

**Татарский научно-исследовательский и проектный  
институт нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина**

На правах рукописи



**АНУФРИЕВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ  
НЕФТИ ОТ СЕРОВОДОРОДА**

Специальность 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных  
и газовых месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Бугульма – 2023

Работа выполнена в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина.

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**Сахабутдинов Рифхат Зиннурович**

**Официальные оппоненты:**

**Хамидуллин Ренат Фаритович**

доктор технических наук, профессор  
Бугульминский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», директор

**Корнетова Ольга Михайловна**

кандидат технических наук  
Акционерное общество «Волжский научно-исследовательский институт углеводородного сырья», лаборатория сероочистки углеводородного сырья, старший научный сотрудник

**Ведущая организация:**

**Акционерное общество «Институт нефтехимпереработки», г. Уфа**

Защита состоится 8 июня 2023 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета 72.1.021.01 в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти [www.tatnipi.ru](http://www.tatnipi.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Львова Ирина Вячеславовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Увеличение объемов добычи сероводородсодержащей нефти, повышение требований к ее качеству, а также тенденция на ужесточение экологических требований стимулирует нефтяные компании внедрять на своих объектах технологии удаления сероводорода из нефти. Для очистки нефти от сероводорода применяют отдувку углеводородным газом, прямое окисление кислородом воздуха в присутствии катализатора, снижение давления на горячей ступени сепарации ниже атмосферного, нейтрализацию химическими реагентами. Эти методы характеризуются высокими капитальными или эксплуатационными затратами. Вследствие актуальности данной проблемы активно ведутся работы по совершенствованию существующих методов удаления сероводорода из нефти, а также поиску и разработке новых эффективных способов.

### **Степень разработанности темы**

Проблемой удаления сероводорода из нефти занималось большое количество ученых, наибольший вклад в её решение внесли: М.К. Баймухаметов, А.Ф. Вильданов, Л.Г. Григорян, К.С. Каспарьянц, С.П. Лесухин, М.З. Мавлютова, А.М. Мазгаров, З.Г. Мурзагильдин, М.М. Мухаметшин, К.Р. Низамов, А.А. Петров, Г.Н. Позднышев, Р.З. Сахабутдинов, Г.Г. Теляшев, Э.Г. Теляшев, В.П. Тронов, А.М. Фахриев, Ф.Г. Шакиров, А.Н. Шаталов, Ф.Д. Шайдуллин, Д.Д. Шипилов, А.И. Ширеев, G. Mains, и другие.

### **Цель диссертационной работы**

Повышение эффективности процессов очистки нефти от сероводорода путем совершенствования существующих и разработки новых технологий.

Для достижения указанной цели в ходе исследования решались следующие задачи:

1. Анализ существующих методов удаления сероводорода из нефти.
2. Совершенствование технологии десорбционной очистки нефти от сероводорода в колонном аппарате.
3. Исследование процесса десорбции сероводорода из нефти при ультразвуковом воздействии.
4. Разработка технологии удаления сероводорода из нефти с применением ультразвукового воздействия.

### **Научная новизна**

1. Установлено, что при подготовке нефти методом отдувки углеводородным газом в колонном аппарате, подача попутного нефтяного газа

с концевой ступени сепарации и колонны отдувки в подводящий нефтепровод первой ступени сепарации снижает концентрацию сероводорода в нефти на выходе из колонного аппарата.

2. Выявлено, что концентрация сероводорода в подготавливаемой нефти снижается при дополнительном ультразвуковом воздействии, причем в большей степени с увеличением частоты и мощности ультразвука, в частности установлено, что с увеличением частоты воздействия ультразвука с 20 до 100 кГц на нефть вязкостью 175 мПа·с при удельных акустических мощностях 50 и 200 Вт/дм<sup>3</sup> десорбция сероводорода из жидкой фазы в газовую увеличивается в 3,8 и 3,2 раза соответственно, а с увеличением удельной акустической мощности ультразвука с 25 до 200 Вт/дм<sup>3</sup> концентрация сероводорода снижается в 4,8 и 6 раз для нефти вязкостью 53 и 415 мПа·с соответственно.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Определены способы и параметры подготовки газа, поступающего на компрессорные станции с установок подготовки нефти, на которых осуществляется отдувка сероводорода из нефти газом, не содержащим H<sub>2</sub>S, в колонном аппарате.

2. Усовершенствована технология десорбционной очистки нефти от сероводорода в колонном аппарате. Технология внедрена на трех объектах ПАО «Татнефть».

3. Разработан руководящий документ РД 153-39.0-828-13 «Инструкция по технологии подготовки нефтяного газа, поступающего на компрессорные станции с установок подготовки нефти».

4. Разработана технология удаления сероводорода из нефти с применением ультразвукового воздействия.

5. Определены оптимальные параметры воздействия ультразвука и место установки ультразвуковых излучателей в технологической схеме подготовки нефти.

6. Установлены зависимости между эффективностью десорбции сероводорода из нефти при ультразвуковом воздействии и удельной акустической мощностью, интенсивностью, частотой ультразвука, а также вязкостью нефти и термобарическими условиями.

7. Получена формула для определения времени воздействия ультразвука на нефть при минимальных удельных затратах электроэнергии.

8. Разработан стандарт организации СТО ТН 369-2018 «Инструкция по технологии интенсификации сепарации с очисткой нефти от сероводорода».

9. Созданные технические решения выполнены на уровне изобретений и защищены патентами РФ.

## **Методы решения поставленных задач**

Поставленные задачи решались путем анализа и обобщения результатов лабораторных исследований и промысловых испытаний. Для построения математических моделей объектов подготовки нефти и попутного нефтяного газа, а также расчета массообменных процессов использовался программный комплекс Aspen Hysys. Вязкость нефти определялась с использованием вискозиметра Брукфильда, массовая доля сероводорода в нефти - методом йодометрического титрования. Для анализа компонентного состава попутного нефтяного газа использовался метод газовой хроматографии.

## **Основные защищаемые положения**

1. Результаты исследований процесса подачи попутного нефтяного газа (или конденсата) с компрессорной станции в подводящий нефтепровод ступени сепарации нефти с целью увеличения эффективности технологии отдувки сероводорода из нефти в колонном аппарате.

2. Оптимальные параметры ультразвукового воздействия (удельная акустическая мощность, время воздействия, частота ультразвука) для удаления сероводорода из нефти.

3. Результаты лабораторных исследований и промысловых испытаний по интенсификации процесса десорбции сероводорода из нефти с применением ультразвукового воздействия (УЗВ).

4. Технология очистки нефти от сероводорода с применением УЗВ.

## **Степень достоверности результатов**

Научные положения, выводы и рекомендации подкреплены результатами лабораторных и промысловых испытаний, аргументированы на основании большого количества экспериментов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением аттестованных методик лабораторных анализов в аккредитованной лаборатории.

## **Апробация работы проведена на:**

- научно-технической ярмарке идей и предложений группы компаний ОАО «Татнефть» (г. Бугульма, 2012 г.),
- всероссийской научно-практической конференции «Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство» (г. Альметьевск, 2014 г.),
- молодежной научно-практической конференции института «ТатНИПИнефть» (г. Бугульма, 2014, 2016, 2017 г.),
- молодёжной научно-практической конференции ОАО «Татнефть», посвященной 55-летию НГДУ «Джалильнефть» (г. Джалиль, 2014 г.),
- научно-практической конференции по актуальным вопросам переработки попутного нефтяного и природного газа, посвященной 60-летию Миннибаевского ГПЗ (г. Альметьевск 2016 г.),

- молодежной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 2016 г.),
- международном конкурсе научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли (г. Санкт-Петербург, 2017.),
- международной научно-практической конференции «Повышение эффективности разработки нефтяных и газовых месторождений на поздней стадии» (г. Краснодар, 2017 г.),
- международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» Альметьевск, 2020).

### **Публикации**

Основные положения диссертации отражены в 23 опубликованных работах, из них шесть статей в рецензируемых научных изданиях и два патента на изобретение.

### **Личный вклад**

Автор участвовал в постановке, планировании и решении задач диссертационной работы, непосредственно выполнял лабораторные исследования. При непосредственном участии автора проведены промысловые испытания. В соавторстве с коллегами участвовал в подготовке к публикации статей, патентов, стандартов организации, выступал с докладами на конференциях.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 180 наименований, одного приложения и содержит 142 страницы, 53 рисунка и 24 таблицы.

### **Благодарность**

Результаты теоретических, лабораторных исследований и промысловых испытаний, изложенные в диссертации, являются итогом работы автора под руководством доктора технических наук, профессора Сахабутдинова Р.З. при активной помощи Шаталова А.Н., Гарифуллина Р.М., Шипилова Д.Д. и других сотрудников отдела исследования и промысловой подготовки нефти, газа и воды института «ТатНИПИнефть». Автор благодарит всех, оказавших помощь в выполнении и обсуждении работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и защищаемые положения, приведены теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** проведён анализ научно-технической литературы по методам удаления сероводорода из нефти.

Существующие методы очистки нефти от сероводорода можно разделить на основные группы – это химические и физические.

