

На правах рукописи



КУЛАГИНА ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ  
ГАЗОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ЭНЕРГОХОЛОДИЛЬНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 25.00.19 –

«Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2016

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
**Байков Игорь Равильевич**

Официальные оппоненты: **Чучкалов Михаил Владимирович**  
доктор технических наук  
ООО «Газпром трансгаз Уфа» / начальник  
технического отдела

**Долотовский Игорь Владимирович**  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.» /  
Проблемная научно-исследовательская  
лаборатория теплоэнергетических установок  
электростанций и систем энергоснабжения,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный  
технический университет», г. Ухта

Защита диссертации состоится «06» октября 2016 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время наблюдается тенденция к постоянному росту потребления природного газа, что увеличивает энергозатраты на его подготовку и транспорт. Энергосбережение становится одним из факторов, определяющих эффективность и экономичность систем подготовки и транспорта природного газа. Утилизация энергии избыточного перепада давления природного газа при его редуцировании в системах газораспределения и газопотребления является одним из видов энергосбережения в газотранспортной системе и оказывается весьма перспективной на сегодня. На первый план выходят задачи повышения энергоэффективности транспорта природного газа при максимальной утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

При расширении природного газа в детандерном агрегате достигается высокий технологический эффект, и в настоящее время доказана целесообразность их использования взамен дросселирующих устройств. На базе детандер - генераторных агрегатов возможно создание энерготехнологических установок с комплексной выработкой электроэнергии и холода (понижение температуры газа) без сжигания топлива, т.е. экологически чистым способом. Использование детандеров при адиабатном расширении газа и передача внешней работы на вал машины позволяют создать значительно большее охлаждение, чем при дросселировании. Повышению эффективности установок, использующих охлажденный газ, способствует применение турбодетандеров, особенно для холодильных камер и как первая ступень технологической линии для сжижения природного газа.

Комплексное использование на газораспределительной станции (ГРС) энергии избыточного давления природного газа с целью выработки электроэнергии и потребления её в холодильном комплексе является самым энергоэффективным способом утилизации ВЭР в магистральном транспорте газа и способствует решению важнейших экономических и экологических проблем.

Так как большая часть территории нашей страны газифицирована и имеется много ГРС возле городов и населенных пунктов, представляется целесообразным строительство при ГРС промышленных холодильных комплексов и установок по сжижению газа.

Природный газ не является токсичным веществом, и его применение в качестве хладагента в сочетании с детандерными установками может позволить создать высокоэффективные экологически чистые, менее дорогостоящие холодильные комплексы с упрощенной структурой. Для успешного внедрения энергохолодильных комплексов (ЭХК) на базе ДГА в промышленность России необходимо проводить широкий комплекс работ, включающий как научные разработки, так и организацию производства.

Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что возможности применения ЭХК и установок для сжижения газа на газоперекачивающих станциях магистральных газопроводов недостаточно изучены и существует необходимость оценки их потенциала, который может быть получен при внедрении в газотранспортной промышленности, а также разработки схем, получения зависимостей для определения показателей эффективности применения холодильных и криогенных технологий, включенных в систему транспортировки газа.

**Целью работы** является повышение энергоэффективности системы газоснабжения на основе совершенствования энергохолодильных и криогенных технологий на базе детандер-генераторных агрегатов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1 Анализ существующих технологий утилизации избыточного давления природного газа на ГРС и выявление наиболее перспективной из них с учетом современных достижений техники.

2 Определение возможных потенциалов потоков газа и обоснование внедрения энергохолодильных комплексов с учетом существующих технологий.

3 Разработка алгоритма проектирования энергохолодильного комплекса с использованием потенциала ВЭР избыточного давления газа на ГРС.

4 Сравнение и выбор наиболее эффективной схемы охлаждения природного газа энергохолодильного комплекса на ГРС.

5 Сравнительный анализ и определение наиболее эффективной технологии сжижения природного газа при утилизации избыточного давления природного газа на ГРС.

**Научная новизна:**

1 Впервые получены аналитические зависимости и алгоритм определения емкости энергохолодильного комплекса с использованием ВЭР избыточного давления газа от перепада температур поступающего природного газа и производительности ГРС с учетом особенностей технологии проектирования и установлена последовательность выбора температур для нагрева природного газа, поступающего к потребителям.

2 Определена функциональная зависимость величины потребления холода на единицу емкости энергохолодильного комплекса при различной производительности ГРС в зависимости от условий их эксплуатации.

3 Получены аналитические зависимости по определению потенциала энергоэффективности систем подготовки и транспорта природного газа при установке детандер-генераторных агрегатов от степени их загрузки.

4 Разработана схема установки по производству сжиженного природного газа на основе детандерного холодильного цикла.

**Практическая ценность работы.** Полученные результаты исследований используются в учебном процессе, а именно: в программе дисциплин «Энергосбережение в теплоэнергетике и технологиях», «Тепломассообменное оборудование предприятий» при подготовке бакалавров по направлению «Промышленная теплоэнергетика».

Схема комплекса для производства сжиженного газа применяется ООО «Ростнефтехим» при проектировании технологической линии для сжижения природного газа.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались теоретические методы исследования: анализ, синтез, системный анализ, теплофизические методы.

