

**Казанский Федеральный Университет**  
**Кафедра высоковязких нефтей и природных битумов**

**Kazan Federal University,**

**Department of high-viscosity oils and natural bitumen**

Гимаева Алина Рашитовна, Gimaeva Alina Rashitovna

Айчанова Александра Рафаэлевна, Aichanova Alexandra Rafaelevna

[argimaeva@yandex.ru](mailto:argimaeva@yandex.ru)

**Эффективность методов предотвращения гидратообразования на  
газораспределительных станциях**

(The effectiveness of methods for preventing hydrate formation  
at gas distribution stations)

**Аннотация.**

Газораспределительные станции магистральных трубопроводов относят к одним из основных узлов систем газоснабжения, которые представляют собой сложный комплекс технического оборудования. ГРС относятся к объектам повышенной опасности, вследствие чего, вопросы их безопасной и надежной эксплуатации приобретают особую актуальность.

Одним из серьезных технологических осложнений, которые возникают в газопроводах при транспорте природного газа, является образование газовых гидратов.

Для решения данной проблемы в работе были проведены исследования, которые направлены на применение технологии редуцирования давления газа на ГРС с возможностью организации процесса подогрева газа за счет энергетического потенциала сжатого газа с применением регулятора давления с теплогенератором РДУ-Т, который сконструирован специально для предотвращения гидратообразования.

**Ключевые слова:** гидратообразование, газораспределительная станция, регулятор давления газа, экономическая эффективность, ресурсосбережение.

## 1 Введение

Газораспределительные станции магистральных трубопроводов относят к одним из основных узлов систем газоснабжения, которые представляют собой сложный комплекс технического оборудования. ГРС относятся к объектам повышенной опасности, вследствие чего, вопросы их безопасной и надежной эксплуатации приобретают особую актуальность.

Значительную часть себестоимости газа составляют затраты на его транспортировку. В результате этого, вопросы, связанные с разработкой новых технологий, и технического перевооружения имеющегося оборудования, остаются актуальными на сегодняшний день.

Одним из серьезных технологических осложнений, которые возникают в газопроводах при транспорте природного газа, является образование газовых гидратов [1]. Увеличение эффективности транспортировки газа и оборудования, а также сбережения ресурсов, затрачиваемых на мероприятия, предотвращающие образование кристаллогидратов при редуцировании давления газа, являются актуальными вопросами в отношении ГРС.

Для исключения выпадения гидратов при редуцировании газа на ГРС проводятся специальные мероприятия, которые предотвращают гидратообразование. К одному из таких мероприятий относят подогрев газа, осуществляемый сжиганием транспортируемого газа. Данный метод не отвечает требованиям энергосбережения.

Одним из новых направлений в обеспечении стабильной и безопасной эксплуатации редуцирующих узлов ГРС является отказ от необходимого подогрева газа.

Таким образом, редуцирование газа на ГРС без его подогрева в подогревателях, требующих сжигания части транспортируемого газа, является актуальной научно-технической задачей.

Для решения данной проблемы в работе были проведены исследования, которые направлены на применение технологии редуцирования давления газа на ГРС с возможностью организации процесса подогрева газа за счет энергетического потенциала сжатого газа с применением регулятора давления с теплогенератором РДУ-Т, который сконструирован специально для предотвращения гидратообразования [2]. Применение регулятора в технологических схемах ГРС, где возможно отключение, либо отказ от использования подогревателей газа, несет значительный экономический эффект. Регулятор давления газа РДУ-Т работает без посторонних источников энергии – за счет собственной кинетической энергии газового потока, что является несомненным плюсом.

**Целью исследования** является оценка эффективности методов предотвращения гидратообразования на газораспределительных станциях.

