

На правах рукописи

Мусаилов Ибрагим Тажутдинович

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ГАЗОПРОВОДАХ ВЫСОКОГО И
СВЕРХВЫСОКОГО (ДО 30 МПА) ДАВЛЕНИЯ**

2.8.5 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Научный руководитель:

Лурье Михаил Владимирович
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ.

Официальные оппоненты:

Китаев Сергей Владимирович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет», профессор
кафедры «Транспорт и хранение нефти и
газа».

Подорожников Сергей Юрьевич
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Тюменский индустриальный
университет», доцент кафедры «Транспорт
углеводородных ресурсов».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет»

Защита состоится «19» сентября 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.369.09, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет), по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, дом 65, корп.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина». Объявление о защите диссертации и автореферат размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» <http://www.gubkin.ru/> и направлены на размещение в сети Интернет на сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по адресу <http://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан « » августа 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к. т. н.



И. А. Леонович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Известно, что в последние годы постоянно увеличивается число газопроводов, эксплуатируемых в сложных географических условиях при сверхвысоких давлениях с большим перепадом рабочих температур. В эксплуатацию введены такие газопроводы, как «Голубой поток», «Турецкий поток», «Северный поток-1», протяженность некоторых из них составляет более 1000 км, а глубина залегания достигает 2000 м, газ транспортируют под давлением до 30 МПа. Для моделирования режимов работы подобных газопроводов требуется учет большого количества факторов, влияющих на параметры транспортирования. Появляются новые вопросы, связанные с транспортировкой водорода по действующим газопроводам в рамках программ декарбонизации. Все это обуславливает актуальность задач по исследованию и разработке методов расчета стационарных течений газа в газопроводах высокого и сверхвысокого давления с учетом широкого диапазона изменения давлений и температур и с учетом различного компонентного состава транспортируемого газа. Актуальны исследования по истечению реального газа через различные отверстия при больших (свыше 10 МПа) давлениях, в частности, исследования, связанные с технологическими процессами на газонаполнительных станциях, происходящих, как известно, при высоких и сверхвысоких давлениях, а также более детальный анализ процессов сжатия газа в центробежных нагнетателях.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию стационарных течений газа посвящены работы таких авторов, как И.А. Чарный, Н.И. Белоконь, В.И. Черников, М.А. Гусейнадзе, М.В. Лурье, М.Г. Сухарев, И.Е. Ходанович, Б.Л. Кривошеин, Ф.Г. Темпель, С.А. Бобровский, Б.П. Поршаков, В.А. Юфин и многих других отечественных и зарубежных ученых. Большое внимание изучению вопросов течений газа и решению задач о газовых струях в своих работах уделили С.А. Чаплыгин и А.Н. Shapiro.

Большинство последних работ, посвященных тематике данной диссертационной работы, имеют ряд особенностей: используются уравнения состояния газа «Ван-дер-ваальсового» типа вместо более точных многопараметрических уравнений состояния газа AGA-8 и GERG-2008, или газ вовсе считается идеальным, рабочие давления ограничиваются значениями 200-250 атм, при моделировании температурных режимов

не учитывается колебание температуры окружающей среды вдоль трассы газопровода, не учитывается изменение температуры в виду смены сезонов, коэффициент теплопроводности между транспортируемым газом и окружающей средой принимается постоянным и т.д. Для расчета параметров течения газа через отверстия используются методики расчета без учета реальных свойств газа. Все перечисленные допущения приводят к неточностям при проведении исследований и расчетов стационарных процессов в газопроводах и сосудах высокого и сверхвысокого (до 30 МПа) давления.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование стационарных течений газа в трубах и каналах при высоких (до 15 МПа) и сверхвысоких (до 30 МПа) давлениях применительно к технологическим проблемам трубопроводного транспорта природного газа и разработка методов расчета параметров этих течений.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

- разработать методы расчета (прежде всего, численные) стационарных процессов в газопроводах, работающих при высоких и сверхвысоких давлениях, с учетом реальных свойств транспортируемого газа и большим перепадом высот профиля;
- исследовать термогидравлические режимы работы глубоководных газопроводов и выявить возможные экстремальные эффекты в условиях смены сезонов;
- исследовать параметры работы газопроводов при возможном транспортировании по ним метано-водородных смесей;
- подвергнуть критическому анализу методы расчета процессов истечения природного газа через отверстия в поверхности сосудов высокого и сверхвысокого давления (в т.ч. газопроводов), выявить погрешности этих методов и предложить более обоснованный метод расчетов;
- исследовать термогидравлические методы расчета параметров компримирования газа в центробежных нагнетателях (ЦБН), предложить метод таких расчетов, в т.ч. с учетом диссипации механической энергии при сжатии газа; исследовать коэффициент полезного действия ЦБН;
- исследовать процессы опорожнения и заполнения сосудов высокого и сверхвысокого (до 30 МПа) давления; предложить расчетные формулы.

Научная новизна результатов исследования

1. Усовершенствован метод численного расчета стационарных процессов в

газопроводах, работающих при высоких и сверхвысоких давлениях с учетом реальных свойств газа согласно методике расчета коэффициента сжимаемости газа и других его параметров - GERG-2008; обнаружены специфические эффекты работы глубоководных газопроводов.

2. Выполнено исследование режимов работы газопроводов, транспортирующих природный газ совместно с водородом в виде метано-водородных смесей.

3. Предложен метод расчета параметров компримирования газа в центробежных нагнетателях и метод оценки диссипации механической энергии.

4. Разработан новый алгоритм расчета расхода газа, вытекающего через отверстия в стенках сосудов высокого и сверхвысокого (до 30 МПа) давления (в т.ч. газопроводов), а также времени их опорожнения, позволивший установить ранее неизвестные эффекты.

Теоретическая и практическая значимость работы

Исследование стационарных течений газа по газопроводам высокого и сверхвысокого давления и разработка численных методов расчета параметров этих течений позволит повысить обоснованность и точность расчетов, выполняемых при решении различных задач, связанных с вопросами транспортировки и распределения газа.

Результаты исследований процессов транспортировки водорода в составе метано-водородных смесей по газопроводам высокого и сверхвысокого давления позволят обосновать возможность его транспортировки по действующим газопроводам, вместо сооружения новых. Полученные результаты также позволят подобрать допустимую концентрацию водорода для его транспортировки в составе смеси газов.

Полученные результаты в рамках исследования процессов истечения газа через различные отверстия позволят определить величину потерь газа при утечках, как вследствие плановых операций (продувка через свечу), так и нештатных ситуаций (повреждение при проведении ремонтных работ либо незаконные врезки), что является важным при расчете экономических и экологических последствий данных действий, позволят определить время опорожнения или газонаполнения этих сосудов и газопроводов, позволят правильно подобрать количество редуцирующих устройств на газораспределительной станции, чтобы обеспечить заданную пропускную способность.

Полученные результаты в рамках исследования процессов сжатия газа в

нагнетателях позволят правильно рассчитать коэффициент полезного действия нагнетателя и провести его энергетических аудит.

Методы и методология исследования

В качестве основного метода исследований выбрано математическое моделирование стационарных течений газа, основанное на численном решении системы дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих стационарное течение газа в трубопроводах и газовых струях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В газопроводах высокого давления, проложенных по дну глубоководных морей, помимо теплообмена с окружающей средой, большое влияние оказывают эффект Джоуля-Томсона, а также профиль трубопровода. Учет этих факторов показал, что в зимние периоды времени может происходить обмерзание газопровода в конце подводного участка.