Химические методы основаны на переводе сероводорода в менее агрессивные соединения за счет нейтрализации и/или связывания H<sub>2</sub>S химическими веществами и реагентами. Физические методы базируются на процессе десорбции сероводорода в газовую фазу. Отличительной особенностью данных методов от химических является то, что сероводород из нефти удаляется в химически неизменённом виде.

Отдельно можно выделить третью группу - комбинированные, сочетающие в себе признаки химических и физических методов удаления сероводорода.

Существующие химические методы нейтрализации сероводорода в нефти можно разделить на экстракционные, реагентные, окислительные. Показано, что несмотря на относительно невысокие капитальные вложения химические методы имеют существенные недостатки: необходимость постоянной подачи реагентов (и, как следствие, высокие эксплуатационные расходы), негативное влияние продуктов реакции на свойства очищаемой продукции, а также расход реагентов на побочные реакции.

Представлен опыт по очистке нефти от сероводорода с применением следующих технологических приемов: сепарация, подача газа в подводящий нефтепровод сепараторов концевой ступени, отдувка сероводорода из нефти углеводородным газом, ректификация нефти и отпарка, очистка нефти от сероводорода в поле центробежных сил, ультразвуковое воздействие.

Наибольшее распространение получила отдувка сероводорода из нефти углеводородным газом, поэтому совершенствование данного способа с целью увеличения эффективности процесса является актуальной задачей.

Основной причиной, по которой ультразвуковые технологии не используются для удаления сероводорода из нефти, является малоизученность процесса, в литературных источниках отсутствует информация об эффективности данного процесса применительно к удалению сероводорода из нефти, системных теоретических и экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров воздействия полями различной физической природы.

**Во второй главе** приведены результаты исследований по влиянию технологии десорбционной очистки нефти от сероводорода на процесс подготовки и транспорт углеводородного газа. Показано, что основным «источником» образующегося конденсата в газопроводе является газ с десорбционной колонны. Применение аппаратов воздушного охлаждения не позволяет в полной мере достичь требуемой температуры точек росы по влаге и углеводородам попутного нефтяного газа (ПНГ), направляемого в систему газосбора.

Проведены исследования по снижению объема конденсата, образующегося в системе газосбора, за счет использования холодильных машин и эффекта Джоуля-Томсона. Определены параметры, при которых достигается требуемая температура точек росы по влаге и углеводородам.

Основными параметрами, влияющими на эффективность удаления сероводорода из нефти, являются температура, давление в десорбционной колонне, расход и состав отдувочного газа. Однако, компонентный состав нефти, подаваемой в колонну отдувки, также оказывает влияние на процесс десорбции  $H_2S$  из нефтяного потока. С увеличением содержания легких компонентов (метан, этан, пропан и бутан) в нефтяном потоке увеличивается эффективность десорбционной очистки в колонном аппарате (рисунок 1). Данный эффект достигается за счет того, что в процессе массообмена между газом и нефтью углеводороды из жидкой фазы частично переходят в газовую, обеспечивая тем самым более легкую десорбцию сероводорода.

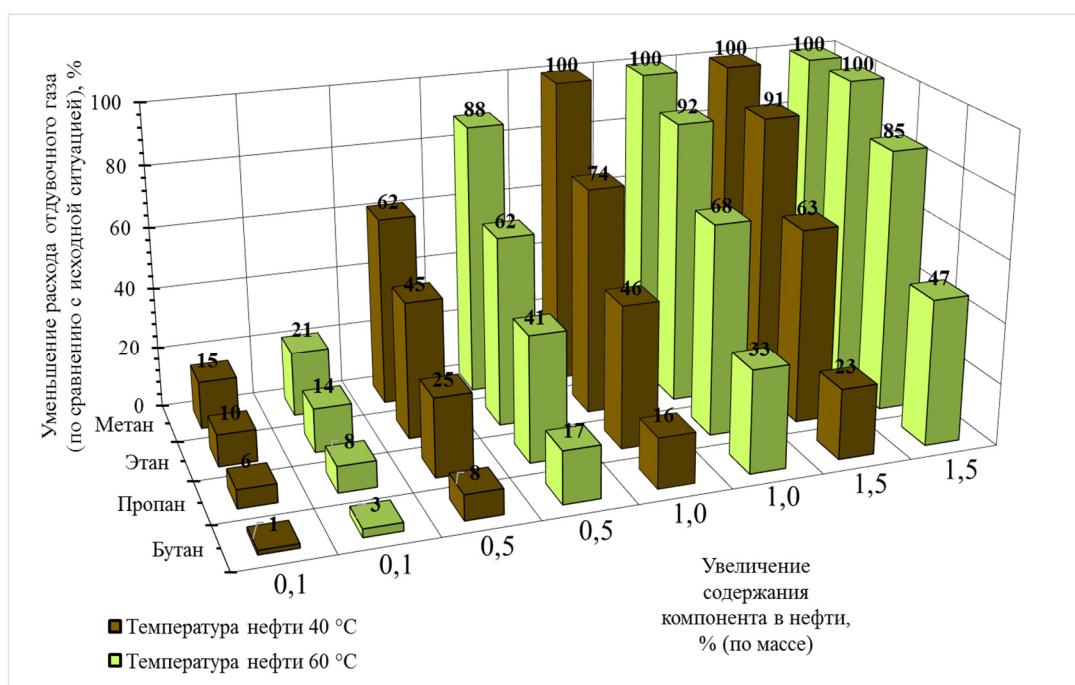


Рисунок 1 – Зависимость эффективности десорбционной очистки нефти от сероводорода при увеличении содержания в ней легких углеводородов

Предложено два способа изменения компонентного состава нефти, подаваемой в колонну отдувки, с целью увеличения эффективности десорбционной очистки и исключения негативного влияния на компримирование и транспорт газа с колонны отдувки:

- рециркуляцией всего объема газа, поступающего с концевых ступеней сепарации и колонны отдувки, в подводящий нефтепровод первой ступени сепарации (1 вариант, рисунок 2);

- дополнительным охлаждением нефтяного газа с КС (например, посредством его дросселирования) с последующей подачей отделившегося конденсата в поток нефти (2 вариант, рисунок 2).

Показано, что рециркулируемый поток (попутного нефтяного газа или конденсата) рациональнее подавать в поток жидкости, поступающей в сепараторы первой ступени, что позволяет в большей степени снизить массовую долю сероводорода после колонны отдувки (КО) по сравнению с вариантами подачи на последующие ступени сепарации. Положительный эффект в основном достигается за счет увеличения пропана в нефти, поступающей в КО.

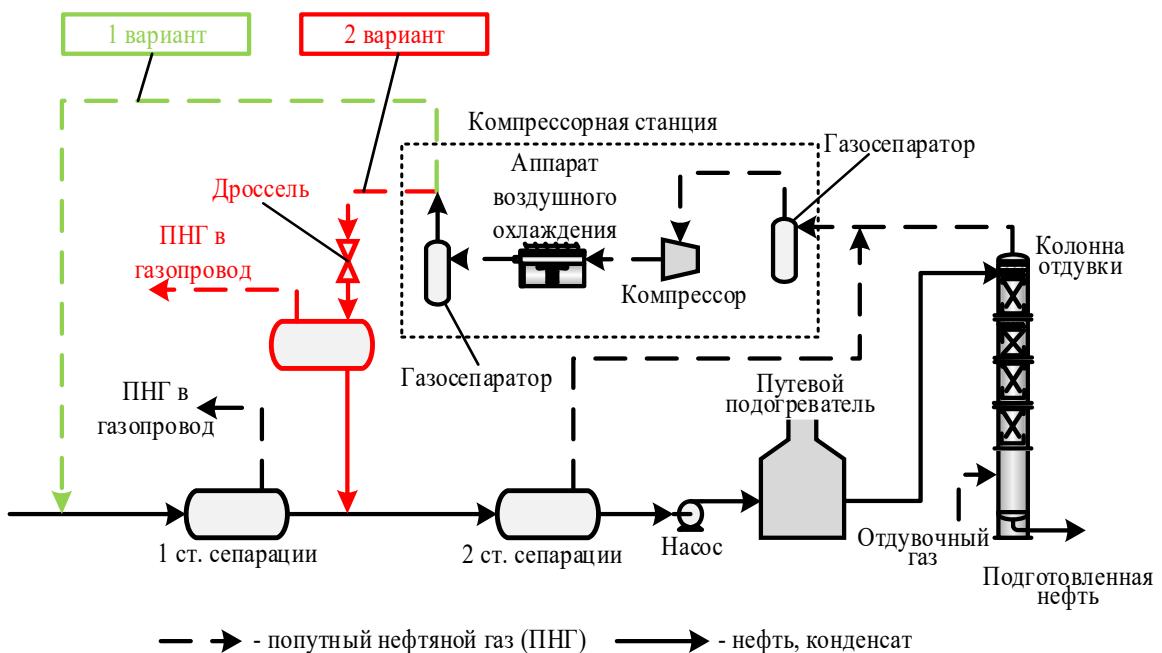


Рисунок 2 – Способы изменения состава нефти перед десорбционной колоннной

Обеспечение более глубокого охлаждения попутного нефтяного газа (ПНГ) на компрессорной станции и последующая подача сконденсировавшихся углеводородов в подводящий нефтепровод позволит

больше снизить массовую долю сероводорода в нефти после колонны отдувки. Так, снижение температуры газа способствует конденсации большего объема углеводородов. Однако вместе с конденсацией углеводородов происходит и переход сероводорода из газовой фазы в жидкую. При минус 40 °С (рисунок 3), когда все углеводороды C<sub>3+</sub> из газовой фазы перешли в жидкую, эффективность десорбционной очистки нефти от сероводорода снижается, т.е. критическим параметром, ограничивающим температуру охлаждения ПНГ на КС, является температура, при которой конденсируется весь объем пропана из газовой фазы. (рисунок 3).