**Основные защищаемые положения.** Полученные при проведении исследования зависимости холодопроизводительности от температуры и расхода поступающего природного газа; последовательность выбора температур в камерах энергохолодильного комплекса; алгоритм расчета энергохолодильного комплекса на базе детандер-генераторных агрегатов; результаты сравнительного анализа параметров используемых хладагентов, общие значимые выводы и рекомендации.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на 62-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Уфа, 2011 г.;

– II, III, IV Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды», г.Уфа, 2011, 2012, 2013 гг.;

– Международном конкурсе научных работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, г.Москва, 2012 г.;

– XVIII, XIX Всероссийских научно-технических конференциях «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность», г. Томск, 2012, 2013 гг.;

– Международной молодежной конференции «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения», г. Томск, 2012 г.;

– XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях «Проблемы строительного комплекса России», г.Уфа, 2014, 2015 гг.;

– Международные учебно-научно-практических конференциях «Трубопроводный транспорт – 2013, 2015», г. Уфа.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов; содержит 231 страницу машинописного текста, включая 15 таблиц, 41 рисунок, 1 приложение и библиографический список из 185 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, поставлена цель работы и определены задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность проведенных исследований.

**В первой главе** проведен анализ литературных источников и выполнен обзор исследований, проведенных в области повышения эффективности магистрального транспорта газа за счет использования вторичных энергетических ресурсов избыточного давления (ВЭР).

В связи с актуальными проблемами энергосбережения в настоящее время активно разрабатываются технологии использования детандеров в системе утилизации ВЭР избыточного давления газов в различных отраслях промышленности. Одним из решений вопроса энергоэффективности и обеспечения энергетической безопасности страны является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и утилизация вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), в качестве которых рассматривается энергия, теряемая при дросселировании природного газа.

Значительный вклад в исследования различных направлений использования энергии избыточного давления газа на газораспределительных станциях (ГРС), газорегуляторных пунктах (ГРП) внесли В.С. Агабабов, Д.Т. Аксенов, Г.П. Аксенова, В.В. Гайдукевич, Ю.Л. Гуськов, Е.В. Джураева, А.П.

Клименко, С.С. Комаров, А.В. Корягин, Е.Д. Лашкевич, В.П. Мальханов, А. Л. Репин, А.А. Степанец, В.Ф. Утенков, Ю.Ю. Хаймер, В.Н. Шпак и др.

К настоящему времени имеются единичные опытные разработки для конкретных объектов и находятся на разных стадиях разработки проекты по внедрению энергохолодильных комплексов с ДГА, но нет типовых установок для повсеместного использования.

В реализованных проектах вырабатывается только электрическая энергия и отсутствует холодильная часть, что снижает энергоэффективность не менее чем в два раза.

**Во второй главе** рассмотрена возможность реализации энергохолодильных комплексов на газораспределительных станциях (ГРС), позволяющая оценить эффективность использования потенциалов энергии избыточного давления газа в единой системе газоснабжения в зависимости от реальных параметров эксплуатации объектов.

Способ снабжения потребителей природным газом с использованием газораспределительной станции (ГРС) осуществляется при одновременной выработке электрической энергии и холода при редуцировании с использованием включенного параллельно ГРС энергохолодильного комплекса (ЭХК). ЭХК имеет детандер-генераторный агрегат (ДГА) с теплообменниками. При этом часть поступающего газа может направляться в ЭХК для выработки электроэнергии и холода, а часть - в ГРС. Таким образом, ГРС и ЭХК функционируют взаимосвязанно и согласованно как единая газоредуцирующая система с выработкой электроэнергии и холода и выдачей потребителю газа с заданными параметрами.

Возможность получения низких температур в камерах холодильного комплекса рассмотрена в условиях работы ГРС с учетом особенностей технологии проектирования холодильных установок.

Установлено, что при выборе температур в камерах холодильного комплекса наиболее эффективно руководствоваться следующим алгоритмом действий:



1 Определить температуру газа на входе в комплекс и на выходе из него (подача к потребителям)  $t'_r, t''_r$ .

2 Задаться разностью температур на выходе для газа и входе для воздуха в воздухоохладитель. Установлено, что она должна составлять не менее 3-5 °С:

$$t'_b = t''_r + 5^\circ\text{C}.$$

3 Задаться темпом охлаждения воздуха в воздухоохладителе (3-4 °С:

