

На правах рукописи

ГУСЕВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

**Подготовка попутного газа нефтедобычи к транспорту
с применением трёхпоточной вихревой трубы**

Специальности: 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтегазовая отрасль)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования « Тюменский государственный нефтегазовый университет» (ТюмГНГУ)

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Грачев Сергей Иванович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Тарасенко Александр Алексеевич
- кандидат технических наук, доцент
Шешуков Николай Леонтьевич

Ведущая организация - Общество с ограниченной ответственностью «Тюменский научно-исследовательский и проектный институт природного газа и газовых технологий (ООО «ТюменНИИгипрогаз»)

Защита состоится 20 июля 2004 года в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.273.01 при ТюмГНГУ по адресу: 625039, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТюмГНГУ по адресу: 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72.

Автореферат разослан 20 июля 2004 года

Ученый секретарь

диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

В.П. Овчинников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Процесс добычи нефти, главная цель которого получение товарной нефти для потребителя, заключается в извлечении скважинной продукции, ее транспорта по внутрипромысловым трубопроводам, разделении на нефть, газ и воду и их целесообразное использование. В процессе нефтедобычи в составе скважинной продукции поступает попутный газ, который зачастую сжигают на промыслах, что приводит к необоснованным потерям углеводородного сырья и ущербу экологии всего региона. Известен путь рационального использования нефтяного газа – подача его в магистральный газопровод. Для этого необходима очистка и осушка газа до показателей, соответствующих нормативам газопровода, с применением комплекса сооружений и технологических схем извлечения водяных паров и углеводородных компонентов, способных в условиях трубопровода конденсироваться. Осушку газа производят с помощью жидких (абсорбционный способ), твердых (адсорбционный способ) поглотителей, низкотемпературной сепарации и конденсации. Абсорбенты (гликоли, растворы хлористого кальция и лития), адсорбенты (оксид алюминия, силикагель, цеолиты) регенерируются в комплексах для осуществления десорбционных процессов.

Как показывает практика подготовки попутного газа к транспорту с применением абсорбции, адсорбции, низкотемпературной очистки с помощью холодильных машин и других методов их применение требует значительных капитальных и энергетических затрат. Установлено, что более экономичной является газодинамическая технология, основанная на использовании имеющегося перепада давления (1,3-1,6) МПа в специальных устройствах, таких как: пульсационные охладители газа (ПОГ), волновые детандеры (ВД), газодинамические осушители (ГДО), вихревые трубы (ВТ). Однако, небольшой перепад давлений попутного газа практически исключает возможность реализации традиционной схемы низкотемпературной сепарации (НТС),

основанной на эффекте дросселирования. Расширители с более высоким температурным КПД (турбодетандеры, ВД, ПОГ) весьма сложны и ненадежны в эксплуатации. Технология с применением ГДО практически не проработана. Наиболее целесообразна и эффективна технология для осушки нефтяного газа, основанная на вихревом эффекте, которая реализована в других процессах газовой, нефтяной и химической промышленности. Вихревой эффект (эффект Ранка-Хилша), реализуемый в частности в регулируемой трехпоточной вихревой трубе (ТВТ), заключается в температурном разделении газа на холодный и горячий потоки. Наряду с получением холода, ТВТ обеспечивает отделение жидкости непосредственно из закрученного потока, отводимой в виде третьего потока.

Анализ работы систем нефтегазосбора и подготовки показывает, что промысловый процесс осушки газа может существенно отличаться от термодинамически равновесного, причем степень неравновесности обусловлена техническими особенностями сепарационных узлов. При проектировании обустройства нефтяных месторождений и оптимизации работы промыслового оборудования необходима количественная и качественная оценка состояния попутного газа в конце принятого для конкретного месторождения технологического цикла подготовки скважинной продукции. Поэтому решение задачи обеспечения внедрения экологически чистой и эффективной технологии с применением ТВТ возможно путем получения эмпирических данных при экспериментальном моделировании реальных условий осушки углеводородной смеси.

Цель работы

Повышение эффективности технологии подготовки попутного газа к транспорту путем применения и регулирования вихревого эффекта Ранка-Хилша в устройствах низкотемпературной осушки газа.