**Основные задачи** исследования:

- обзор литературных источников и патентной документации по вопросам предупреждения гидратов и их разрушению;
- изучение состава, свойств, условий и места образования гидратов;
- анализ проблем при использовании существующей технологии редуцирования давления газа на ГРС;
- расчет экономической эффективности регуляторов давления РДУ-Т и обоснование целесообразности реализации редуцирования давления газа на ГРС при помощи регулятора давления газа с теплогенератором взамен существующей технологии.

## **2 Материалы и методы**

На изучение процесса гидратообразования и на его математическое моделирование было затрачено много усилий ученых и исследователей. Большое внимание при этом направлено на методы и средства предотвращения газовых гидратов.

Экспериментальные и теоретические исследования термодинамики, кинетики и физико-химических свойств газовых гидратов проводили зарубежные и отечественные учёные. Список исследователей достаточно длинный и продолжает расти и по сегодняшний день. Е.Г. Хаммершмидт, Б.В. Дегтярев, В.А. Истомин, В.Г. Квон, Ю.Ф. Макогон, В.Л. Лакеев, В.Ш. Шагапов, Р.Р. Уразов, Ю. П. Каратаев, Э.А. Бондарев, В. М. Билюшов, Н.Г. Мусакаев, В.С. Якушев и другие внесли большой вклад в изучение гидратов [3,4]. Данные исследования дали возможность для определения времени начала образования кристаллогидратов, места и с какой скоростью они накапливаются в газопроводе посредством инженерных расчётов.

### 3 Дискуссия

Гидраты – это твердые соединения, которые способен образовывать природный газ, насыщенный парами воды, при следующих условиях: высокое давление и определенная положительная температура.

Гидраты похожи на белую кристаллическую массу или на снег.

При скоплении в газопроводах, они могут вызвать частичную или полную закупорку.

Изучение проблемы гидратов, в зависимости от их открытия и дальнейшего изучения можно условно разбить на следующие периоды [3].

Первый период – это академические исследования, которые длились в течение 120 лет со времени первой публикации. Первая публикация была сделана в 1811 году английским химиком Х. Дэви. В результате своих опытов, ему удалось получить гидрат хлора. В этот период были получены гидраты большинства газов, а также их смесей, исследованы зависимости образования гидратов от давления и температуры, определены приближенно составы гидратов, построены первые диаграммы фазового состояния.

Второй период начался в 1930 годах, когда перед исследователями стала серьёзная задача, связанная с развивающейся газодобывающей промышленностью. Данная тенденция влекла за собой серьёзное изучение

гидратов природных газов. В данный период были разработаны мероприятия по борьбе с гидратами, проведены исследования свойств гидратов газа с применением современных методов, а также выполнены серьезные теоретические исследования.

Третий период – современный период. Данный период характерен тем, что гидраты нашли широкое промышленное применение. В качестве примера промышленного применения можно отнести следующее: разделение газовых смесей, опреснение морской воды, борьба с туманами, стабилизация углеводородных жидкостей и другие. Все это стало возможным в результате изучения кинетики образования гидратов. Особое место занимает открытие группой советских ученых: В. Г. Васильевым, Ю. Ф. Макогоном, Ф. А. Требиным, А. А. Трофимуком, Н. В. Черским, возможности существования газогидратных залежей газа в осадочном чехле земной коры.

Анализ работ, посвященных данной теме, позволил установить, что ежегодно на ГРС, расположенных только на территории Республики Башкортостан, с учетом фактически используемого уровня подогрева газа, на предварительный подогрев расходуется 14,87 млн.  $\text{нм}^3/\text{год}$  или около 0,1 % от транспортируемого через ГРС газа [5]. В масштабах России при существующем потреблении газа 300 млрд.  $\text{нм}^3/\text{год}$  его количество, расходуемое на предварительный подогрев, может достигать порядка 300 млн.  $\text{нм}^3/\text{год}$ .

В результате исследований были выявлены три структуры гидратов. Структура I, которая образуется газами и парами. Структура II, которая образуется жидкостями. Найдена также третья структура гидратов – структура «Н». Структура Н встречается не так часто, как другие структуры.