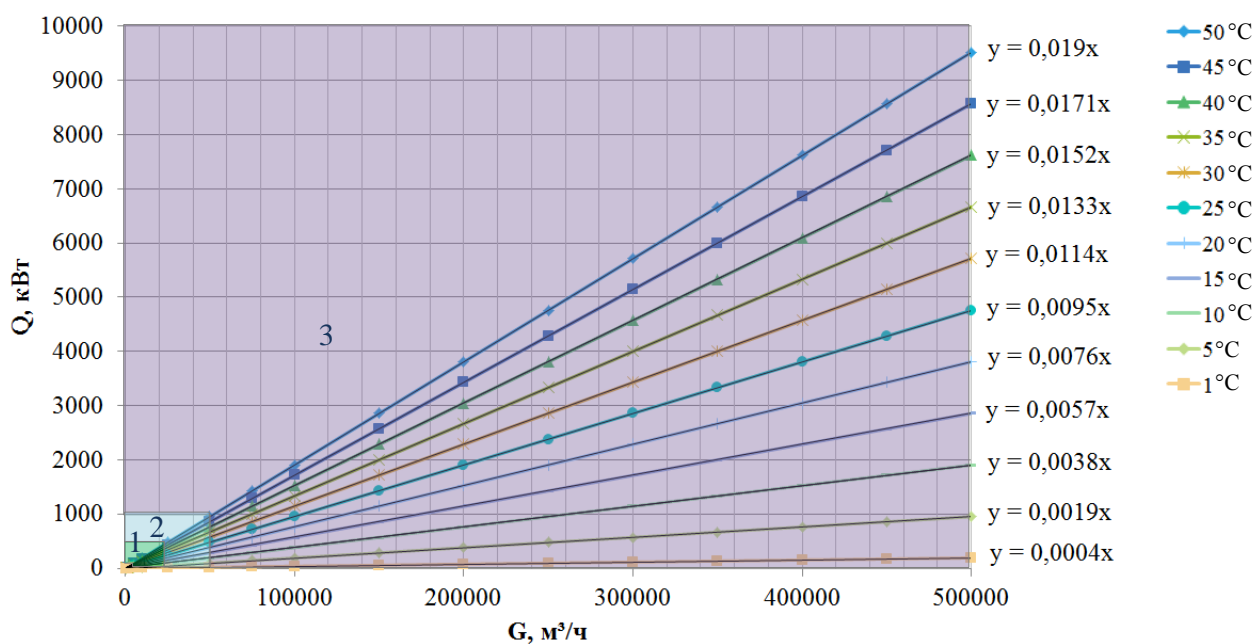
$$t''_b = t'_b - 4^\circ\text{C}).$$

4 Задаться темпом охлаждения камеры в стационарном режиме таким образом, чтобы воздух увлажнялся и отеплялся не более чем на 2°С:

$$t_b = t''_b + 2^\circ\text{C}.$$

Из разработанного алгоритма следует, что достичь достаточно низких температур воздуха в камерах ЭХК невозможно, поэтому данные камеры могут использоваться только для охлаждения до температур от -7 до +4°С.

Схема включения, единичная мощность ДГА и их количество определяются индивидуально в каждом проекте в зависимости от параметров и масштабности ГРС по проходу газа, а также от спроса потребителей электроэнергии и холодильных площадей. В работе, в качестве примера, был произведен расчет холодопроизводительности и емкости холодильного комплекса для ГРС с производительностью от 2 до 3 кг/с и различными изменениями температур (рисунок 1). Для некоторых интервалов температур  $\Delta t, ^\circ\text{C}$  были выявлены зависимости холодопроизводительности  $Q, \text{кВт}$  от производительности ГРС  $G, \text{м}^3/\text{ч}$ , коэффициенты полученной зависимости определялись методом наименьших квадратов.



1 – малые, 2 – средние, 3 – крупные холодильники

Рисунок 1 – Зависимость холодопроизводительности холодильного комплекса от производительности ГРС

Проведенные исследования показали, что при отсутствии предварительного подогрева температура газа на выходе из ДГА может понижаться до  $-80^{\circ}\text{C}$  и ниже, что недопустимо по действующим правилам безопасности эксплуатации газопроводов. Исходя из этого представляется целесообразным использование турбодетандерных агрегатов (ДГА) на ГРС в сочетании с холодильным комплексом, где температура газа вновь будет повышаться до требуемой. В работе была выявлена зависимость емкости холодильного комплекса  $V$ , т от перепада температур природного газа и производительности (рисунок 2).

