

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Лебедева Михаила Сергеевича «Исследование процесса низкотемпературной сепарации углеводородов на объектах малотоннажного производства сжиженного природного газа», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы

### Актуальность темы

Проблема повышения эффективности производства сжиженного газа имеет важное экономическое значение. Согласно Долгосрочной программе развития производства СПГ в Российской Федерации на период до 2025 г. предполагается последовательное плановое увеличение производительности малых СПГ-заводов в 4 раза, в том числе за счет развития технологического потенциала и реализации ряда мер поддержки газовой отрасли. При этом трубопроводный газ и сжиженные газы должны выступать не в роли конкурентов, а являться взаимодополняющими видами энергоресурсов.

В отличие от крупнотоннажного, малотоннажное производство СПГ в России характеризуется высокой степенью локализации и наличием собственных технологий — как в части сжижения, так и с точки зрения необходимого оборудования. Поскольку себестоимость производства и транспортировки СПГ выше, чем сетевого природного газа, требуется особый подход к этой отрасли промышленности.

Подготовка газа для сжижения — одна из важнейших частей в цепи поставки газа потребителю. Перед процессом сжижения газа необходима его предварительная очистка от вредных серосодержащих соединений, углекислого газа, влаги, а также от фракций тяжёлых углеводородов. Наличие сопутствующих примесей в исходном газе и их неправильное извлечение может привести к тому, что производимый СПГ не будет удовлетворять техническим требованиям, а процесс сжижения и эксплуатация оборудования могут быть осложнены из-за нежелательных свойств компонентов. Так, для предотвращения замерзания на низкотемпературных участках технологического процесса, бутан и тяжёлые углеводороды, входящие в состав сырого газа, необходимо отделять, затем их можно фракционировать на сжиженные углеводородные газы и конденсат. Кроме этого, если алканы ( $C_2H_4$ ,  $C_3H_8$ ), которые являются ценнейшими недорогими источниками сырья, входят в состав природного газа в значительных количествах, их можно использовать для продажи или для дальнейшей глубокой газохимической переработки. Также следует отметить, что еще одной целью подготовки и производства сжиженного природного газа является обеспечение максимальной безопасности для окружающей среды, минимизация выбросов углеводородов в атмосферу и удешевление процесса.

Таким образом, совершенствование существующих технологий, связанных с производством сжиженного природного газа, в том числе



эффективное извлечение примесей и их последующее использование, является актуальной задачей.

### Содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, включающего список литературы из 106 наименований и 1 приложение.

*Во введении* обоснована актуальность направлений исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, выносимые на защиту положения, приведены сведения об апробации работы, публикациях автора.

*В первой главе* представлен литературный обзор, направленный на критический анализ основных тенденций в развитии методов отделения легких и тяжелых углеводородов в различных технологических процессах сжижения при малотоннажном производстве СПГ, отражена степень изученности обозначенной соискателем проблемы.

По результатам обзора литературных источников для решения поставленных в диссертационном исследовании задач соискателем предлагается рассмотреть возможность и обосновать эффективность предварительного снижения концентрации пропана и бутана в потоке природного газа, поступающего на установку сжижения на АГНКС и провести детальное исследование компонентного состава смеси углеводородов, конденсирующихся при охлаждении потоков газа в процессе сжижения на ГРС.

*Во второй главе* приводятся результаты моделирования процесса предварительного отделения углеводородных фракций на ГРС, определены оптимальные параметры функционирования схемы извлечения сжиженных углеводородных газов (смеси пропана и бутана) на ГРС по методу низкотемпературной сепарации как при совместной работе с линией сжижения газа на АГНКС, так и без нее, позволяющие увеличить на 1 % концентрацию метана в товарном продукте и извлечь из сжижаемого потока газа часть компонентов, негативно влияющих на процесс проведения сливно-наливных операций.

*Третья глава* посвящена исследованию процесса низкотемпературной сепарации природного газа на действующем объекте малотоннажного производства СПГ. В результате проведенных экспериментов был предложен ряд технических решений для поддержания наименьшего перепада давления в трубном пространстве технологического потока предварительного теплообменника и увеличения холодопроизводительности ожижителя за счет увеличения давления на входе в турбодетандер.