Более элементарную структуру имеют гидраты I структуры. Данные гидраты образованы ячейками, состоящих из полостей двух форм: в форме двенадцатигранника и четырнадцатигранника.

Ячейки решеток в гидратах I типа состоят из 46 молекул воды. Вещества образующие гидраты I типа, которые встречаются наиболее часто, представлены метаном, этаном, двуокисью углерода и сероводородом.

Строение гидратов природного газа II типа более сложное, чем строение гидратов I структуры. В гидратах II структуры решетка состоит из двух видов ячеек, имеющих форму: двенадцатигранника и шестнадцатигранника.

Ячейка решетки гидрата II структуры представлена 136 молекулами воды. К гидратообразователям II типа находятся азот, пропан и изобутан.

Типы полиэдрических ячеек, которые образуют строение решетки гидратов типа I и II, представлены на рисунке 1.

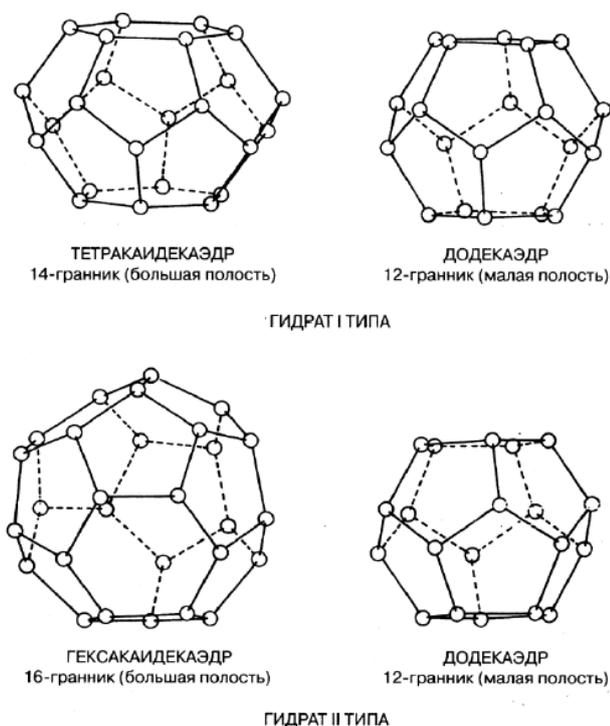


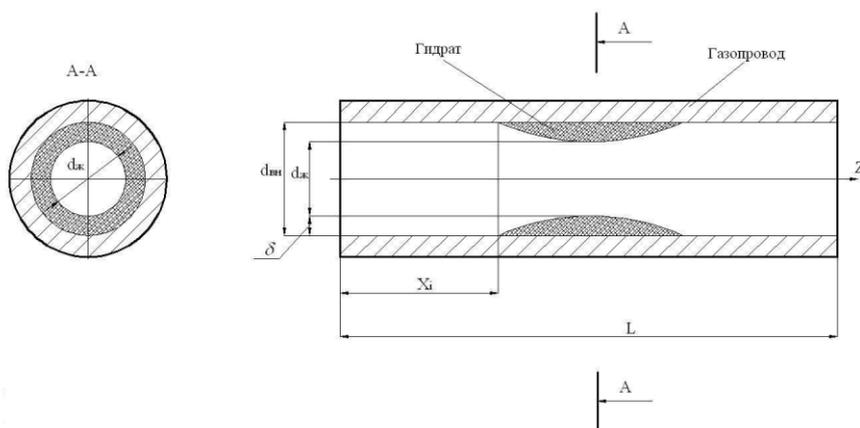
Рисунок 1 – Ячейки решетки гидратов I типа и II типа

Гидраты H типа встречаются редко. Структура гидратов типа «H» образована полостями трех видов: додекаэдрические, т.е. двенадцатигранники, неправильная додекаэдрическая форма и неправильная икосаэдрическая формы [3,6].

