

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И.Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела имени К. Турысова

Кафедра Нефтяной инженерии

Ажакаев Нуржан Нурбаевич

Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании
автоматизированных газораспределительных станциях

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 7М07202 – «Нефтяная инженерия»

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И.Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела имени К. Турысова

Кафедра Нефтяной инженерии

УДК 622.692

На правах рукописи

Ажакаев Нуржан Нурбаевич

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

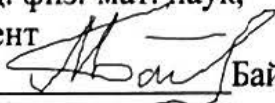
Интенсификация теплообменных
процессов в оборудовании
автоматизированных

Направление подготовки

газораспределительных станциях
7M07202 – «Нефтяная инженерия»

Научный руководитель:

канд. физ.-мат. наук,
доцент



Баймухаметов М.А.

22.06.2021 г.

Рецензент:

канд. хим. наук, ассоц. профессор

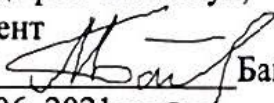
Каспийского Университета

Нуранбаева Б.М.

« 22 » 06 2021 г.

Нормоконтроль:

канд. физ.-мат. наук,
доцент



Баймухаметов М.А.

22.06.2021 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
«Нефтяная инженерия»

Дайыров Ж.К.

« ___ » _____ 2021 г.

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И.Сатпаева

Институт геологии, нефти и горного дела имени К. Турысова

Кафедра Нефтяной инженерии

7M07202 – «Нефтяная инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

«Нефтяная инженерия»

_____ Дайров Ж.К.

« ____ » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Ажакаеву Нуржану Нурбаевичу

Тема: Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях

Утверждена приказом Ректора Университета № 330-М от «11» ноября 2019 г.

Срок сдачи законченной диссертации _____

Исходные данные к магистерской диссертации: результаты исследований существующих АГРС

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) изучение современного состояния вопроса;

б) теоретические исследования процесса применения турбодетандерных установок для повышения эффективности работы газораспределительных станций;

в) актуальность применения энергосберегающих технологий;

г) расчет экономической эффективности;

Перечень графического материала: 15 слайдов



ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

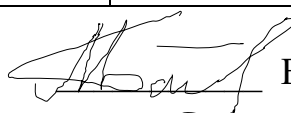
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Основные проблемы, связанные с применением турбодетандерных установок.	22.11.2019-16.03.2020	
Выявление технико-технологических особенностей эффективности применения турбодетандеров на АГРС-1 Орбита.	17.03.2020-13.02.2021	
Обоснование технологических решений для повышения эффективности работы турбодетандеров и выработки электроэнергии	15.02.2021-15.05.2021	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	кандидат физико-математических наук, доцент Баймухаметов М.А.	22.06.2021	
Нормоконтролер	кандидат физико-математических наук, доцент Баймухаметов М.А.	22.06.2021	

Научный руководитель

 Баймухаметов М.А.

Задание принял к исполнению обучающийся

 Ажакаев Н.Н.

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на магистерскую диссертацию

Ажакаева Нуржана Нурбаевича

по специальности 7М07202 – «Нефтяная инженерия»

На тему: **«Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях»**

Задачей диссертационной работы является изучение и выбор наиболее эффективного метода применения турбодетандерных установок на автоматизированных газораспределительных станциях; проведение анализа возможности использования при эксплуатации, проверка интенсификации и работы теплообменных процессов при использовании турбодетандеров на АГРС. Тема диссертационной работы полностью соответствует специальности 7М07202 – «Нефтяная инженерия».

Ажакаев Нуржан Нурбаевич выполнил поставленные перед ним задачи, приобрел практические навыки по выбору эффективности применения турбодетандерных установок, который можно выбрать только на основании изучения состояния АГРС, его технических характеристик и условия эксплуатации.

Результаты работы были опубликованы в материалах республиканской научно-практической конференции «Сатпаевские чтения – 2021» в секторе «Современные технологии в процессах бурения, добычи, сбора и транспортировки нефти и газа» на тему: «Эффективность применение турбодетандерных установок в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях и газораспределительных пунктах».

Ажакаев Нуржан за время учебы в магистратуре вырос как специалист в области нефтегазового дела, приобрел необходимые исследовательские навыки, которые в будущем ему позволят стать хорошим специалистом способным самостоятельно ставить и решать научно-практические задачи. Все результаты свидетельствуют о направленности решения актуальной проблемы, которые возникают при работе магистральных газопроводов, в том числе автоматизированных газораспределительных станциях. Полученные данные являются полными и исчерпывающими. По уровню экспериментальной и теоретической подготовки Ажакаев Н.Н. достоин наивысшей оценки и присуждения академической степени магистра.

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук,
доцент



Баймухаметов М.А.

«24» мая 2021 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

Ажакаев Нуржан Нурбаевич

по специальности 7М07202 – «Нефтяная инженерия»

На магистерскую диссертацию Ажакаева Нуржана Нурбаевича по специальности 6М070800 – «Нефтяная инженерия» на тему «Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях».

Рецензируемая работа представлена на 15 слайдах и пояснительная записка на 60 страницах.

В настоящее время в Казахстане с большими темпами проводится газификация многих регионов, в частности северных областей республики. Для решения таких масштабных целей проводятся мероприятия по прокладке магистральных газопроводов и сооружая автоматизированные газораспределительные станции, основным назначением которого является понижение и удерживание давления в заданном режиме для подачи газа потребителям. Зачастую при эксплуатации таких станции возникает немало проблем с нехваткой электроэнергии для собственных нужд, которое сказывается на общей непрерывной работе газораспределительных станции и снижению общего КПД, так как значимость подачи газа населению является приоритетом всегда. Для решения бесперебойной работы и увеличение автономной работы АГРС возможны применения различные способы. Наиболее хорошим методом является применение турбодетандерных установок, для эффективного редуцирования газа и выработки электроэнергии для собственных нужд.

Основной задачей настоящей работы было выявление наиболее эффективного метода применения турбодетандерных установок на автоматизированных газораспределительных станциях, который можно выбрать на основании изучения состояния АГРС, его конструкции, условия эксплуатации, продукта, который по нему перекачивается и всевозможных конструкционных особенностей.

По результатам исследований опубликована и доложена научная статья на конференции «Сатпаевские чтения – 2021» при университете Satbayev University в секторе «Современные технологии в процессах бурения, добычи, сбора и транспортировки нефти и газа» на тему: «Эффективность применение турбодетандерных установок в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях и газораспределительных пунктах»

К замечанию можно отнести неточность формулировок, касающиеся обоснования принимаемых решений.

В совокупности полученных результатов работы Ажакаев Н.Н. вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, достойна положительной оценки, а ее автор достоин присвоения степени магистра.

Рецензент  Нуранбаева Булбул Молдашевна

Занимаемая должность: Лидер программ по направлению подготовки «Нефтегазовое дело»
кандидат химических наук, ассоц. профессор УО Каспийского общественного университета.

Протокол анализа Отчета подобия

заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Ажакаев Нуржан Нурбаевич

Название: Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях

Координатор: Мурат Баймухаметов

Коэффициент подобия 1:2.8

Коэффициент подобия 2:0.2

Замена букв:44

Интервалы:11

Микропробелы:34

Белые знаки:0

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Дата

Подпись заведующего кафедрой /

начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Дата

Подпись заведующего кафедрой /

начальника структурного подразделения

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Ажакаев Нуржан Нурбаевич

Название: Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях

Координатор: Мурат Баймухаметов

Коэффициент подобия 1: 2.8

Коэффициент подобия 2: 0.2

Замена букв: 44

Интервалы: 11

Микропробелы: 34

Белые знаки: 0

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование:

..обнаруженные заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата.....
Работу признаю самостоятельной и допускаю к защите.

22.06.2021 г.

Дата



..... Баймухаметов М.А.

Подпись Научного руководителя

АҢДАТПА

Магистірлік диссертацияның тақырыбы: «Автоматтандырылған газ тарату станциялары жабдықтарындағы жылу алмасу процестерін интенсификациялау». Магистірлік диссертация 60 бет көлемінде аяқталды.

Бұл магистірлік диссертацияда автоматтандырылған газ тарату станцияларының құрамында турбодетандерлі жабдықтарды қолдану арқылы жылу алмасу процестерін жетілдіру амалдыры қарастырылған. Математикалық есептеулер мен әдістемелер ұсынылған.

Қорытындылай келе, барлық жұмыстың нәтижелері мен қорытындылары шығарылады.

АННОТАЦИЯ

Темой магистерской диссертации является «Интенсификация теплообменных процессов в оборудовании автоматизированных газораспределительных станциях». Магистерская диссертация выполнена в объеме – 60 страниц.

В данной магистерской диссертации рассмотрены методы улучшения теплообменных процессов с использованием турбодетандерных установок в составе автоматизированных газораспределительных станциях. Предложена расчетная методика математических задач.

В заключении обобщены результаты и выводы всей проделанной работы.

ABSTRACT

The theme of the master's dissertation is « Intensification of heat exchange processes in the equipment of automated gas distribution stations». The master's dissertation was completed in the amount of 60 pages.

In this master's dissertation methods for improving heat exchange processes using turboexpander units as part of automated gas distribution stations were examined. There is a computational technique and mathematical solution of problems.

In conclusion, the results of all the work done are summarized.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Изучение состояния вопроса и постановка цели и задачи исследования	11
1.1	Области применения турбодетандеров	12
1.2	Особенности работы утилизационного турбодетандера	14
1.3	Типы конструкций эксплуатируемых турбодетандеров	18
1.4	Технологическая схема утилизационной турбодетандерной установки при совместной работе с воздушной климатической системой	19
1.5	Турбодетандерная утилизационная установка для потребителей, использующих природный газ с различным давлением	25
2	Анализ высокоэффективных технологий на базе турбодетандерной техники	28
3	Общие характеристики АГРС-1 Орбита в качестве исследуемого объекта	34
3.1	Общие сведения рассматриваемой АГРС	34
3.2	Конструктивные решения блок-контейнеров АГРС	35
3.3	Основные технико-технологические характеристики АГРС-1 Орбита	36
3.3.1	Описание технологии турбодетандерных агрегатов (ТДА)	39
3.3.2	Принцип работы турбодетандера	39
4	Расчет эффективности применения турбодетандеров на АГРС	41
4.1	Анализ полученных результатов	
5	Экономическая эффективность проекта по применению турбодетандерных установок на АГРС	43 47
5.1	Актуальность применения энергосберегающих технологий	
5.2	Расчет экономических показателей	47
5.3	Прогнозируемый срок окупаемости проекта	48
		49
	Основные выводы и рекомендации	51
	Список использованной литературы	52

ВВЕДЕНИЕ

Природный газ - энергия XXI века. Так образно подчеркивается его значение в развитии топливно-энергетического комплекса современного общества. Доля природного газа в мировом топливно-энергетическом комплексе, как ожидается, в первой половине XXI века возрастет до 30%. В последние десятилетия все больше внимания уделяется разработке мероприятий по повышению энергоэффективности производства. Значительные возможности экономии энергетических ресурсов имеются при их потреблении. С точки зрения энергосбережения в газотранспортной системе на сегодня весьма перспективной является утилизация энергии избыточного давления природного газа, подводимого по газопроводам к автоматизированным газораспределительным станциям (АГРС). Техническим средством при этом являются специально разрабатываемые энергосберегающие турбодетандерные установки, преобразующие энергию избыточного давления природного газа в электроэнергию.

Постоянный рост потребления природного газа влечет за собой необходимость увеличения энергозатрат, также ресурсных затрат на подготовку и транспортировку газа.

Одним из пунктов реализации программы энергосбережения в Казахстане в рамках эксплуатации газотранспортной системы (ГТС) является внедрение турбодетандерных установок на объектах ГТС. В типовые энергосберегающие технологии включена технология применения детандер-генераторных агрегатов для выработки электроэнергии на АГРС при дросселировании природного газа, что позволит вырабатывать электроэнергию для собственных нужд на бестопливной основе. Однако, если внедрить такую технологию, расход природного газа на АГРС значительно возрастет. Поэтому в научных кругах и в эксплуатирующих организациях не утихают споры об эффективности и целесообразности замены дросселирующих устройств на ТДУ на АГРС. С точки зрения энергосбережения в газотранспортной системе на сегодняшний день весьма перспективной является утилизация энергии избыточного давления природного газа в турбодетандере как один из способов использования вторичных энергоресурсов.

Турбодетандером называется утилизационная, т. е. не потребляющая топлива, расширительная турбина, механически связанная с потребителем ее мощности, например электрогенератором, компрессором и т. п. Таким образом, турбодетандеры утилизируют собственные энергетические ресурсы газотранспортной системы (полезно не используемый перепад давлений газа) и достаточно просты в эксплуатации. Однако существуют два больших препятствия для внедрения этой технологии, а именно: пригодность участка (АГРС) для возможного размещения турбодетандера и законодательные барьеры. Выбор АГРС для размещения турбодетандера важен с многих точек зрения, основной из которых является экономика.

Кроме того, важными соображениями при выборе участка являются: доступность близлежащей электросети или другого рынка для электричества, требования к воздушному шуму с точки зрения удаленности от жилья, наличие земельного участка для размещения установки, величина сезонных изменений расхода и давления.

В любом случае, выбор наиболее эффективного способа применения энергосберегающих установок, а именно рассматриваемых турбодетандерных установок в составе АГРС возможно только на основании изучения состояния самой станции, состоянии газопроводов, их конструкции, условия и режимов эксплуатации, качество и состав продукта который по нему перекачивается, срока службы и многих других конструктивных особенностей.

При этом руководствуются не только соображениями эффективности применения турбодетандерных установок после реконструкции площадок, но и безопасности его эксплуатации для человека и окружающей среды.

Цель работы:

- Повышение энергоэффективности системы газоснабжения.
- Обоснование эффективности использования избыточного давления природного газа в турбодетандерных установках на основании рационального применения основных узлов АГРС, а именно узлов подогрева и редуцирования.
- Обоснование применения турбодетандеров в получении электроэнергии для нужд АГРС при теплообменных процессах.

Значимость работ:

- Выявлении наиболее эффективного метода интенсификации теплообменных процессов АГРС.
- Проведение термодинамического, энергетического и экономического анализа с установкой турбодетандеров на существующей площадке.
- Разработка и выбор наиболее эффективного варианта схемы установки ТДУ.

1 Изучение состояния вопроса и постановка цели и задачи исследования

Проблеме эффективности применения турбодетандерных установок на различных системах применения посвящено большое количество работ о отечественных и зарубежных авторов. Основоположником использования турбодетандеров в технологии переработки газов является академик Капица П.Л. В 1939 г. П.Л. Капица в СССР был предложен более эффективный турбо детандер для крупных воздуходелительных установок низкого давления реактивного типа. Он показал, что турбодетандеры нужно делать по типу радиальных гидротурбин с расширением газа не только в неподвижных каналах направляющего аппарата, но и в каналах вращающегося рабочего колеса, используя градиент давления, создаваемый действием центробежных сил. Рабочее колесо турбодетандера П.Л. Капицы имело длинные лопатки малой кривизны. [33]

На первых же машинах, выполненных по схеме Капицы, был получен изоэнтропийный КПД около 80 %. Этот тип стал основной конструкцией современных турбодетандеров как у нас в стране, так и за рубежом. [33]

Большой вклад в развитие технологических схем добычи и транспортирования природного газа и усовершенствование конструкций турбодетандерных установок внесли Язык А.В., Елифанова В.И., Степанец А.А., Мальханов О.В. и Агабабов В.С. В то же время для увеличения эффективности работы газодобывающих и газотранспортных комплексов целый ряд проблемных вопросов, таких как: увеличение качества природного газа, который подаётся в магистральный газопровод; выработка электроэнергии за счет потенциальной энергии сжатого газа и другие, требуют совершенных решений.

Выполненный обзор литературных источников позволил определить проблемы и состояние современных турбодетандерных установок, на основании которых были выбраны направления исследований. Особенности работы турбомашин в газовой отрасли определяются как свойствами [1] и параметрами рабочего тела (природного газа), так и работой проточной части в двухфазном потоке. Рабочая среда турбодетандеров — это многокомпонентный природный газ, содержащий кроме семейства углеводородов еще и сероводород, водяной пар, кислород, водород и другие вещества, которые существенно влияют на характеристики и конструкцию турбомашин. Количественное содержание названных компонентов природного газа практически на всех месторождениях различно. Поэтому для получения требуемого состава природного газа, соответствующего требованиям ГОСТ 5542-87 [2] или другого необходимого содержания, следует либо разрабатывать новые схемы подготовки газа, очистки, осушки и его переработки, либо правильно подбирать такие схемы из существующих.