2. Если действующий газопровод частично загрузить водородом так, что в газопроводе окажется метано-водородная смесь с расходной объемной концентрацией до 20%, то режим работы газопровода практически не изменится: существенно не изменится коммерческий расход газа, а давление в конце газопровода при добавлении водорода только увеличится.

3. Для более точного описания газодинамических процессов в газопроводах высокого и сверхвысокого давления следует применять уравнение для скорости звука в реальном газе. Скорость звука в быстротекущих установившихся процессах в реальном газе, в отличие от аналогичных процессов в совершенном газе, имеет немонотонный характер: при увеличении давления скорость звука сначала уменьшается, а после достижения минимума - постепенно возрастает.

4. Расход газа, истекающего из отверстия в поверхности газопровода, при высоких давлениях (порядка 10-15 МПа) значительно отличается от аналогичных значений расхода, которые получены для совершенного газа и при использовании классической теории, причем это отличие может достигать 20%.

5. Термодинамический процесс, происходящий в центробежном нагнетателе газа, весьма близок к адиабатическому процессу. В расчетах процессов компримирования необходимо учитывать реальные свойства газа, прежде всего, дополнительный нагрев

газа за счет зависимости удельной внутренней энергии и энтальпии газа не только от температуры, но и от давления («Джоулев нагрев»).

6. Путем сопоставления параметров газа перед компримированием в центробежном нагнетателе и после компримирования можно оценить диссипацию механической энергии и вычислить коэффициент полезного действия нагнетателя.

7. На защиту выносится безразмерная зависимость, характеризующая интенсивность опорожнения/заполнения сосуда высокого давления.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов исследований обоснована применением общепринятых методов решения задач газовой динамики в совокупности с современными методами и средствами проведения научных исследований.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 19-24 августа 2019 г.; на 75-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2021», г. Москва, 26-30 апреля 2021 г.; на 72-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018», г. Москва, 23-26 апреля 2018 г.

Публикация результатов работы

Основные результаты исследований опубликованы в 7 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы

Текст диссертации изложен на 130 страницах, содержит 41 рисунок и состоит из 4 глав, введения и заключения. Список использованной литературы включает 111 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** диссертации представлен обзор и анализ исследований стационарных течений природного газа в газопроводах, а также критический анализ существующих методов расчета параметров стационарных течений газа, и делаются выводы об их применимости для расчета современных газопроводов высокого и сверхвысокого давления.

Во **второй главе** приведена теория установившихся течений газа в газопроводах высокого и сверхвысокого давления, основанная на известной системе дифференциальных уравнений, описывающих движение газа в газопроводе:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho v S) = 0, \\ \rho \frac{dv}{dx} = -\frac{dp}{dx} - \frac{4}{d} \tau_w - \rho g \cdot \frac{dz}{dx}, \\ \frac{d}{dx} \left(\frac{\alpha_k v^2}{2} + J \right) = \frac{\pi d \cdot q_n}{Q_M} - g \frac{dz}{dx}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho(x)$, $v(x)$, $p(x)$ – неизвестные плотность, скорость и давление газового потока; $S(x)$ – площадь поперечного сечения газопровода; $\tau_w = \lambda \rho v^2 / 8$ – касательное напряжение трения на стенке трубопровода; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; $J = e_{\text{вн}} + p/\rho$ – энтальпия газа; $e_{\text{вн}}$ – удельная внутренняя энергия; g – ускорение свободного падения; $dz/dx = \sin \alpha(x)$ – синус угла наклона оси трубопровода к горизонту; $q_n = -K_T(T - T_{\text{нар}})$ – удельный по поверхности тепловой поток, проходящий через стенку трубопровода; $K_T(x)$ – коэффициент теплопроводности; $T(x)$ – температура газа; $T_{\text{нар}}(x)$ – температура окружающей среды; α_k – коэффициент Кориолиса; Q_M – массовый расход газа.

В системе уравнений (1) неизвестные давление, температура и плотность газа связываются между собой с помощью уравнения состояния:

$$p = Z(p, T) \cdot \frac{RT}{V}, \quad (2)$$

где R – газовая постоянная, которая определяется из соотношения $R = \bar{R}/\mu$, где \bar{R} – универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса газа; V – удельный объем ($1/\rho$), Z – коэффициент сжимаемости газа, как функция от давления p и температуры T .

Уравнение (2) является обобщённым уравнением состояния Менделеева – Клапейрона, отражающим связь между термодинамическими величинами: давлением, температурой и объемом газа. Данное уравнение применимо к реальному газу благодаря введению коэффициента сжимаемости Z , характеризующего отклонение свойств реального газа от свойств идеального газа.

В следующей части главы проведен сравнительный анализ методик расчета коэффициента сжимаемости газа Z , и оценена их применимость при проведении расчетов газопроводов высокого и сверхвысокого давления. По результатам сравнения с экспериментальными данными обоснован выбор методики расчета коэффициента сжимаемости газа на основе многопараметрического уравнения GERG-2008, применимого для широких диапазонов давлений и температур (рисунок 1).

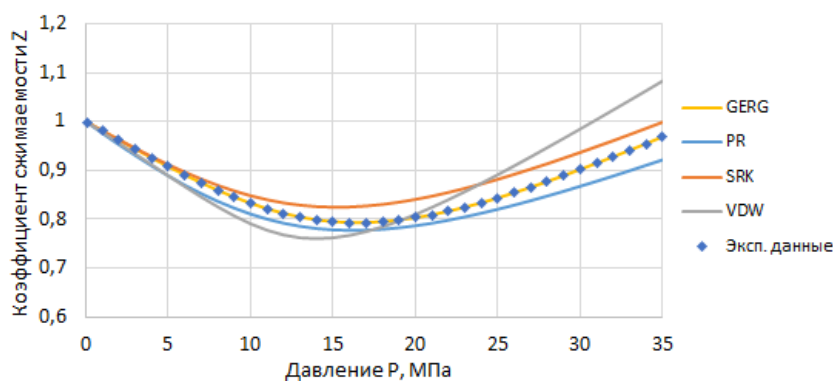


Рисунок 1 – Сравнение значений коэффициента сжимаемости метана при $T = 290 \text{ К}$

Подробно описан метод решения системы уравнений (1) путем ее сведения к системе 2-х дифференциальных уравнений для неизвестных функций давления $p(x)$ и температуры $T(x)$:

$$\begin{cases} a_1(p, T) \frac{dp}{dx} + b_1(p, T) \frac{dT}{dx} = c_1(p, T, x) \\ a_2(p, T) \frac{dp}{dx} + b_2(p, T) \frac{dT}{dx} = c_2(p, T) \end{cases}, \quad (3)$$

где коэффициенты a_1, a_2, b_1, b_2, c_1 и c_2 рассчитываются на основе исходных данных.

Система уравнений (3) представляет собой два линейных уравнения относительно dp/dx и dT/dx . Если главный определитель Δ системы (3) не равен нулю, то система (3) однозначно решается относительно производных dp/dx и dT/dx при помощи правила Крамера.

Приравняв главный определитель Δ системы уравнений (3) к нулю, можно получить уравнение для определения критической скорости $V_{кр}$, т.е. скорости звукового течения газа:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{ZRT}{1 - \frac{p}{Z} \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T}} \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}. \quad (4)$$

Уравнение (4) является уравнением адиабатной скорости звука в реальном газе.

В уравнении (4) значения изобарной C_p и изохорной C_v теплоемкостей, а также коэффициента сжимаемости Z газа рассчитываются при помощи уравнения GERG-2008.