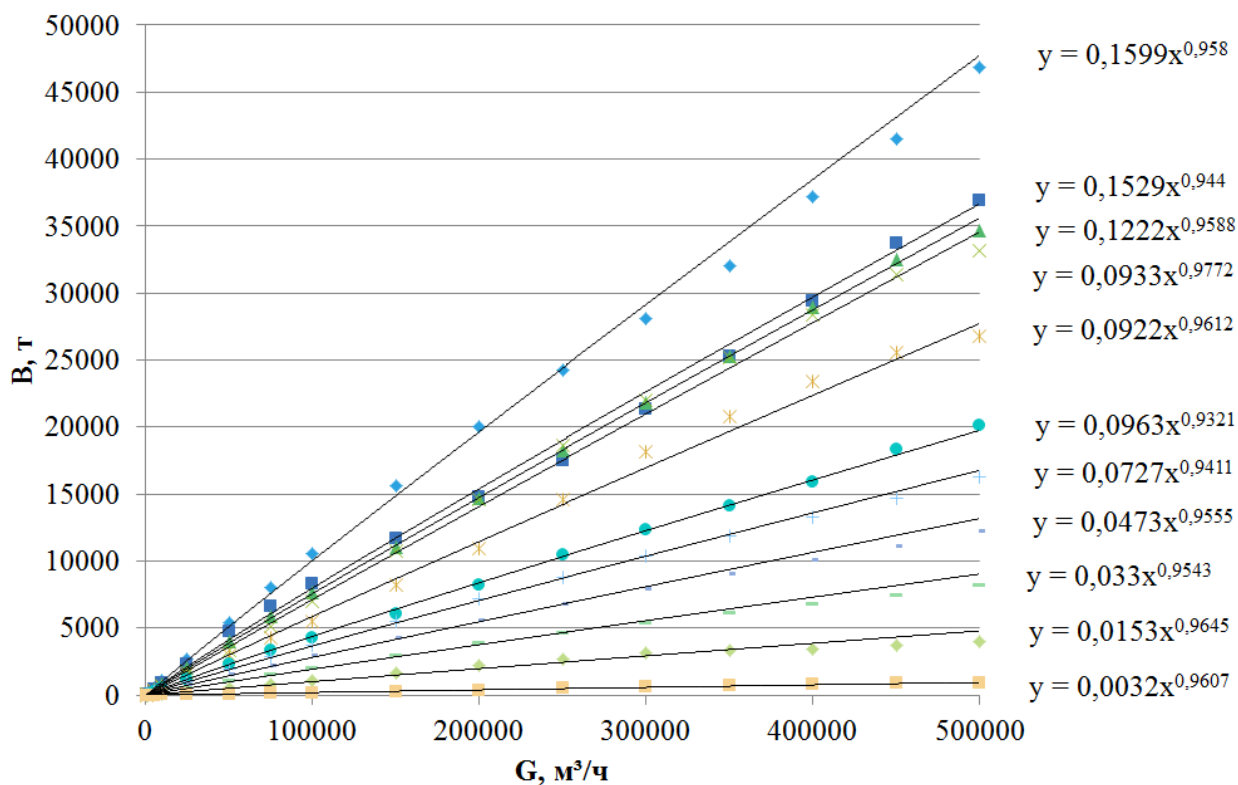


Рисунок 2 – Зависимость емкости холодильного комплекса от перепада температур природного газа и производительности ГРС

Обработка экспериментальных данных позволила методом асимптотических координат получить следующую зависимость:

$$B = 2 \cdot 10^{-6} \cdot G^{1,0165} \cdot (-2,4808 \cdot \Delta t^2 + 970,754 \cdot \Delta t - 927,0814) - 0,0016 \cdot \Delta t^2 + 0,806 \cdot \Delta t - 0,6786. \quad (1)$$

Из анализа рисунка 2 также видно, что строительство холодильного комплекса экономически целесообразно при производительности ГРС более 5000 м³/ч и при перепаде температур природного газа более 25°C.

Проведенные исследования показали, что достичь достаточно низких температур воздуха в одной камере холодильника невозможно и весь возможный потенциал в одной камере использован быть не может. В данном случае предложен вариант разделения общей емкости холодильного комплекса на несколько камер, в каждой из которых сохраняется отличный от других температурный режим. Тогда природный газ, проходя последовательно все камеры, нагревается до требуемой у потребителей температуры (рисунок 3).

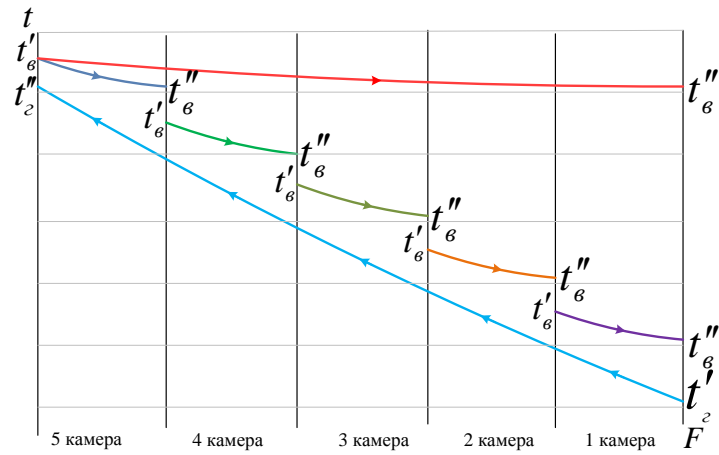


Рисунок 3 – Распределение температур воздуха и природного газа по камерам холодильника

Производительность ГРС в течение года характеризуется сезонной неравномерностью потребления. ГРС, обеспечивающие только отопительно-вентиляционные нагрузки потребителей, отсутствующие в летние месяцы, в дальнейшем для строительства энергохолодильного комплекса рассматривать нецелесообразно, так как расчетными параметрами проектирования холодильных установок являются максимальные температуры окружающего воздуха. Минимальному потреблению газа соответствуют летние месяцы. Энергохолодильные комплексы рассчитываются на наиболее сложный период работы, а именно в теплое время года, когда расход газа на ГРС становится минимальным. В качестве примера рассмотрим потенциал ГРС, расположенной в средней полосе РФ, с минимальным расходом газа за год (июль), равный от 2 до 3 кг/с, перепад давления природного газа на входе и выходе составляет 3,8/0,6 МПа, при этом степень понижения давления  $p_1/p_2=6$ . Тогда величина снижения температуры газа после его расширения в турбине достигнет максимального значения  $60^{\circ}\text{C}$ . Для регулирования энергохолодильного комплекса согласно требованиям потребителей холода при постоянной выработке электроэнергии предусматривается ступенчатость расширения газа и регулируемое снижение температуры. Ступенчатое расширение газа позволяет поддерживать требуемую температуру при высокой энергетической эффективности.

**В третьей главе** предложен алгоритм расчета энергохолодильного комплекса в условиях работы ГРС.

Алгоритм расчета разработан с учетом неравномерной работы ГРС в течение года, предусмотрен для нескольких вариантов охлаждения: с непосредственным использованием природного газа в качестве хладагента и с использованием промежуточного хладоносителя.

Основные элементы алгоритма расчета холодильного комплекса:

1 Определение основных размеров:

- расчет вместимости: определяется по решению оптимизационной задачи;
- определяется планировка;
- производится расчет строительной площади:

$$F_{\text{стр}} = \frac{F_{\text{зп}}}{\beta_F}, \quad (2)$$

где  $\beta_F$  - коэффициент использования строительной площади;

$F_{\text{гр}}$  - грузовая площадь,  $\text{м}^2$ .