Элементарная ячейка включает 34 молекулы воды. К гидратообразователям «Н» типа относят: метилбутан, диметилбутан, триметилбутан, диметилпентан, метилциклопентан, этилциклопентан, метилциклогексан, циклогептан и циклооктан. Данные компоненты в природном газе встречаются редко.

Одно из главных условий гидратообразования – это благоприятные термобарические условия: низкая температура и высокое давление.

Схема газопровода с образованием отложений гидратного слоя на внутренних стенках представлена на рисунке 2 [7].



$d_{вн}$  – внутренний диаметр газопровода;  $d_{ж}$  – диаметр живого сечения;  
 $z$  – направления оси газопровода;  $x_i$  – точка начала образования гидрата;  $L$  – длина рассматриваемого участка

Рисунок 2 – Схема газопровода с образованием газогидратного слоя на внутренних стенках

К основным методам предупреждения образования гидратов относятся [6]:

- поддержание температуры потока газа выше, чем температура образования гидрата;
- поддержание давления потока газа ниже, чем давление образования гидратов;

– абсорбционная осушка, адсорбционная осушка, низкотемпературная сепарация;

– ввод ингибитора.

Применение ингибиторов гидратообразования в потоке транспортируемого газа. Суть метода заключается в том, что ингибиторы, введённые в поток газа, частично поглощают водяной пар и переводят их в раствор, который не образует гидратов. В качестве ингибиторов широкое применение получили метиловый спирт, а также растворы ДЭГ и ТЭГ.

Общий или частичный подогрев природного газа на ГРС осуществляется с помощью промышленных подогревателей.

Конструктивно подогреватели могут быть: с прямым (открытым огнем) и непрямым (с промежуточным теплоносителем) нагревом, и оснащены различными автоматическими и вспомогательными устройствами.

В настоящее время на ГРС ОАО «Газпром» эксплуатируются около пяти тысяч подогревателей газа различных типов [1]:

– подогреватели газа прямого нагрева: ПГА-1, ПГА-2, ПГА-3, ПГА-5, ПГА-10, ПГА-20, ПГА-15, ПГА-100, ПГА-200, ПГТА-200, ПГТА-375, ПГТА-1000;

– подогреватели газа с промежуточным теплоносителем: ПГ-10, ПГ-30, ПТПГ-5, ПТПГ-10, ПТПГ-15, ПТПГ-30, ПНГ-025, ПНГ-050, ПНГ-100, ПГТТ, БПГ.

Стоимость подогревателей колеблется в диапазоне от двух миллионов рублей до трех миллионов рублей в зависимости от теплопроизводительности, пропускной способности и комплектации. Применение подогревателей, как метод обогрева арматуры, с целью предотвращения гидратов, требует значительных финансовых вложений.

Электрические ленточные обогреватели применяют для локального подогрева корпуса регулятора. Саморегулирующая нагревательная лента стоит приблизительно от 500 до 1000 рублей за метр. Несмотря на свою

экономическую выгоду, недостаток этого метода заключается в обязательно использовании внешнего источника энергии.

Недостатком всех имеющихся способов борьбы с гидратами является большие капитальные вложения, а также потребление внешних источников энергии.

Одно из направлений для усовершенствования трубопроводных систем является обеспечение стабильной и безопасной эксплуатации редуцирующих узлов ГРС, исключающих необходимость подогрева газа для предотвращения образования гидратов при редуцировании газа.

При редуцировании газа происходит образование гидратов и обмерзание запорно-регулирующего узла регулятора.

Снижение температуры газа при редуцировании объясняется эффектом Джоуля-Томсона. Снижение его температуры колеблется в пределах от 10 °С до 25 °С, что является благоприятными условиями для образования кристаллогидратов [8].

Для предотвращения гидратообразования предлагается использование регулятора давления газа с теплогенератором РДУ-Т на ГРС.