Проведено исследование зависимости скорости звука в реальном газе от давления и температуры и сравнение со значениями скорости звука в совершенном газе.

Доказано, что скорость звука в реальном газе зависит как от температуры, так и от давления, причем зависимость носит немонотонный характер.

Показано, что скорость звука в реальном газе при небольших давлениях изменяется

несущественно, в среднем на 3-5 м/с на 1 МПа. Причем при уменьшении температуры скорость звука изменяется сильнее, чем при увеличении давления. В интервале давлений до 7 МПа скорость звука уменьшается, достигая своего минимума, далее с возрастанием давления монотонно увеличивается, достигая значений 700-750 м/с (рисунок 2).

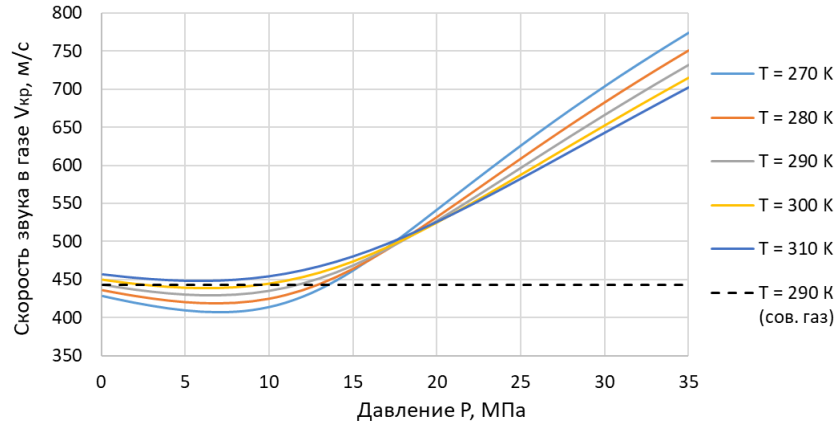


Рисунок 2 – Зависимость скорости звука в природном газе (метан) от давления

В данной главе также проводится исследование адиабатических процессов в реальном газе и приводится разработанная методика расчета коэффициента полезного действия центробежного нагнетателя с учетом диссипации механической энергии.

Получено уравнение адиабатического процесса в реальном газе с учетом выделяющегося тепла трения. Установлено, что этот адиабатический процесс существенно отличается от аналогичного пуассоновского процесса в совершенном газе, прежде всего тем, что в нем учитывается дополнительный нагрев газа, обусловленный проявлением эффекта Джоуля-Томсона.

Предлагается определять интенсивность потерь энергии в нагнетателе и вычислять его внутренний коэффициент полезного действия путем сопоставления температуры газа на выходе нагнетателя с расчетным значением, найденным без учета диссипации механической энергии.

В виду того, что процесс сжатия газа в центробежном нагнетателе протекает очень быстро можно утверждать, что процесс сжатия газа внутри центробежного нагнетателя близок к адиабатическому процессу. Скорость газа на выходе из рабочего колеса внутри центробежного нагнетателя до торможения в диффузоре может составлять 150-200 м/с, теплообмен газа с окружающей средой не успевает происходить. Однако адиабата реального газа отличается от известной адиабаты Пуассона, которая помимо реальных свойств газа должна учитывать тепло диссипации механической энергии $dq_{дис}^T$ и отражать эффект Джоуля-Томсона.

Уравнение адиабаты реального газа, учитывающее тепло диссипации механической энергии $dq_{\text{дис}}^T$ и эффект Джоуля-Томсона, имеет следующий вид:

$$\left(1 - \frac{1}{C_p} \frac{dq_{\text{дис}}^T}{dT}\right) \cdot \frac{dT}{dp} = \frac{ZR}{C_p} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right) \frac{T}{p}. \quad (5)$$

При помощи уравнения (5) можно найти искомую зависимость $T = T(p)$ в адиабатическом процессе для реального газа.

Отношение $\kappa = \frac{dq_{\text{дис}}^T}{C_p dT}$ в уравнении (5) называется коэффициентом диссипации κ и показывает, какую долю количества $C_p dT$ энергии, необходимой для нагрева газа на dT при постоянном давлении в рассматриваемом нагнетателе, составляет количество механической энергии $dq_{\text{дис}}^T$, перешедшей в тепло. При $\kappa = 0$ уравнение (5) представляется в виде «классической» адиабаты реального газа:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{ZR}{C_p} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right) \frac{T}{p}. \quad (6)$$

При условии $0 < \kappa < 1$ уравнение (5) является уравнением адиабатического процесса в нагнетателе с учетом выделяющегося тепла трения, т.е. с учетом потерь механической энергии:

$$(1 - \kappa) \cdot \frac{dT}{dp} = \frac{ZR}{C_p} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right) \frac{T}{p}. \quad (7)$$

В следующей части главы получено отношение для расчета внутреннего коэффициент полезного действия центробежного нагнетателя:

$$\eta = \frac{\left[\int_{(p_B, T_B)}^{(p_H, T_H)} \frac{dp}{\rho(p, T)} \right]_{\kappa=0}}{\left[\int_{(p_B, T_B)}^{(p_H, T_H)} \frac{dp}{\rho(p, T)} \right]_{\kappa} + \kappa \int_{(p_B, T_B)}^{(p_H, T_H)} C_p dT} \quad (8)$$

Данный коэффициент полезного действия определяет отношение мощности нагнетателя, которую он затрачивал бы на перемещение газа из линии всасывания в линию нагнетания при отсутствии диссипации механической энергии ($\kappa = 0$), к аналогичной величине, но с учетом диссипации, т.е. при $0 < \kappa < 1$.

Построены кривые нагрева реального газа (метана) в процессе адиабатического сжатия газа центробежным нагнетателем с начальными значениями: $p_0 = 6$ МПа, $T_0 = 293$ К, со степенью сжатия $\varepsilon = p_H/p_B = 1,25$ для различных значений $\kappa < 1$ (рисунок 3).

Показано, что чем больше значение коэффициента диссипации κ , тем больше

температура газа T_H после компримирования. Например, если при отсутствии диссипации температура газа увеличивается на 17,09 К, то при наличии диссипации, в которой $\kappa = 0,1$, температура газа увеличивается уже на 19,02 К, т.е. более чем на ~11%.

Доказано, что по разработанной методике появляется возможность оценить потери механической энергии в газовом нагнетателе и рассчитать коэффициент полезного действия нагнетателя. Для этого нужно экспериментально установить индекс T_H/T_B увеличения температуры при сжатии газа в нагнетателе, сравнить этот индекс с рассчитанным по идеальной адиабате реального газа и найти значение коэффициента диссипации, после чего рассчитать коэффициент полезного действия η и определить уровень потерь механической энергии.