2 Задается строительно-изоляционная конструкция:

- выбор тепло-, гидро- и пароизоляционных материалов;
- расчет толщины теплоизоляционного слоя:

$$\delta_{\text{из}} = \lambda_{\text{из}} \left[ \frac{1}{k} - \left( \frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e} \right) \right], \quad (3)$$

где  $k$  - нормативный коэффициент теплопередачи изоляционной конструкции,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\alpha_H, \alpha_B$  - коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности ограждения и от внутренней поверхности ограждения к воздуху камеры, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_i$  - толщина отдельных слоев ограждения, м;

$\lambda_{из}, \lambda_i$  - коэффициент теплопроводности изоляционного и строительного материалов, Вт/(м · К).

3 Производится тепловой расчет для определения производительности оборудования  $Q_{об}$ , Вт, требуемой для отвода всей теплоты, поступающей в объект, и поддержания в нем заданных параметров, определяется:

$$Q_{об} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (4)$$

где  $Q_1$  - теплоприток через ограждения помещений;

$Q_2$  - теплоприток от грузов при их холодильной обработке;

$Q_3$  - теплоприток, вносимый с наружным воздухом при вентиляции помещения;

$Q_4$  - эксплуатационные теплопритоки от различных источников;

$Q_5$  - теплопритоки от «дыхания» продукции.

4 Выбор и расчет системы охлаждения - определяется необходимая поверхность теплообмена воздухоохладителей для поддержания в охлаждаемых помещениях требуемых параметров воздушной среды:

$$F = \frac{Q_{об}}{K_{p.c.} \theta_m}, \quad (5)$$

где  $K_{p.c.}$  – коэффициент теплопередачи ребристой стенки трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\theta_m$  - среднелогарифмический температурный напор, °С.

Для сглаживания сезонной неравномерности потребления холода рассмотрены способы и порядок подбора оборудования для аккумулирования

холода: замораживание льда воздушным потоком и намораживание льда на стенках.

**В четвертой главе** по разработанному алгоритму был произведен анализ работы энергохолодильного комплекса при следующих вариантах использования холодного потока природного газа:

- с непосредственным использованием охлажденного газа в качестве хладагента;

- с использованием промежуточного хладоносителя для транспортировки холода к месту использования.

На рисунке 5 представлена расчетная схема холодильного комплекса с указанием параметров поступающего от ДГА природного газа. Результаты проведенного расчета приведены в таблице 1.