Предлагаемый способ внедрен на трех компрессорных станциях и объектах подготовки нефти ПАО «Татнефть»:

1. Куакбашская УПВСН – КС при КУПВСН НГДУ «Лениногорскнефть»;
2. ДНС-10 - КС-11с НГДУ «Джалильнефть»;
3. Кама-Исмагиловская УПВСН – КС-7с НГДУ «Лениногорскнефть».

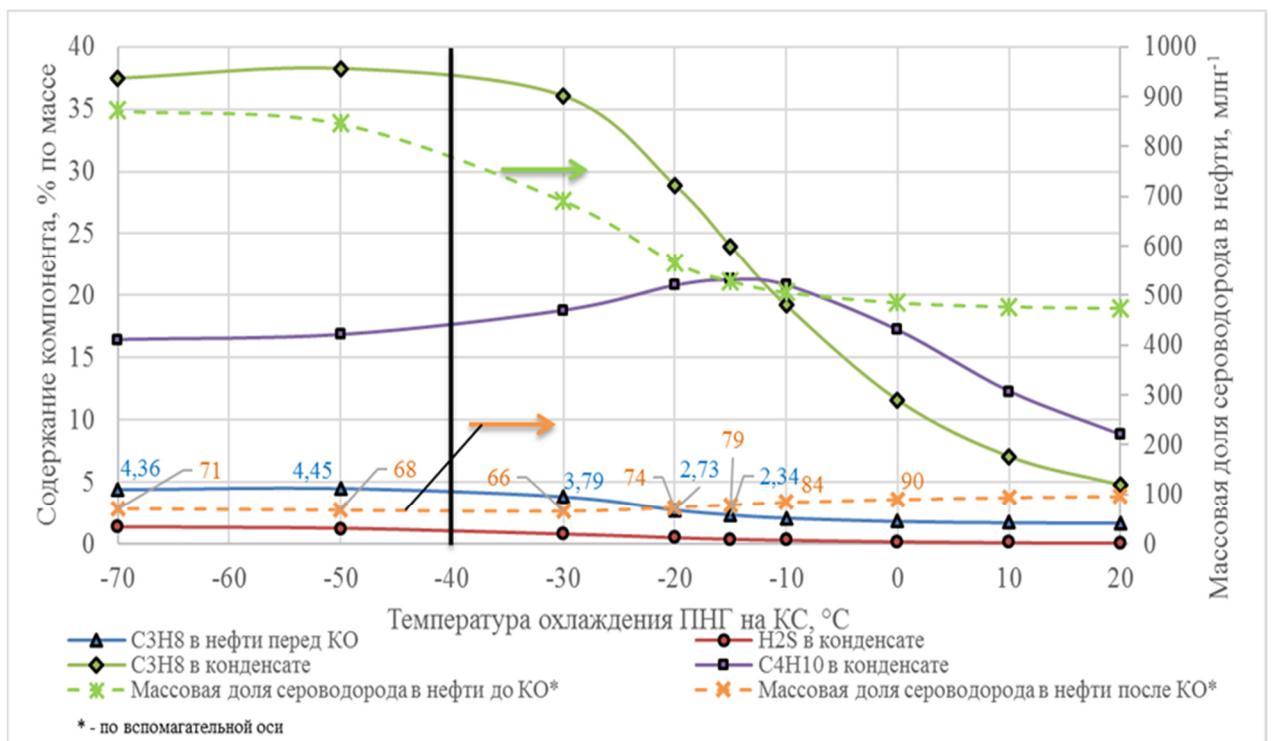


Рисунок 3 – Изменение компонентного состава нефти и конденсата в зависимости от условий проведения низкотемпературной сепарации ПНГ в условиях КС

Результаты проведенных промысловых испытаний (таблица 1) по увеличению эффективности очистки нефти от сероводорода в десорбционной колонне и уменьшению количества образующегося конденсата в системе газосбора показали, что:

1. На Куакбашской УПВСН массовая доля сероводорода в нефти после колонны отдувки снизилась в среднем со 166 до 83 ppm, удельный расход отдувочного газа с 3,15 до 3,00 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а количество конденсата, образующегося в системе газосбора в среднем на 95 %.

2. На Сулеевской ТХУ массовая доля сероводорода в нефти после колонны отдувки снизилась в среднем с 83 до 68 ppm, удельный расход отдувочного газа на 5 %, а количество выпадающего конденсата в системе сбора газа было практически исключено.

3. На Кама-Исмагиловской УПВСН массовая доля сероводорода в нефти после колонны отдувки снизилась в среднем с 95 до 71 ppm, при этом температура нефти уменьшилась в среднем на 4 °C, а объем образующегося конденсата на 88 %.

Таблица 1 - Среднегодовые параметры работы технологии десорбционной очистки нефти от сероводорода

Объект	Год	Массовая доля сероводорода в нефти, млн <sup>-1</sup>		Параметры работы десорбционной колонны			Количество конденсата, образующегося в системе газосбора, м <sup>3</sup> /год	Внедрение предлагаемого способа
		до КО	после КО	Соотношение газ/нефть, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Абсолютное давление, МПа	Температура нефти, °C		
КС при КПС-Куакбашская ПДС	2011	997	166	3,15	0,135	50	1029	–
	2012	995	85	3,00	0,135	52	12	+
	2013		88	2,99	0,129	53	45	+
	2014		86	2,98	0,124	52	92	+
	2015		73	3,25	0,127	51	65	+
КС-1с-Сулеевская ТХУ	2012		95	2,13	0,137	49	616	–
	2013	321	70	2,23	0,143	47	615	–
	2014		55	2,26	0,137	47	21	+
	2015		81	1,94	0,138	48	0	+
КС-7с-Кама-Исмагиловская УПВСН	2012	211	116	1,52	0,136	47	416	–
	2013	240	86	2,33	0,135	48	335	–
	2014		82	1,96	0,135	51	420	–
	2015		71	1,99	0,140	44	48	+

Примечание: знаком «+» отмечены годы, когда на объекте работала технология подготовки сероводородсодержащей нефти и попутного нефтяного газа.

Для повышения эффективности технологии десорбционной очистки нефти от сероводорода на установках подготовки, а также исключения негативного влияния данной технологии на последующий транспорт ПНГ разработан руководящий документ РД 153-39.0-828-13 «Инструкция по технологии подготовки нефтяного газа, поступающего на компрессорные станции с установок подготовки нефти».

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований процесса десорбции сероводорода из нефти с применением ультразвукового воздействия (УЗВ).

Эффективность удаления сероводорода из нефти оценивалась отношением разницы между исходной и конечной массовыми долями  $\text{H}_2\text{S}$  к исходному значению, выраженным в процентах.

Показано, что эффективность удаления сероводорода из нефти с помощью ультразвука существенно зависит от термобарических условий. Воздействие на нефть ультразвуком частотой 50 кГц и удельной акустической мощностью 200 кВт/м<sup>3</sup> позволяет снизить содержание сероводорода в нефти на 5-45 % в зависимости от вязкости (рисунок 4). Сочетание вакуумной сепарации нефти (при абсолютном давлении 50 кПа) с воздействием на нее ультразвука позволяет в два раза увеличить эффективность десорбции сероводорода в газовую фазу по сравнению с вариантом при атмосферном давлении. С уменьшением температуры эффективность удаления сероводорода существенно снижается, при этом чем больше вязкость, тем меньше влияние ультразвуковых волн на процесс десорбции сероводорода из нефти.