Основные задачи исследований

1. Выполнение технико-экономического обоснования целесообразности применения вихревой технологии и ТВТ при подготовке попутного газа нефтедобычи к трубопроводному транспорту.

2. Разработка конструкции ТВТ с узлом сепарации, адаптированной к технологическому процессу подготовки скважинной продукции нефтяных месторождений.

3. Аналитическое и экспериментальное изучение термодинамических и сепарационных характеристик вариантов конструкций вихревых труб в различных режимах работы.

4. Экспериментальное исследование термодинамической эффективности промышленного образца ТВТ при осушке попутного газа нефтедобычи.

5. Технико-экономическая оценка полученных результатов, опытно-промышленное внедрение, разработка нормативных документов.

Научная новизна работы

1. На основании экспериментального исследования сепарации попутного газа с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша при реализации на разных режимах работы и вариантах исполнения сепарационной части ТВТ установлено, что наилучшие показатели имеет схема с тангенциальными продольными щелями, равномерно расположенными по окружности.

2. Впервые получены экспериментальные данные об особенностях работы трехпоточной регулируемой вихревой трубы с разрывом закрученной струи при доле холодного потока $\mu = 1,0$ при подготовке попутного газа нефтедобычи с применением результатов стендовых испытаний работы моделей ТВТ диаметром 18 и 8 мм на воздухе.

3. Научно обоснована, с учетом экспериментальных данных, пульсационная концепция вихревого эффекта, позволившая интерпретировать экспериментальные результаты, полученные при работе вихревых труб в опытно-промышленном и промышленном масштабе.

Практическая ценность и реализация

Разработанная технология подготовки попутного газа нефтедобычи к транспорту низкотемпературным методом на базе ТВТ позволила обеспечить необходимую кондицию попутного газа для подачи его в магистральный газопровод. Сконструирована и запущена в эксплуатацию трехпоточная вихревая труба в составе установки с рекуперацией холода в теплообменнике на дожимной насосной станции (ДНС) «Загорская» предприятия ЗАО «Транс ЭКС».

Апробация результатов исследований

Основные положения работы были доложены на: V Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (г. Рыбинск, 2001 г.); научно-техническом совете предприятия ЗАО «Транс ЭКС» (г. Оренбург, 2002 г.); заседаниях кафедр: «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений» и «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений» (ТюмГНГУ, 2002-2003 гг.).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ, в том числе 4 статьи, свидетельство на полезную модель.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников (99 наименований) и приложения на 16 страницах. Изложена на 218 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 26 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности использования технологии, основанной на эффекте Ранка-Хилша, с применением трехпоточных вихревых труб для очистки попутного газа нефтедобычи, сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

В первом разделе рассмотрен широкий спектр технологических процессов, обеспечивающих необходимое качество попутного газа (абсорбция, адсорбция, низкотемпературная конденсация с помощью холодильных машин и др.). Однако эти процессы технологически сложны, требуют больших энергоматериальных затрат и обычно реализуются в рамках газоперерабатывающих заводов. Применение их в промышленных условиях проблематично. К характерным особенностям таких систем относится то обстоятельство, что в их массообменных аппаратах взаимодействие фаз осуществляется при относительно малых градиентах термодинамических и кинетических параметров (давление, температура, скорость течения газа и жидкости и др.), а также без существенной трансформации кинетической энергии входящего потока газовой смеси. Принципиально отличными от этих аппаратов являются устройства, в которых реализуется так называемая газодинамическая технология. В этих устройствах исходный газ, имеющий избыточную потенциальную энергию давления, либо разгоняется до звуковых и сверхзвуковых скоростей (с одновременной закруткой или без неё), либо с помощью специальных устройств переводится в пульсирующее состояние с определённой частотой и амплитудой. При этом проявляются достаточно интенсивные термические и фазовые эффекты разделения, которые во многих случаях можно использовать в технологии очистки и разделения газовых смесей, или (при необходимости) для простого их нагрева и охлаждения.

В этой связи изучена сущность вихревого эффекта, исследованы его основные параметры и характеристики, влияющие на эффективность применения вихревых труб при различных процессах, представлен аналитический обзор результатов исследований по разделению газовых смесей с применением вихревых труб. Отмечено, что эксперименты, проводимые рядом авторов по «сухому» компонентному разделению газовых смесей непосредственно в поле центробежных сил вихревых труб, не показали

количественного эффекта, который можно было бы использовать в промышленности.