От правильного выбора схемы зависит эффективность и качество переработки природного газа. На выбор применяемой схемы влияют параметры газа, особенно его давление. При высоком давлении газа применяются более простые схемы. В случае низкого значения давления, применяемые схемы усложняются, добавляются дополнительные устройства и установки. Поэтому разработка новых схем, позволяющих решать возникающие сложные проблемы, связанные с работой турбодетандеров в области переработки газа, является одной из актуальных задач. В процессе эксплуатации турбодетандерных холодильных агрегатов (ТДА) в условиях применения на газораспределительных станциях, довольно часто изменяются параметры эксплуатации, а также возможно изменение гидравлических параметров трубопроводов и технологических аппаратов, расположенных в газовой магистрали между турбиной и компрессором, что приводит к необходимости оценки работы ТДА на режимах, отличных от расчетного. При строгом подходе к решению этой задачи, необходимо для каждого конкретного режима выполнить решение прямой задачи расчета течения газа в турбине, и по полученным результатам (мощности на валу) определить параметры на входе и выходе. Решение такой задачи сопряжено с достаточно большим объемом вычислительных работ, особенно если приходится рассчитывать большое количество значений. Поэтому необходимо для конкретной конструкции турбодетандеров на основе расчетного исследования разработать рекомендации и методики по выбору совместного режимов работы турбодетандера с минимальными затратами расчетного времени. Таким образом, разработка методики и расчетной программы для расчета совместного режима работы турбодетандера и компрессора является актуальной задачей. Как было сказано ранее, турбодетандеры работают в широком диапазоне изменения физических параметров, и для того, чтобы обеспечить незначительное снижение КПД на режимах, отличных от расчетного, необходимо разработать рекомендации по созданию проточной части. Большая доля от суммарных потерь в турбодетандере при работе на нерасчетном режиме перепадает на рабочее колесо. Это связано, в основном, с нерасчетным углом натекания потока на рабочие лопатки, что приводит к отрывам пограничного слоя и образованиям вихрей. Поэтому, важная проблема – разработка рекомендаций по созданию формы профиля рабочей лопатки.

1.1 Области применения турбодетандеров

Турбодетандерами называются турбомашин, используемые для расширения газов. Название турбодетандер состоит из двух слов «турбина» - лопаточный двигатель, преобразующий энергию потока рабочей среды в механическую, и «детандер» происходит от французского слова *detendre* - расширять сжатое. Отличие турбины от турбодетандера заключается в том, что основное назначение турбины — это выработка механической энергии, а основное назначение турбодетандера — это производство холода [3].

Установки, которые за счет расширения природного газа вырабатывают механическую энергию и служат приводом электрогенератора, называются утилизационными турбодетандерными установками (УТДУ) [4,5,6] или детандер-генераторными агрегатами (ДГА) [7-9]. Турбодетандерные установки, которые вырабатывают холод и которые служат приводом компрессора, называются турбодетандерными агрегатами (ТДА). УТДУ используют излишек давления газа для выработки электроэнергии на газораспределительных станциях или газораспределительных пунктах, а ТДА используют в различных схемах охлаждения, очистки, осушки и сепарации низкокипящих углеводородов из природного газа. В газовой промышленности турбодетандеры используются для:

- пуска газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата (ГПА), а также для проворачивания ее ротора при останове (с целью его охлаждения); при этом турбодетандер работает на транспортируемом газе [10];
- охлаждения природного газа (при его расширении в турбине) в установках его сжижения [11, 12];
- охлаждения природного газа в установках при «промышленной» подготовке для транспорта по трубопроводной системе (удаление влаги путем ее вымораживания и т.п.) [13, 14];
- привода компрессора высокого давления с целью подачи газа в подземные хранилища;
- выработки электроэнергии на газораспределительных станциях (ГРС) системы транспорта природного газа к его потребителям с использованием в турбине перепада давлений газа между трубопроводами высокого и низкого давления [15 - 19].
- 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 [20 - 24].

В виду индивидуальности физических параметров, компонентных составов и расходов природного газа каждого месторождения или ГРС, часто приходится разрабатывать технологические схемы и проектировать новую проточную часть, вводя новые поправочные коэффициенты, создавая новые методики расчета потерь и других параметров. Другими словами, приходится выполнять дополнительные исследования, необходимые для получения достоверной информации о работе агрегата, особенно, если турбина работает в области конденсации некоторых фракций природного газа.

Соответственно, вновь спроектированные проточные части всегда требуют доводки после испытаний на натурном газе с натурными параметрами. На сегодняшний день, по-прежнему, основным методом изучения и доводки турбодетандеров является физический эксперимент. Однако, в последние годы с ростом возможностей вычислительной техники заметно увеличилась степень отработки конструкций проточных частей турбодетандеров с использованием численных экспериментов. Численный эксперимент часто предполагает проведение расчетов с использованием методов конечных элементов, но из-за высоких требований к ресурсам персонального компьютера (ПК) не всегда удается провести его достоверно. В связи с этим параллельно развивался метод псевдо 3D расчета, реализуемый на базе системы эмпирических уравнений и зависимостей. Этот вариант расчета не такой информативный по сравнению с расчетом методом конечных элементов, но позволяет достаточно быстро провести оценку показателей работы турбомашин с допустимой точностью и при этом не требует мощного ПК и больших временных затрат. В настоящее время большое число работ как в нашей стране, так и зарубежных, посвящено исследованию аэродинамических процессов в турбодетандерах с использованием численного эксперимента, разработке и развитию моделей вычислительной газодинамики.

1.2 Особенности работы утилизационного турбодетандера

Успешное использование ТДА на промыслах явилось основанием для разработки турбоагрегатов, предназначенных для энергосберегающих технологий, в том числе турбодетандеров, в которых производится утилизация энергии избыточного давления природного газа на узлах его редуцирования (УТДУ). По существующим магистральным газопроводам газ транспортируется при давлении 2,5...9,81 МПа. По отводам от магистральных газопроводов газ направляется к АГРС и далее к газораспределительным пунктам (ГРП), в которых его давление уменьшается до значений 1,2 и 0,15 МПа соответственно. В некоторых случаях, например, для подачи газа в газотурбинные двигатели КС и электростанций, давление снижается до 1,5...3,5 МПа. Снижение давления газа обычно производится путем дросселирования в специальных дросселирующих устройствах различных типов, в которых потенциальная энергия избыточного давления газа расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений, и, таким образом, безвозвратно теряется. Если учесть существующие и постоянно растущие в мире расходы природного газа, то при использовании процесса дросселирования потери энергии могут составить десятки миллиардов киловатт-часов в год [46]. Установив утилизационные установки, использующие избыточный потенциал давления газа, можно получить электрическую энергию как на ГРС и ГРП, так и на других узлах редуцирования [47]. Расширение газа в таких установках осуществляется в турбодетандерах, единичная мощность которых может достигать 10...12 МВт. Процесс расширения газа в турбодетандерах близок к изотропному, что о

беспечивает получение максимальной механической энергии, которая в электрогенераторе преобразовывается в электрическую [48]. Впервые использовать перепад давления природного газа на ГРС (ГРП) для выработки электроэнергии с помощью турбодетандеров предложил в 1947 г. академик М.Д. Миллионщиков с коллегами [49, 50]. В 1948 г. это предложение было экспериментально проверено на ТДУ ГРП Дашавского сажевого завода А.В. Александровым [50, 51]. Давление газа на входе в турбодетандер составляло 0,6...1 МПа, на выходе 0,12...0,13 МПа, мощность установки 50...80 кВт.

Однако, до 1980 г. использование УТДУ ограничивалось единичными экспериментальными образцами [53].

Систематические исследования и разработка проблемы рационального использования потенциальной энергии дросселируемых потоков газа началась в 80-х годах. Были проведены оценки ресурсов потенциальной энергии газа на ГРС и ГТКС Мингазпрома, разработаны технологические схемы УТДУ, определены параметры и характеристики оборудования установок, и их экономическая эффективность. Результаты этих исследований послужили основой решения НТС Мингазпрома 28 СССР от 04.11.1983 г. по созданию утилизационных установок УКС2-300 мощностью 300 кВт для ГТКС и УТДУ-2500 мощностью 2500 кВт для ГРС.

Первый образец УКС2-300, предназначенный для выработки электроэнергии на газотурбинных компрессорных станциях (ГТКС) мощностью 50...60 МВт, в 1987 г. прошел опытно-промышленное испытание на ГКС-1 газопровода "Союз" ПО "Оренбургтрансгаз". Второй образец УКС2-300 также прошел опытно-промышленное испытание на этой же ГКС-1. Основные параметры УКС2-300 [46]:

- расход газа 20 тыс.м³ /ч;
- давление газа на входе 5,1 МПа, температура 90 °С и на выходе давление 2,1 МПа, температура 25 °С;
- частота вращения ротора турбодетандера 24480 об/мин;
- частота вращения ротора электрогенератора 3000 об/мин;
- мощность электрогенератора 300 кВт.

К основным элементам УКС2-300 относятся: турбодетандер с редуктором, электрогенератор с электрооборудованием, трубная обвязка с арматурой, агрегаты автоматической системы управления, контрольно-измерительные приборы и приборы автоматики, а также система смазки. Все оборудование размещено в блок-боксе заводского изготовления, снабженном системами отопления, вентиляции, освещения, контроля загазованности и пожаротушения.

В установке применена одноступенчатая центростремительная турбина. Через одноступенчатый редуктор с передаточным отношением 8:1 она

соединена с асинхронным электрическим генератором (типа 4А-355М-2У3), который служит для разворота ротора при запуске и для выработки электроэнергии на рабочих режимах.

Перед поступлением в турбодетандер газ подогревается в теплообменнике от системы утилизации тепла отходящих газов ГПА. Головной образец утилизационной установки УТДУ-2500 с 1981 г. эксплуатируется на ГРС-7 г. Днепропетровска [54], в 1988 г. он прошел ведомственные приемные испытания.

Основные параметры УТДУ-2500 [46, 48]:

- расход газа 4,5 млн.м³ /сут;
- давление на входе 2,2 МПа, температура 60 °С и на выходе давление 1,0 МПа, температура 2 °С;
- частота вращения ротора турбодетандера и электрогенератора 3000 об/мин;
- мощность электрогенератора 2500 кВт.

Состав УТДУ-2500 включает: турбодетандер; электрогенератор (СТД-3150-2РУХЛ4); смазочно-уплотнительную систему турбодетандера, электрогенератор и трансмиссии; высоковольтное (6,3 и 10,5 кВ) электрооборудование; КИП и А, системы автоматического управления, регулирования и защиты. Все это оборудование размещено в трех блок-боксах. Блок-боксы оборудованы системами отопления, вентиляции, освещения, контроля загазованности и пожаротушения.

Турбодетандер установки подключен к входному коллектору ГРС (параллельно блоку редуцирования) и к трем выходным коллекторам ГРС. По конструкции турбина турбодетандера осевая, пятиступенчатая; для передачи крутящего момента к генератору применяется трансмиссионный вал с зубчатыми полумуфтами. Холодный поток газа после турбодетандера используется для охлаждения масла в специальном теплообменнике. Перед турбодетандером газ подогревается в огненных подогревателях.

Система смазки замкнутая, циркуляционная; она обеспечивает уплотнение выходного вала турбодетандера на всех режимах работы.

Аппаратура КИП и А, системы автоматического управления, регулирования и защиты осуществляют дистанционный пуск установки и выведение на 30 рабочую частоту вращения, контроль и регулирование основных параметров, и необходимую сигнализацию.

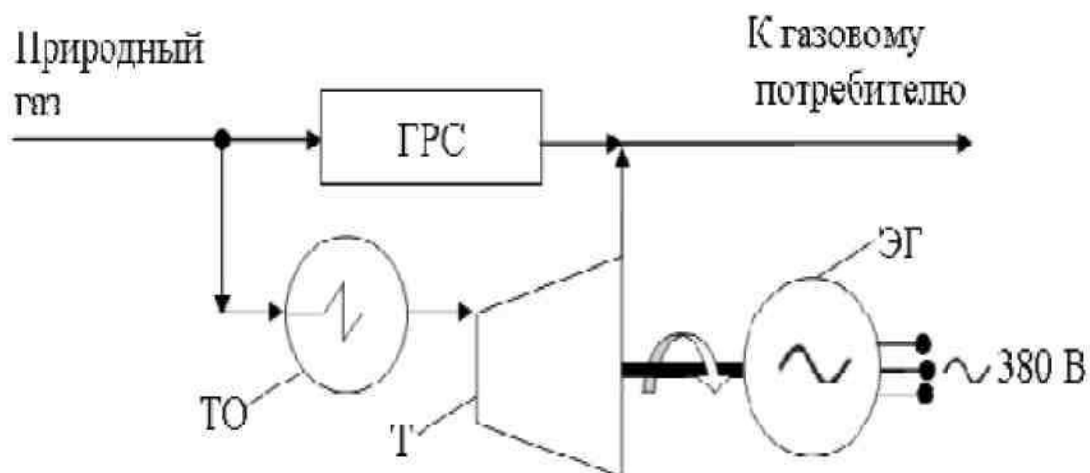


Рисунок 1 – Принципиальная схема утилизационной турбодетандерной установки УТДУ-2500: ГРС – газораспределительная станция; ТО – подогреватель газа (теплообменник); Т – турбодетандер утилизационный; ЭГ – электрогенератор

Принцип работы схемы:

- Газ подается в подогреватель, в котором нагревается за счет подвода к нему внешней теплоты.
- Нагретый газ подается в турбодетандер, в котором расширяется и одновременно охлаждается. При расширении вырабатывается механическая энергия, которая передается электрогенератору.
- Газ греется в подогревателе до температуры, которая позволяет после расширения в турбодетандере получить температуру его не ниже 0 °С. В схеме УТДУ энергия холода не используется. Была также разработана комбинированная установка, которая вырабатывает электроэнергию и холод [55]. При этом в схеме не применяется подогреватель, т.е. не подводится тепловая энергия для подогрева газа (рисунок 2).

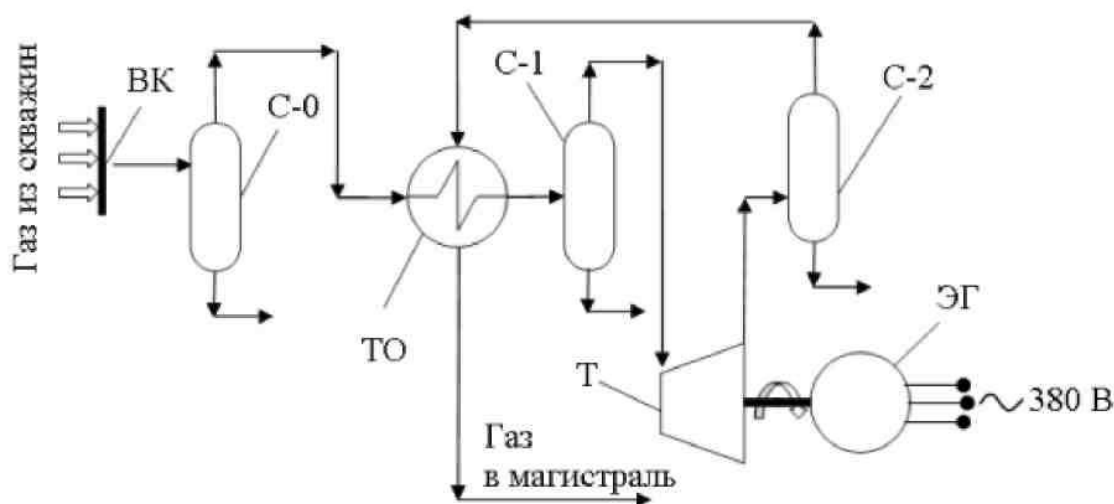


Рисунок 7 – Принципиальная схема утилизационной турбодетандерной установки при работе в холодильном цикле: ВК – входной коллектор; С-0, С-1, С-2 – сепараторы предварительной, вторичной очистки и низко-температурный; ТО – рекуперативный теплообменник; Т – турбодетандер; ЭГ – электрогенератор

Принцип работы схемы заключается в следующем:

- газ подается в теплообменник, в котором он охлаждается за счет обратного потока охлажденного газа;
- охлажденный газ подается в турбодетандер, в котором он расширяется и одновременно дополнительно охлаждается. Выработанная механическая энергия передается электрогенератору. Также в турбодетандере происходит конденсация некоторых компонентов газа;
- после турбодетандера газ подается в сепаратор, где происходит разделение жидкой и газообразной фракций;
- затем сухой газ подается в теплообменник (ТО), где передает холод сырому газу; после ТО газ подается к потребителю или в магистраль.