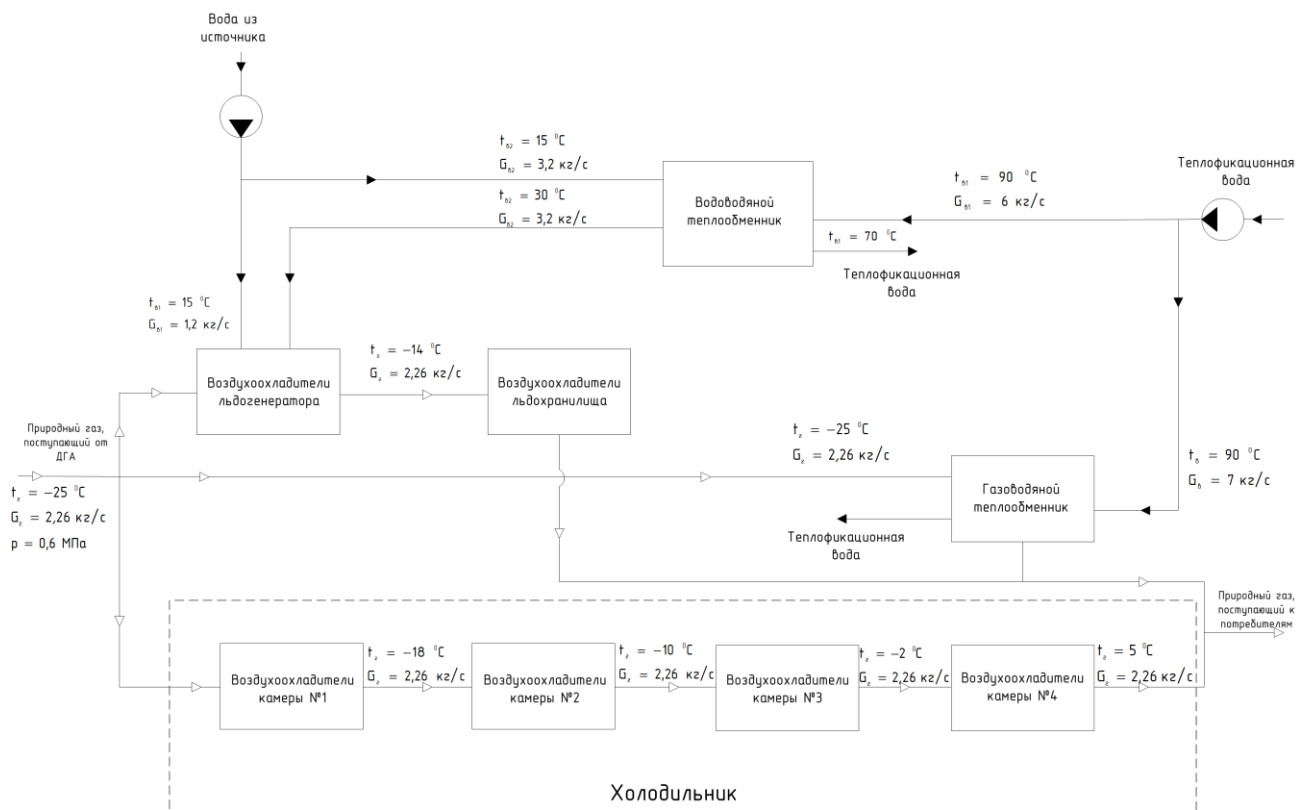


Рисунок 4 – Расчетная схема холодильного комплекса

Таблица 1 – Результаты расчета воздухоохладителей энергохолодильного комплекса

Наименование параметра	Наименование ограждения			
	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4
Тепловая нагрузка на оборудование $Q_{об}$ , кВт	27,8	39,1	35,4	29,6
Температура воздуха на входе в воздухоохладитель $t_{в'}$ , °С	-13	-5	3	10
Температура воздуха на выходе из воздухоохладителя $t_{в''}$ , °С	-17	-9	-1	6
Температура газа на входе в воздухоохладитель $t_{г'}$ , °С	-25	-18	-10	-2
Температура газа на выходе из воздухоохладителя $t_{г''}$ , °С	-18	-10	-2	5
Поверхность теплообмена воздухоохладителей $F$ , м <sup>2</sup>	470,3	537,7	459,9	498,9
Объемная подача вентиляторов $V_{в}$ , м <sup>3</sup> /с	3,13	5,01	3,37	3,43

В практике холодоснабжения принято оценивать энергопотребление на единицу хранимой продукции. По данным компаний, представленных на российском рынке и предлагающих возведение типовых промышленных холодильников в средней полосе России, удельная величина потребления холода на единицу емкости составляет 0,13-0,22 кВт/т. Для нашего примера с расходом газа от 2 до 3 кг/с удельная величина потребления холода представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Удельная величина потребления холода на единицу емкости энергохолодильного комплекса

$\Delta t$ , °С	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	1
$b$ , кВт/т	0,174	0,188	0,188	0,188	0,180	0,189	0,183	0,176	0,170	0,184	0,182

Для случая использования промежуточного хладоносителя были приняты следующие исходные данные: расход газа действующей ГРС в средней полосе России – 2-3 кг/с; при проходе через турбодетандерную установку газ охлаждается до  $-25^{\circ}\text{C}$ ; после турбодетандерной установки газ поступает в



теплообменный аппарат, на выходе которого температура газа должна поддерживаться от 0 до +5 °С. При использовании холодного природного газа в качестве хладагента система производства холода значительно упрощается, так как используются только теплообменные аппараты и вентиляторы. Эффективность холодильного цикла снижается при использовании газообразной среды в качестве хладагента, так как коэффициент теплоотдачи газообразной среды на несколько порядков ниже коэффициента теплоотдачи жидкой среды. Но преимущества теплофизических свойств хладоносителя могут быть сведены на нет из-за потерь холода при его транспортировке к месту использования. Количество холода, непосредственно переданное холодильным камерам, составит около 150 кВт, оно оказывается достаточным для обеспечения малого холодильного комплекса, емкость которого от 250 до 1000 усл.т.

Для утилизации энергии потока холодного газа было рассмотрено возможное использование льдогенератора капельного замораживания. При диаметре капли от 2 до 20 мм путь прохождения составляет от 1 до 134 м. Результаты расчетов показали, что для полного замораживания воды и охлаждения льда до заданной температуры капле необходимо пройти значительный путь, а это в свою очередь увеличивает размеры оборудования. Добиться такой высоты невозможно, поэтому предложен другой вариант получения льда с помощью льдогенератора блочного льда.