Анализом результатов работ по использованию вихревых труб в установках НТС природного газа выявлено отсутствие технических решений по регулированию расхода газа через ВТ.

Изучены работы, связанные с исследованием и внедрением трехпоточных вихревых труб (с отбором жидкости непосредственно в ВТ) в газовой, нефтедобывающей и химической промышленности. Выявлено, что получены только конкретные показатели работы различных модификаций ТВТ в заданных условиях, но не изучен вопрос о взаимосвязи сепарационных и термодинамических характеристик ТВТ.

Выполнено технико-экономическое обоснование применения вихревой установки при подготовке попутного газа к транспорту на примере ДНС «Загорская». Расчет экономической эффективности проводился в соответствии с апробированными современными методиками оценки коммерческой эффективности внедрения разработок и определялся сроком окупаемости капитальных вложений, величиной ежегодной прибыли, получаемой за счет выработки товарного продукта (очищенного попутного газа), а также экологическим фактором от ликвидации вредных выбросов в атмосферу (снятие штрафных санкций). Продолжительность расчетного периода принята 11 годам (1 год - строительство; 10 лет - период эксплуатации). Проведенный расчет показал, что внедрение вихревой установки на указанном объекте позволит получить ежегодный чистый доход в размере 23639,4 тыс. рублей и расчетно окупить капитальные вложения на ее строительство за 2 месяца эксплуатации.

Во втором разделе представлены экспериментальные данные по исследованию термодинамических характеристик трехпоточных вихревых труб, которое было выполнено в связи с отсутствием опыта промышленной эксплуатации вихревых труб на углеводородных газах при отношении давлений

$\varepsilon < 2$. Известно, что в системе подготовки попутного газа нефтедобычи к транспорту данный параметр лежит в ограниченном интервале $\varepsilon = 1,3-1,5$. В этом режиме в сопловом вводе вихревой трубы имеет место дозвуковое истечение газа.

При проведении экспериментальных исследований в первую очередь был изучен эффект Ранка-Хиша, позволяющий вихревой трубе генерировать холод при высоком давлении исходного газа. Показатели ее работы при различных значениях доли холодного потока μ приведены в таблице 1 (режимы № 1-3). Как видно из результатов опытов, наблюдается типичная для вихревого эффекта зависимость ΔT_x от μ , при $\varepsilon = \text{const}$.

В последней графе представлена величина q , пропорциональная удельной холодопроизводительности, которая практически не зависит от μ , что не свойственно для вихревого эффекта. Анализ показал, что это связано с аномально высоким значением величины ΔT_x при $\mu = 1$, которое повышает

Таблица 1 – Показатели работы ТВТ при различных долях холодного потока

№ режима	Давление, Мпа			ε	Степень открытия сопла, %	Температура, °С				ΔT_x	μ	$q = \mu \cdot \Delta T_x, \text{°С}$
	$P_{\text{вх.у}}$	$P_{\text{вх.тр}}$	P_x			$T_{\text{вх.у}}$	$T_{\text{вх.тр}}$	T_x	$T_{\text{вых.т}}$			
1	2,8	2,8	0,5	4,83	30,0	13,5	+0,5	-	-13,0	36,5	0,56	20,4
2	2,7	2,7	0,5	4,67	-	12,0	-3,0	-	-5,0	28,0	0,7	19,6
3	3,0	2,9	0,5	5,00	30,0	13,5	+1,0	-	-13,0	20,5	1,0	20,5
4	5,2	5,4	3,8	1,41	9,0	12,0	+7,0	-6,0	-2,0	13,0	1,0	13,0
5	5,4	5,4	3,8	1,41	12,0	12,0	+7,5	-5,0	-2,0	12,5	1,0	12,5
6	4,95	4,95	2,5	1,94	-	16,0	+13,0	-3,5	-	16,5	1,0	16,5
7	4,1	-	3,5	1,17	20,0	15,0	+10,0	+6,0	+8,0	5,0	1,0	5,0
8	4,0	-	3,5	1,14	20,0	14,0	+10,0	+6,0	+7,0	4,0	1,0	4,0

эффект дросселирования более чем в 2 раза ($\Delta T_{др}=9,6$ °С, расчет). Данное явление нельзя объяснить неадиабатностью ТВТ, т.к. нагрева трубы горячего потока не наблюдалось. Обнаруженный эффект вызывается процессом разрыва вихревого потока в непосредственной близости от соплового ввода.

