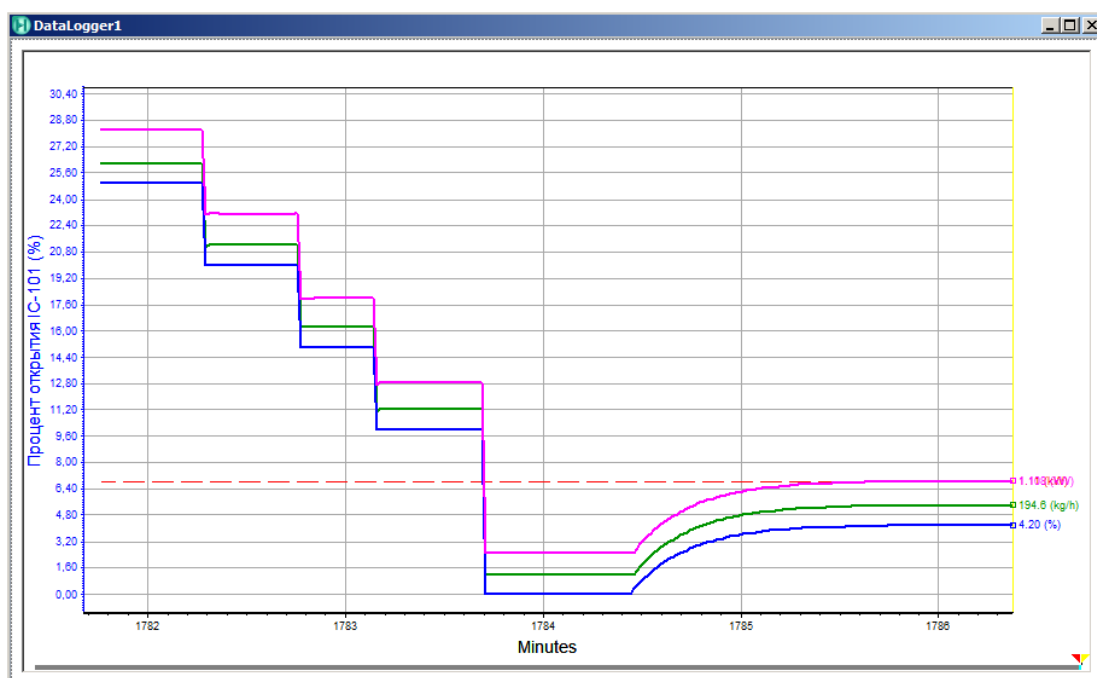


Рисунок 31. Шкала процента открытия регулирующего клапана IC-101 (начальное уменьшение % открытия клапана)