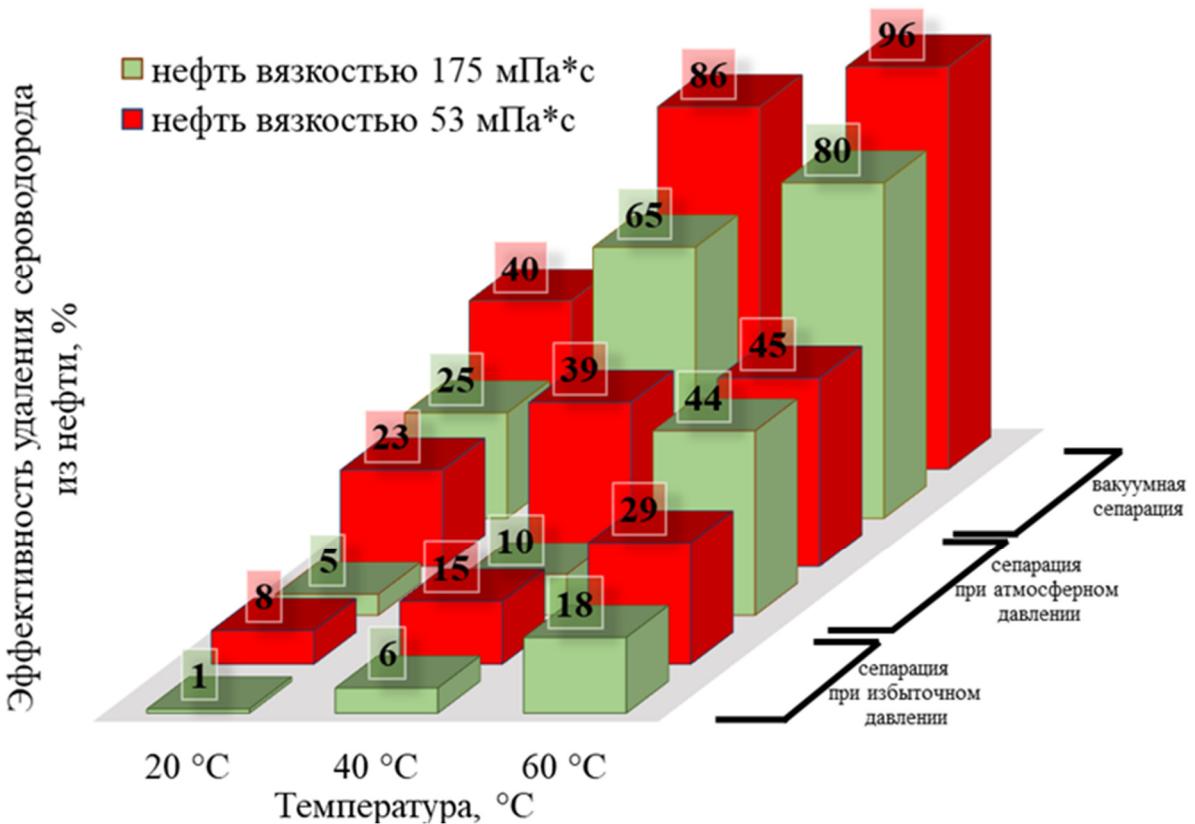


Рисунок 4 - Эффективность снижения массовой доли сероводорода в нефти за счет воздействия ультразвука при различных термобарических условиях (частота ультразвука 50 кГц, время воздействия 5 мин)

С увеличением вязкости возрастает поглощение звуковых волн, что приводит к существенному снижению амплитуды ультразвуковых колебаний и энергии, которую они несут по мере удаления от источника. Так, при температуре нефти 60 °C, атмосферном давлении, частоте ультразвука 50 кГц и времени воздействия 5 мин увеличение вязкости с 50 до 400 мПа·с приводит к снижению эффективности процесса примерно в два раза (рисунок 5). Следует отметить, что при вязкости нефти более 400 мПа·с увеличение удельной акустической мощности незначительно влияет на процесс, тогда как при вязкости менее 150 мПа·с повышение мощности от 100 до 200 Вт/дм<sup>3</sup> позволяет интенсифицировать выделение сероводорода примерно в два раза.

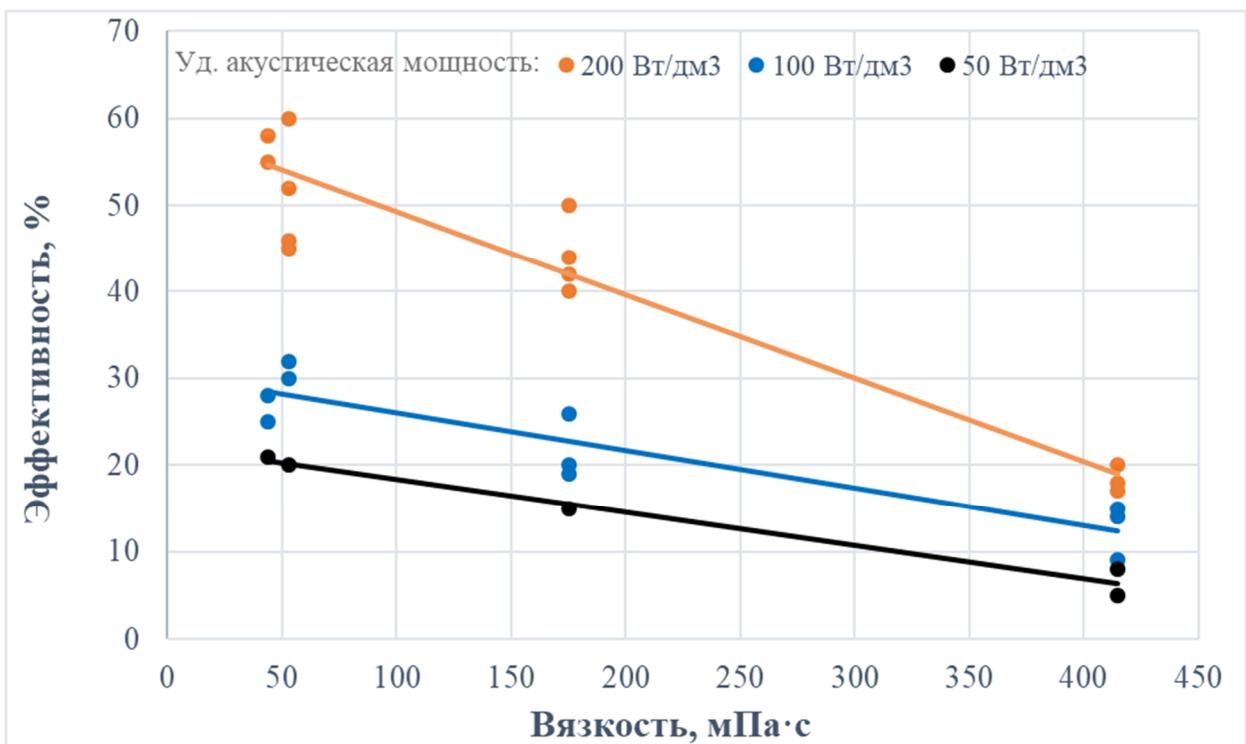


Рисунок 5 - Зависимость эффективности удаления сероводорода из нефти от ее вязкости

Установлена аналогичная тенденция и для зависимости удаления сероводорода от частоты ультразвукового воздействия (рисунок 6). При обработке пробы нефти вязкостью 175 мПа·с и плотностью 918 кг/м<sup>3</sup> при аналогичных термобарических условиях повышение частоты ультразвука способствует заметному повышению эффективности процесса очистки нефти и тем больше, чем выше величина удельной акустической мощности.

С увеличением интенсивности ультразвука прослеживается тенденция на повышение эффективности десорбции сероводорода. Так, с ростом интенсивности на 3 Вт/см<sup>2</sup> эффективность увеличивается на 5-7 % (рисунок 7).

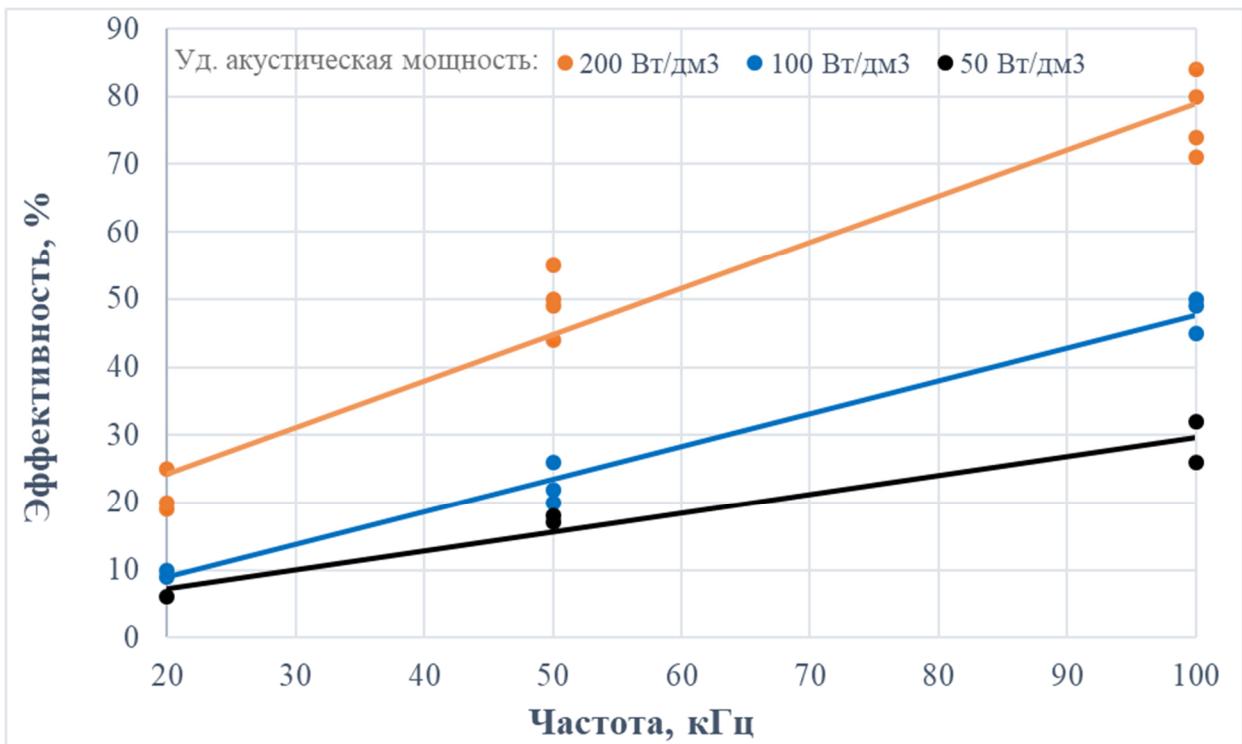


Рисунок 6 - Зависимость эффективности удаления сероводорода из нефти от частоты ультразвука