1.3 Типы конструкций эксплуатируемых турбодетандеров

Турбодетандеры по направлению движения потока делятся на центростремительные, центробежные и осевые; при этом турбодетандеры центростремительного и центробежного типов выполняются с рабочими колесами радиального и диагонального направлений [39, 40]. Из-за конструктивных особенностей и низкого значения КПД турбодетандеры центробежного типа не нашли широкого применения. Исходя из особенностей физических условий работы турбодетандера и опыта различных фирм производителей, в основном, в схемах НТС используется центростремительный турбодетандер радиально-осевого типа (турбодетандер осевого типа в таких схемах не оправдал себя, из-за большого эрозионного износа лопаток рабочего колеса, особенно в периферийной

части). Также большое преимущество конструкций радиально-осевого типа по сравнению с осевым — это срабатывание более высокого перепада давления в одной ступени, что позволяет уменьшить габариты. И еще один положительный эффект использования радиально-осевой конструкций заключается в уменьшении осевой силы, возникающей от движения газового потока и действующей на ротор агрегата, т.к. компрессор также в основном выполняется центробежного осерадиального типа. Турбодетандеры осевого типа используются в утилизационных турбодетандерных установках, в которых необходимо расширять газ с большим перепадом давления, что требует организации многоступенчатой конструкции, а выполнить эффективную многоступенчатую проточную часть с рабочими колесами радиально-осевого типа достаточно сложно. Каждая ступень турбодетандера состоит из соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК). СА служит для полного или частичного преобразования потенциальной энергии сжатого газа в кинетическую движущегося потока, а РК — для преобразования кинетической и потенциальной энергии потока газа в механическую работу, передаваемую через вал внешнему потребителю. В зависимости от количества срабатываемого перепада в СА турбодетандеры называют активными, если понижение давления происходит только в сопловом аппарате или реактивными, если понижение давления происходит и в сопловом аппарате, и в рабочем колесе.

1.4 Технологическая схема утилизационной турбодетандерной установки при совместной работе с воздушной климатической системой

В настоящее время недостаточно используется энергия сжатого природного газа на редуцирующих узлах: ГРС и ГРП, особенно с энергетическим потенциалом газового потока менее 1 МВт. В настоящее время в России и странах ближнего зарубежья, в основном, используются установки мощностью 2,5 и 4 МВт как имеющие более высокие технико-экономические показатели. Для использования энергии сжатого газа необходимо установить УТДУ, которая будет вырабатывать электрическую энергию за счет срабатывания перепада давления природного газа. В литературе встречаются и другие названия таких установок: утилизационная детандер энергетическая установка (УДЕУ), турбодетандер энергетический (ТДЭ) и др.

Основным недостатком получения электрической энергии с помощью таких установок является необходимость подогрева газа на входе или на выходе турбодетандера, т.к. при практически изоэнтальпийном расширении газа существенно снижается его температура. Природный газ с отрицательной температурой запрещается подавать в газовую магистраль или потребителю, т.к. это приводит к обмерзанию грунта вдоль трубопровода или к выходу из строя газового оборудования, а также выпадению гидратов, которые увеличивают эрозийный износ трубопроводов или могут привести к закупорке трубопроводов [89]. Таким образом, в первую очередь целесообразно

устанавливать УТДУ при небольшом перепаде давления газа, одновременно с большим количеством расхода газа, для получения максимальной единичной мощности.

Идеальный вариант для таких установок, когда используется полученный холод, к примеру:

- для охлаждения газа после сжатия в дожимных компрессорах;
- в схемах переработки природного газа;
- в химической и других промышленных технологиях;
- для хранения продуктов питания или других веществ.

В случае, когда нет возможности использовать холод, тогда необходимо подогревать газ на входе или на выходе УТДУ.

Например, установка УТДУ-4000, электрической мощностью 4000 кВт, требует для подогрева газа 4200 кВт теплоты. Естественно, эти мощности нельзя непосредственно сравнивать при оценке эффективности, поскольку стоимость вырабатываемой электроэнергии в два раза выше стоимости сжигаемого газа для получения тепловой энергии, требующейся для подогрева газа на входе в УТДУ.

Также рассматриваемые установки устанавливаются на редуцирующих узлах тепловых электрических станций (ТЭС), у которых можно брать тепло для подогрева газа перед УТДУ.

Таким образом, появилась необходимость разработки нового технического решения для использования потенциала энергии сжатого природного газа на редуцирующих узлах, удаленных от источников тепловой энергии при отсутствии возможности использования холода.

На ГРС или ГРП расположено большое количество оборудования и приборов, которые отвечают за работоспособность редуцирующего узла, имеются помещения для обслуживающего персонала (операторная) и другие помещения с оборудованием, которое нуждается в обогреве, а также в тепловой энергии нуждается природный газ после редуцирования в дросселирующем устройстве. В основном, для обогрева помещений и нагрева природного газа используются газовые водогрейные котлы, в которых сжигается газ для подогрева воды.

При анализе параметров газа: давления, температуры и расхода было выяснено, что энергетический потенциал газового потока, который можно утилизировать ~100 кВт. Этой электрической мощности было бы достаточно для нагрева отапливаемых помещений с помощью электрических котлов. Но, так как на этой ГРС редуцируется большой перепад давления газа с 5,4 до 0,3 МПа (изб), появляется необходимость в подогреве газа на 100 °С, для этого необходима тепловая мощность в количестве 123 кВт. Если для получения

этой тепловой энергии использовать газовые котлы, то тогда пропадает смысл технического решения с установкой УТДУ.

Для решения этой задачи была разработана схема, в которой подогрев природного газа на выходе из УТДУ, а также подогрев помещений станции с требуемой тепловой мощностью 100 кВт предложено реализовывать с использованием воздушной климатической системы (ВКС). Упрощенная схема такой установки приведена на рисунке 3.

Схема, представленная на рисунке 3, включает ГРС, УТДУ и ВКС.

ГРС представлена в виде дросселирующего устройства (Др), сепаратора (С), а также добавлен подогреватель газа (П).

УТДУ включает турбодетандерный агрегат (ТД) и электрогенератор (ЭГ).

ВКС представлена в виде вентилятора (В), рекуператора (Р), турбины (Т), электродвигателя (ЭД) и компрессора (К).

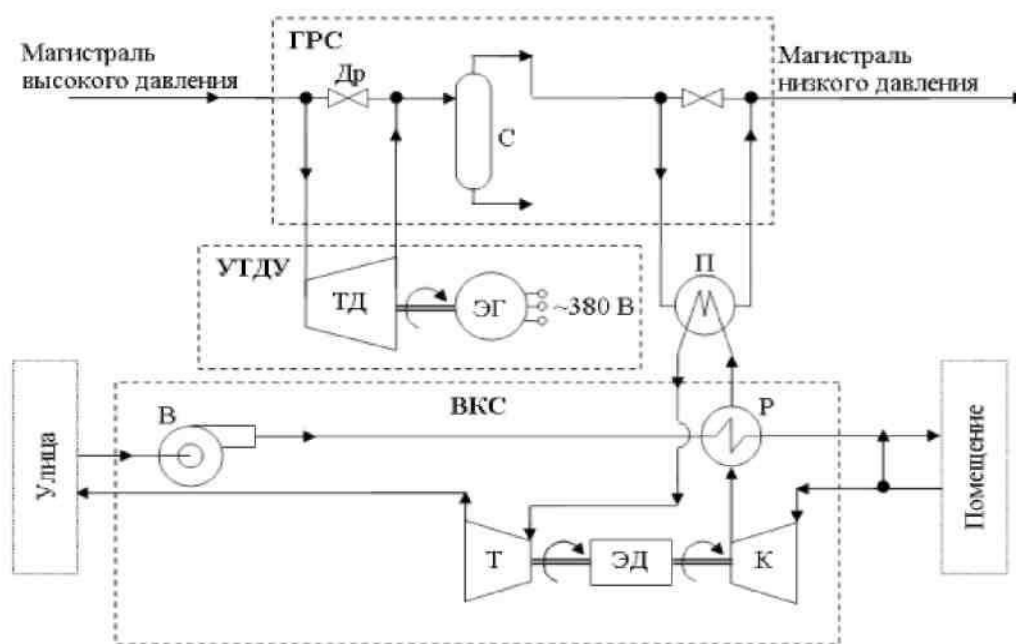


Рисунок 3 – Упрощенная схема УТДУ с ВКС для установки на ГРС в режиме подогрева помещения

Принцип действия схемы на рисунке 3. Природный газ из магистрали высокого давления поступает в турбодетандер ТД, в котором расширяется и тем самым вырабатывает механическую энергию, которая преобразуется в электрическую в электрогенераторе ЭГ. В процессе расширения газа в турбодетандере выпадает конденсат, который в сепараторе С отделяется. Сухой газ направляется в подогреватель П, в котором подогревается до температуры выше 0 °С и направляется в магистраль низкого давления. В свою очередь вентилятор ВКС подает воздух из атмосферы в рекуперативный теплообменник Р, в котором он подогревается и затем направляется для нагрева помещений. Далее воздух

из помещения подается на компрессор К, в котором сжимается с одновременным повышением температуры, а затем в рекуператоре Р отдает своё тепло атмосферному воздуху. Частично отдав своё тепло, воздух подается для подогрева природного газа в подогреватель. Из подогревателя воздух направляется в турбину, в которой расширяется до атмосферного давления и выбрасывается в атмосферу.

Электрическая мощность, потребляемая электродвигателем ВКС, составляет $166,3 - 64,3 = 102,0$ кВт (разность между мощностями компрессора и турбины). Учитывая эту мощность и электрическую мощность на привод вентилятора ВКС 9,7 кВт, несложно определить, что электрической мощности, генерируемой УТДУ, достаточно: $112,5$ кВт $\approx 102,0 + 9,7$ кВт.

Для регулирования температуры подаваемого воздуха в помещение и кратности циркуляции воздуха в схему введена линия рециркуляции. Зависимость температуры подаваемого воздуха от коэффициента рециркуляции приведена. Под коэффициентом рециркуляции понимается отношение количества свежего атмосферного воздуха к количеству воздуха, подаваемого в помещение.

При высоких значениях температуры подаваемого в помещение воздуха увеличиваются тепловые потери в окружающую среду и растёт вероятность получения ожогов рабочего персонала, а при низких температурах увеличивается время нагрева помещения, поэтому целесообразно использовать средние значения.

В летнее время ВКС можно перевести на охлаждение помещения (рисунок 4), избыточную электроэнергию, вырабатываемую установкой УТДУ, использовать на собственные нужды или выдавать в электрическую сеть.

Для охлаждения помещения летом необходимо 22,5 кВт холода с подачей воздуха с температурой 11°C. Температура подаваемого воздуха регулируется рециркуляционным потоком.

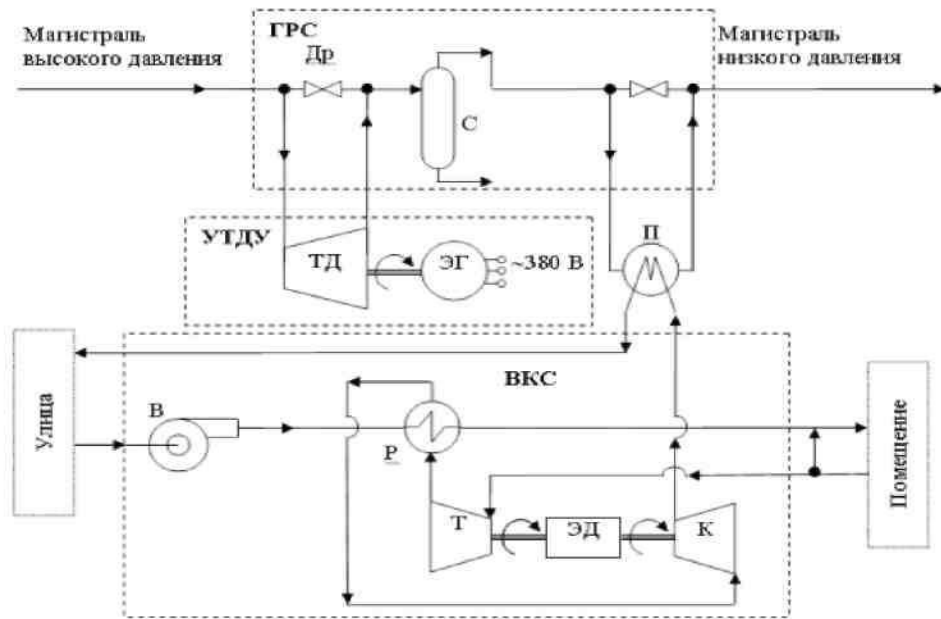


Рисунок 4 – Упрощенная схема УТДУ с ВКС для установки на ГРС в режиме охлаждения помещения

Потребление электроэнергии воздушной климатической системой составит 31 кВт, при равных условиях по природному газу вырабатываемая мощность УТДУ составит 112,5 кВт.

Вырабатываемое избыточное количество электроэнергии в режиме охлаждения помещения составит $112,5 - 31 = 81,5$ кВт, которое возможно использовать на собственные нужды или выдавать в сеть.

Для оценки работы предлагаемой схемы проведены расчеты и построена зависимость вырабатываемой электрической мощности от температуры воздуха окружающей среды (рисунок 5).

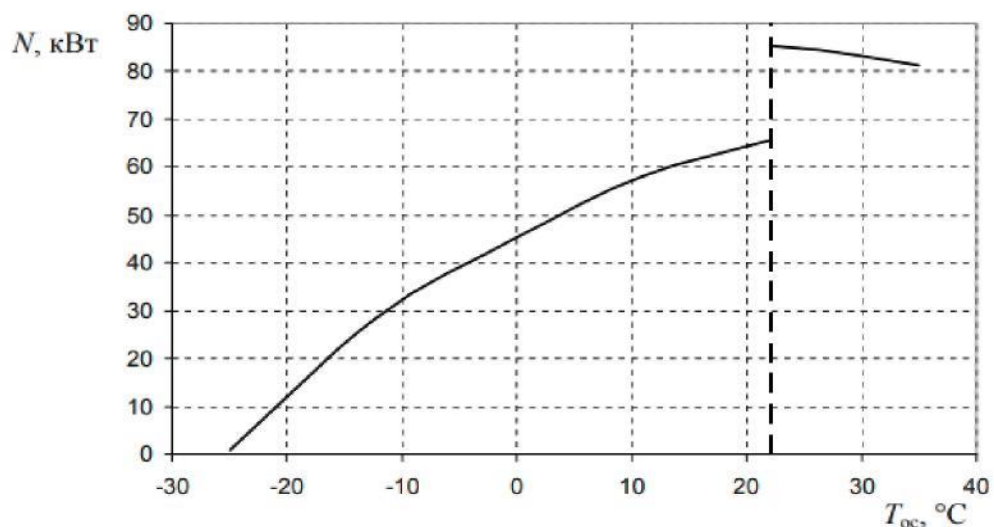


Рисунок 5 – Вырабатываемая электроэнергия в зависимости от температуры воздуха окружающей среды

Как видно из рисунка 5, чем ближе температура воздуха окружающей среды к температуре воздуха в помещении (22 °С), тем больше возможно получить электроэнергии.

При температуре воздуха окружающей среды 22 °С ВКС переходит в режим проветривания помещения, тепловая энергия затрачивается только на подогрев природного газа после УТДУ.

Разные значения избыточной мощности по этим двум режимам вблизи температуры окружающей среды 22 °С объясняются тем, что элементы ВКС при переключении воздушных потоков работают с различной эффективностью.