Последующие исследования вихревой установки проводились при параметрах близких к параметрам работы при подаче нефтяного газа в магистральный газопровод. ТВТ работала при $\mu=1$ и $\varepsilon=1,4$ (таблица 1, режимы 4-6). Понижение температуры газа в теплообменнике составило (4,5-5) °С (режимы 4,5), а T_x = от минус 5 °С до минус 6 °С. Замеры точки росы очищенного газа при данном уровне температуры холодного потока дали следующие результаты: по влаге $T_{рос}$ = минус 9 °С, по углеводородам $T_{рос}$ = минус 7 °С. В таблице 1 приведены также режимы работы вихревой установки, когда (режимы 7,8) она работала при очень небольшом отношении давлений ($\varepsilon=1,14-1,17$) и $\mu=1$. Несмотря на то, что температура холодного потока была $T_x=6$ °С, наблюдалась хорошая осушка по воде. Точка росы составляла в основном минус 17 °С.

Проведен сравнительный анализ термодинамической эффективности разработанной конструкции ТВТ диаметром 75 мм с эффективностью вихревых труб, разработанных и испытанных другими авторами на углеводородных газах. Сравнение проводили по показателю политропы n (таблица 2), который инвариантен к параметрам ε и температуре газа на входе в ВТ. В этом случае при фиксированной доле холодного потока μ термодинамические характеристики ВТ сопоставляются как бы в одинаковых условиях эксплуатации. Для наглядности сравнения различных конструкций вихревых труб введен приведенный показатель эффективности θ , который позволяет соотнести показатель политропы конкретной вихревой трубы к максимально достигнутой величине n_{max} в ряду сравниваемых вихревых труб.

$$\theta = \frac{(n-1) \cdot 100}{(n_{max} - 1)} \%$$

Как видно из таблицы 2, испытанная конструкция ТВТ диаметром 75 мм

Таблица 2 – Эффективность вихревых труб различного диаметра

Вид углеводородного газа	$D_{тр},$ мм	$P_{вх.тр},$ МПа	$T_{вх.тр},$ °С	μ	ε	n	$\theta, \%$
Попутный	150	3,80	40	0,70	8,0	1,028	34
Природный	147	0,66	20	0,70	4,1	1,036	43
Природный	55	3,30	-26	0,68	4,2	1,050	60
Попутный	100	0,55	20	0,70	3,7	1,053	64
Природный	70	0,92	-22	0,70	3,6	1,065	78
Природный	143	4,2	13	0,70	4,9	1,083	100
Попутный	50	1,75	-0,5	0,70	3,1	1,044	53
Попутный	75	2,7	-0,3	0,70	4,6	1,052	63

вышла на уровень лучших, работающих на углеводородных газах.

Экспериментальные исследования ТВТ при низком давлении попутного газа (0,9-1,2) МПа проводили при трех вариантах узлов сепарации:

1. Кольцевая щель высотой 7 мм, отстоящая от среза сопла на расстоянии $\delta = 500$ мм;
2. Дырчатая перфорация - 1800 отверстий диаметром 3 мм, расположенных в шахматном порядке, $\delta = 325$ мм;
3. Шесть тангенциальных щелей шириной 8 мм, $\delta = 115$ мм.