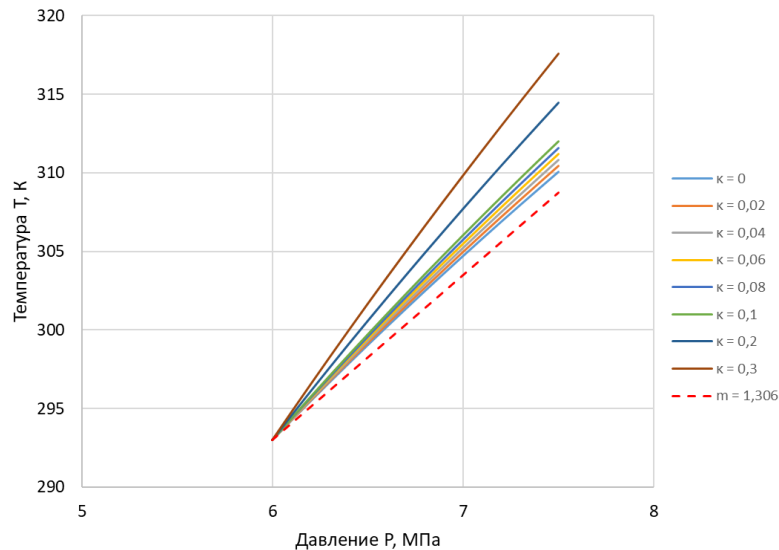


Рисунок 3 – Адиабаты реального газа для различных значений коэффициента κ

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию особенностей стационарных процессов в газопроводах высокого и сверхвысокого давления, проложенных в глубоководных морях. На основе предложенной математической модели проводится моделирование режимов работы газопровода типа «Турецкий поток», на примере которого проводится анализ влияния различных параметров на температуру и давление газа в газопроводе. Выполнено исследование режимов работы газопровода типа «Северный поток-1» при его частичном заполнении водородом. Определяется концентрация водорода в газовой смеси, допускающая его транспортировку без существенных отклонений от действующих режимов работы газопровода.

Показано, что на участках спуска на дно давление газа в подводных газопроводах может скачкообразно увеличиваться, а на участках подъема со дна скачкообразно уменьшаться, вызывая дополнительное охлаждение газа (рисунок 4). Резкое изменение

давления обусловлено влиянием профиля газопровода, а именно весом сжатого газа, значение которого оказывается существенным при заданных условиях.

Показано, что на температуру газа в газопроводах, проложенных по дну морей, существенное влияние оказывает эффект Джоуля-Томсона, работа сил тяжести и теплообмен. На участке подъема газопровода со дна за счет влияния эффекта Джоуля-Томсона (дроссель-эффект) температура газа может стремительно охлаждаться, приближаясь к отрицательным значениям. Учет этих факторов важен для предсказания мест возможного образования газовых гидратов при недостаточной степени осушения газа или для прогнозирования возможного обмерзания газопровода и вспучивания грунтов в прибрежной зоне.

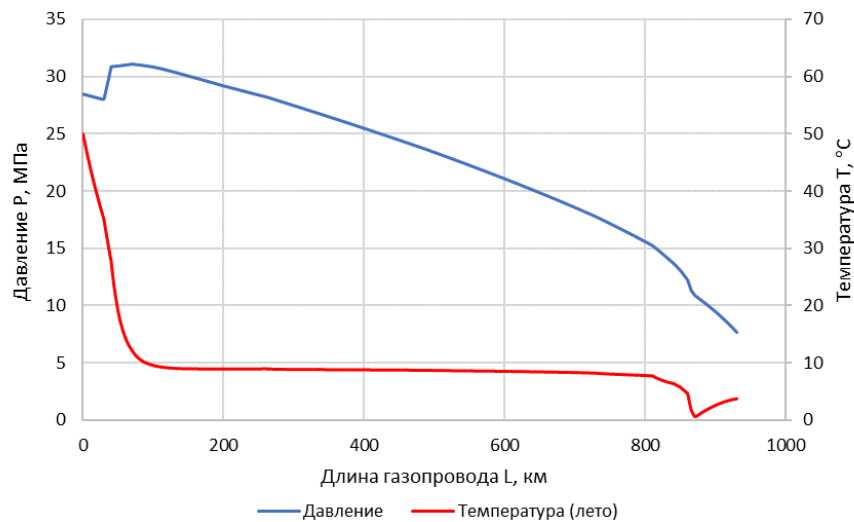


Рисунок 4 – Моделирование режима работы газопровода типа «Турецкий поток»

Проведено исследование влияния температуры окружающей среды в разное время года на температуру газа в подводных газопроводах высокого и сверхвысокого давления.

Температура окружающей среды может существенно меняться в зависимости от времени года, меняя параметры течения газа: температуру, давление и плотность, что в свою очередь отражается на необходимости корректировки режима течения газа для поддержания требуемых выходных параметров. Так, на примере рассмотренного газопровода температура окружающей среды (морской воды) на прибрежных участках летом и зимой может отличаться на 13 °C. Это в свою очередь отражается на интенсивности охлаждения газа на участках спуска газопровода в воду и нагрева на участках его подъема со дна.

Показано, что в летнее время года на участках спуска газопровода в воду газ охлаждается менее интенсивно, по сравнению с расчетами для зимнего времени года, тогда как на участках подъема газ, наоборот, нагревается сильнее (рисунок 5). Что

касается «зимнего» режима транспортировки газа, то при условии сильных морозов и низкой степени теплообмена газ может охлаждаться до предельно низких температур, что может приводить к обмерзанию газопровода. Это следует учитывать при проектировании и эксплуатации газопроводов подобного типа.

Проведено исследование влияния коэффициента теплопередачи K_T на интенсивность теплообмена газа, транспортируемого по газопроводу типа «Турецкий поток» с окружающей средой.

На значение коэффициента теплопередачи подводных газопроводов влияет степень его заглубления в грунт, материал трубы, наличие бетонного покрытия и изоляции, характеристика воды, наличие течений и т.д. Все эти параметры могут отличаться на различных участках газопровода. Так, для обеспечения устойчивости подводного газопровода на мелководье и защиты от внешнего воздействия поверхность трубопровода в прибрежных зонах покрывается слоем бетона от 50 до 110 мм. Учитывая, что в этих местах температура воды в море наиболее сильно изменяется в зависимости от времени года, учет интенсивности теплообмена на этих участках является важным фактором для корректного определения температуры газа.

Для исследования влияния интенсивности теплообмена на параметры транспортируемого газа проведена серия расчетов распределения температуры газа в зимнее время года при различной степени теплообмена, то есть с различным значением коэффициента теплопередачи по длине газопровода (рисунок 5).

Показано, что интенсивность теплообмена на начальном участке подводного газопровода практически не влияет на конечную температуру, что не скажешь о конечном участке, где теплообмен оказывает существенное влияние на конечную температуру. Показано, что существует возможность регулирования температуры газа на выходе из газопровода путем изменения интенсивности теплообмена на определённых участках газопровода. При достаточной температуре окружающей среды и высоком уровне теплообмена температура газа на выходе из газопровода может оставаться всегда положительной даже в зимнее время года. Этот факт необходимо учитывать при проведении экономического обоснования сооружения подогревателей газа на приемной станции для поддержания необходимой температуры газа на выходе из газопровода, а также если существует риск обмерзания газопровода в зимнее время года.