Для случая, когда нет необходимости подогревать или охлаждать помещения, а только использовать, подогрев природного газа после утилизационного турбодетандера предлагается схема, приведена на рисунке 6. Даная схема была построена на основе элементов ВКС и может быть представлена в виде теплового насоса «воздух-воздух», в которой в качестве бесконечного источника тепла является окружающая среда. Данное тепло используется для подогрева газа после УТДУ.

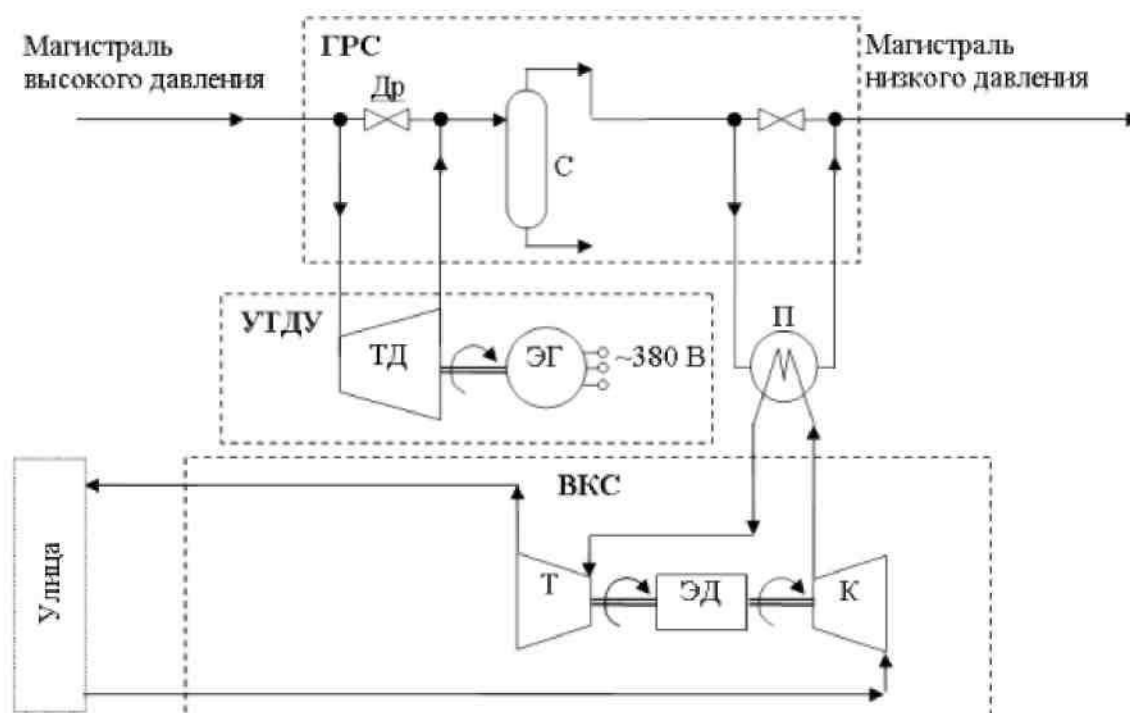


Рисунок 6 – Упрощенная схема УТДУ с ВКС для установки на ГРС в режиме подогрева природного газа

Из рисунка 7 видно, чем выше температура воздуха окружающей среды, тем меньше необходимо электроэнергии. При температурах воздуха выше 20°С затрачивается энергия только для прокачивания теплоносителя через подогреватель, нет необходимости в существенном повышении давления воздуха компрессором.

Таким образом, потребление электроэнергии ВКС значительно меньше в случае, когда не нужно обеспечивать климатические условия для помещения. Вырабатываемые излишки электроэнергии, как упоминалось ранее, можно использовать на собственные нужды или выдавать в сеть.

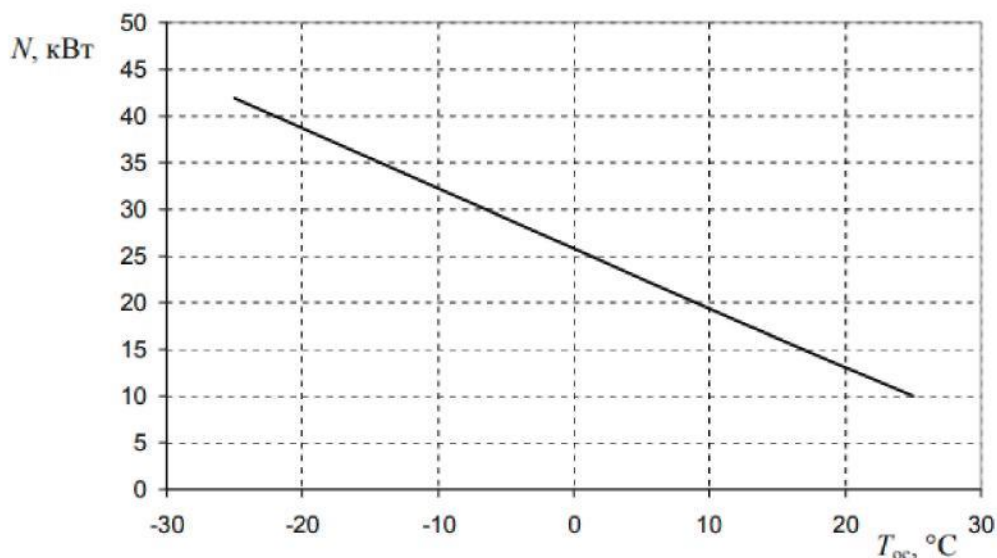


Рисунок 7 – Потребление электроэнергии в зависимости от температуры воздуха окружающей среды

1.5 Турбодетандерная утилизационная установка для потребителей, использующих природный газ с различным давлением

На газораспределительных станциях (ГРС) и газораспределительных пунктах (ГРП) для поставки газа к потребителям производится понижения с входного давления для ГРС 7,5...4,0 МПа и для ГРП 1,2 МПа до давления в распределительной сети путем расширения газа в дросселирующих устройствах. Расширение происходит без получения полезной работы, такой процесс называется эффектом Джоуля-Томсона. В этом случае теряется большое количество потенциальной энергии газа, на сжатие которого использовалась энергия на компрессорных станциях. Только на ГРС России энергетический потенциал превышает 300 МВт, на ГРП он составляет более 3000 МВт (к сведению установленная мощность компрессоров на компрессорных станциях России превышает 5400 МВт). Годовое количество вырабатываемой электрической энергии с помощью УТДУ, установленных только на ГРС, может превышать $2,6 \cdot 10^9$ кВт·ч.

В ГРС давление газа на выходе постоянное на протяжении года, в ГРП давление на выходе изменяется и зависит от потребления. Еще одной отличительной особенностью является то, что на ГРС, в основном, только один выходной поток, а на ГРП имеются несколько выходных потоков с разным давлением. Разное выходное давление обосновано разными потребителями природного газа. Например, может быть три выходных потока с давлением газа 0,6; 0,3 и 0,005 МПа (изб).

Таким образом, обычная утилизационная турбодетандерная установка не может выдавать три значения давления на выходе и поэтому в ней газ расширяется только до первого отбора с наибольшим значением давления 0,6 МПа (изб). Установка еще двух турбодетандеров с дальнейшим понижением до требуемых значений приводит к увеличению материальных затрат и, как следствие, к росту срока окупаемости проекта. Вместе с тем, при работе только одного турбодетандера с расширением газа до 0,6 МПа (изб) теряется большое количество энергетического потенциала сжатого газа. Таким образом, для использования полного потенциала сжатого газа необходимо разработать новый подход к решению этой задачи.

Существует несколько вариантов реализации УТДУ на газораспределительных станциях с потребителями природного газа разного давления [39]:

- расширение газа в турбодетандере до наибольшего значения давления, для получения остальных значений давления происходит ступенчатое расширение в дросселирующих устройствах;
- использование нескольких турбодетандеров на разное входное и конечное давление газа;
- реализация многоступенчатого турбодетандерного агрегата с отборами газа необходимых параметров.

Первый подход является наиболее известным и часто используемым, второй подход, как уже отмечалось, редко используют из-за большой стоимости и большого срока окупаемости, но третий, по нашему мнению, рассмотрен недостаточно и нигде не использовался.

В данной работе именно это направление и является предметом исследования.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать многоступенчатый турбодетандер осевого типа с двумя отборами, с поворотными сопловыми аппаратами для обеспечения максимальной эффективной работы на режимах, отличных от номинального.

Принципиальная схема приведена на рисунке 8.

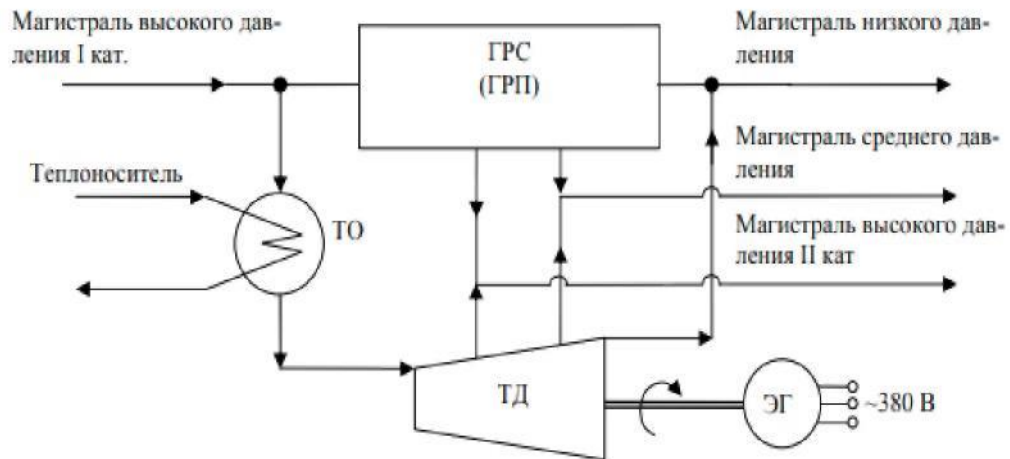


Рисунок 8 – Схема с турбодетандером на ГРС (ГРП)

Обычно, природный газ из магистрали высокого давления $\sim 1,2$ МПа (изб) подается на ГРП, в котором происходит снижение давления в дросселирующих устройствах. В первой ступени газ расширяется до 0,6 МПа (изб), часть газа с этим давлением отправляется в магистраль высокого давления II категории, а оставшаяся часть – во вторую ступень, где расширяется до давления 0,3 МПа (изб). Далее газ с давлением 0,3 МПа (изб) направляется в магистраль среднего давления, а оставшаяся часть – в третью ступень, где расширяется до давления 0,005 МПа (изб) и поступает в магистраль низкого давления.

В случае работы ГРС (ГРП) вместе с турбодетандером природный газ из магистрали высокого давления I кат. нагревается в теплообменнике (ТО) и подается в турбодетандер (ТД). В турбодетандере газ, расширяясь в нескольких ступенях первого отсека, совершает полезную работу. Затем часть газа из потока отбирается с давлением 0,6 МПа (изб) в магистраль высокого давления II кат., а оставшаяся часть расширяется в следующих ступенях второго отсека турбодетандера до давления 0,3 МПа (изб). Далее часть газа отбирается в магистраль среднего давления, а оставшаяся часть расширяется в остальных ступенях третьего отсека турбодетандера до давления 0,005 МПа (изб) и отправляется в магистраль низкого давления.

Выполненный анализ работы нескольких ГРС (ГРП) позволил провести оценку количества отбираемого газа от общего расхода газа. Для магистрали высокого давления II кат. оно составляет 10 - 15 %, для магистрали среднего давления - 25 - 30 % и оставшаяся часть 65 - 55 % направляется в магистраль низкого давления. Эти значения приблизительные и для каждой газораспределительной станции необходимо проводить количественную оценку.

2 Анализ высокоэффективных технологий на базе турбодетандерной техники

Рассмотрены утилизационные установки на базе турбодетандерной техники. Представлены технические характеристики и особенности конструкции утилизационных установок мощностью 8, 300, 2500, 4000 кВт.

Проведенные исследования показали, что полезное использование избыточного давления природного газа путем замены дросселирующих устройств турбодетандерами для последующего привода электрогенераторов даст возможность получить на АГРС около 550 МВт генерирующих мощностей. При этом среднегодовая мощность почти 80% от общего числа утилизационных турбодетандерных установок (УТДУ) находится в пределах от 0,3 до 4 МВт, 15% - от 4 до 9 МВт и более 5% - от 10 до 17 МВт (рис.1).

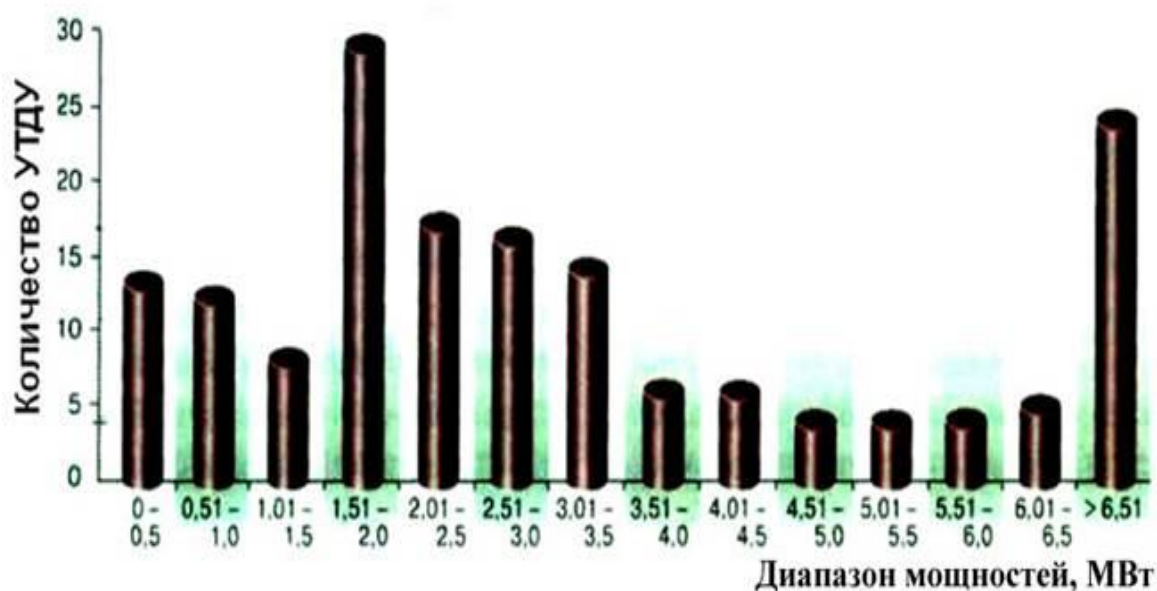


Рис. 9 - Распределение УТДУ по мощностям

Из приведенных данных видно, что наибольшую потребность представляют УТДУ мощностью от 300 до 4000 кВт. В связи с этим было принято решение об теоретическом исследовании применения и внедрения установки на существующей площадке АГРС-1 Орбита мощностью 4000 кВт.

Утилизационные установки можно условно разделить на агрегаты малой мощности от 8 до 300 кВт, средней мощности от 300 до 1000 кВт и агрегаты большой мощности от 1000 до 6000 кВт.

УТДУ большой мощности служат для выработки электроэнергии на собственные нужды или подачи ее в энергосистему.

Важная составляющая УТДУ – система автоматического управления (САУ), которая является основным логическим и управляющим элементом агрегата.

САУ позволяет обеспечивать дистанционное автоматизированное управление подготовкой и пуском агрегата, контроль и регулирование параметров в процессе работы, поддержание заданной температуры сепарации, нормальную и аварийную остановку агрегата, отображение контролируемых параметров на экране монитора.

Система управления, регулирования и защиты агрегата позволяет осуществлять контроль предпусковой готовности; автоматический пуск, выведение на рабочий режим агрегата; защиту агрегата; реализацию алгоритмов нормального и аварийного остановов, экстренное аварийное отключение агрегата.

Своевременность и правильность принимаемых решений в значительной степени зависит от объема и наглядности представляемой информации. Для решения этих задач САУ обеспечивает информационные функции, которые включают измерение и отображение текущих значений технологических параметров агрегата; визуальную и звуковую предупредительную и аварийную сигнализацию; тестирование состояния блоков и модулей САУ во всех режимах работы и отображение текущих значений параметров САУ.