Особенность конструкции регулятора давления газа РДУ-Т перед другими регуляторами заключается в наличии теплогенератора, который сконструирован специально для предотвращения обмерзания арматуры.

Теплогенераторы работают без стороннего источника энергии, они отбирают часть кинетической и потенциальной энергии сжатого газа, транспортируемого по магистрали.

Применение регуляторов давления газа РДУ-Т позволяют решить существующие проблемы ресурсосбережения, путем осуществления подогрева газа без сжигания части транспортируемого газа.

Рассмотрим область применения регуляторов давления газа РДУ-Т, а также его основные характеристики и принцип работы, для того чтобы дать полную оценку преимуществ данного типа регуляторов.

Регуляторы давления газа РДУ-Т предназначены для понижения, а также поддержания давления газа «после себя» на определенном значении при помощи автоматики.

Тепло в теплогенераторе получается из-за создания процесса вихревого энергоделения.

Вихревой эффект – это эффект температурного разделения газа, который происходит при закручивании газа в цилиндрической камере. При этом периферийная часть потока имеет температуру выше температуры исходного газа, а центральная часть имеет температуру ниже. Данный эффект был открыт Жозефом Ранком в 1931 году [9].

Схема монтажа регулятора РДУ-Т представлена на рисунке 3.

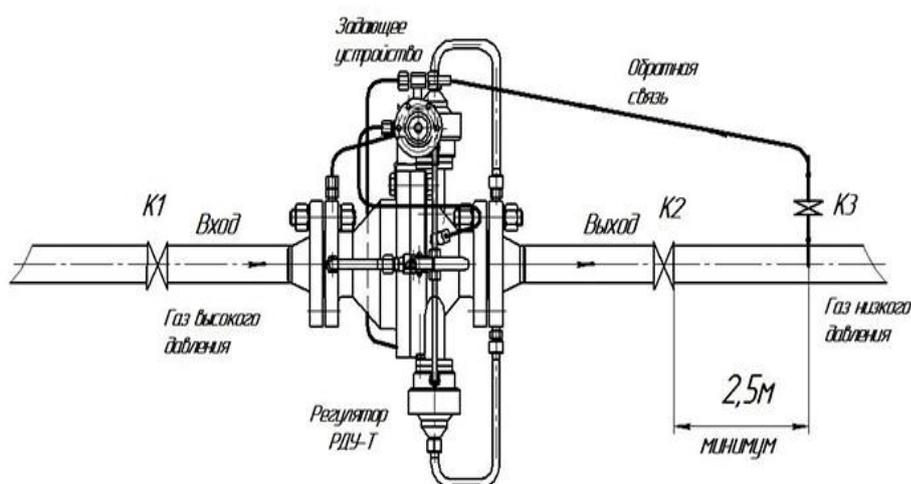
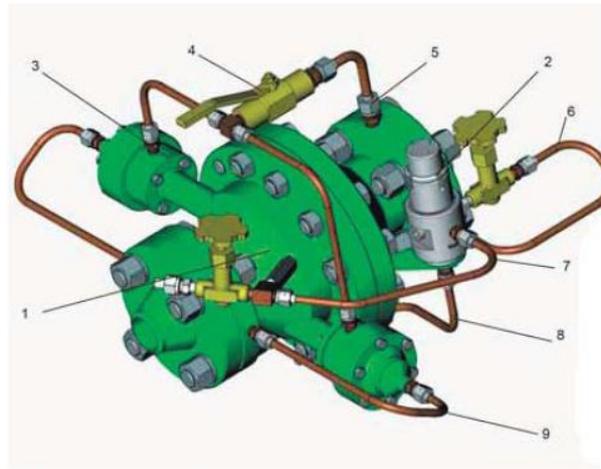


Рисунок 3 – Схема монтажа регулятора РДУ-Т

На рисунке 4 представлен внешний вид регулятора давления газа РДУ-Т.