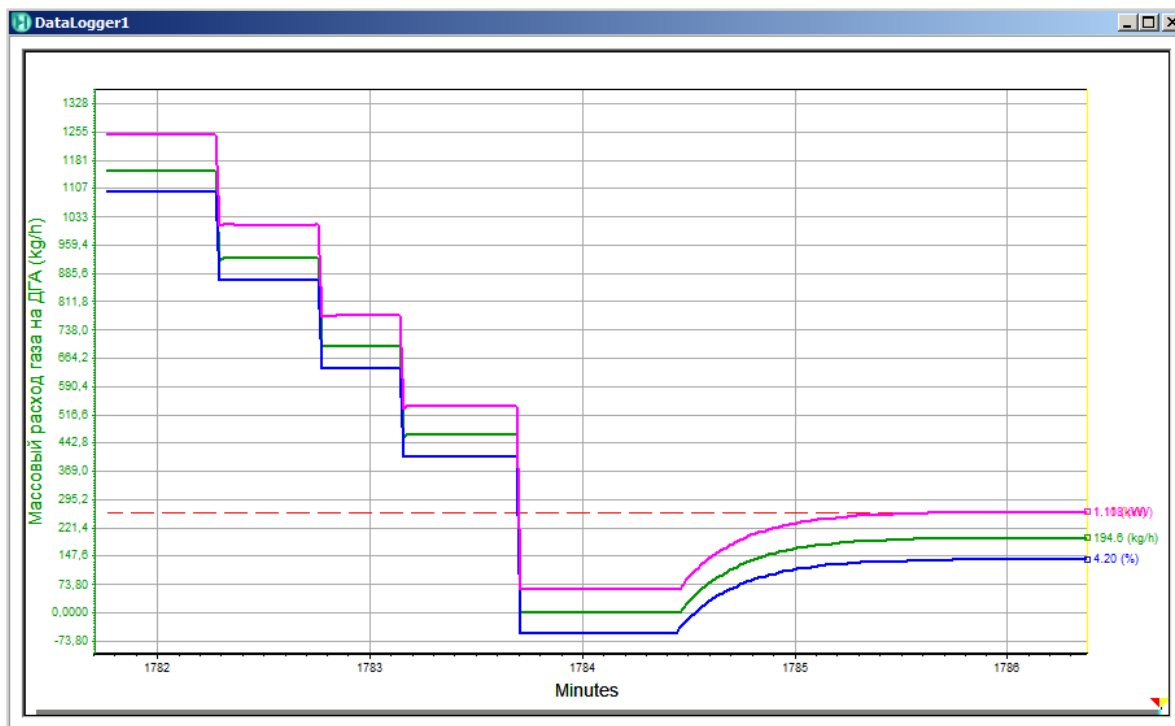


Рисунок 32. Шкала массового расхода газа, поступающего к ДГА (начальное уменьшение % открытия клапана)

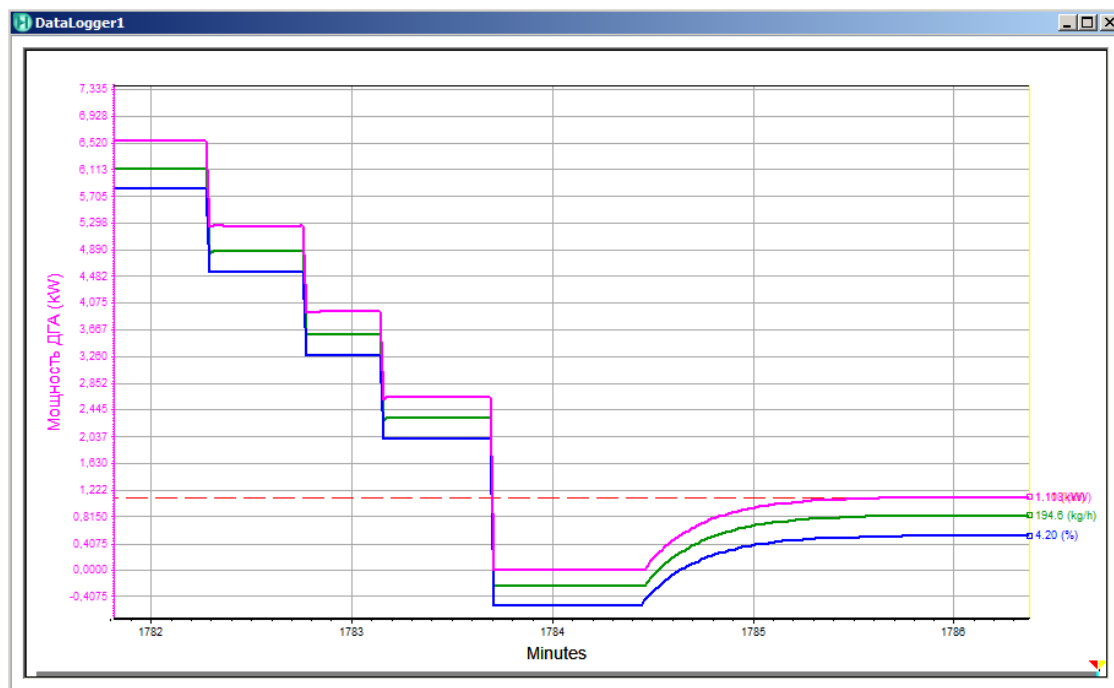


Рисунок 33. Шкала мощности ДГА (начальное уменьшение % открытия клапана)

В данном случае, в отличие от рисунков 28–30, изначально с помощью ручного ввода процент открытия регулирующего клапана с каждым разом

понижался, следовательно, и мощность ДГА снижалась. Ручное регулирование заканчивается также снизу, после чего автоматика в автоматическом режиме увеличивала % открытия клапана с целью достижения вырабатываемой ДГА мощности, пока та не станет равной 1,1 кВт.