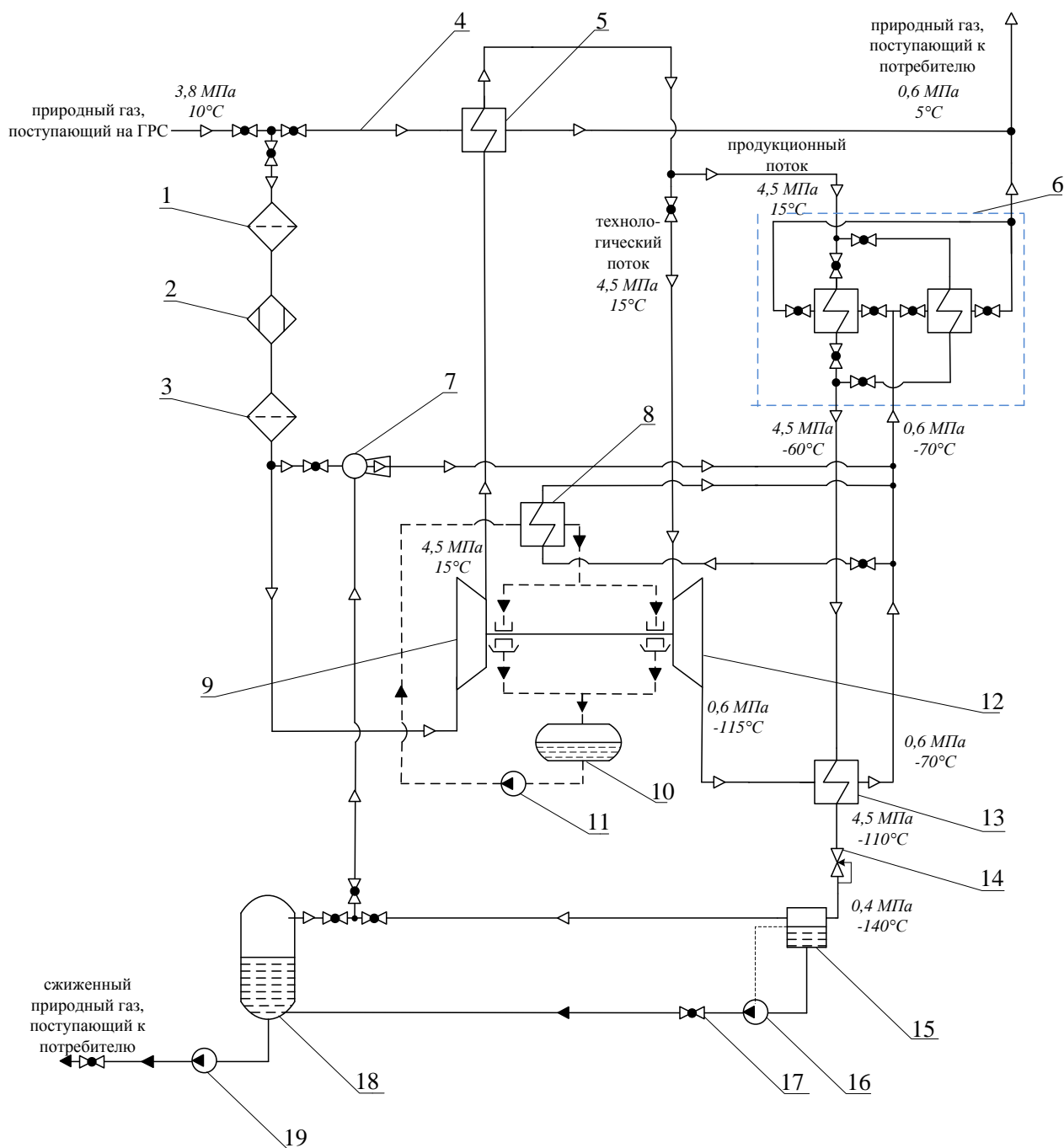
Традиционный генератор блочного льда имеет изолированный снаружи бак с рассолом, охлаждаемым работой холодильной машины. Предлагается подавать в бак вентиляторами холодный воздух, который будет охлаждаться в теплообменниках. В баке расположены формы с водой. Вода постепенно намерзает на стенках и днищах форм. Воздухоохладители расположены за пределами бака и устроены так же, как и в камерах газового холодильного комплекса.

**В пятой главе** рассмотрен альтернативный вариант использования энергии, обусловленной перепадом давлений магистрального и

распределительного газопровода на ГРС, где происходит понижение давления, а целью является получение сжиженного природного газа. Научный и практический интерес в настоящее время представляют перспективы развития и использования сжиженного природного газа (СПГ) в Российской Федерации. При получении СПГ необходимо достигать криогенных температур, что влечет за собой применение специальной технологии, оборудования и конструкционных материалов. В настоящее время наиболее перспективными являются детандерные холодильные циклы для сжижения природного газа, работающие на основе использования перепада между давлением в газопроводе и давлением в газораспределительной сети.

При производстве СПГ на ГРС проявляется главный недостаток схем с внутренним охлаждением газа – при снижении температуры проявляется кристаллизация, в связи с чем необходимо проводить осушку и очистку всего проходящего через установку газа от диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . На рисунке 5 представлена разработанная нами схема установки по сжижению природного газа. В работе рассмотрена возможность повышения производительности при уменьшении стоимости технологического оборудования, вместо дополнительного блока очистки от углекислоты продукционного потока рассматривается использование в качестве предварительного - регенеративный теплообменник непрерывного действия. Для обеспечения непрерывности потока природного газа к потребителям предусматривается использование двух регенераторов.

Производительность установки составляет 1,5 т/ч. Преимуществом такой установки оказываются низкие удельные затраты на электроэнергию, так как для сжатия газа в компрессоре используется привод детандера.



1 – фильтр-пылеуловитель; 2 – блок осушки; 3 – фильтр для очистки от частиц адсорбента; 4 – линия утилизация тепла; 5 – теплообменник; 6 – блок предварительных регенеративных теплообменников; 7– струйный компрессор; 8– охладитель масла; 9 – компрессор; 10 – масляный бак для системы смазки детандера; 11 – масляный насос; 12 – детандер; 13 – основной теплообменник; 14 – регулятор давления; 15 – сепаратор; 16, 19 – криогенный насос; 17 – кран проходной; 18 – хранилище СПГ

Рисунок 5 – Расчетная схема комплекса для производства сжиженного газа

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Проведенный анализ существующих технологий утилизации избыточного давления природного газа на ГРС показал, что внедрение энергохолодильных комплексов в магистральном транспорте газа позволит повысить энергоэффективность не менее чем в два раза за счет тригенерации, а при строительстве ЭХК с использованием природного газа затраты сократятся на 50% в отличие от парокомпрессионных холодильных установок.

2 В результате определения потенциалов потока газа было выявлено, что весь возможный потенциал редуцирования давления газа может быть использован только при реализации схемы ЭХК, где холодильник разделен на несколько последовательных камер и в каждой из них поддерживается различная температура воздуха. Полученные в ходе проведенных исследований аналитические зависимости для ЭХК, утилизирующего ВЭР избыточного давления газа, позволяют определить емкость комплекса при известных производительности ГРС и перепаде температур природного газа.

3 Разработан алгоритм проектирования холодильного комплекса с использованием в качестве хладагента охлажденного в ДГА природного газа для проведения технико-экономических обоснований утилизации ВЭР на КС и ГРС.