На рисунке 1, в качестве примера приведены зависимости ΔT_x и ΔT_r от μ при степени открытия сопла $\alpha = 52$ %. Как видно из рисунка, максимальная температурная эффективность ТВТ соответствует варианту 1, наименее эффективен вариант 3. Однако, в связи с тем, что представленные зависимости получены при разных ε , провели также сравнение термодинамической эффективности ТВТ с различными узлами сепарации по показателю политропы n . Так, при $\alpha = 52$ % показатель политропы для первого варианта равен 1,074, для

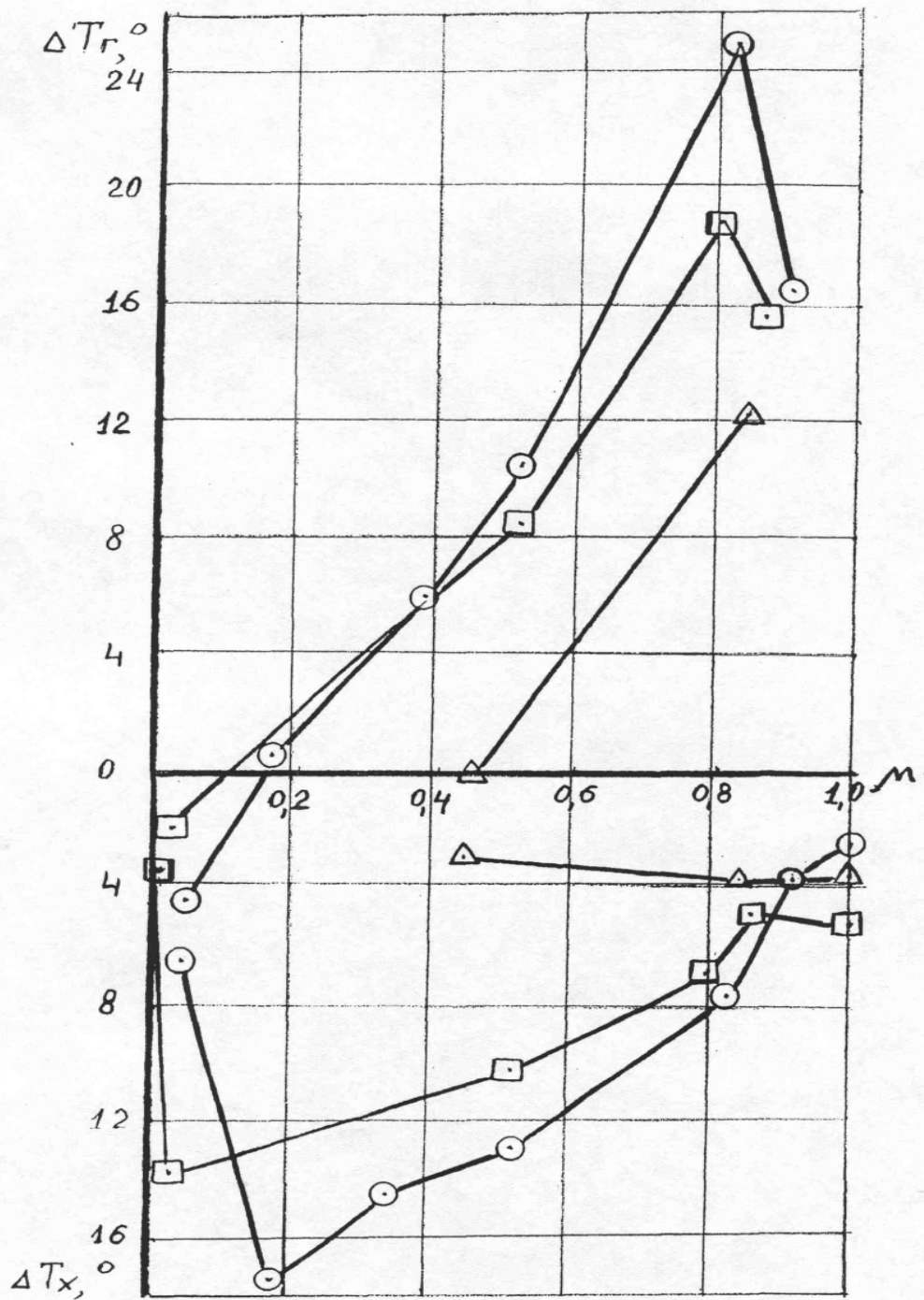


Рис. 1 Зависимость температурной эффективности ТВТ диаметром $D_{тр} = 75$ мм от доли холодного потока μ при $\alpha = 50\%$

□- вариант 2.1 $\epsilon_{cp}=1,57$

○- вариант 2.2 $\epsilon_{cp}=1,46$

△- вариант 2.3 $\epsilon_{cp}=1,16$

второго - $n=1,06$, третьего - $n=1,073$, т.е. температурная эффективность первого и второго вариантов практически одинаковая. В то же время при $\alpha=100\%$ (полностью открытое сопло) для варианта 1 $n = 1,095$. Это рекордное значение эффективности для вихревых труб, работающих на углеводородных газах (таблица 2). Для варианта 3: при $\alpha=100\%$, $n=1,03$.