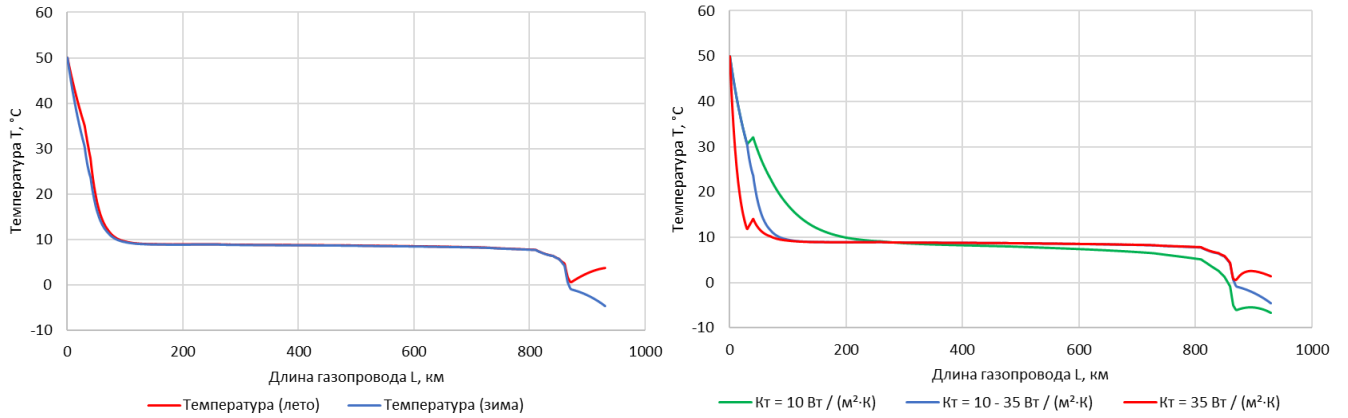


Рисунок 5 – Влияние температуры окружающей среды $T_{нар}$ (слева) и коэффициента теплопередачи K_T (справа) на температуру газа

В данной главе также исследован вопрос о транспортировке водорода по действующим газопроводам высокого и сверхвысокого давления. Одним из способов такой транспортировки является введение некоторого количества водорода с коммерческим расходом q_{H_2} в газопровод с природным газом, текущим с коммерческим расходом q_{CH_4} . В таком случае в трубопроводе образуется метано-водородная смесь (МВС) с расходным объемным содержанием c водорода:

$$c = \frac{q_{H_2}}{q_{H_2} + q_{CH_4}} 100\%. \quad (9)$$

Массовая концентрация θ водорода в смеси определяется из соотношения:

$$\theta = \frac{\rho_{H_2} q_{H_2}}{\rho_{H_2} q_{H_2} + \rho_{CH_4} q_{CH_4}} 100\%. \quad (10)$$

Суть вопроса о транспортировке водорода, рассматриваемая в работе, сведена к решению двух задач:

- 1) определение того, как изменится расход газа при добавлении водорода в различных концентрациях при сохранении давления на входе и выходе;
- 2) определение того, как изменится давление на выходе при добавлении водорода в различных концентрациях при сохранении начального давления и расхода газа.

Для решения задач был взят участок газопровода типа «Северный поток-1» с начальным давлением 22 МПа, перекачивающий природный газ с коммерческим расходом 27,5 млрд. м³/год.

Проведен расчет распределения давления по длине газопровода и расчет значения годового расхода газа при добавлении в газ водорода различной концентрации.

Показано, что добавление водорода расходной объемной концентрации в пределах

20% (что соответствует массовому содержанию 3%) уменьшает годовую пропускную способность газопровода незначительно, изменение составляет $\sim 2,5\%$ (рисунок 6). Что касается коммерческого расхода газа, то доказано, что добавление водорода в этой же концентрации его практически не изменяет, изменение составляет $< 0,1\%$, с увеличением коммерческого расхода по мере увеличения содержания водорода в МВС.

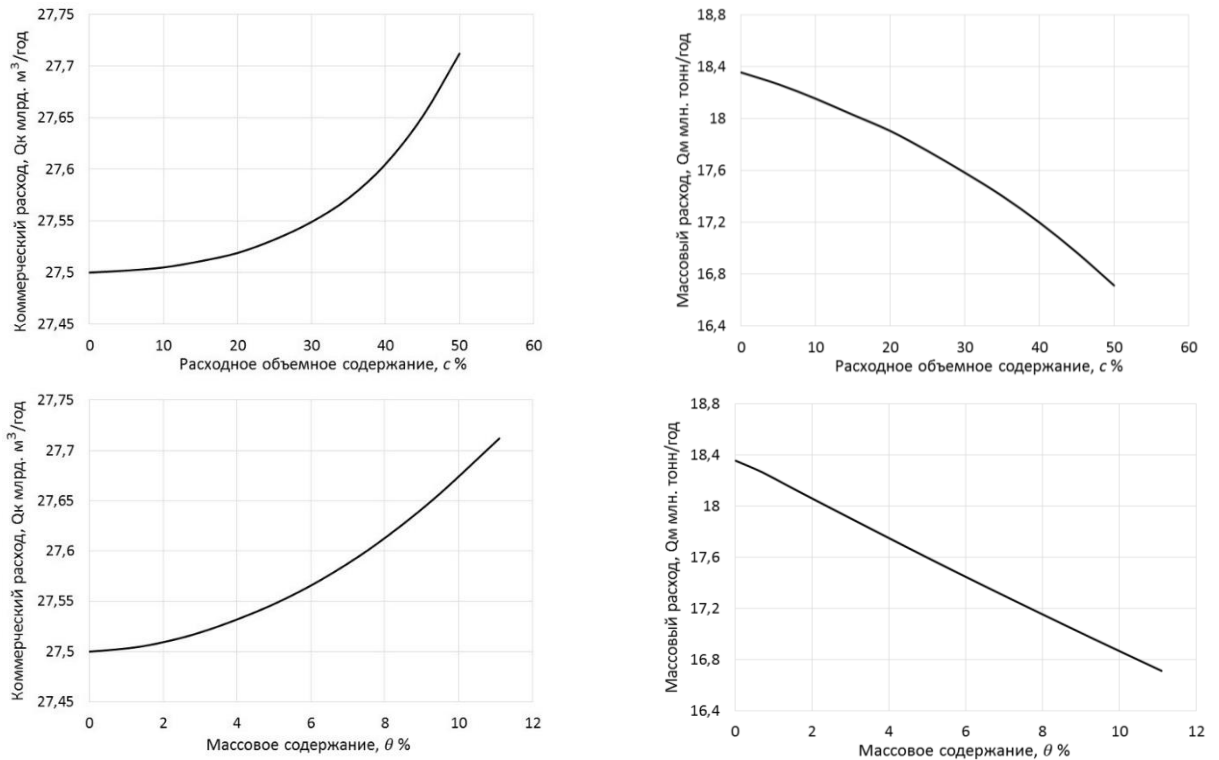


Рисунок 6 – Зависимость коммерческого и массового расхода газа от расходного объемного содержания водорода (сверху) и от массового содержания водорода (снизу)

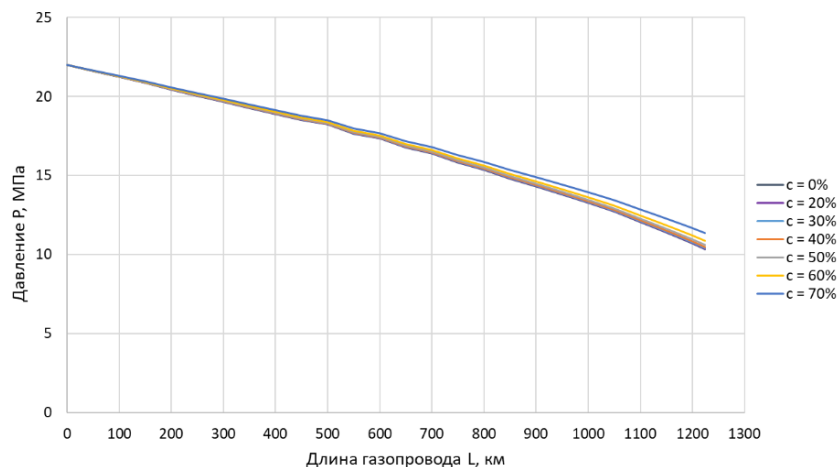


Рисунок 7 – Распределение давления МВС по длине газопровода

Показано, что по мере увеличения содержания водорода в метано-водородной смеси давление в каждом сечении газопровода будет увеличиваться, соответственно увеличивается и давление в конце газопровода. Добавление водорода в расходной

объемной концентрации до 20% изменяет давление в конце газопровода не более чем на 0,5 атм. (рисунок 7). Это обусловлено уменьшением плотности перекачиваемой газовой смеси, увеличением коэффициента сжимаемости и уменьшением потерь давления.