САУ выполняется в виде двухуровневого программно-технического комплекса с распределенными параметрами.

В состав нижнего уровня входят устройства и приборы автоматического управления и контроля; схемы управления исполнительными механизмами, преобразующая аппаратура и первичные датчики, расположенные на изделии.

В состав верхнего уровня входят рабочие станции оператора и инженера.

Такое решение позволяет продолжать работу установки без ограничений ее возможности при выходе из строя одной из станций; просматривать оператору сразу два видеокadra работы установки; осуществлять при работе установки контроль смежных систем или обеспечивать связь с системами станционного уровня, сохранять архивную информацию.

При взаимодействии с составляющими частями агрегата САУ обеспечивает информационный обмен с датчиками аналоговых сигналов, а также выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

Связь с верхним уровнем и рабочими станциями производится с помощью стандартных интерфейсов.

Со смежными системами (газоанализ, пожаротушение, охранная сигнализация) обмен обеспечивается дискретными сигналами (сухими контактами).

Документирование и архивирование информации о процессах, происходящих в агрегате, позволяет вести постоянную запись всех параметров с дискретностью не более 5 сек. (сохранность без обновления не менее 30 дней), формировать аварийный архив измеряемых параметров с дискретностью не более 1 сек за 5 минут до аварии и 5 минут после аварии (сохранность – постоянно) и фиксировать данные о всех действиях оператора.

САУ выполняет функции формирования и вывода информации на печать по заданию оператора.

Учитывая мировую тенденцию в применении электромагнитного подвеса ротора с использованием в конструкции турбодетандера сухих уплотнений, были проведены работы, результаты которых реализованы. Применение электромагнитного подвеса ротора позволило отказаться от системы смазки агрегата и, как следствие обеспечить существенную экономию масла, которая при годовом ресурсе работы 8000 ч составит около одной тонны на один агрегат, кроме того, магнитный подвес ротора имеет следующие преимущества:

- полную экологическую чистоту;
- возможность работы со скоростями вращения, ограниченными только прочностью материалов ротора;
- практически неограниченный срок службы магнитного подшипника из-за отсутствия износа;
- отсутствие необходимости обслуживания при эксплуатации.

Управление и контроль за работой электромагнитного подвеса ротора осуществляется аппаратурой управления, состоящей из ряда блоков, в частности силового питания, автоматики, регуляторов и формирования стандартных сигналов датчиков положения ротора.

Для визуального контроля режимов работы системы электромагнитного подвеса ротора телеметрическая информация передается на стандартный ПК по стандартному интерфейсу.

Реализовать аналогичное решение и полностью отказаться от системы смазки в конструкции УТДУ, кинематическая схема которого включает детандер, редуктор и генератор, не представляется возможным, так как система смазки обеспечивает подачу масла одновременно к узлам детандера, редуктора и генератора. Поэтому использование в конструкции электромагнитного подвеса ротора лишь частично позволит решить проблему, исключив систему смазки только детандера, при этом стоимость утилизационной установки возрастет на 40 %, а срок окупаемости увеличится приблизительно в 2 раза.

В настоящее время прорабатывается конструктивное исполнение УТДУ с высокоскоростным генератором с консистентной смазкой подшипниковых

узлов, что позволит исключить из кинематической схемы редуктор и систему смазки генератора.

Учитывая накопленный практический опыт, можно утверждать, что при разработке схем УТДУ необходима проработка технических решений применительно к каждому конкретному объекту. Это позволяет наиболее полно использовать потенциал перепада давления транспортируемого газа.

Анализ возможных вариантов организации процесса в УТДУ показывает, что, в зависимости от уровня подогрева газа перед детандером, температура газа на выходе из него может быть как выше, так и ниже 0°C. Это позволяет организовать процесс подогрева газа в УТДУ таким образом, чтобы наряду с электроэнергией вырабатывать холод. Наибольшей технико-экономической эффективности использования УТДУ можно добиться при комбинированном производстве электроэнергии и холода.

В 2005 году началось широкое применение утилизационной установки высокого давления УТДУ-4000, мощностью 4000 кВт для АГРС, которая может работать как с автономной электрической нагрузкой, так и на сеть неограниченной мощности.

В комплект поставки утилизационной установки УТДУ-4000 входят детандер-генераторный агрегат со вспомогательными системами, шкафы с электротехническим оборудованием, система автоматического управления, контрольно-измерительные приборы.

Таблица 1 - Основные технические характеристики УТДУ-4000

Наименование параметра рабочей среды	Значение параметра
Диапазон изменения расхода газа через турбодетандер, млн.м ³ /сутки	0,6 – 3,3
Диапазон изменения давления на входе в турбодетандер, МПа	2,04 – 3,82
Температура газа на входе в установку, С	1,5 – 19,6
Диапазон изменения давления газа на выходе из турбодетандера, МПа	0,35 – 0,55
Температура газа на выходе из турбодетандера, не ниже, С	0
Диапазон мощностей, кВт	800 – 4800
Номинальное напряжение переменного трехфазного тока, кВ	10,5 (6,3)
Частота тока, Гц	50

Примерная стоимость 1 кВт установленной мощности УТДУ в долларах США без капитальных затрат на проект привязки и затрат на присоединение к электросети составляет:

- УТДУ 2500 550,0 дол. США

- УТДУ 4000 420,0 дол. США
- УТДУ 6000 330,0 дол. США

Проекты характеризуются сравнительно малыми сроками окупаемости 4,5÷6 лет (мировой опыт свидетельствует о том, что сроки окупаемости проектов в электроэнергетике составляют в среднем 7 лет).

Время, необходимое для сооружения УТДУ большой мощности, составляет 10 месяцев, монтаж и пуско-наладка – 1-3 месяца.

Проработан также вопрос внедрения на АГРС комбинированной энергетической установки большой мощности, состоящей из утилизационного турбодетандера и газотурбинной электростанции, которые работают по когенерационной технологии. Комбинированные установки особенно эффективны в период неравномерности выработки электроэнергии УТДУ по месяцам в течение года. Несмотря на то, что капитальные вложения комбинированных установок увеличиваются почти в 2 раза, чистый денежный поток тоже увеличивается в 2 раза.

На рисунке 10 представлена схема совместной работы турбодетандерной электростанции и газотурбинной электростанции (когенерационной установки простого цикла)

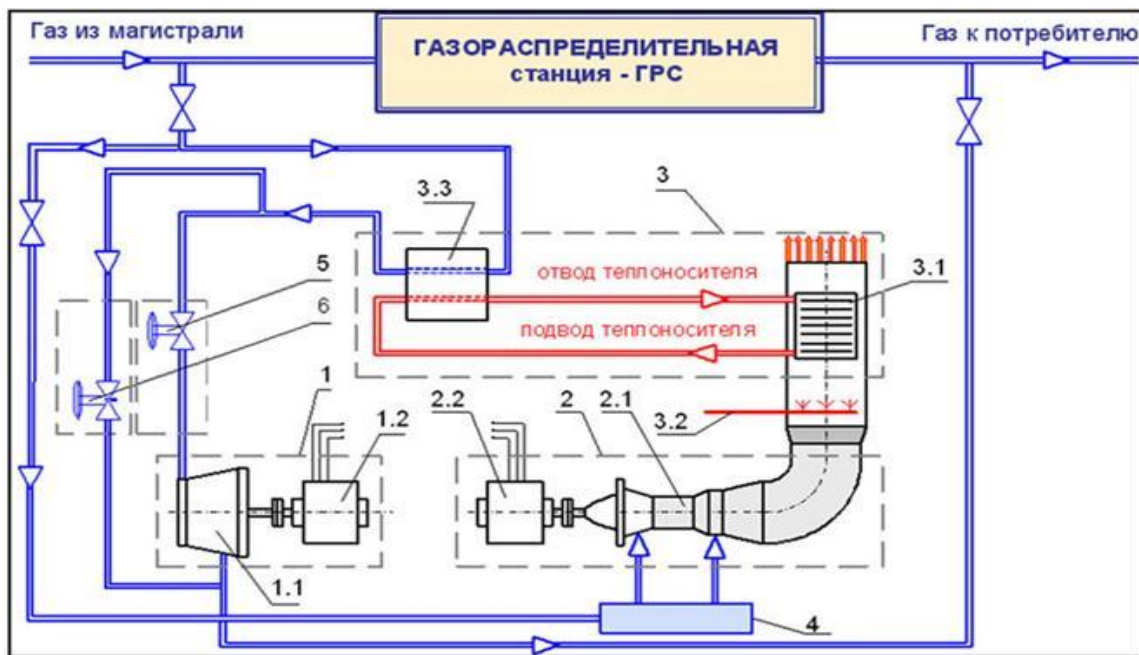


Рисунок 10 - 1 - турбодетандерная электростанция; 1.1 - турбодетандер; 1.2 - генератор; 2 - газотурбинная электростанция; 2.1 - газотурбинный двигатель; 2.2 - генератор; 3 - теплообменное оборудование; 3.1 -утилизационный теплообменник (котел- утилизатор водогрейный); 3.2 - дожигающее устройство; 3.3 - подогреватель "газ-вода"; 5 - блок клапана стопорно-дозировующего; 6 - блок клапана байпасного

Данная схема позволяет:

- не сжигая газ в подогревателях газа на входе в турбодетандер обеспечить температуру газа после турбодетандера не ниже минус 5° С;
- повысить общий КПД электростанции с 26,5% до 35% за счет установки водогрейного котла-утилизатора на выкидной шахте электростанции, используя тепловую электроэнергию выхлопных газов;
- подогреть газ в теплообменнике «газ-вода» за счет горячей воды в котле-утилизаторе с минимальными затратами энергии теплоносителя (воды);
- при плановой и внеплановой остановке турбодетандера использовать 2,5 - 6 МВт электроэнергии от электростанций.

При внедрении утилизационных установок на объектах эксплуатации возникает ряд проблем, требующих решения на разных этапах проведения работ, в частности:

- при отсутствии места для установки УТДУ на территории ГРС до принятия решения о выделении земельного отвода затрудняется проведение проектных работ по привязке оборудования, а процедура выделения земельного отвода требует значительных затрат времени и, как следствие, происходит увеличение срока реализации проекта;
- при согласовании технических условий на подключение к электрическим сетям предприятия-энергетики выдвигают требования о дополнительном строительстве энергетических объектов, не имеющих отношения к реализации данного проекта, что приводит к его удорожанию;
- выбор оптимального способа подогрева газа на входе в УТДУ в значительной степени определяет удельный расход топлива на выработку электроэнергии и срок окупаемости проекта;
- при утилизации энергии перепада давления топливного газа на ТЭЦ особое значение приобретает точность поддержания давления перед котлами, причем как в штатном режиме работы, так и в режимах запуска-остановки. В этом случае необходимо применять в байпасной линии высоконадежный клапан-регулятор, в функции которого входит поддержание давления в переходных режимах до вступления в работу регулятора ГРП;
- необходимость обеспечить получение электроэнергии необходимого качества и необходимую величину давления газа на выходе из турбодетандера. Так, например, в соответствии с требованием утилизационная установка УТДУ-4000 на АГРС должна при работе на автономную нагрузку обеспечить выработку как электроэнергии в соответствии с требованием ГОСТ 23377-84, так и заданную величину давления газа, поступающего в газопровод после турбодетандера. Решить задачу удалось применением входящих в комплект поставки двух

регуляторов, работающих по специальным алгоритмам, один из регуляторов поддерживает частоту переменного тока, а другой – давление на выходе из турбодетандера.

3 Общие характеристики АГРС-1 Орбита в качестве исследуемого объекта

3.1 Общие сведения рассматриваемой АГРС

Автоматическая газораспределительная станция АГРС-1 Орбита предназначена для подачи газа от магистрального газопровода с давлением $P_{вх.}=2,0-5,4$ МПа, переключения поступающего газа из газопровода, его очистки и подогрева, регулирования расхода, редуцирования со снижением и поддержанием давления в заданных пределах и поддержания его с определенной точностью при изменении расхода и давления газа на входе АГРС, а так же для измерения, регистрации его расхода и одоризации перед подачей потребителю.

АГРС предусматривается на базе блочных газораспределительных станций полного заводского изготовления, представляют собой комплекс технологического оборудования, обеспечивающего выполнение следующих основных функций:

- очистка газа от капельной жидкости и механических примесей с автоматическим сбросом конденсата;
- подогрев газа перед редуцированием и автоматическое поддержание заданной температуры для повышения надежности работы оборудования;
- редуцирование газа высокого давления (магистрального) до указанного низкого и поддержание его с заданной точностью при изменении входного давления или расхода газа;
- измерение расхода газа с многосуточной регистрацией данных и передачей информации на уровень газораспределяющей организации;
- одоризация газа;
- регулирование расхода газа
- автоматическое управление режимами работы технологического оборудования станции, в том числе ограничение поставок газа по требованиям газораспределяющей организации;
- звуковое и визуальное оповещение при аварийных ситуациях, а также при нарушениях работы с передачей сигнала на пульт диспетчеру или оператору.

3.2 Конструктивные решения блок-контейнеров АГРС.

Оборудование АГРС размещено как в утепленных пожаробезопасных блок-контейнерах, так и на рамах на открытом воздухе.

Блок-контейнеры выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 22853-86 «Здания мобильные (инвентарные)» Общие технические условия и имеют сертификат соответствия в области пожарной безопасности № ССБК RU.ПБ09.Н000250.

Класс взрывоопасных зон блока редуцирования в соответствии с ПУЭ - В1-а.

Категория отсеков блоков по пожарной опасности в соответствии с Постановлением Правительства Республики Казахстан от 16 января 2009 года № 14 и Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 22 января 2015 года №33 Об утверждении Правил эксплуатации магистральных газопроводов:

- переключения – А;
- учета – А;
- регулирования расхода – А;
- редуцирования – А;
- одоризации – А;
- подготовки теплоносителя – Г;
- операторной – В4.
- Степень огнестойкости блоков по СНиП 21-01-97 — II.
- Класс конструктивной пожарной опасности - С0.
- Класс пожарной опасности строительных конструкций - К0.
- Класс функциональной пожарной опасности - Ф5.

Категория и группа взрывоопасной смеси природного газа с воздухом в соответствии с ПУЭ – ПА-Т1

Пожарная безопасность блоков обеспечивается в соответствии с требованиями ГОСТ 22853, ГОСТ 12.1.004.

Отопление блоков технологического, подготовки теплоносителя и операторной осуществляется путём циркуляции теплоносителя по двухтрубной системе отопления блок-контейнеров.

В блоках переключения, регулирования расхода, учета и редуцирования предусмотрена естественная вентиляция, рассчитанная на трёхкратный воздухообмен в час, также предусмотрена аварийная принудительная вентиляция с применением взрывозащищенных вентиляторов. В блоке автоматической одоризации газа предусмотрена естественная вентиляция, рассчитанная на 10-ти кратный воздухообмен.

Блок-контейнер состоит из цельносварного металлического каркаса, установленного на жесткой раме из профильного материала.

В качестве утеплителя используются негорючие минераловатные плиты на основе базальтового волокна IZOVER. В блоке предусмотрена гидро- и пароизоляция, обеспеченная строительной мембраной Изолтекс НГ 200.

Внутренняя отделка стен и потолка выполнена профлистом стеновым С8 окрашенным, прикрепленным к каркасу через стекло-магниевый лист СМЛ (негорючий материал) для минимизации «мостов холода». Наружная отделка: стен – металлокраской типа «Корабельная доска» окрашенным; крыши – кровельным профлистом МП-20 окрашенным. Пол внутри блок-контейнера имеет настил из листа стального рифлёного ромбического.

Напольное покрытие выполнено в искробезопасном исполнении за счёт диэлектрических ковриков, уложенных поверх напольного настила внутри блок-контейнера.

В отсеках блок-контейнера с категорией А и Г в крыше предусмотрены люки в качестве легкобрасываемых конструкций.

Блок-контейнер за счёт дополнительных строповочных элементов, предусмотренных конструкцией, удобны для транспортировки и монтажа, отвечают железнодорожным габаритам перевозки, и вместе с тем обеспечивают свободный доступ эксплуатирующего персонала ко всем органам управления и узлам технологической схемы, для целей обслуживания и ремонта.

Конструкция блока удовлетворяет районам с сейсмичностью 9 баллов.