Увеличение акустической мощности и времени воздействия ультразвука способствуют повышению эффективности удаления сероводорода, причем с уменьшением вязкости нефти положительный эффект возрастает (рисунок 8). С увеличением продолжительности воздействия ультразвука на нефть эффективность десорбции H<sub>2</sub>S возрастает тем больше, чем выше удельная акустическая мощность, при этом воздействовать ультразвуком более 5 мин нецелесообразно (рисунок 9). С увеличением продолжительности воздействия возрастают и затраты электроэнергии. Из рисунка 10 следует, что, несмотря на повышение эффективности, с увеличением времени ультразвукового воздействия удельные затраты энергии на единицу эффективности увеличиваются. Так, например, при удельной мощности 50 Вт/дм<sup>3</sup> и времени воздействия 5 мин содержание сероводорода в нефти снижается на 45 %, тогда как последующее ультразвуковое воздействие в течение 5 мин позволяет дополнительно увеличить эффективность всего на 10 % (т.е. эффективность увеличивается с 45 до 55 %), а затраты энергии при этом возрастают в 2 раза.

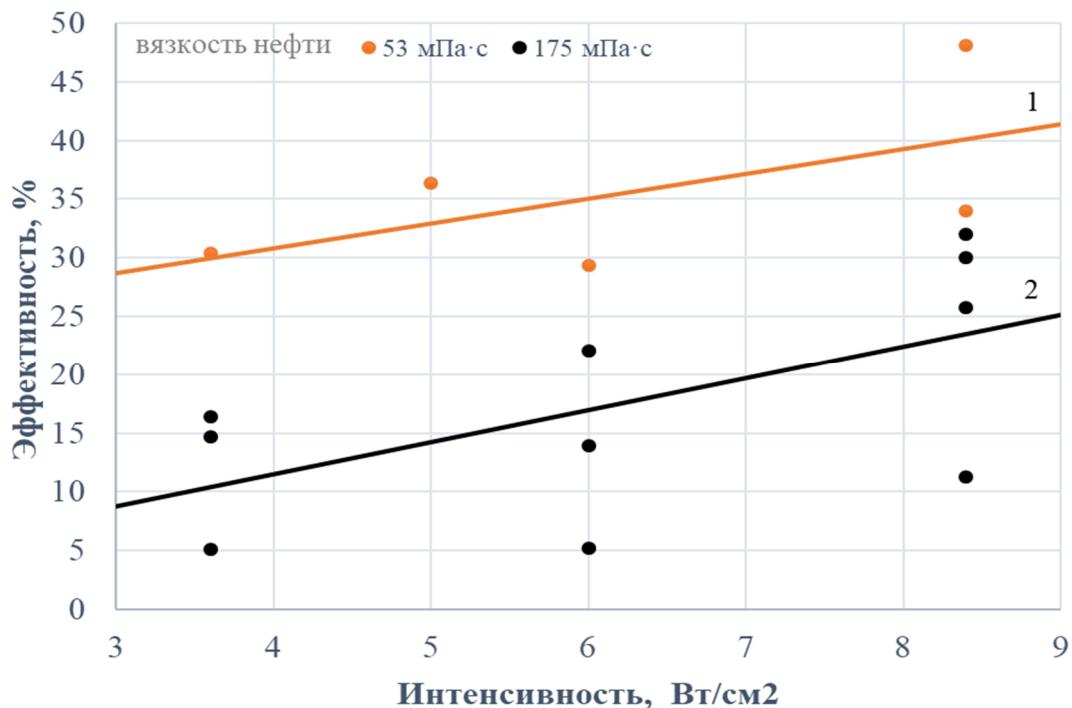


Рисунок 7 - Влияние интенсивности ультразвукового воздействия на эффективность снижения сероводорода в нефти (удельная акустическая мощность 50 кВт/м<sup>3</sup>, частота 100 кГц, температура 60 °С, атмосферное давление)

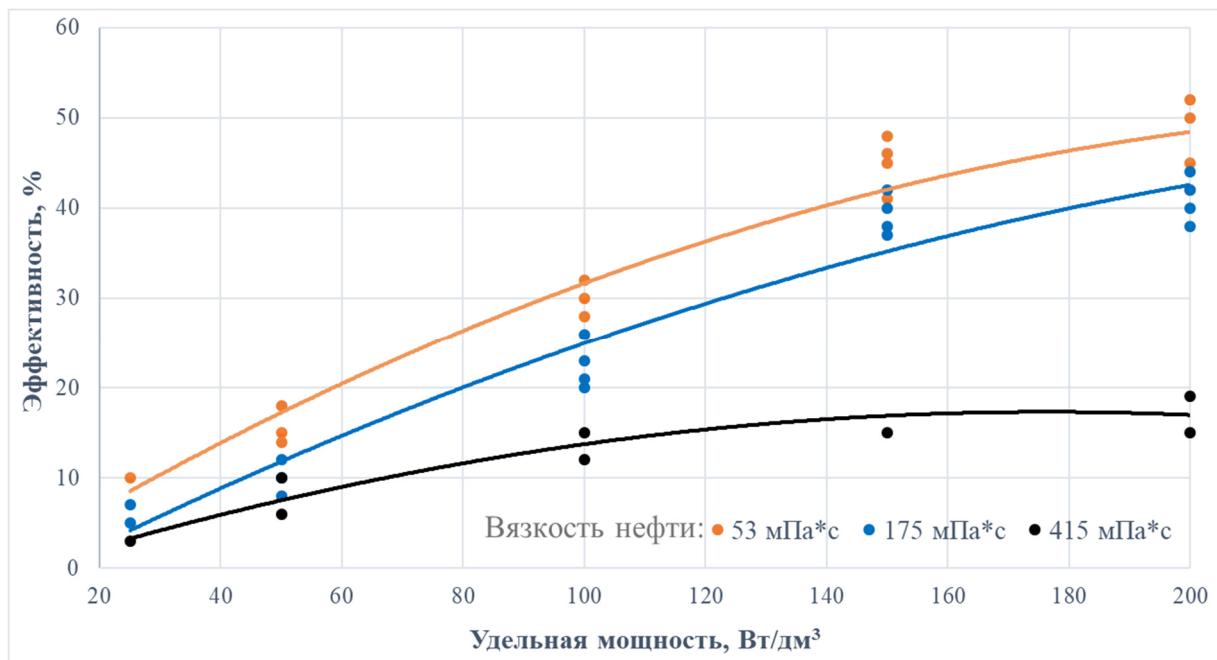


Рисунок 8 - Влияние удельной акустической мощности на эффективность десорбции сероводорода из нефти (частота ультразвука 50 кГц, время воздействия 5 минут)

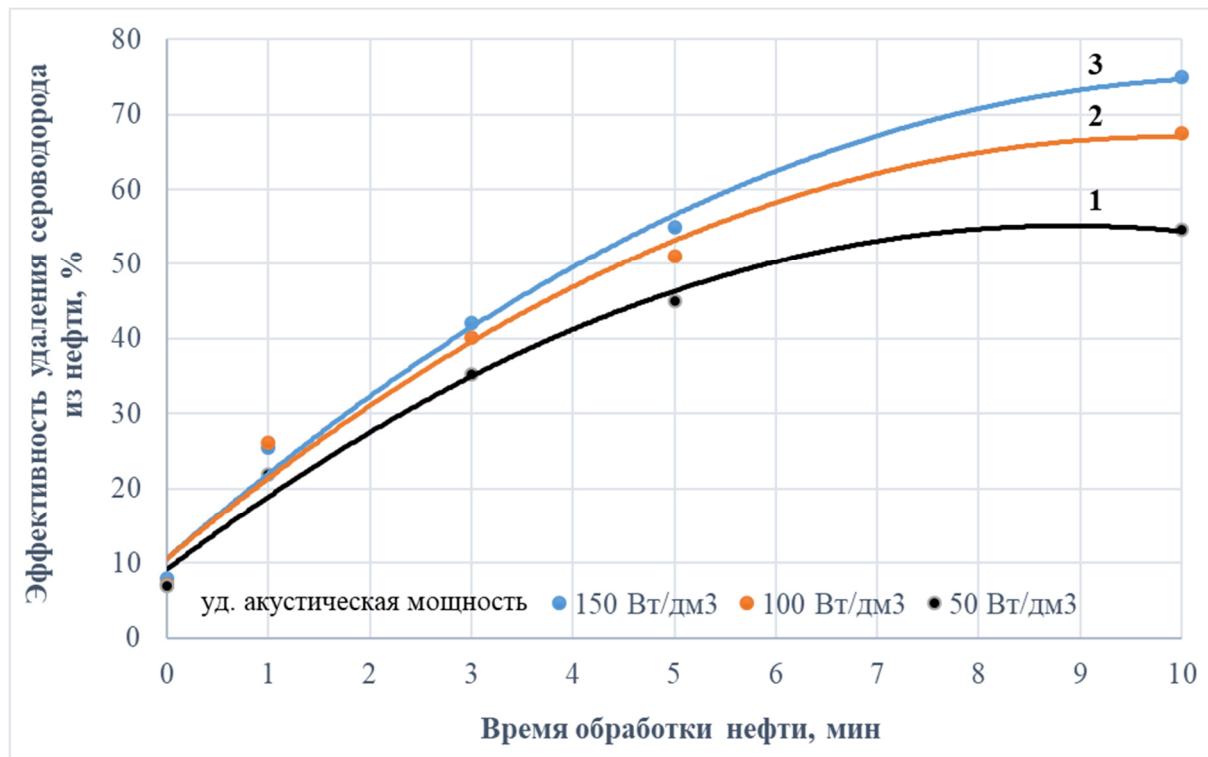


Рисунок 9 - Зависимость эффективности удаления сероводорода из нефти от продолжительности ультразвукового воздействия