Установлено, что добавление водорода в природный газ, транспортируемый по газопроводу, в расходной объемной концентрации до 20% изменяет режим его работы незначительно.

В четвертой главе приведены результаты исследования процессов истечения газа через различные отверстия в газопроводах и сосудах высокого и сверхвысокого давления. Разработан метод расчета параметров истечения природного газа из газопроводов и сосудов высокого и сверхвысокого давления. На основе численного расчета, выполненного с помощью разработанной методики, приведены таблицы и графики для определения расхода газа, вытекающего через отверстия для различных давлений и температур. Определен критерий звукового истечения природного газа. Разработана методика определения времени полного или частичного опорожнения сосудов и газопроводов высокого и сверхвысокого давления.

При нарушении герметичности газопровода или сосуда под давлением вследствие образования сквозного отверстия или в результате выполнения технологических операций, таких как продувка через свечу, возникает вопрос об определении количества потерянного газа. Газ вытекает из отверстия из-за разности давлений внутри и вне газопровода или сосуда под давлением с некоторым расходом q_M (кг/с), который требуется определить.

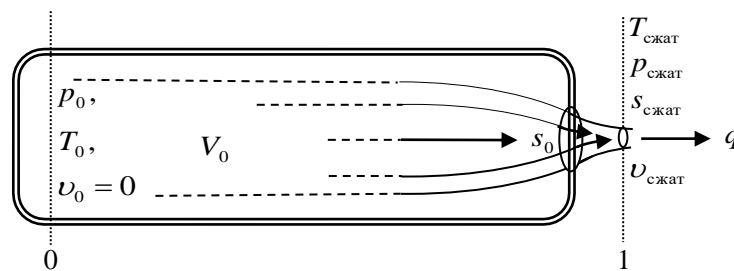


Рисунок 8 – Истечение газа через отверстие в стенке сосуда

При образовании отверстия в стенке газопровода или сосуда под давлением газ начинает вытекать из отверстия так, что струя вытекающего газа сжимается (рисунок 8). Площадь наиболее сжатого сечения струи $S_{\text{сжат}}$ оказывается меньше площади отверстия S . Отношение площади наиболее сжатого сечения струи к площади отверстия называется коэффициентом сжатия струи μ_* .

Расход вытекающего газа определяется согласно уравнению:

$$q_M = \rho_{\text{сжат}} v_{\text{сжат}} \mu_* S, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{сжат}}$ – плотность газа в наиболее сжатом сечении струи; $v_{\text{сжат}}$ – скорость истечения; S – площадь отверстия, сквозь которое происходит истечение газа.

Коэффициент сжатия газовой струи в случае звукового истечения $\mu_* \approx 0,74$, а в случае дозвукового истечения определяется из следующего уравнения:

$$\mu_* = 0,62 + 0,12 \cdot M_{\text{сжат}}, \quad (12)$$

где $M_{\text{сжат}}$ – число Маха в наиболее сжатом сечении.

Задача об определении расхода газа, вытекающего из отверстия, сводится к определению давления $p_{\text{сжат}}$, температуры $T_{\text{сжат}}$, плотности газа $\rho_{\text{сжат}}$ в наиболее сжатом сечении струи и скорости истечения $v_{\text{сжат}}$.

Газ вытекает из отверстия в поверхности газопровода или сосуда под давлением с такой скоростью, что теплообменом в газе можно пренебречь, процесс истечения можно принять адиабатическим. Если также принять, что процесс истечения является установившимся, и пренебречь потерей механической энергии на трение, то к трубке тока, заключенной между удаленными сечениями внутри газопровода или сосуда и наиболее сжатым сечением струи вне газопровода или сосуда, можно применить уравнение Бернулли:

$$\frac{v_{\text{сжат}}^2 - 0^2}{2} + \int_{(0)}^{(1)} \frac{dp}{\rho(p, T)} = 0 \quad (13)$$

Уравнение (13) можно представить в следующем виде:

$$v_{\text{сжат}}^2 = -2 \int_{(p_0, T_0)}^{(p, T)} \frac{dp}{\rho(p, T)} \quad (14)$$

Истечение газа может проходить в двух режимах: в дозвуковом, когда скорость, с которой газ вытекает из отверстия меньше местной скорости звука $v_{\text{сжат}} < c$, и в звуковом, когда скорость, с которой газ вытекает из отверстия равна скорости звука $v_{\text{сжат}} = c$.

Для случая, когда давление газа p_0 в трубе или в сосуде намного больше, чем давление в той области, куда происходит истечение газа, скорость, с которой газ вытекает из отверстия, будет равна местной скорости звука. Давление в наиболее сжатом сечении струи $p_{\text{сжат}}$ будет больше внешнего давления $p_{\text{внеш}}$. По мере протекания процесса истечения давление в газопровode или сосуде будет уменьшаться, следовательно будет уменьшаться давление в наиболее сжатом сечении струи, пока не сравняется с внешним

давлением $p_{\text{сжат}} = p_{\text{внеш}}$. С этого момента принимается, что режим истечения - дозвуковой.

Классическая теория достаточно хорошо описывает решение уравнения (13) для определения параметров звукового и дозвукового истечения в случае, если газ считается совершенным, а адиабатический процесс можно описать адиабатой Пуассона.

В случае, если газ считается совершенным, применяются известные уравнения для расчета параметров истечения. При невысоких давлениях расчетные формулы для определения параметров истечения согласно классической методике дают весьма точные значения для реального газа. Но при более высоких давлениях газ нельзя считать идеальным, а адиабатический процесс – пуассоновским.

Для расчета параметров истечения реального газа через сквозное отверстие при высоких и сверхвысоких давлениях необходимо интегрировать уравнение адиабаты реального газа (6) от начальных значений $p = p_0, T = T_0$ и $u_0 = 0$ до текущих значений p, T, u , вычисляя интеграл (14). После каждого шага интегрирования рассчитывается плотность газа из выражения $\rho_i = p_i / (Z(p_i, T_i)RT_i)$. После чего рассчитывается приращение плотности $\Delta\rho_i = \rho_i - \rho_{i-1}$. Затем рассчитывается значение квадрата скорости звука в i – й точке адиабаты $c_i^2 = \Delta p_i / \Delta\rho_i$.

Если рассчитанное значение $c_i^2 > -2 \int_{(p_0, T_0)}^{(p_i, T_i)} \frac{dp}{\rho(p, T)}$, то это означает, что ускоряющийся газ еще не достиг значений местной скорости звука, и расчет необходимо продолжить.

Расчет необходимо выполнять до тех пор, пока на каком-нибудь шаге N не будет выполняться равенство:

$$c_N^2 \leq -2 \int_{(p_0, T_0)}^{(p_N, T_N)} \frac{dp}{\rho(p, T)}, \quad (15)$$

Это будет означать, что в данном сечении потока скорость истечения газа достигла местной скорости звука. Сечение, в котором будет выполняться равенство (15), является наиболее сжатым сечением истекающей струи. В данном сечении фиксируются значения скорости истечения $v_{\text{сжат}} = c_N$, давления $p_{\text{сжат}} = p_N$ и температуры $T_{\text{сжат}} = T_N$. На основе этих значений рассчитывается плотность газа: $\rho_{\text{сжат}} = \rho_N = p_N / (z(p_N, T_N)RT_N)$ и рассчитывается расход газа q_M по уравнению (11).