4 При сравнении вариантов холодоснабжения ЭХК предложено реализовать схему с непосредственным использованием природного газа в качестве хладагента, обеспечивающую достижение экономии в 1,5 раза по сравнению с применением промежуточного хладонносителя.

5 Сравнительный анализ технологий производства сжиженного газа выявил, что энергохолодильные комплексы могут эффективно использоваться как первая ступень установок по сжижению природного газа. Разработанная схема установки по производству СПГ для выпуска продукции объемом 0,42 кг/с дает возможность применять ее для типовых ГРС в диапазоне расходов от 2 до 3 кг/с, и при этом срок окупаемости не превышает 3,5 лет.

По теме диссертационного исследования опубликовано 16 научных трудов:

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

1. Байков, И.Р. Целесообразность использования в энергохолодильных комплексах на базе детандергенераторных установок промежуточного хладонносителя / И.Р. Байков, Р.А. Молчанова, О.В. Кулагина // Территория Нефтегаз. - 2014.- № 8.- С. 112-114.

2. Кулагина, О.В. Эффективное использование энергетических потоков природного газа с отрицательной температурой, полученных в детандергенераторных агрегатах / О.В. Кулагина, И.Р. Байков, А.Р. Гатауллина, Р.А. Молчанова // Глобальный научный потенциал. - 2014. - № 12 (45). - С. 15-20.

3. Байков, И.Р. Потенциал энергохолодильного комплекса на газораспределительных станциях и возможности его реализации / И.Р. Байков, Р.А. Молчанова, О.В. Кулагина // Технологии нефти и газа. - 2015.- № 3 (98). - С. 42-47.

В других изданиях:

4. Кулагина, О.В. Возможности использования "бросовой" энергии газовых потоков в холодильном комплексе на крупных ГРС / О. В. Кулагина, Р.А. Молчанова, И. Р. Байков // Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды: ст. и тез. II Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / УГНТУ. – Уфа: ЦИТО, 2011. - С. 105-107.

5. Кулагина, О.В. Утилизация в холодильном комплексе энергетических потоков, получаемых в детандер-генераторных агрегатах / О. В. Кулагина, А. Р. Гатауллина, Р. А. Молчанова // Материалы 62-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011.- Кн.1. - С. 104.

6. Гатауллина, А. Р. Возможности использования в холодильном комплексе получаемых в детандер-генераторных агрегатах энергетических потоков природного газа / А. Р. Гатауллина, О. В. Кулагина // Сб. тр.

Международного конкурса научных работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. – М.:НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники, 2012. - С. 308-314.

7. Кулагина, О.В. Основные принципы проведения энергетического обследования в системе магистрального транспорта газа / О. В. Кулагина, А. Р. Гатауллина, Р. А. Молчанова // Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения: материалы Международной молодежной конференции. - Томск: Изд-во ООО «СПБ Графика», 2012.- С. 50-52.

8. Кулагина, О.В. Применение энергетических потоков газа на крупных ГРС / О. В. Кулагина, А. Р. Гатауллина, Р. А. Молчанова // Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды: Ст. и тез. III Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / УГНТУ. - Уфа: ЦИТО, 2012.- С. 211-213.

9. Кулагина, О.В. Утилизация энергетических потоков газа с отрицательной температурой на крупных ГРС / О. В. Кулагина, А. Р. Гатауллина, Р. А. Молчанова // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XVIII Всерос. науч.-техн. конф. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СПБ Графика», 2012. – С.143-145.

10. Байков, И.Р. Возможность использования промежуточного хладоносителя в энергохолодильных комплексах на базе детандергенераторных установок / И. Р. Байков, Р.А. Молчанова, О.В. Кулагина, А.Р. Гатауллина // Трубопроводный транспорт-2013: материалы XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. - С. 336-337.

11. Кулагина, О.В. Использование избыточной энергии давления природного газа на небольших газораспределительных станциях / О. В. Кулагина, А. Р. Гатауллина, Р. А. Молчанова // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. – С. 263-264.

12. Байков, И.Р. Сравнение вариантов использования холодного потока природного газа в промышленных холодильниках на базе детандер-генераторных установок / И. Р. Байков, Р.А. Молчанова, О.В. Кулагина, А.Р. Гатауллина // Водоснабжение, водоотведение и системы защиты окружающей среды: Ст. и тез. IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / УГНТУ. - Уфа: ЦИТО, 2013. - С. 179-181.

13. Кулагина, О.В. Целесообразность строительства энергохолодильных комплексов с промежуточным хладоносителем на небольших ГРС / О. В. Кулагина // Проблемы строительного комплекса России: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. / УГНТУ. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. - С. 220-222.

14. Кулагина, О.В. Возможный потенциал энергохолодильного комплекса на ГРС / О. В. Кулагина // Проблемы строительного комплекса России: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. / УГНТУ. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. - С. 326-328.

15. Кулагина, О.В. Определение вместимости холодильника при установке детандер-генераторного агрегата с заданными режимными параметрами на ГРС/ О. В. Кулагина, Р.А. Молчанова // Трубопроводный транспорт-2015 : материалы X Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. - С. 370-373.

16. Кулагина, О.В. Рекомендации по выбору вместимости холодильника при установке на ГРС/ О. В. Кулагина, Р. А. Молчанова // Трубопроводный транспорт-2015 : материалы X Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. / УГНТУ. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. - С. 373-375.