Установлено, что при одинаковых затратах электроэнергии на единицу объема оптимальным является воздействие ультразвуковых волн в течение 4-8 минут (рисунок 10). При большой удельной акустической мощности (более 50 Вт/дм<sup>3</sup>) и непродолжительном воздействии ультразвука времени для перехода сероводорода из жидкой в газовую фазу недостаточно. Процесс перехода является относительно «кинерционным» и требует времени для зарождения газового пузырька, его увеличения и всплытия к поверхности раздела фаз жидкость-газ. Интенсивное действие ультразвука за короткий промежуток времени не позволяет полностью завершить процесс десорбции сероводорода, поскольку часть зародившихся пузырьков газа обратно схлопывается в слое жидкости. В свою очередь действие на нефть ультразвука малой мощности (менее 15 Вт/дм<sup>3</sup>) даже при продолжительном времени воздействия не обеспечивает необходимой интенсивности зарождения газовых пузырьков, что также снижает эффективность процесса. В диапазоне вязкости от 50 до 200 мПа·с оптимальным является продолжительность воздействия 5-6 мин, при последующем увеличении вязкости оптимальные параметры незначительно смещаются в область более продолжительного ультразвукового воздействия.

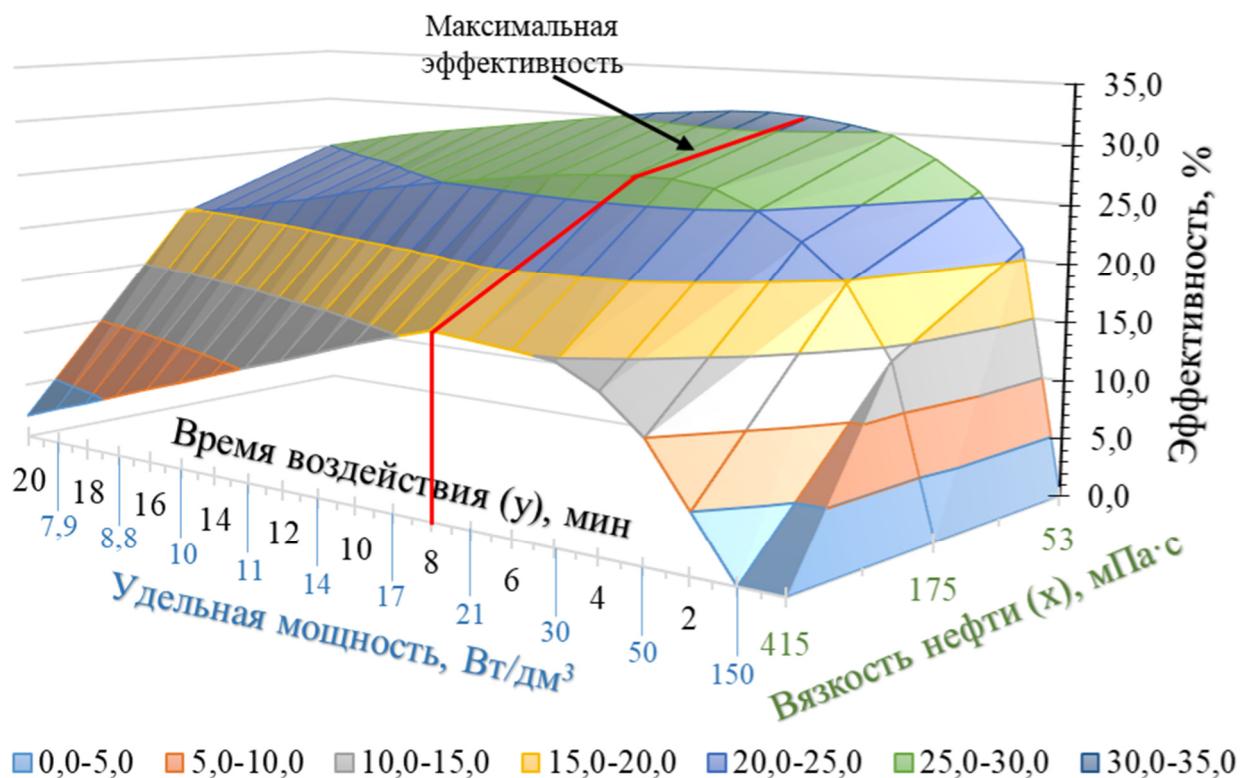


Рисунок 10 - Зависимость эффективности удаления сероводорода из нефти от времени обработки и удельной акустической мощности при одинаковых затратах электроэнергии

Для оптимизации процесса десорбции сероводорода из нефти предложена зависимость оптимального времени воздействия ультразвука от вязкости нефти в интервале от 40 до 415 мПа·с:

$$y = -1,11 \times 10^{-5}x^2 + 0,0107x + 5,46 \quad (1)$$

где  $y$  – оптимальное время воздействия ультразвука, мин;

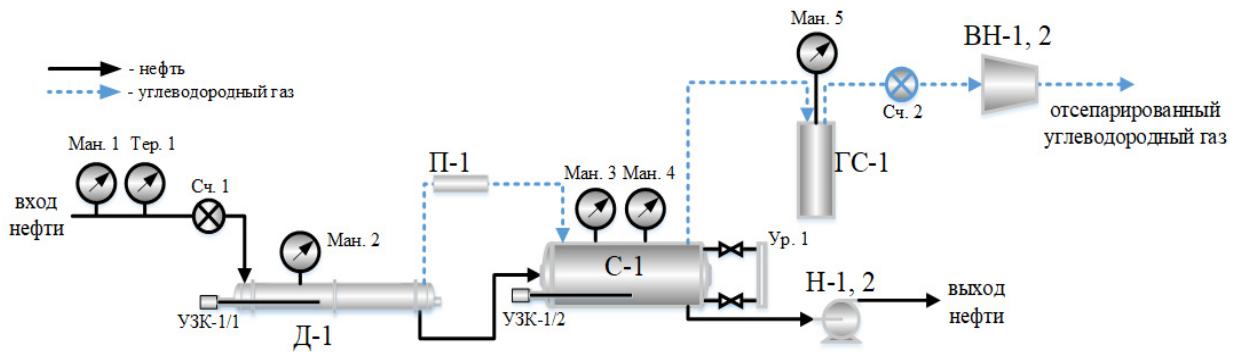
$x$  – вязкость нефти, мПа·с.

Увеличение глубины вакуума и температуры повышает эффективность процесса, однако характер зависимости (1) остается идентичным, поэтому ее возможно применять для предварительной оценки оптимального времени проведения процесса независимо от термобарических условий.

Проведенные исследования показали возможность использования ультразвуковых волн для интенсификации удаления сероводорода из нефти. Определены основные зависимости эффективности снижения сероводорода от вязкости нефти, термобарических условий, удельной акустической мощности, времени обработки и интенсивности ультразвука. Данный способ может использоваться для увеличения эффективности сепарации нефти на горячих ступенях с целью снижения расхода реагента-нейтрализатора сероводорода.

Испытания в условиях промысла были проведены на трех объектах ПАО «Татнефть» (УПВСН НГДУ «Ямашнефть», УПВСН «Андреевка», УПСВН «Каменка»; нефть, подготавливаемая на данных объектах, характеризуется вязкостью 53, 175, 415 мПа·с соответственно), при трех значениях абсолютного давления в сепарационной емкости С-1 – 105 (атмосферном), 70 и 50 кПа (рисунок 11), двух вариантах воздействия ультразвука на нефть: в подводящем трубопроводе Д-1 и сепараторе С-1. Расшифровка режимов представлена в таблице 3.1. Схема пилотной установки для сепарации и десорбционной очистки нефти от сероводорода с использованием УЗВ, представлена на рисунке 11.

Уменьшение давления ниже атмосферного (абсолютное давление в сепараторе 70 кПа, режимы 2.1 - 2.3) увеличивает эффективность удаления сероводорода. Массовая концентрация сероводорода снижается примерно на 45 % (режим 2.1) при вязкости нефти не более 200 мПа·с. Для сверхвязкой нефти (вязкостью более 400 мПа·с) увеличение эффективности значительно ниже и составляет всего 16 %. Воздействие на нефть ультразвука в подводящем трубопроводе Д-1 (рисунок 12) позволяет дополнительно снизить массовую концентрацию сероводорода на 3-6 %, а при воздействии в полости сепаратора (режим 2.2) - на 8-10 %. Газовый фактор нефти при работе установки на режимах 2.1 – 2.3 изменялся от 0,44 до 5,93 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.