1 – исполнительный механизм; 2 – задатчик; 3 – теплогенератор; 4 – кран; 5 – линия подачи газа в теплогенератор; 6 – линия входного высокого давления; 7 – импульсная линия задания; 8 – линия обратной связи; 9 – линия сброса газа из теплогенератора

Рисунок 4 – Регулятор типа РДУ-Т

Рассмотрим принцип работы регулятора давления газа РДУ-Т. Газ поступает на вход теплогенератора из входного фланца регулятора через кран. Попадая в улитку, газ закручивается и разделяется на холодную и горячую составляющие. Горячая составляющая проходит по спирали и нагревает теплоизлучающий патрубок [4]. Далее горячая составляющая проходит по центру в обратном направлении и сбрасывается в выходной фланец регулятора через выходное отверстие. Теплоизлучающий патрубок смонтирован близко к редуцирующему узлу исполнительного механизма, для предотвращения его обмерзания. Теплогенератор работает по принципу вихревого разделения потока газа.

Регуляторы давления РДУ-Т были установлены в ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», ООО «Газпром трансгаз Ставрополь», ОАО «Леноблгаз» на «проблемных» объектах магистральных газопроводов, где отсутствует узел подогрева газа.

Важным достоинством регуляторов РДУ-Т является отсутствие дополнительных трудозатрат по обслуживанию. Для работы теплогенератора необходим расход газа, в объеме от 1000 м<sup>3</sup>/ч. На малых расходах, теплогенератор может быть выключен, а регулятор давления газа РДУ-Т может работать в режиме обычного регулятора РДУ.

Также в работе был произведен расчет экономической эффективности применения регулятора давления газа РДУ-Т на газораспределительной станции.

Для расчета экономической эффективности предлагалось отключение подогревателей газа в летний сезон на 4 месяца.

График, на котором отображён срок окупаемости регулятора давления газа РДУ-Т представлен на рисунке 5.

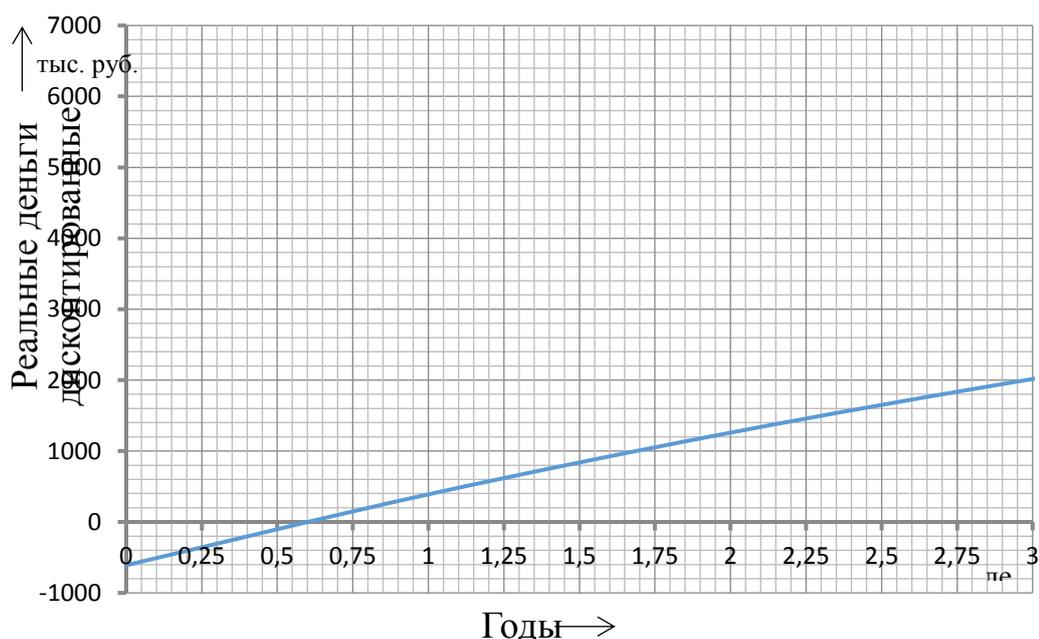


Рисунок 5 – Срок окупаемости регулятора давления газа РДУ-Т

В заключении проведенного расчета был сделан вывод, что за год эксплуатации РДУ-Т объем сэкономленного топливного газа составил 322, 08 тыс. м<sup>3</sup>, денежная экономия составила 1398, 471 тыс. руб.