Полученные результаты показывают, что при любом отклонении работы установки от штатного режима, система автоматического регулирования расхода газа, подаваемого на ДГА, стремится добиться состояния равновесия системы, при условиях которого на ДГА будет подаваться определенное количество природного газа для генерации в детандер-генераторном агрегате электрической мощности равной 1,1 кВт, что является ее непосредственной задачей. Достижение состояния равновесия достигается регулированием процента открытия регулирующего клапана. Система автоматического контроля параметров технологического оборудования обеспечивает его корректную эксплуатацию в номинальном режиме и поддержание стабильной работы в течение всех часов работы оборудования, а также обеспечивает его безопасность при возникновении нештатных ситуаций во избежание повреждения оборудования и недопущения человеческих жертв на объекте.

### **3.3 Оценка величины электроэнергии, сэкономленной за счет применения на ГРП ДГА малой мощности в роли автономного источника электроснабжения**

Оценка величины электроэнергии, которую можно сэкономить при условии того, что на ГРП установлен роторный ДГА малой мощности, показана с помощью оценочного расчета, в котором некоторые показатели усредненные. Полученный результат должен показать какое количество электроэнергии можно сэкономить при теоретическом снабжении ГРП в нашей стране детандерами малой мощности.

Число газорегуляторных пунктов на территории нашей страны  $Z_{грп}$  колеблется в районе 250 000, имеющих разные перепады давлений и пропускную способность. Положительными сторонами ДГА малой мощности являются небольшие габариты



агрегата, также они дают некоторое преимущество в надежности функционирования ГРП, если учитывать, что объект находится далеко от точки присоединения к ВЛЭП, вследствие чего возможны аварии.

Как было сказано ранее, электропотребление у основной массы ГРП не превышает суммарно 5 кВт. В связи с неимением конкретных статистических данных, для простейшего оценочного расчета условно принимается, что требуемая мощность для объектов ГРП составляет 2,5 кВт. Тогда экономия электрической мощности составляет:

$$N_{\text{экон}}^{\text{ГРП}} = N_{\text{дга}} \cdot Z_{\text{грп}} = 2,5 \cdot 250\,000 = 625 \cdot 10^3 \text{ кВт} = 625 \text{ МВт} \quad (3.4)$$

При условии экономии 625 МВт суммарно от всех ГРП нашей страны, можно оценить количество электроэнергии, которая могла быть сэкономлена от применения ДГА в течение года, тогда:

$$N_{\text{год}}^{\text{экон}} = N_{\text{экон}}^{\text{ГРП}} \cdot n_{\text{ч}}^{\text{год}} = 625 \cdot 8760 = 5,475 \cdot 10^6 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (3.5)$$

В рамках нашей страны применение энергосберегающих мер в системах газораспределения, а именно, применение маломощных роторных ДГА для электроснабжения объектов ГРП с целью покрытия собственных нужд, может не только повысить надежность работы самих ГРП, а также получается, что у газовой компании отсутствует необходимость в продаже электроэнергии в сеть, так как это может снизить цену поставляемой энергии. Автономное электроснабжение ГРП прежде всего позволит покупать меньшее количество электроэнергии от внешних источников.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с ежегодным ростом населения Земли, энерговооруженности труда, наблюдается стремительное увеличение темпа добычи и потребления энергетических ресурсов. Наша страна не является исключением. Вопрос энергосбережения остро стоит в каждой промышленной отрасли, в том числе и в системах газотранспорта газораспределения.

За последнее столетие технический прогресс прошел различные этапы развития и становления. Благодаря этому, прежде чем рассуждать о целесообразности той или иной меры по энергосбережению в конкретной области, имеется возможность смоделировать любую технологическую схему с применением специального программного обеспечения для выявления трудностей или нюансов в ходе ее эксплуатации.