Пожарная защита обеспечивается конструкцией блока и применением негорючих и слабо горючих материалов.

АГРС предназначена для эксплуатации на открытом воздухе, нормированных для исполнения «У», категория размещения 1 по ГОСТ 15150-69.

3.3 Основные технико-технологические характеристики АГРС-1 Орбита

АГРС-1 Орбита является основным источником газоснабжения для потребителей города Алматы.

АГРС-1 «Орбита» расположена вблизи нового микрорайона «Алгабас» и АТЭЦ-2 (рисунок 11,12).

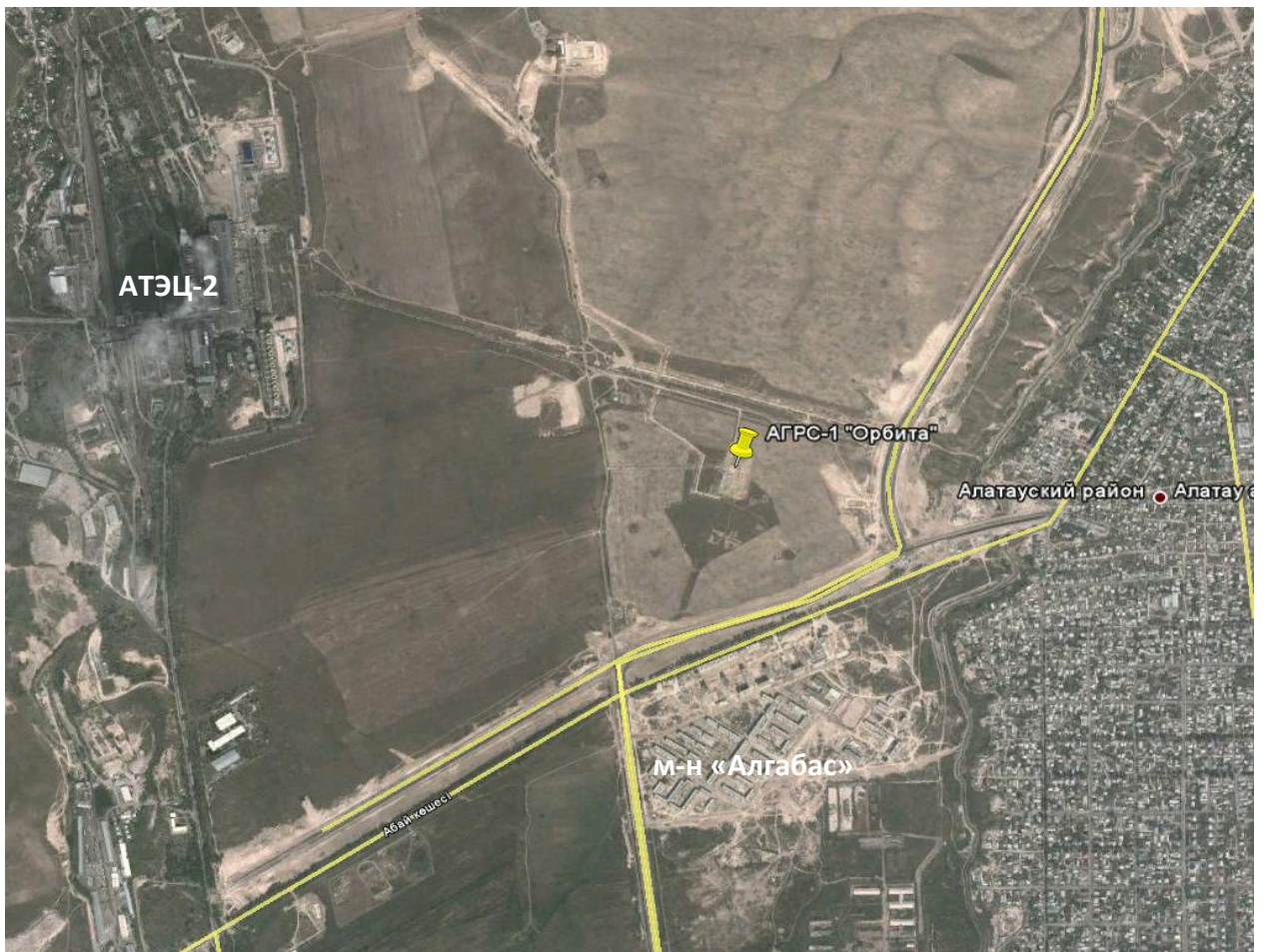


Рисунок 11 – План размещения АГРС-1 «Орбита»



Рисунок 12 – общий вид АГРС-1 «Орбита»

В таблице 2 приведены технические характеристики АГРС-1 «Орбита» после проведённой реконструкции. Работы проведены ТОО «БатысМунайГазЖабдыктары» по проекту ТОО «KazСтройПроект-ПВ».

Таблица 2 – Технические характеристики АГРС-1 «Орбита»

п.п.	Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
1	Рабочее давление газа на входе максимальное	МПа	5,4
2	Рабочее давление газа на входе минимальное	МПа	2,0
3	Давление газа на выходе 1 потребитель	МПа	1,2
4	Давление газа на выходе 2 потребитель	МПа	0,6
5	Максимальная пропускная способность 1 по потребителя	нм ³ /ч	130 000
6	Максимальная пропускная способность 2 по потребителя	нм ³ /ч	20 000
7	Минимальная пропускная способность 1 по потребителя	нм ³ /ч	2000
8	Минимальная пропускная способность 2 по потребителя	нм ³ /ч	600
9	Точность поддержания давления газа на выходе	%	±5
10	Температура газа на входе	°С	4...+17
11	Температура окружающего воздуха	°С	-38...+42
12	Установленный ресурс до капитального ремонта, не менее	ч	262 800
13	Напряжение основного питания	В	220
14	Напряжение аварийного питания	В	220
15	Количество выходов на потребителя		2
16	Допустимая сейсмичность района установки станции, баллы по Рихтеру		9

Потребителем данной АГРС является коммунально-бытовой сектор г. Алматы.

Электроснабжение АГРС-1 «Орбита» осуществляется от сетей 10 кВ АО «Алатау Жарык Компаниясы», далее через собственную трансформаторную подстанцию 10/0,4кВ АО «Интергаз Центральная Азия» мощностью 63 кВА расположенную на расстоянии 400 метров от АГРС-1 в сторону АТЭЦ-2 по КЛ-0,4кВ. Категория электроснабжения III.

3.3.1 Описание технологии турбодетандерных агрегатов (ТДА)

На многих станциях измерения и регулирования газа большие потенциалы энергии остаются неиспользованными.

При поступлении природного газа из магистральных трубопроводов в системы городов и крупных промышленных предприятий осуществляется понижение его давления на газораспределительных станциях (ГРС), которые в основном, состоят из подогревателей газа, узлов редуцирования, узлов учёта и т.д. Подогреватель газа необходим для компенсации температурных потерь в узлах редуцирования. Снижение давления газа происходит в редуцирующих клапанах.

Энергия потребляется, как в процессе сжатия газа, так и в процессе его расширения. При этом потребление энергии в процессе сжатия газа происходит в результате работы, которую необходимо совершить для сжатия газа до давления в трубопроводе и поддержания этого давления на требуемом уровне в процессе его транспортировки. В процессе расширения газа на ГРС и ГРП энергия потребляется для восстановления его температуры после охлаждения в результате этого расширения.

Для целей утилизации энергии выделяемой при редуцировании газа на ГРС существуют и на протяжении многих лет используют утилизационные энергетические турбодетандерные установки, предназначенные для выработки электроэнергии, сжатия воздуха и других газов, а также охлаждения в холодильных установках. Эти технологии достигаются путем рекуперации потенциальной энергии избыточного давления сжатого газа на газораспределительных станциях (ГРС) и газораспределительных пунктах (ГРП) в узлах редуцирования.

3.3.2 Принцип работы турбодетандера

Принцип работы турбодетандера состоит в последовательном проходе газа высокого давления по межлопаточным каналам направляющего аппарата, в котором происходят расширение и увеличение скорости потока. Далее газ проходит лопатки рабочего колеса и через колесо, и вал отдает свою кинетическую энергию внешнему потребителю. Все это приводит к снижению давления и понижению температуры газа, прошедшего

через турбодетандер. На рисунке 13 показан общий принцип и применение детандерных установок.

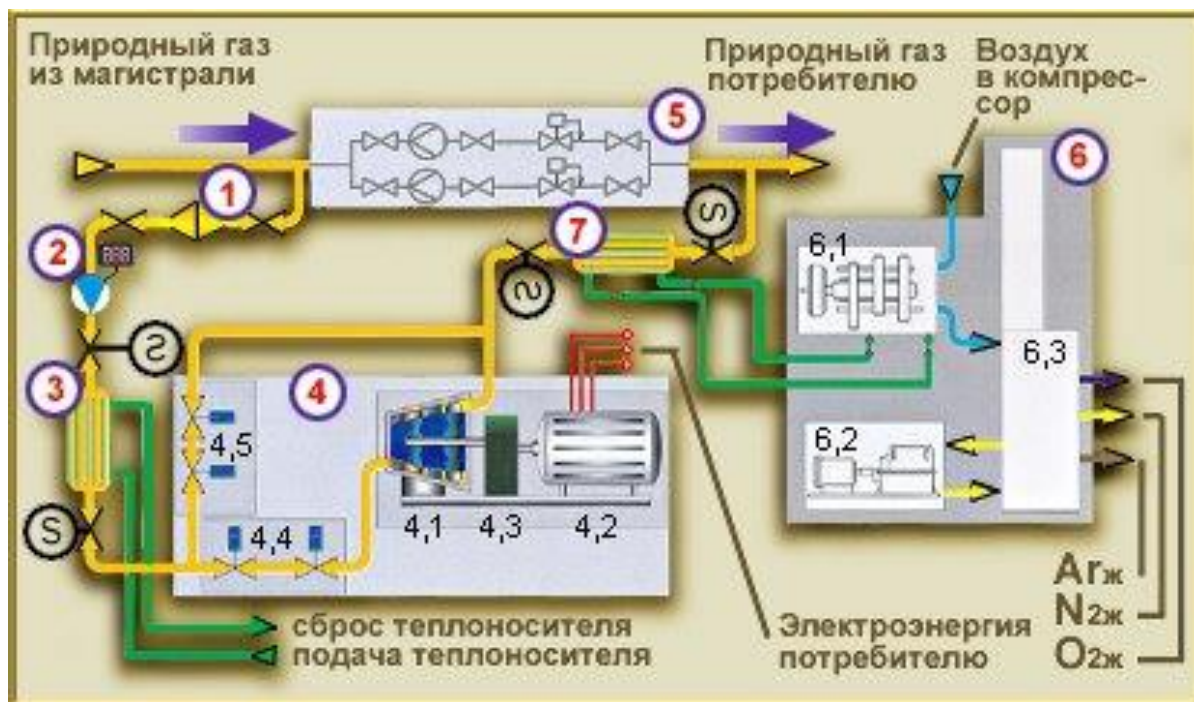


Рисунок 13 – применение детандерной установки,
где:

1-фильтр, 2-счетчик расхода газа; 3, 7-подогреватель газа; 4-детандер-генератор; 4.1-детандер; 4.2-генератор; 4.3-редуктор; 4.4-блок дозирующего клапана; 4.5-блок регулятора давления на байпасной линии; 5-газоредуцирующий пункт; 6-установка разделения воздуха; 6.1-компрессор воздушный; 6.2-компрессор циркуляционный; 6.3-блок разделения воздуха.

Принцип работы детандер-генераторных агрегатов заключается в следующем:

По трубопроводам газ транспортируется под давлением $2,0 \div 9,81$ МПа и выше. На АГРС давление газа необходимо снизить до $0,6 \pm 1,2$ МПа. В настоящее время, при снижении давления, вся заложенная в газе энергия расходуется за счет выбросов тепла в окружающее пространство. Для того чтобы дополнительно использовать или осуществить "утилизацию" перепада давления параллельно с пунктом понижения давления газа устанавливается газорасширительный агрегат-турбодетандер. Турбодетандеры понижают давление газа до требуемого потребителем уровня. При этом проходящий через турбодетандер газ не сжигается, а используется как рабочее тело, приводя в движение вал генератора и превращая потенциальную энергию газа в электрическую. После чего, не теряя своих свойств, газ направляется потребителю.

Мощность детандер-генераторного агрегата зависит от количества газа, проходящего через турбину турбодетандера, перепада давления газа на входе и выходе из турбины и температуры газа на входе в турбину. Работа энергокомплекса и пункта снижения давления газа взаимосвязана. При максимальном потреблении газа турбодетандерами узел редуцирования работает в минимальном режиме. В случае остановки комплекса вся нагрузка автоматически переключается на узел редуцирования.

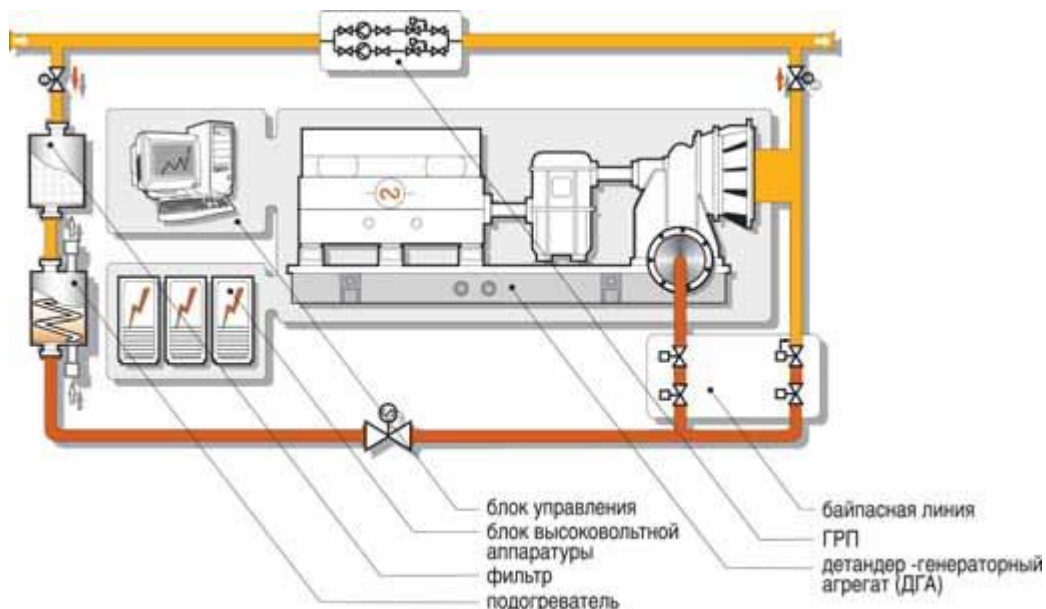


Рисунок 14 – технологическая схема детандер-генератора в схеме АГРС

4 Расчет эффективности применения турбодетандеров на АГРС

Таблица 2 – применимость платформ в зависимости от глубины

Наименование	Обозначение	Размерность	Величина
Расход природного газа	G_T	кг/с	83,33
Температура пара перед турбиной	t_0	°C	660
Давление пара перед турбиной	P_0	бар	60
Давление пара перед газопаровым теплообменником	$P_{П}$	бар	1
Температура пара перед газопаровым теплообменником	$t_{П}$	°C	100
Температура газа перед газопаровым теплообменником	t'_1	°C	20
Давление газа перед газопаровым теплообменником	p'_1	бар	13
Давление газа перед турбодетандером	P_1	бар	12

ндером			
Давление газа после турбодетандера	P_2	бар	3
Температура газа перед турбодетандером	t_1	°C	80
Температура газа после турбодетандера	t_2	°C	4
Температура воды на входе в электропарогенератор	$t_{в.вх}$	°C	100
Теплоемкость природного газа	$C_{pГ}$	кДж/кг	2,09
Показатель адиабаты для природного газа	K		1,32

Основные расчеты:

Расход теплоты в газопаровом теплообменнике:

$$Q_{гпт} = G_r \cdot C_{pr} \cdot (t_1 - t'_1) \quad (1)$$

Расход теплоты на конденсацию:

$$Q_{конд} = Q_{гпт} \quad (2)$$

$$Q_{конд} = r \cdot G_{п} \quad (3)$$

где, $r = \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ - теплоты парообразования

Расход пара:

$$G_{п} = \frac{Q_{конд}}{r} \quad (4)$$

Тепловая на электропарогенератора:

$$Q_{эпн} = G_{п} \cdot C_{pВ} \cdot (t_s - t'_{в.вх}) + G_{п} \cdot r + G_{п} \cdot C_{рп} \cdot (t_0 - t_s) \quad (5)$$

Мощность турбины:

$$N_{турб} = H \cdot G_{п} \quad (6)$$

Степень понижения давления в турбодетандере:

$$\pi_{тд} = \frac{P_1}{P_2} \quad (7)$$

Работа в турбодетандере:

$$L_{тд} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{тд}^{\frac{k}{k-1}}} \right) \cdot \eta_{тд} \quad (8)$$

Мощность турбодетандера:

$$N_{\text{тп}} = G_{\text{г}} \cdot L_{\text{тд}} \quad (9)$$

Суммарная мощность турбины и турбодетандера:

$$\text{Суммарная мощность} = N_{\text{тп}} + N_{\text{турб}} \quad (10)$$

Использование предлагаемой турбодетандерной установки для производства электроэнергии исключает расходование магистрального газа на нужды ГРС, так как газ подогревается в газопаровом теплообменнике теплотой отработавшего пара из турбины. За счет установки электропарогенератора обеспечивается большая экономическая эффективность, так как топливо на подогрев воды в нем не затрачивается. Отсутствие процесса сжигания топлива создает полную экологическую чистоту установки. Увеличивается эффективность выработки электроэнергии, то есть расход теплоты на электропарогенератор покрывается мощностью турбодетандера и 6% мощности турбины, а значит оставшаяся энергия, вырабатываемая турбиной — это 94%, является дополнительной.