*В четвертой главе* диссертант приводит результаты анализа эффективности применения установки низкотемпературной сепарации углеводородов при стравливании газа и алгоритм расчета характеристик



процесса извлечения пропана и бутана при стравливании газа с участка газопровода с помощью мобильной установки, работающей за счет технологии низкотемпературной сепарации углеводородов с целью снижения затрат материальных и денежных ресурсов.

В заключении диссертационного исследования обобщены его результаты и сформулированы практические предложения.

### **Научная новизна**

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе Лебедева М.С., обладают научной новизной и теоретической значимостью.

Наиболее существенными являются следующие результаты:

- разработана модель процесса редуцирования газа на газораспределительной станции с включением в схему производства предварительное получение сжиженных углеводородных газов и последующее сжижение природного газа со сниженной концентрацией углеводородов ( $C_{3+}$ ) на АГНКС;
- получены зависимости параметров процесса низкотемпературной сепарации основных характеристик сжиженной фракции от давления, состава магистрального газа и температуры окружающей среды;
- экспериментальным путем доказаны возможность и эффективность применения разработанной схемы в процессе низкотемпературной сепарации углеводородов в том числе на линейной части магистральных газопроводов при проведении ремонтных и диагностических работ.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена анализом научных работ отечественных и зарубежных авторов по теории и практике повышения эффективности объектов малотоннажного производства СПГ за счет улучшения его качественных характеристик и снижения себестоимости.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на использовании общепризнанных положений термодинамики, тепломассообмена, методов моделирования с применением ЭВМ и подтверждается результатами экспериментальных исследований.

### **Практическая ценность**

Важной чертой работы является ее практическая направленность, результаты работы внедрены на одном из газотранспортных предприятий региона. Практическая ценность результатов диссертационного исследования подтверждается сравнительным анализом предложенной схемы с технологией на действующем объекте производства СПГ. Практическая значимость результатов диссертации заключается в аргументированном техническом решении, основанном на эффекте влияния марки турбинного масла на процесс низкотемпературной сепарации.



## **Полнота опубликования результатов диссертационных исследований**

Основные положения, сформулированные в диссертационной работе, отражены в публикациях и научных докладах соискателя. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, 3 из которых в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России и определенных Аттестационным советом УрФУ, 1 статья в издании, входящем в международные реферативные базы данных Scopus и WoS. Получен патент на изобретение. Основные результаты были доложены на отраслевых и международных конференциях.

## **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

По тексту диссертационной работы и автореферата имеются некоторые вопросы и замечания:

1. Требуется уточнения, каким пунктам Паспорта научной специальности 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы» соответствует содержание диссертации. Данная информация отсутствует как в автореферате, так и в тексте диссертации.

2. В автореферате указана информация, что полученные результаты исследования приняты к использованию в ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», что подтверждается справкой о практическом использовании результатов диссертационного исследования от 14.10.2022 №01-007/200-555, в тексте диссертации данная справка отсутствует. Поясните, пожалуйста, какие именно результаты ваших исследований были использованы на практике.

3. Согласно действующим редакциям ГОСТ Р 52087-2018 «Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия» и ГОСТ 20448-2018 «Газы углеводородные сжиженные топливные для коммунально-бытового потребления. Технические условия» при обозначении единичного компонента следует использовать термин сжиженный углеводородный газ (сжиженный газ), а при обозначении смеси углеводородов – термин сжиженные углеводородные газы, соответственно. Указанная терминология требует уточнения по всему тексту работы. Например, предполагается «реализация сжиженного углеводородного газа» (см. п.2 Положения, выносимые на защиту, стр. 8), «жидких углеводородных продуктов», «пропан-бутановый продукт» (стр. 36) и т.д.

4. Также для более четкого понимания, следует придерживаться единства нормативной терминологии по тексту работы касательно «сжиженных тяжелых фракций». Не совсем понятно, из каких соображений соискатель подразумевает под тяжелыми фракциями («тяжелые углеводороды» – стр. 10) – этан (стр. 17), на стр. 29 – тяжелые фракции начинаются уже с пропана и т.д. Согласно действующей редакции ГОСТ 34894-2022 «Газ природный сжиженный. Технические условия» к тяжелым углеводородам относится «сумма значений молярной доли пентанов и более тяжелых углеводородных компонентов, определяемых с использованием газохроматографического или иного метода анализа». А отделяемая пропан-



бутановая фракция относится к широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ).