Д-1 - трубная камера ультразвуковой обработки; П-1 - устройство гашения пены – пеногаситель; С-1 - сепаратор; ГС-1 – газосепаратор; ВН-1,2- вакуумные насосы; Н-1, 2 – насосы; УЗК-1/1, 2 - ультразвуковые комплексы; Ур. 1 - уровнемер; Ман. 1-3 - манометр; Ман. 4,5 - мановакуумметр; Тер. 1- термометр спиртовой; Сч. 1 - счетчик жидкости; Сч. 2 - счетчик газовый

Рисунок 11 – Схема пилотной установки для сепарации и десорбционной очистки нефти от сероводорода

Таблица 2 - Характеристика режимов очистки нефти от сероводорода на пилотных установках

№ режима	Абсолютное давление в сепараторе, кПа	Место размещения ультразвукового излучателя для воздействия на нефть	
		в сепараторе	в трубопроводе
1.1	атмосферное	-	-
1.2	атмосферное	+	-
2.1	70	-	-
2.2	70	+	-
2.3	70	-	+
3.1	50	-	-
3.2	50	+	-
3.3	50	-	+

Примечание: знаком «+» отмечены параметры, применяемые в данном режиме; знаком «-» отмечены параметры не используемые при данном режиме работы модельного узла

Увеличение глубины вакуума до 50 кПа без ультразвукового воздействия (режим 3.1) позволяет удалить дополнительно 33 % сероводорода из сверхвязкой нефти и 63 % из нефти вязкостью 53 мПа·с. Обработка нефти ультразвуком в подводящем трубопроводе в условиях вакуума (режим 3.3) увеличивает эффективность процесса удаления H<sub>2</sub>S всего на 6 % по сравнению с режимом 3.1, что на 4 % меньше, чем при размещении ультразвуковых излучателей в сепараторе (режим 3.2). При сравнении режима 1.1 с режимом 3.2 видно, что сочетание ультразвука с относительно большим вакуумом позволяет удалить сероводород с большей эффективностью, которая по сравнению с обычной сепарацией при атмосферном давлении увеличивается уже на 38-50 % (в зависимости от вязкости нефти). Газовый фактор нефти при рабочих условиях (абсолютное давление 50 кПа) составил в среднем 1,1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и 4,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> для нефти вязкостью 415 и 53 мПа·с соответственно. Ультразвук способствует более глубокой дегазации нефти, вследствие чего расход газа с модельного узла на режимах 3.2 и 3.3 выше по сравнению с режимом 3.1 примерно на 10 и 20 % соответственно.

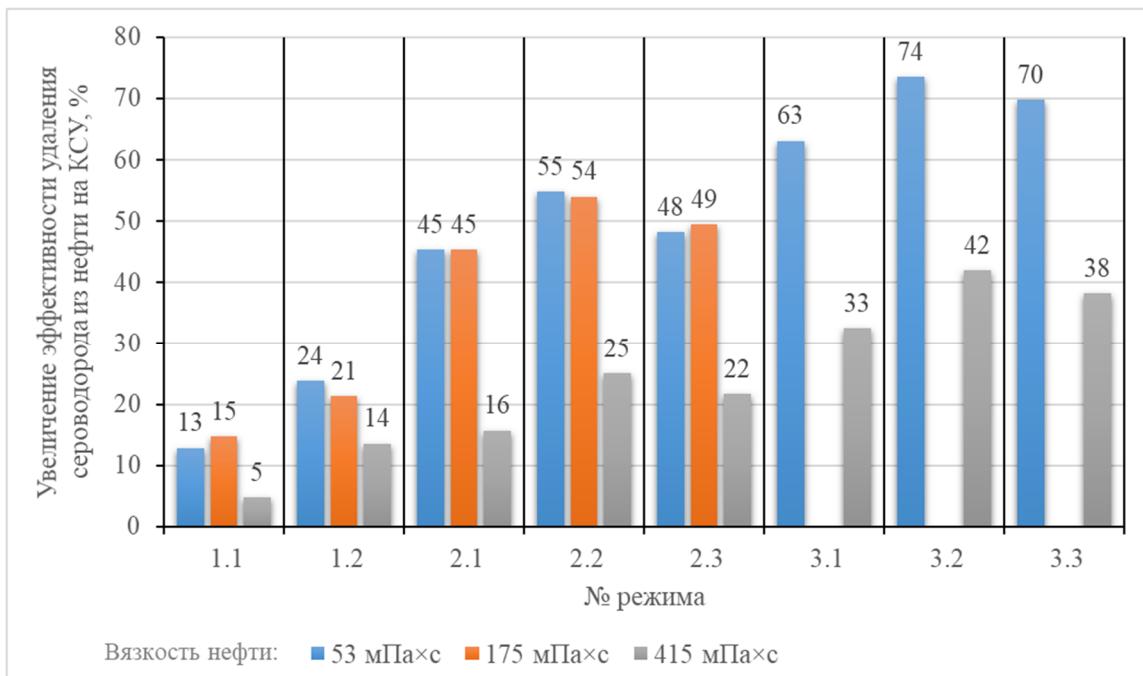


Рисунок 12 - Увеличение эффективности удаления сероводорода из нефти на КСУ относительно существующего положения

При сравнении режимов 1.1 и 1.2, 2.1 и 2.2, 3.1 и 3.2 (рисунок 12) видно, что эффективность ультразвука по извлечению сероводорода из нефти в вакууме при принятых в экспериментах промысловых условиях не превышает 11 %.

Увеличение глубины вакуума способствует более активному переходу легких компонентов из состава жидкой фазы в газовую, что сказывается на расходе выделяющегося газа в модельном сепараторе. Так, снижение абсолютного давления со 105 до 70 кПа увеличивает расход газа примерно в 4-15 раз (в зависимости от свойств нефти). Уменьшение абсолютного давления с 70 до 50 кПа увеличивает расход газа примерно в 1,5-2,5 раза.

Эффективность десорбции H<sub>2</sub>S за счет ультразвукового воздействия в основном зависит от места размещения ультразвукового излучателя и практически не зависит от давления. Так, увеличение десорбции сероводорода при всех рассматриваемых значениях абсолютного давления в сепараторе С-1 составило 4-6 и 8-10 % при воздействии ультразвука в подводящем трубопроводе и полости сепаратора соответственно.

На основании проведенных экспериментальных исследований и промысловых испытаний, разработана технология для интенсификации процесса десорбции сероводорода из нефти с применением ультразвукового воздействия. По результатам проведенной работы разработан стандарт ПАО «Татнефть» СТО ТН 369-2018 «Инструкция по технологии интенсификации сепарации с очисткой нефти от сероводорода».

**В четвертой главе** приведена технико-экономическая оценка внедрения ультразвуковых излучателей на процесс десорбции сероводорода из нефти.

Эффект от внедрения технологии рециркуляции ПНГ с выкида компрессорной станции в подводящий нефтепровод ступени сепарации нефти достигается за счет уменьшения температуры нагрева нефти и, как следствие, экономии топливного газа, а также уменьшения затрат на вывоз конденсата из дрипов газопровода. На всех трех рассмотренных объектах (Куакбашская УПВСН, Сулеевская ТХУ, Кама-Исмагиловская УПВСН) срок окупаемости затрат не превышает 1,4 года. Наибольший экономический эффект достигается от внедрения предлагаемого способа на КС при КУПВСН - Куакбашская УПВСН (ЧДД 94 млн руб., срок окупаемости менее 1 года).

Эффект от внедрения ультразвуковой обработки нефти на горячей ступени сепарации достигается за счет снижения расхода реагента нейтрализатора сероводорода. Экономическая эффективность от внедрения ультразвуковых излучателей на УПВСН «Андревка» составляет: ЧДД 36 млн. р., срок окупаемости не более 2 лет. При внедрении ультразвуковых излучателей на УПВСН НГДУ «Ямашнефть» ЧДД составит 89 млн. р., срок окупаемости с момента финансирования 4,3 года).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов выполненной работы сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что основным источником конденсата, образующегося в системе сбора сероводородсодержащего газа ПАО «Татнефть», является газ с колонны отдувки, из которого выделяется до 70 % конденсата от общего объема.

2. Разработана технология подготовки сероводородсодержащей нефти и попутного нефтяного газа, позволяющая увеличить эффективность десорбционной очистки нефти от сероводорода и уменьшить количество конденсата, образующегося в системе газосбора.

3. Экспериментально установлены зависимости влияния параметров УЗВ на процесс десорбции сероводорода из нефти, в частности:

- с увеличением вязкости нефти и давления сепарации эффективность десорбции сероводорода из нефти в газовую фазу уменьшается;

- с увеличением частоты, удельной акустической мощности, времени воздействия ультразвука увеличивается эффективность десорбции сероводорода из нефти в газовую фазу.

4. Разработана формула для определения оптимального времени воздействия ультразвука на нефть вязкостью от 40 до 415 мПа·с при минимальных удельных затратах электроэнергии.

5. Определены варианты процессов и технологические параметры для очистки нефти от сероводорода за счет УЗВ в зависимости от вязкости нефти.