На основе разработанной методики проведена серия расчетов величины массового расхода газа (метана), вытекающего через отверстие в стенке сосуда или газопровода в

атмосферу для различных значений давления и температуры в нем.

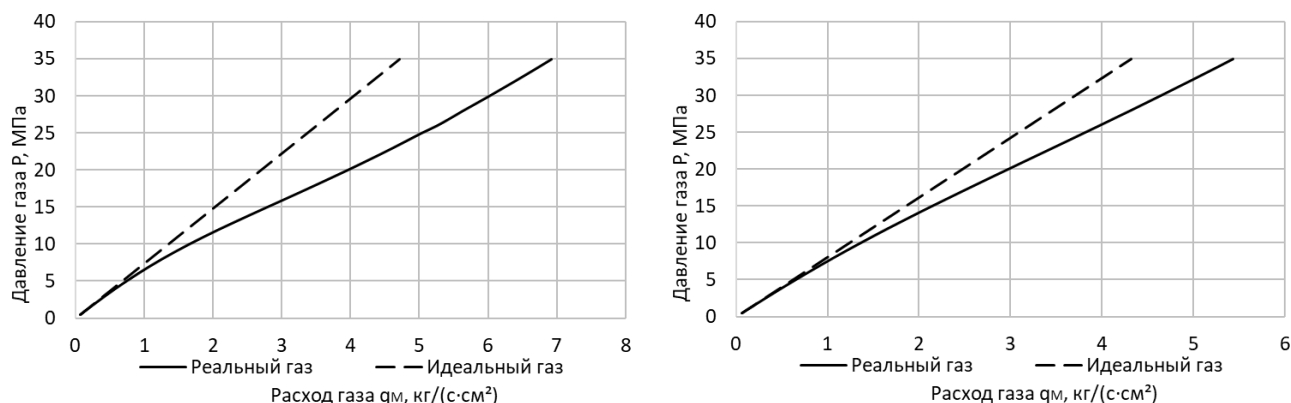


Рисунок 9 – Зависимость массового расхода газа, вытекающего из отверстия, от давления при температуре газа в $T_0 = 260 \text{ K}$ (слева) и $T_0 = 310 \text{ K}$ (справа)

Показано, что для небольших давлений применение упрощенной методики, основанной на предположении об идеальности газа оправдано, погрешность составляет не более 1%, но по мере увеличения давления реальные свойства газа проявляются существеннее и разность значений превышает 20%, это обусловлено, прежде всего, эффектом Джоуля-Томсона, который выражается в значительном охлаждении газа в наиболее сжатом сечении струи, и следовательно в существенном изменении плотности газа, значениями скорости звукового истечения и коэффициентом сжимаемости газа. Показано, что на величину расхода газа существенно влияет температура газа, холодный газ вытекает из отверстия с большим расходом, чем горячий (рисунок 9).

В этой главе также был определен критерий звукового истечения реального газа.

Решение задачи об определении критерия звукового истечения сводится к определению давления в наиболее сжатом сечении струи вытекающего газа, в котором скорость истечения равна скорости звука $v_{\text{сжат}} = c$, по известным значениям давления $p_0 = p_{\text{внут}}$ и температуры газа T_0 . Если давление в той области, куда будет происходить истечение $p_{\text{внеш}}$, будет меньше давления в наиболее сжатом сечении струи $p_{\text{сжат}}$, режим истечения будет звуковым, в противном случае - дозвуковым. Отношение $p_{\text{внут}}/p_{\text{сжат}}$, равное пограничному отношению $p_{\text{внут}}/p_{\text{внеш}}$, становится критерием звукового истечения.

Показано, что различия в значениях критерия звукового истечения для реального и идеального газа могут достигать 30% (рисунок 10). Например, в случае, если начальное давление реального газа в сосуде или газопроводе $p_0 = 27 \text{ МПа}$ и температура $T_0 = 290 \text{ К}$, то для выполнения условия звукового истечения необходимо, чтобы давление в области, куда происходит истечение, было не ниже $p_{\text{внеш}} = p_0/2,30 \approx 11,74 \text{ МПа}$ вместо

14,67 МПа в случае совершенного газа. Это говорит о том, что при истечении реального газа смена режима происходит значительно позднее.

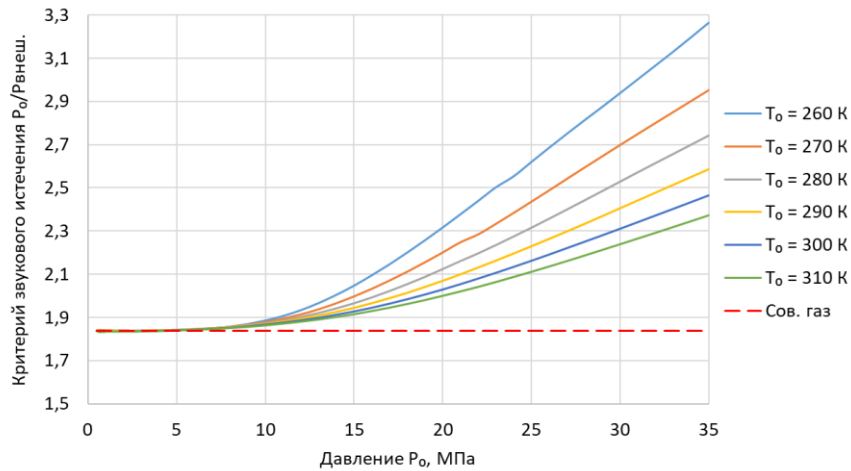


Рисунок 10 – Зависимость критерия звукового истечения природного газа от давления

Рассмотрен вопрос определения времени полного или частичного опорожнения газопроводов и сосудов под давлением через отверстие в их стенке. Также рассмотрен вопрос определения количества вытекшего газа при частичном опорожнении. Разработана методика определения времени опорожнения, применимая для любых значений давления и температуры газа на момент истечения. Потребность в таком расчете возникает при необходимости обслуживания опорожняемых газопроводов или сосудов в случае, если необходимо определить безопасное время, когда можно приступить к работе, либо при необходимости определения величины потерь газа за время утечки.

Уравнение баланса массы газа можно представить в следующем виде:

$$\frac{dm(t)}{dt} = -q(t), \quad (16)$$

где $m(t)$ и $q(t)$ – масса газа в газопроводе или сосуде и расход газа через отверстие.

Уравнение (16) означает, что скорость уменьшения массы газа в сосуде или газопроводе равна расходу газа, вытекающего сквозь отверстие в стенке.

Процесс истечения газа можно описать, используя величины, задающие масштаб происходящего процесса: начальную плотность газа ρ_0 , начальную массу газа m_0 , масштаб для скорости звука в газе c_0 , масштаб для времени истечения t_0 , масштаб для расхода газа q_0 . Используя эти величины, можно ввести безразмерную массу газа $\bar{m}(\bar{t}) = m(t)/m_0$, безразмерный расход газа $\bar{q}(\bar{t}) = q(t)/q_0$, безразмерное время $\bar{t} = t/t_0$.

Через безразмерные параметры уравнение (16) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\bar{m}(\bar{t})}{d\bar{t}} = -\bar{q}(\bar{t}). \quad (17)$$

Определение зависимости массы газа в газопроводе или сосуде от времени сводится к решению уравнения (17) с начальными условиями: $\bar{m} = 1$ при $\bar{t} = 0$.