Турбодетандерная установка в системе газораспределительной станции, содержащая турбодетандер, электрогенератор, линию высокого давления природного газа, газопаровой теплообменник, присоединенный к линии высокого давления и турбодетандеру, отличающаяся тем, что имеет электропарогенератор, питаемый электроэнергией от электрогенераторов турбодетандера и противодавленческой турбины, соединенный с противодавленческой турбиной.

4.1 Анализ полученных результатов

Данный исследовательский проект является первым в Казахстане в сфере энергосберегающих «бестопливных» технологий на основе ДГА. Весь объект занимает достаточно малую площадь. Комплекс работает в автоматическом режиме, для обслуживания требуется всего лишь один оператор.

Электростанции ДГА работают параллельно с ГРС (ГРП), являясь, дополнительной линией редуцирования газа. Специально разработанная регулируемая байпасная линия обеспечивает бесперебойную и надежную подачу газа потребителю.

КПД тепловых турбинных установок не превышает 40%, самых лучших парогазовых установок (газотурбинные двигатели в сочетании с паровой турбиной) — 50%. КПД детандер-генераторного агрегата достигает 85%, а себестоимость вырабатываемой им электроэнергии существенно ниже, чем на тепловых станциях. Мощность ДГА определяется параметрами конкретного объекта: расходом газа и перепадом давления. Генераторы переменного тока частотой 50 Гц напряжением 6,3 кВ или 10,5 кВ позволяют подключиться в

сеть энергосистемы (неограниченной мощности) и вырабатывать электроэнергию с частотой и фазой этой сети.

Основным ресурсом для выработки электроэнергии ДГА является магистральный газ. Основываясь на данных предоставленных АО «Intergas Central Asia» по количеству проходящего газа через АГРС-1 «Орбита», осуществлен расчет годовой потенциальной выработки электроэнергии ДГА (таблица 3).

Таблица 3 – прогноз максимальной годовой выработки электроэнергии на АГРС-1 «Орбита»

п.п.	месяц	тыс.кВт/ч
1	Январь	3199,2
2	Февраль	2993,8
3	Март	2282,4
4	Апрель	491,0
5	Май	0,0
6	Июнь	0,0
7	Июль	0,0
8	Август	0,0
9	Сентябрь	0,0
10	Октябрь	870,5
11	Ноябрь	2106,0
12	Декабрь	3400,1
	Итого за год	15343,0

При рассмотрении установки турбодетандер-генераторного агрегата на АГРС-1 «Орбита» были получены нижеприведенные результаты.

На рисунке 15 представлен график выработки электроэнергии турбодетандерным агрегатом (ТДА-4000), разарботки Публичного Акционерного Общества «Инженерно-производственное предприятие «Энергия» (ПАО «ИПП Энергия», г.Кривой Рог). Данный график показывает возможную выработку электроэнергии ЭТДА в зависимости от:

1. перепада давления на ГРС;
2. температуры газа на входе ЭТДА;
3. расхода газа через ЭТДА.

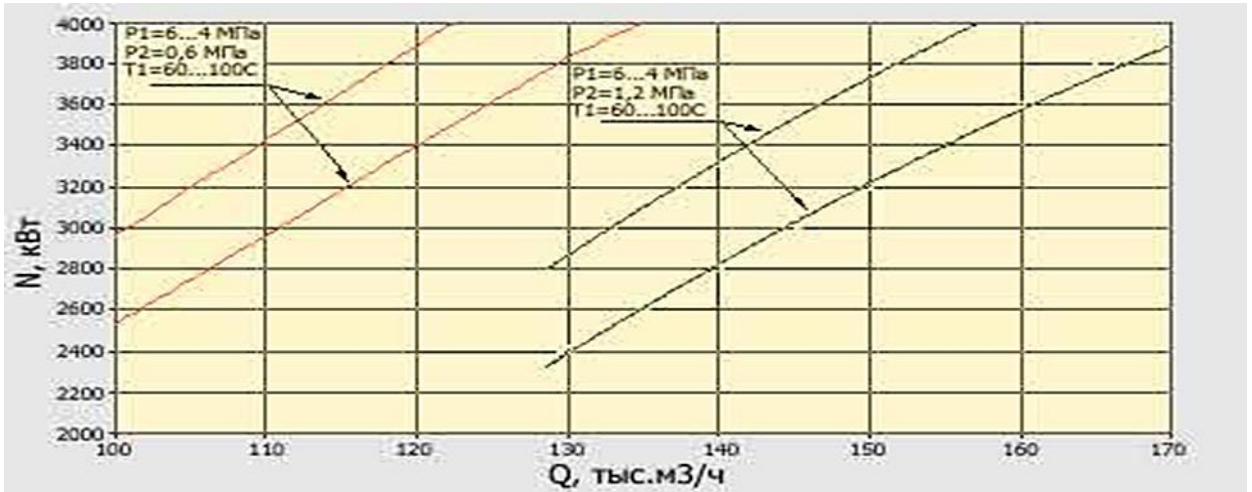


Рисунок 15 – зависимость выработки электроэнергии от расхода газа через АГРС при давлении на входе $P=4\pm 6$ МПа, давлении на выходе $P=0,6$ МПа и температуры газа на входе в турбодетандер-генератор.

Основываясь на данный график и технические данные ЭТДА-4000 просчита на ожидаемая выработка электроэнергии применительно к АГРС-1 «Орбита».

Расход газа через турбодетандер, тыс. нм³/ч:

диапазон.....17±122
 Средний за год.....48
 Среднегодовое давление на входе в подогреватели, атм.....12
 Требуемая температура на входе ЭТДА, °С.....+70
 Предполагаемое количество подогревателей газа ПГ-50, шт.....3

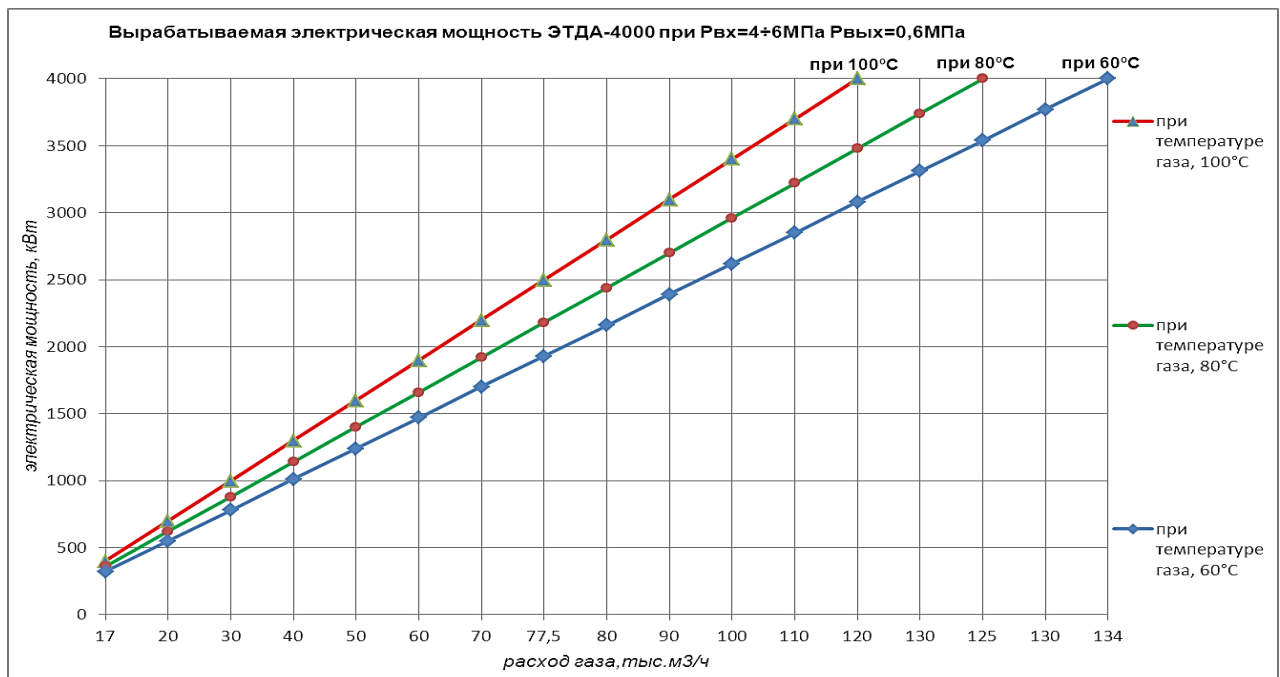


Рисунок 16 – зависимость выработки электроэнергии от расхода газа через АГРС при давлении на входе $P=4\pm 6$ МПа, давлении на выходе $P=0,6$ МПа и температуры газа на входе в турбодетандер-генератор.

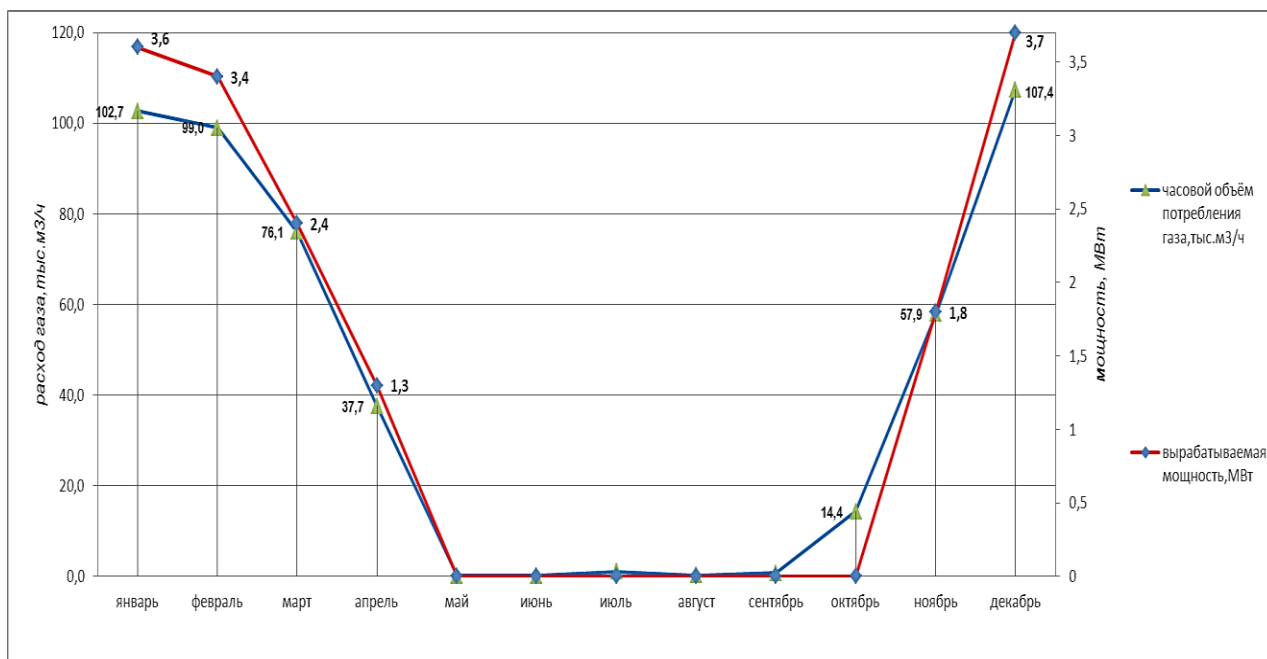


Рисунок 17 – выработка электроэнергии при существующем расходе газа через АГРС-1 при давлении на входе $P=4\pm 6$ МПа, давлении на выходе $P=0,6$ МПа и температуры газа на входе в турбодетандер-генератор = 100°C .

Таблица 4 – актуальные данные по расходу газа и расчётная выработка электроэнергии на АГРС-1 при давлении газа на входе $P=4\pm 6$ МПа, давлении газа на выходе $P=0,6$ МПа и температуры газа на входе в турбодетандер-генератор= 100°C .

п.п.	месяц	месячный объём потребления газа, млн. м3	часовой объём потребления газа, тыс. м3/ч	вырабатываемая мощность, МВт	выработка электроэнергии, тыс.кВт.ч
1	январь	76,37	102,7	3,6	2592,0
2	февраль	66,54	99,0	3,4	2448,0
3	март	56,58	76,1	2,4	1728,0
4	апрель	27,11	37,7	1,3	936,0
5	май	0,14	0,2	0	0,0
6	июнь	0,13	0,2	0	0,0
7	июль	0,78	1,0	0	0,0
8	август	0,17	0,2	0	0,0
9	сентябрь	0,56	0,8	0	0,0
10	октябрь	10,34	14,4	0	0,0
11	ноябрь	43,06	57,9	1,8	1296,0
12	декабрь	79,94	107,4	3,7	2664,0
	ИТОГО	361,7	41,5		11664,0

5 Экономическая эффективность проекта по применению турбодетандерных установок на АГРС

5.1 Актуальность применения энергосберегающих технологий.

Актуальность модернизации системы добычи, подготовки и транспортировки углеводородов в нефтегазовой промышленности, сегодня становится все более масштабной. В соответствии с этим ведется большая работа по модернизации газотранспортной системы.

Принятые дорожные карты развития нефтегазовой отрасли, в соответствии с которой предусматривается увеличение добычи нефти, газа и газового конденсатного сырья, установлены рычаги для ее дальнейшей реализации. Наши недра богаты полезными ископаемыми. Созданы инновационные методы их добычи и реализации, путем привлечения иностранных предприятий. К сожалению, накопилось множество проблем, которые препятствуют к развитию энергоструктуры. С увеличением объемов добычи углеводородов, следует не только модернизировать производственные объекты, но и внедрять энергосберегающие технологии, которые способствуют к повышению энергоэффективности технологических процессов.

С каждым годом потребление электроэнергии населением и предприятиями растет. Это связано со строительством многих предприятий и заводов, которые потребляют большое количество топливно-энергетических ресурсов, в частности электрической энергии. Нефтегазовые компании должны искать пути по внедрению энергосберегающих технологий, в частности комбинировать традиционные методы получения электрической энергии с альтернативными. Необходимость выработки собственной электрической энергии нефтегазовыми компаниями на базе собственных предприятий необходимо с темпами роста цен на электроэнергию.

В нашем быстроразвивающемся мире, развитие энергоэффективности и энергосбережения является важным условием развития национальной экономики и конкурентоспособности в современном обществе. Актуальность проблемы энергосбережения в нефтегазовой отрасли, сегодня становится все более масштабной и существенной, аспектов рассмотрения данной проблемы огромное множество. Если брать во внимание именно подготовку газа к транспорту, то затраты на топливно-энергетические ресурсы просто колоссальны. Компании энергетического сектора внедряют проекты по использованию избыточной энергии давления газа при его редуцировании прямо на газодобывающем предприятии природного газа. Детандер- генераторные агрегаты стали одним из самых передовых технологических оборудования в нефтегазовом промышленности, так как она по сравнению с устаревшими методами, дает возможность не только улучшить качество подготовки газа, но и выработать чистую электрическую энергию, используя энергию давления газа.