Срок окупаемости регулятора давления РДУ-Т составил 186 дней. Регуляторы давления РДУ-Т окупают себя всего за один сезон работы.

Применение регуляторов давления газа РДУ-Т позволяют решить существующие проблемы ресурсосбережения, путем осуществления подогрева газа без сжигания части транспортируемого газа.

#### **4 Заключение**

Таким образом, в результате проделанной работы была предложена возможность решения существующей проблемы ресурсосбережения за счет применения регулятора давления газа РДУ-Т, позволяющего осуществлять подогрев газа за счет энергетического потенциала сжатого газа без сжигания части транспортируемого газа; проведена патентная проработка способов и устройств для предотвращения гидратообразования на ГРС, а также анализ имеющихся на рынке регуляторов давления; произведен расчет экономической эффективности регуляторов давления РДУ-Т и обоснование целесообразности реализации редуцирования давления газа на ГРС при помощи регулятора давления газа с теплогенератором взамен существующей технологии.

#### **Конфликт интересов**

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

#### **Список использованной литературы**

1) Волошин, А.М. Подогреватели газа нового поколения / А.М. Волошин, А.З. Шайхутдинов, Я.В. Зарецкий, Ф.Ш. Серазетдинов, В.Г. Тонгоног, В.Б. Явкин, Б.Ф. Серазетдинов. Газовая промышленность. – М.: ООО «Газоил пресс». № 08 (649). 2010. - 78-80 с.

2) Грунвальд, А.В. Использование метанола в газовой промышленности в качестве ингибитора гидратообразования и прогноз его потребления в период до 2030 года / А.В. Грунвальд. – М. : Нефтегазовое дело, 2007. – 29 с.

3) Айчанова А.Р., Гимаева А.Р. Оценка эффективности методов предотвращения гидратообразования на газораспределительных станциях. - Нефтегазовый терминал. Выпуск 14: сборник научных трудов международной научно-технической конференции магистрантов им. профессора Н. А. Малюшина / под общ. ред. М. А. Александрова. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С.12-15.

4) Айчанова А.Р., Гимаева А.Р. Подогрев газа как метод борьбы с гидратообразованием на газораспределительных станциях. - Трубопроводный транспорт – 2018: тезисы докладов XIII Международной учебно-научно-практической конференции / редкол: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С.6-8.

5) Дудин, С. М. Моделирование фазового состава газоконденсата в трубопроводах / С.М. Дудин, Ю.Д. Земенков, А.Б. Шабаров, Н.В. Саранчин. – М.: Известия вузов. Нефть и газ, 2010. – 68 с.

6) Истомин, В.А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа / В.А. Истомин, В.Г. Квон. - М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. - 506 с.

7) Паранук, А.А. Разработка методов раннего обнаружения гидратообразования в магистральных газопроводах и технологических трубопроводах компрессорных станций: дис. канд. техн. наук / Паранук А.А. – М., 2014. – 133 с.

8) Пат. 2329371 Российская Федерация, МПК E21B 43/00, F17D 3/00. Способ управления процессом предупреждения гидратообразования [Текст] / Андреев О.П.; заявитель и патентообладатель ООО «Ямбурггаздобыча». - № 2006137680/03; заявл. 26.10.2006; опубл. 20.07.2008, Бюл. № 20. – 5с.

9) Daraboina, N. Synergistic kinetic inhibition of natural gas hydrate formation / N. Daraboina, C. Malmos, N. von Solms // Fuel. – 2013. – № 108. – P. 749–757.