Представлены результаты расчета зависимости убывания безразмерной массы газа от безразмерного времени для различных значений отношения $p_0/p_{\text{внеш}}$ (рисунок 11). Исходя из представленных результатов расчета, можно сделать вывод, что при звуковом режиме истечения внешнее давление не оказывает влияния на зависимость уменьшения массы газа в газопроводе или сосуде, кривые зависимости $\bar{m}(\bar{t})$ для всех значений отношения $p_0/p_{\text{внеш}}$ на определенном этапе времени одинаковые. Различия начинаются при переходе в дозвуковой режим истечения, когда противодавление начинает влиять на расход истечения, и процесс опорожнения становится медленнее. Время полного опорожнения определяется отношением $p_0/p_{\text{внеш}}$, причем чем больше значение давления на момент истечения, тем дольше процесс будет проходить в звуковом режиме.

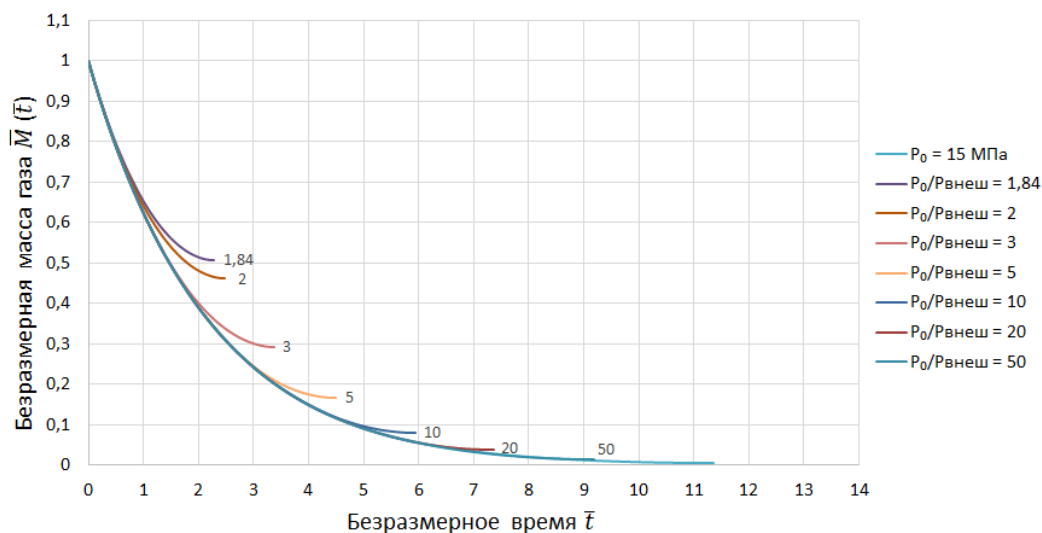


Рисунок 11 – Время опорожнения в безразмерных переменных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Утверждается, что при расчете параметров транспортировки газа по газопроводам высокого и сверхвысокого давления необходимо использовать уравнения состояния общего вида, учитывающие его компонентный состав. Показано, что использование методов расчета, применимых в широких диапазонах давлений и температур и при неограниченном компонентном составе, дают наиболее точные значения расчетных параметров.

2. Показано, что на температуру газа в газопроводах высокого и сверхвысокого давления, проложенных по дну глубоководных морей, помимо теплообмена с окружающей средой, большое влияние также оказывают эффект Джоуля-Томсона и

профиль трубопровода. Выявлено в частности, что под влиянием эффекта Джоуля-Томсона температура газа на участках подъема со дна может существенно уменьшаться и приводить к обмерзанию газопровода в зимнее время.

3. Подтверждена расчетами возможность транспортировки водорода в составе метано-водородной смеси (МВС) по действующим газопроводам высокого и сверхвысокого давления без существенного снижения их расходов. Установлено, что добавление водорода в расходной объемной концентрации до 20% в транспортируемый природный газ практически не изменяет его коммерческого расхода, хотя массовый расход падает на 3%. Давление газа в конце газопровода увеличивается при добавлении водорода.

4. Обнаружено, что скорость звука в быстротекущих стационарных процессах в реальном газе в отличие от процессов в совершенном газе имеет нелинейный характер. При низких давлениях скорость звука в реальном газе совпадает со скоростью звука в совершенном газе и составляет 400-450 м/с, но с увеличением давления скорость звука в газе сначала уменьшается, достигая своего минимума, далее с увеличением давления до 35 МПа монотонно возрастает, достигая значений 750 м/с. Иными словами, показано, что скорость звука в газе существенно зависит не только от его температуры, но и от давления.

5. Утверждается, что термодинамический процесс, происходящий в центробежном нагнетателе газа, весьма близок к адиабатическому процессу. Установлено, что в адиабатическом процессе компримирования газа в нагнетателе необходимо учитывать реальные свойства газа и, прежде всего, дополнительный нагрев газа за счет зависимости удельной внутренней энергии и энтальпии газа не только от температуры, но и от давления. Иными словами, необходимо учитывать эффект, аналогичный эффекту Джоуля-Томсона при разрежении, только в этом случае можно трактовать параметры нагнетателя более полно и обоснованно.

6. Предложен способ оценки потерь механической энергии в центробежном нагнетателе и расчета его коэффициента полезного действия путем сопоставления температуры газа на выходе из нагнетателя с температурой газа в обратимом адиабатическом процессе в реальном газе, то есть без учета диссипации механической энергии.

7. Обнаружено, что расход газа, истекающего из отверстия в поверхности газопровода при больших давлениях (порядка 10-15 МПа), значительно отличается от значений расхода газа, которые предсказывает классическая теория, причем это отличие может достигать 20%.

8. Показано, что благодаря эффекту Джоуля-Томсона при подтекании к отверстию в стенке газопровода реальный газ охлаждается на 40-50 °С, причем такое охлаждение происходит гораздо интенсивнее, чем предсказывает модель совершенного газа (адиабата Пуассона).

9. Доказано, что при опорожнении и заполнении сосудов высокого и сверхвысокого (до 25 МПа) давления сжатым газом (в частности, на АГНС) можно предложить единую безразмерную зависимость, характеризующую интенсивность опорожнения/заполнения сосуда, служащую для определения продолжительности этого процесса.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Лурье, М.В. Особенности режимов транспортировки газа по газопроводу «Турецкий поток» / М.В. Лурье, И.Т. Мусаилов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2018. – № 3. – С. 42–50.

2. Лурье, М.В. Исследование зависимости скорости звука от давления в магистральных газопроводах высокого и сверхвысокого давления / М.В. Лурье, И.Т. Мусаилов // Газовая промышленность. – 2019. – № 5. – С. 80–84.

3. Лурье, М.В. Эффективный метод расчета утечек газа через сквозные отверстия в стенках газопроводов и сосудов высокого давления / М.В. Лурье, Н.О. Лысенко, И.Т. Мусаилов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – № 3–4. – С. 110–116.

4. Лурье, М.В. Оценка потерь механической энергии при сжатии природного газа в центробежном нагнетателе / М.В. Лурье, И.Т. Мусаилов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – № 5-6. – С. 84-90.

5. Мусаилов, И.Т. О критерии звукового истечения реального газа через сквозное отверстие при высоких и сверхвысоких давлениях / И.Т. Мусаилов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – № 7-8. – С. 94-98.

6. Лурье, М.В. Опорожнение сосудов высокого давления со сжатым природным газом / М.В. Лурье, И.Т. Мусаилов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – № 9-10. – С. 88-93.

7. Голунов, Н.Н. Транспортировка водорода по газопроводам в виде метано-водородной смеси / Н.Н. Голунов, М.В. Лурье, И.Т. Мусаилов // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2021. – № 1-2. – С. 74-82.