5.2 Расчет экономических показателей

Выработка электрической энергии на АГРС с помощью детандер-генераторного агрегата на прямую зависит от расхода проходящего через турбодетандерную полость ДГА, давления и температуры газа. Что касается температуры и давления, то они нормированы, и эксплуатирующая организация поддерживает их согласно техническим условиям или же рабочим документам. При расчете, были взяты предположительные значения

Часовая вырабатываемая мощность электрической энергии ДГА вычисляется по следующей формулой.

$$N_{\text{ДГА}} = \eta_{\text{ДГА}} \cdot \eta_{\text{ЭГ}} \cdot N_{\text{вал}} \cdot t \quad [\text{МВт} \cdot \text{ч}] \quad (11)$$

где,

$\eta_{\text{ДГА}}$ – паспортное КПД детандер-генераторного агрегата;

$\eta_{\text{ЭГ}}$ – паспортное КПД электрогенератора;

$N_{\text{вал}}$ – мощность на валу турбины ДГА; [МВт] t – время; [ч]

Согласно статистическим данным Государственного комитета Республики Казахстан по статистике, с каждым годом увеличивается цены на электроэнергию, ежегодный прирост для физических лиц составляет в районе 15-20%, а для юридических лиц в районе 20-25%. Следовательно, при расчете экономической эффективности следует учесть этот фактор.

Ежегодная экономическая прибыль вычисляется по следующей формуле.

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = N_{\text{ДГА}} \cdot t \cdot \text{Ц}_{\text{эк}} \cdot r_{\text{пр}} \quad (12)$$

$N_{\text{ДГА}}$ – вырабатываемая мощность электрической энергии ДГА вычисляется по следующей формулой

t – количество часов работы ДГА в год, [8000 часов в год];

$\text{Ц}_{\text{эк}}$ – цена электрической энергии за 1 кВт*ч, [тенге];

- 18,25 тенге для бытовых потребителей
- 25,93 тенге для крупных потребителей электроэнергии.

$r_{\text{пр}}$ – ежегодный средний прирост цены за 1 кВт*ч электроэнергии, [%];

При долгосрочном формировании цен на электрическую энергию, были проанализированы цены на электроэнергию за последние 5 лет.

1-ый год

$$\text{Э}_{\text{пр}1} = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 8000 \cdot 18,0 = 316\,800\,000 \text{ тенге}$$

2-ой год

$$\text{Э}_{\text{пр}2} = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 8000 \cdot 19,2 = 337\,920\,000 \text{ тенге}$$

3-ий год

$$\text{Э}_{\text{пр}3} = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 8000 \cdot 21,24 = 373\,824\,000 \text{ тенге}$$

4-ый год

$$\text{Э}_{\text{пр}4} = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 8000 \cdot 24,8 = 435\,480\,000 \text{ тенге}$$

5-ый год

$$\text{Э}_{\text{пр}5} = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 8000 \cdot 27,6 = 485\,760\,000 \text{ тенге}$$

Суммарная экономическая прибыль без учета эксплуатационных затрат составила:

$$\sum_{i=1}^5 \text{Э}_{\text{пр}i} = 1\,949\,784\,000 \text{ тенге}$$

5.3 Прогнозируемый срок окупаемости проекта

Если выразить прибыль для удобства в долларах США (USD), то она составит, учитывая нынешний курс USD относительно национальной валюты Республики Казахстан тенге, в районе 4,534 млн. USD.

При расчете срока окупаемости следует учесть суммарные капиталовложения для реализации проекта и ежегодные эксплуатационные затраты. Эксплуатационные затраты обычно составляет примерно 5-8% от стоимости оборудования. Цена на электроэнергию в Республики Казахстан относительно низкая в Средней Азии, из-за этого срок окупаемости может составлять в районе от 4-5 лет.

Доставка оборудования на площадку, монтаж и пуск-наладка выполняется заводом изготовителем и с учетом цены на оборудование для текущих технических условий составляет от 3 до 3,5 млн. USD. Одним из главных факторов, влияющих на ценообразование оборудования, является состав газа и термобарические условия. Так как если проводимый природный газ является высокосернистым, то следует использовать специальные легированные сплавы, которые препятствуют коррозии оборудования, следовательно, это приводит к увеличению капиталовложений при реализации проекта.

Если учитывать ежегодные эксплуатационные затраты, то они составляют примерно 5-8% от стоимости оборудования. Учитывая, что природный газ на является малосернистым, то цена оборудования будет составлять в районе 3 млн USD, тогда ежегодные эксплуатационные затраты примерно составят 150 тыс. USD.

Максимальная выработка электроэнергии приходится на первую пятилетку, так как расход газа находится на приемлемых значениях загружены все ступени детандер-генераторного агрегата. Следовательно, если брать суммарную прибыль за 2021-2025, то они составили 4,534 млн USD. Учитывая суммарные капиталовложения и ежегодные эксплуатационные расходы за этот период, можем определить срок окупаемости проделанного мероприятия.

$$t_{\text{ок}} = \text{Э}_{\text{пр1-5}} - (K + t * \text{Э}_{\text{экс}}), \quad (13)$$

$\text{Э}_{\text{пр1-5}}$ – суммарная экономическая прибыль за первую пятилетку (2021-2025 г.);

K – суммарные капиталовложения в проект;

$\text{Э}_{\text{экс}}$ – эксплуатационные расходы за первую пятилетку (2021-2025 г.);

$$t_{\text{ок}} = 4\,534\,000 - (3\,500\,000 + 5 * 150\,000) = 284\,000 \text{ USD}.$$

Уже через 5 лет проект окупится и выйдет в плюс с прибылью. Согласно нормативно-правовым актам ТЭО обоснование проектов считается успешным, если проект окупается в среднем за 9 лет, в зависимости от масштаба.

Если говорить о предложениях по использованию вырабатываемой электроэнергии, то есть 2 варианта:

Первое – это, использовать электроэнергию на собственные нужды АГРС, их суммарная потребляемая мощность составляет 1400 кВт*ч.

Второе, обеспечить дополнительной электроэнергией жилые дома в Алматы.

Конечно же первый вариант намного выгоднее так, как эксплуатирующая организация является промышленным объектом и тарифы на электроэнергию немного выше, чем у бытовых потребителей. Следовательно, согласно выполненных расчетов вырабатываемая электроэнергия намного выше и покрывает полностью потребности АГРС, при выработке электроэнергии на собственные нужды, компания может сократить объемы покупки электроэнергии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В работе поставлена и решена задача, направленная на повышение эффективности использования турбодетандеров в технологических схемах АГРС для газовой промышленности с целью улучшения эксплуатационных характеристик. Решение этой задачи позволило получить основные аспекты научных и практических результатов. В ходе работы было выполнено следующее:

- изучена используемая нормативно-техническая документация;
- проанализированы применяемые технологии и методы по эффективности применения турбодетандерных установок на автоматизированных газораспределительных станциях;
- проведен расчет турбодетандерных агрегатов для улучшения и увеличения самостоятельности АГРС от внешних источников электроэнергии и общее эффективное применения их в составе станции.
- были проведены расчеты по определению экономической эффективности по внедрению турбодетандерных установок на АГРС. Представлены результаты о прогнозируемом сроке окупаемости мероприятия. Кроме этого, даны рекомендации по использованию вырабатываемой электроэнергии, которые могли бы улучшить энергоэффективность производственного объекта.

Можно сделать следующие выводы, что методы с использованием применения турбодетандерных установок на АГРС согласно выполненных расчетов и анализов отличились очень высокими значениями эффективности и установка турбодетандеров на газораспределительных станциях является перспективным ресурсосберегающим мероприятием.

Энергосбережение в нашем быстроразвивающемся мире представляет собой одну из важнейших целей каждой компании, занимающаяся в сфере производства. Приоритетными направлениями национальной энергетической политики в нефтегазовой сфере является организация стабильной инновационной системы для обеспечения отраслей государственной энергетики высокоэффективными технологиями и оборудованием, научно-техническими и инновационными решениями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рид Р. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд; пер. с англ. под ред. Б.И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
2. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – Введ. 01.01.88. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 4 с.
3. Епифанова В.И. Компрессорные и расширительные турбомашин радиального типа / В.И. Епифанова. – М.: МВТУ им. Н. Баумана, 1998. – 376с.
4. Трухний А.Д. Термодинамические основы использования утилизационных турбодетандерных установок / А.Д. Трухний // Вестник МЭИ. – 1999. - №5. – С. 62-66.
5. Пат. 41098 Украина, МПК (2009) F25B 11/00. Полезная модель. Утили-ных турбодетандерных установок / С.В. Моисеев, А. В. Бурняшев, В.В. Вишек, В.В. Плахотник, В.П. Сарапин; заявитель и патентообладатель ОАО "Турбгаз". - № и 2008 11636; заявл. 29.09.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. №9 .: ил.
6. Моисеев С.В. Выбор оптимальных номинальных параметров УТДУ для работы на ГРС / С.В. Моисеев, А.В. Бурняшев, В.П. Сарапин // Научные работы: Техногенная безопасность. – Николаев: ЧДУ им. П. Могилы, 2007. – Т. 77, №64. – С. 49-52.
7. Ситников В.В. Новые детандер-генераторные установки ГП НКПП "Зоря"- "Машпроект" как один из путей экономии энергетических ресурсов / В.В. Ситников // Научный процесс. – 2006. – Т. 61, Вып. 48. – С. 236–243.
8. Степанец А.А. Об эффективности детандер-генераторных агрегатов в тепловой схеме ТЭЦ / А.А. Степанец // Энергетик. – 1999. - №4. – С. 24-32. 113
9. Агабабов В.С. Оценка эффективности использования детандер - генераторных агрегатов для получения электроэнергии / В.С. Агабабов // Энерго- сбережение и водоподготовка. - 2001. - № 2. - С. 13-18.
10. Гура Л.А. Газоперекачивающие станции магистральных газопроводов / Л.А. Гура. - М.: НТУ "ХПИ", 2006. - 182 с. Кубанов А.Н.
11. Перспективы использования турбохолодильной техники на объектах добычи газа / А.Н. Кубанов, В.А. Хетагуров, Ф.М. Дедученко // Газовая промышленность. - 2004 - № 12. - С. 65-68.
12. Разработка и совершенствование низкотемпературных детандерных агрегатов / А.В. Бурняшев, О.В. Купрыгин, С.В. Моисеев, В.И. Поливанов // Технические газы. - 2006. - № 5.- С. 47-51.
13. Гухман Л.М. Подготовка газа северных газовых месторождений к дальнему транспорту / Л.М. Гухман. - Л.: Недра, 1980. - 161 с.
14. Кемпбел Д.М. Очистка и переработка природных газов / Д.М. Кемпбел; пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук С.Ф. Гудкова. - М.: Недра, 1977. -349 с.
15. Мальханов О.В. Энергосберегающий турбодетандерный агрегат мощностью 8000 кВт - ЭТДА-8000, предназначенный для выработки электроэнергии на ГРП тепловой электростанции / О.В. Мальханов // Надежность и

- безопасность энергетики. - 2008. - № 3.- С. 59-61.
16. Куличихин В.В. Использование избыточного давления природного газа на промышленных предприятиях / В.В. Куличихин, О.О. Лазарева // Надежность и безопасность энергетики. - 2010. - № 9.- С. 48-54.
 17. Агабабов В.С. О применении детандер-генераторных агрегатов в газовой промышленности / В.С. Агабабов // Энергосбережение и энергосберегающие технологии в энергетике газовой промышленности. - 2001. - Т. 2. - С. 50-53.
 18. Пятничко А.И. Эффективная выработка электроэнергии на ГРС и ГРП при использовании перепада давлений газа / А.И. Пятничко, СП. Крушневич // Технические газы. - 2012. - № 4.- С. 48-51.
 19. Ивчик Л.Ф. Исследование газодинамических и тепловых процессов в детандерной ступени детандер-компрессорного агрегата / Л.Ф. Ивчик, В.Н. Коньшин, Л.Б. Лебедев // Технические газы. -2007. - № 3.- С. 37-45.
 20. Леонов В.П. Профилирование лопаток объемной кривизны рабочих колес турбомашин: методическое пособие / В.П. Леонов - М.: МГТУ им. Н. Баумана, 2000. - 16 с.
 21. Бойко А.В. Оптимальне проектування турбомашин (основи теорії, розрахунок, експеримент) / А.В. Бойко. - Х.: НТУ "ХП", 2011. - 384 с.
 22. Давыдов А.Б. К расчету характеристик радиальных турбодетандеров при больших степенях расширения / А.Б. Давыдов, А.Н. Шерстюк, Т.М. Розеноер // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1983. - № 3.- С. 27-29.
 23. Гуревич Г.Р. Сепарация природного газа на газоконденсатных месторождениях. / Г.Р. Гуревич. - М.: Недра, 1982. - 200 с.
 24. Клименко А.П. Разделение природных углеводородных газов / А.П. Клименко. - Киев: Техника, 1964. - 380 с.
 25. О равновесии процесса конденсации природного газа в турбодетандере / Е.А. Мурунов [и др.] // Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. - 1972. - № 8.- С. 21-24.
 26. Бекиров Т.М. Технология обработки газа и конденсата / Т.М. Бекиров, Г.А. Ланчаков. - М.: Недра, 1999. - 596 с.
 27. Чистяков Ф.М. Холодильные турбоагрегаты / Ф.М. Чистяков. -2е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1967. - 228 с.
 30. Язык А.В. Турбодетандеры в системах промысловой подготовки природного газа / А.В. Язык. - М.: Недра, 1977. - 173 с.
 31. Язык А.В. Системы и средства охлаждения природного газа / А.В. Язык.- М.: Недра, 1986. - 200 с.
 32. Капица П.Л. Турбодетандер для получения низких температур и его применения для ожижения воздуха / П.Л. Капица // ЖТФ. - 1939. - Т. 9, Вып. 2. - С. 99-123.
 33. Капица П.Л. Детандерная установка для ожижения гелия / П.Л. Капица, И.Б. Данилов // ЖТФ. - 1961.- № 31. - С. 457.
 34. Ширковский А.И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений / А.И. Ширковский. - М.: Недра, 1979. - 303 с.
 35. Техника и технология промысловой обработки углеводородного сырья / А.М. Сироткин, Е.Н. Туревский, Ю.А. Лаухин [и др.] // Газовая промышленность. - 1999. - № 6.- С. 12-20.

36. Берлин М.А. Переработка природных и нефтяных газов / М.А. Берлин, В.Г. Гореченков, Н.П. Волков. - М.: Химия, 1981. - 473 с.
37. Бумагин Г.И. Криогенные машины: учебное пособие / Г.И. Бумагин. - Омск: ОмГТУ, 2007. - 216 с. - ISBN 5-8149-0492-5.
38. Твердохлебов В.И. Агрегаты блочные турбодетандерные типа БТДА- 5-100 СУГ, карта технического уровня и качества продукции, ВНПО "Союзтурбогаз" / В.И. Твердохлебов // Надежное оборудование для газовой промышленности. - 1990. - № 29.- С. 30-36.
39. Соколов Ю.Н. Основы единой теории лопастных машин / Ю.Н. Соколов.- Томск: Томский университет, 1973. - 218 с.
40. Давыдов А.Б. Расчет и конструирование турбодетандеров / А.Б. Давыдов, А.Ш. Кабулашвили, А.Н. Шерстюк. - М.: Машиностроение, 1987. - 232 с.
41. Розеноер Т.М. Расчет турбодетандера. Методические указания по курсу "Турбомашин низкотемпературной техники"/ Т.М. Розеноер. – М.: Изд-во УНЦ МГТУ им. Н. Баумана. – 2002. – 80 с.
42. А.А.Степанец. Об эффективности детандер-генераторных агрегатов в тепловой схеме ТЭЦ // Энергетик. - 4, 1999 г., с.2.
43. Зарницкий Г.Э. Теоретические основы использования энергии давления газа. Москва, «Недра», 1968 г.