В выполненной работе рассматривалась актуальность и возможность полезного использования перепада давлений природного газа в детандер-генераторном агрегате малой мощности с целью выработки электроэнергии для покрытия собственных нужд здания ГРП. Моделирование процессов производилось в среде Aspen HYSYS с помощью моделей, работающих в статическом и динамическом режимах. Результатом моделирования в статическом режиме является получение зависимостей мощности ДГА от количества природного газа, направляемого в линию ДГА как для теплого, так и для холодного периодов года. Динамическая модель позволила получить зависимости процента открытия регулирующего клапана, массового расхода газа, величины мощности ДГА, изменяющихся во времени. Данные зависимости также позволяют проследить работу системы автоматического регулирования подачи газа к ДГА. В процессе моделирования приобретены практические навыки работы в среде Aspen HYSYS. Произведен простейший оценочный расчет количества электроэнергии, которую можно сэкономить при применении рассматриваемого способа энергосбережения в системах газораспределения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: [утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р] [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс: справочная правовая система–Электрон. док.–2014.–Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_94054/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/). (Дата обращения 10.04.20).
2. Кротевич В.А. Опыт создания автономной системы электропитания для газовой промышленности // Веб-сайт Тов. "ДП УКРГАЗТЕХ". – 2018. – Режим доступа: [http://www.dgt.com.ua/news/oil-gas/udk\\_621\\_362/udk\\_621\\_362.pdf](http://www.dgt.com.ua/news/oil-gas/udk_621_362/udk_621_362.pdf) (Дата обращения 12.04.20).
3. Епифанова В.И. Компрессорные и расширительные турбомашин радиального типа / В.И. Епифанова. – М.: МВТУ им. Н. Баумана, 1998. – 376 с.
4. Кулагина О.В. Повышение Энергоэффективности Системы Газоснабжения При Внедрении Энергохолодильных Комплексов.
5. Н 165 Нагнетатели и тепловые двигатели Ч.1: — учебное пособие / Н.В. Калинин, В.И. Субботин, В.И. Ситас, А.В. Федюхин — М.: Издательский дом МЭИ, 2017. - с.р.
6. [https://otherreferats.allbest.ru/physics/00222357\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/physics/00222357_0.html) (Дата обращения 20.04.20).
7. Черных А.С. Повышение эффективности электроснабжения технологических объектов системы газораспределения за счет применения автономных источников электроэнергии на базе детандерных электроагрегатов с роторным и шестеренным приводом.
8. Агабабов В.С. Оценка эффективности использования детандер – генераторных агрегатов для получения электроэнергии / В.С. Агабабов Агабабов, В.С. Бестопливные детандер-генераторные установки: учебн. пособие / В.С. Агабабов, А.В. Корягин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
9. Кулагина О.В. Использование избыточной энергии давления природного газа на небольших газораспределительных станциях // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. – Томск. – 2013. – С. 263-264.
10. Пятов И.С. Детандеры объемного типа // Двигатель. – №4. – 2009. – С. 54- 60.
11. Агабабов, В.С. Оценка эффективности работы бестопливных энергогенерирующих установок для производства электроэнергии в системе газоснабжения / В.С. Агабабов, У.И. Смирнова, А.М. Колосов // Вестник МЭИ. – 2010. – №2.
12. Репин Л.А. Возможности использования энергии давления природного газа на ма-лых газораспределительных станциях // Энергосбережение. – №3. – 2004. – С. 34-39. Агабабов В.С. Установка для производства электроэнергии на базе ДГА, воздушных турбины и компрессора / В.С. Агабабов, Е.В. Джураева, А.Ю. Архарова // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2.
13. Турбодетандеры [Электронный ресурс] // Веб-сайт НПП «Газэлектроприбор». – 2018. – Режим доступа: <http://detander.com/turbodet/>
14. Карасевич В.А. Перспективы применения автономных источников энергии при транспортировке и распределении газа / В.А. Карасевич, А.С. Черных, А.А. Яковлев // Научный журнал российского газового общества. – №1. – 2016. – С. 59-61.
15. Фокин Г.А. Методология создания автономных турбинных источников электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы России: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Фокин Григорий Анатольевич. – СПб., 2015. – 456 с.

## Приложения

### Приложение 1. Чертеж роторного кулачкового ДГА малой мощности