5. В п. 2.3 (стр. 33) представлены результаты «моделирования процесса предварительного отделения тяжелых фракций на ГРС» с использованием термодинамических пакетов программного продукта GIBBS, но отсутствует оценка погрешностей полученных результатов, их достоверности и т.д., кроме того, что представлена разница расчетных и фактических значений в процентном выражении. Уточните смысл этой величины. Достаточно ли полученных значений, чтобы принять решение об адекватности результатов моделирования?

6. Уточните, как были получены зависимости концентраций метана, пропана и бутана, представленные на рисунках 2.3-2.12, как были рассчитаны характеристики «получаемого жидкого продукта» и какие именно характеристики были рассчитаны. Ни на одном из графиков нет коэффициента корреляции, с какой точностью были построены представленные зависимости?

7. Может ли соискатель уточнить, как проводился отбор проб и определялись физико-химические показатели газа, какой метод использовался для определения компонентного состава СПГ, в том числе молярной доли метана – табл. 2.5-2.7, 2.9?

8. п. 2.5 Определение экономического эффекта применения установки извлечения пропан-бутана на ГРС: следовало бы предварить таблицу 2.8 методикой расчета, например, руководствуясь положениями «Методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов», а затем представить результаты расчетов не в абсолютных величинах, а в относительных, поскольку стоимость энергоносителей, оборудования относится к неопределенности исходной информации, а результаты, представленные в табл. 2.8, соответствуют какому-то конкретному моменту времени. Требуется пояснения, каким образом был получен срок окупаемости оборудования «менее 5 лет», определялись ли предварительно интегральные показатели – ЧДД, ВНД, ИД?

9. Соискателю следовало бы избегать формулировок «грубая оценка эффективности» (стр. 81) и привести детальную оценку снижения себестоимости СПГ в условиях применения предлагаемой схемы.

Вышеприведенные замечания являются дискуссионными, имеют характер пожеланий и предложений, поэтому не снижают общей положительной оценки рецензируемой работы.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Диссертация Лебедева М.С. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технологические и технические решения, имеющие существенное значение для развития нефтегазовой отрасли. Сформулированные положения, выводы и рекомендации являются обоснованными, подтверждена достоверность и новизна.



Диссертация написана грамотным техническим языком с использованием современной научной терминологии, имеет логичную структуру. Текст диссертации в достаточной степени проиллюстрирован графическим материалом. Этика цитирования соблюдена, по тексту имеются необходимые ссылки на авторов и используемые источники информации. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и дает достаточно исчерпывающую информацию о проведенных исследованиях и полученных результатах. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы.

Диссертация Лебедева Михаила Сергеевича «Исследование процесса низкотемпературной сепарации углеводородов на объектах малотоннажного производства сжиженного природного газа», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы, отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а соискатель Лебедев Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидат технических наук по специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент:

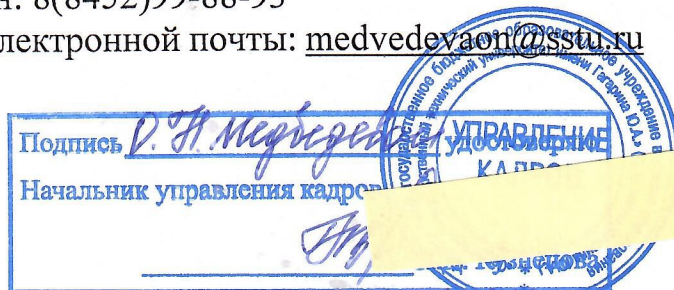
Профессор кафедры «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело» \*

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
доцент, доктор технических наук по специальности 2.1.3 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение  
«27» ноября 2023 г.

Медведева  
Оксана Николаевна

Телефон: 8(8452)99-88-93

Адрес электронной почты: [medvedevaon@sstu.ru](mailto:medvedevaon@sstu.ru)



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
Телефон: +7 (8452) 99-88-11; 99-86-03  
E-mail: [rectorat@sstu.ru](mailto:rectorat@sstu.ru); [sstu\\_office@sstu.ru](mailto:sstu_office@sstu.ru)

\*Институт Урбанистики, архитектуры и строительства