6. Разработана технология с применением УЗВ, позволяющая увеличить эффективность десорбции сероводорода из нефти на ступени сепарации.

7. Созданные технические решения выполнены на уровне изобретений и защищены патентом РФ.

8. Разработаны РД 153-39.0-828-13 «Инструкция по технологии подготовки нефтяного газа, поступающего на компрессорные станции с установок подготовки нефти» и СТО ТН 369-2018 «Инструкция по технологии интенсификации сепарации с очисткой нефти от сероводорода».

9. Технология подготовки сероводородсодержащей нефти и попутного нефтяного газа внедрена на трех объектах ПАО «Татнефть» суммарной производительностью 8 млн. тонн в год.

### **Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

#### **Печатные труды в рецензируемых научных изданиях**

1. Совершенствование физических методов удаления сероводорода из нефти / Р.З. Сахабутдинов, А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, Д.Д. Шипилов. – Текст : непосредственный // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 3. – С. 39-41.
2. Влияние ультразвукового воздействия на процесс десорбции сероводорода из нефти / А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, Р.З. Сахабутдинов, В.В. Соловьев, Д.Д. Шипилов. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 7. – С. 58-60.
3. Повышение эффективности безреагентных методов очистки нефти от сероводорода / Н.Г. Ибрагимов, А.Н. Шаталов, Р.З. Сахабутдинов, Д.Д. Шипилов, А.А. Ануфриев, Р.М. Гарифуллин. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 6. – С. 58-61.
4. Технология подготовки сероводородсодержащей нефти и нефтяного газа на Куакбашском центральном сборном пункте / А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, Д.Д. Шипилов, Р.М. Гарифуллин. – Текст : непосредственный // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2014. – № 6. – С. 40-43.
5. Ультразвуковое воздействие для удаления сероводорода из нефти / А.Н. Шаталов, А.А. Ануфриев, Р.З. Сахабутдинов, Н.Г. Ибрагимов, Д.Д. Шипилов, В.В. Соловьев. – Текст : непосредственный // Технологии нефти и газа. – 2019. – № 6. – С. 48-52.

6. Повышение эффективности десорбции сероводорода из нефти / А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, Д.Д. Шипилов, В.В. Соловьев, Р.З. Сахабутдинов, Н.Г. Ибрагимов. – Текст : электронный // Нефтяная провинция : сетевое науч. изд. – 2019. – № 2. – С. 174-183. – URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/2e67f9\\_4c0b16023ff94c509fca0b88654b017a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/2e67f9_4c0b16023ff94c509fca0b88654b017a.pdf) (дата обращения: 06.10.2022).

### Патенты

7. Патент № 2578499 Российской Федерации, МПК F17B 1/065. Способ подготовки сероводородсодержащей нефти и попутного нефтяного газа : № 2015110278/06 : заявл. 23.03.15 : опубл. 27.03.16 / Сахабутдинов Р.З., Ануфриев А.А., Шаталов А.Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – Текст : непосредственный.
8. Патент № 2694767 Российской Федерации, МПК B01D 19/00. Способ подготовки сероводородсодержащей нефти (варианты) : № 2018142961 : заявл. 04.12.18 : опубл. 16.07.19 / Шаталов А.Н, Ануфриев А.А., Шипилов Д.Д. ; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – Текст : непосредственный.

### Другие печатные труды

9. Подготовка жирных нефтяных газов / Р.З. Сахабутдинов, А.Н. Шаталов, Р.М. Гарифуллин, А.А. Ануфриев, Р.Г. Ганиев. – Текст : непосредственный // Научно-техническая ярмарка идей и предложений группы компаний ОАО «Татнефть» / ТатНИПИнефть. –Бугульма, 2012. – С. 92-102.
10. Ануфриев, А.А. Выбор оптимальной технологии подготовки попутного нефтяного газа в условиях компрессорных станций ОАО «Татнефть» / А.А. Ануфриев, Р.М. Гарифуллин, А.Н. Шаталов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ОАО «Татнефть». – Казань : Центр инновационных технологий, 2013. – Вып. 81. – С. 435-442.
11. Ануфриев, А.А. Решение вопроса по снижению объема конденсата, образующегося в системе газосбора, при десорбционной очистке нефти от сероводорода на УПВСН / А.А. Ануфриев, В.В. Малофеев. – Текст : непосредственный // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 14-18 апр. 2014 г. / Министерство образования и науки РТ ; Совет Альметьевского муницип. р-на ; ОАО «Татнефть» ; АГНИ. – Альметьевск : АГНИ, 2014. – Ч. 1. – С. 35-40.
12. Ануфриев, А.А. Снижение объема конденсата, образующегося в системе газосбора, при десорбционной очистке нефти от сероводорода на УПН / А.А. Ануфриев. – Текст : электронный // Молодежная научно-практическая

конференция института «ТатНИПИнефть» : Секция № 3 «Нефтепромысловое обустройство и наземное строительство». – Бугульма, 2014. – URL: <http://10.2.1.52/upload/sms/2014/pro/001.pdf> (дата обращения: 06.10.2022).

13. Промысловые исследования очистки нефти от сероводорода на концевых ступенях сепарации с помощью ультразвукового воздействия / А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, В.В. Соловьев, Н.Н. Гафаров, А.З. Мингазова, Д.Н. Морунова. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ПАО «Татнефть». – М. : Нефтяное хозяйство, 2020. – Вып. 88. – С. 228-234.

14. Ануфриев, А.А. Снижение объема конденсата, образующегося в системе газосбора при десорбционной очистке нефти от сероводорода на УПН / А.А. Ануфриев, В.В. Малофеев, А.С. Нурутдинов. – Текст : непосредственный // Сборник работ молодёжной научно-практической конференции ОАО «Татнефть», посвященной 55-летию НГДУ «Джалильнефть», сентябрь 2014 г. / ОАО «Татнефть». – Джалиль, 2014. – С. 136-137.

15. Ануфриев, А.А. Эффективные решения по очистке нефти от сероводорода / А.А. Ануфриев. – Текст : электронный // Молодежная научно-практическая конференция института «ТатНИПИнефть» : Секция № 3 «Нефтепромысловое обустройство и наземное строительство». – Бугульма, 2016. – 7 с. – URL: <http://10.2.1.52/upload/sms/2016/pro/001.pdf> (дата обращения: 06.10.2022).

16. Ануфриев, А.А. Увеличение эффективности десорбционной очистки нефти от сероводорода / А.А. Ануфриев, Д.Д. Шипилов. – Текст : непосредственный // Сборник докладов научно-технической конференции, посвященной 60-летию ТатНИПИнефть ПАО «Татнефть», 13-14 апр. 2016 г., г. Бугульма / ПАО «Татнефть». – Набережные Челны : Экспозиция Нефть Газ, 2016. – С. 434-437.

17. Повышение эффективности десорбционной очистки нефти от сероводорода / Н.Г. Ибрагимов, Р.З. Сахабутдинов, А.Н. Шаталов, А.А. Ануфриев, Р.М. Гарифуллин. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ПАО «Татнефть». – М. : Нефтяное хозяйство, 2016. – Вып. 84. – С. 166-173.

18. Ануфриев, А.А. Уменьшение негативного влияния технологии десорбционной очистки нефти от сероводорода на подготовку и транспорт ПНГ до потребителя / А.А. Ануфриев. – Текст : непосредственный // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта - 1 апр. 2016 г. / М-во образования и науки РТ ; Совет Альметьевского муницип. р-на ; АГНИ. – Альметьевск : АГНИ, 2016. – Ч. 1. – С. 16-18.

19. Ануфриев, А.А. Эффективные технологические решения по очистке нефти от сероводорода / А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, Д.Д. Шипилов. – Текст : непосредственный // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, 28-29 окт. 2016 г. – Альметьевск : АГНИ, 2016. – Т. 1. – С. 322-325.
20. Ануфриев, А.А. Комплексная технология очистки нефти от сероводорода и подготовки нефтяного газа к транспорту / А.А. Ануфриев. – Текст : непосредственный // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли. – М. : Технологии развития, 2017. – С. 22-24.
21. Интенсификация десорбции сероводорода из нефти на промысловых объектах ПАО «Татнефть» / Д.Д. Шипилов, А.Н. Шаталов, А.А. Ануфриев, Д.Н. Морунова. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / ПАО «Татнефть». – Набережные Челны : Экспозиция Нефть Газ, 2017. – Вып. 85. – С. 375-384.
22. Технологии очистки нефти от сероводорода на объектах ПАО «Татнефть» / А.А. Ануфриев, А.Н. Шаталов, Д.Д. Шипилов, В.В. Соловьев. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности разработки нефтяных и газовых месторождений на поздней стадии : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. на базе Кубанского государственного технологического университета совместно с Российской академией естественных наук, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 03-06 окт. 2017 г. / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар : Издательский Дом - Юг, 2017. – С. 51.
23. Соловьев, В.В. Исследование методов интенсификации сепарации и удаления сероводорода из нефти. – Текст : непосредственный / В.В. Соловьев, А.А. Ануфриев // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., 12 нояб. 2020 г., г. Альметьевск. – Альметьевск : АГНИ, 2020. – Т. 1. – С. 387-393.