Следует отметить, что параметр n для варианта 1 на $\alpha=30\%$ при низком давлении ($n=1,052$) практически совпал с показателем политропы при работе ТВТ при высоком давлении ($n=1,054$).

Из рисунка 1 видно, что в проведенных экспериментах, также как и в экспериментах при высоком давлении газа величина ΔT_x при $\mu=1$ превышает эффект дросселирования более чем в 3 раза. Например, для режима со вставкой 2: $\Delta T_x=5,3\text{ }^\circ\text{C}$, а $\Delta T_{др}=1,6\text{ }^\circ\text{C}$. Полученные данные еще раз подтверждают аномально высокое значение вихревого эффекта на ТВТ при $\mu=1$. Установлено, что увеличение расстояния установки сепарирующих элементов от соплового ввода увеличивает температурную эффективность трехпоточной вихревой трубы.

Экспериментальные исследования вихревого эффекта в режиме $\mu=1$ показали существенное отклонение величины эффекта охлаждения ΔT_x от эффекта дросселирования $\Delta T_{др}$. В связи с этим была проведена серия экспериментов на ТВТ-осушителе воздуха. В состав установки осушки воздуха входили: компрессорный агрегат производительностью до $3\text{ м}^3/\text{мин}$ с давлением на нагнетании до 10 МПа , ТВТ и ресивер.

Испытывали две модификации ТВТ-осушителей. Геометрические характеристики первой модификации ТВТ в мм: внутренний диаметр соплового блока - 18; ширина соплового ввода - 4,8; высота - 2,8; внутренний диаметр вихревой камеры - 16; длина - 1085; диаметр диафрагмы - 7; сепарационный зазор - ширина - 5; расстояние от края соплового ввода - 25.

Вторая модификация ТВТ, мм: размеры соплового блока, диафрагмы и сепарационного зазора сохраняются без изменения; внутренний диаметр вихре-

вой камеры - 8; длина - 300.

В таблице 3 представлены результаты эксперимента на ТВТ-осушителе при $\mu = 1$ в диапазоне $\varepsilon = 2,7-10,5$. Как видно из таблицы при $\mu=1$ наблюдается значительное превышение величины ΔT_x над $\Delta T_{др}$ (в 4-5 раз). На рисунке 2 сопоставлены холодо- и теплопроизводительности ТВТ – осушителя диаметром $D_{тр} = 8$ мм.

Таким образом, эксперименты, проведенные на ТВТ-осушителе воздуха, подтвердили значительное превышение величины ΔT_x над $\Delta T_{др}$ при $\mu=1$ (также как и в экспериментах на нефтяном газе).

В третьем разделе представлены результаты аналитических исследований следующих экспериментально установленных особенностей работы ТВТ, которые не могли быть объяснены с точки зрения существующих теорий вихревого эффекта:

1. Аномально высокая холодопроизводительность ТВТ при доле холодного потока $\mu=1,0$;
2. Работа ТВТ в режиме, когда точка росы осушаемого газа может иметь более низкую температуру, чем температура торможения газа холодного потока.

Необычная термодинамика ТВТ при $\mu=1,0$, а также несовпадение значений экспериментально определенных и расчетных долей холодного потока и удельных холодо- и теплопроизводительностей, рассчитанных по методике Ранка-Хилша, говорят о том, что в ТВТ (с разрывом вихревого потока) наблюдается нарушение классического уравнения энтальпийного теплового баланса для адиабатной двухпоточной вихревой трубы.

Изучение ряда работ по газодинамическим аппаратам, которые по функциональному назначению и конструктивно подобны вихревым трубам Ранка-Хилша, но не создают закрутки газового потока, позволило выявить, что они могут обеспечивать температурное разделение газа. В диссертации представлены результаты анализа данных ряда авторов, позволившие предло-

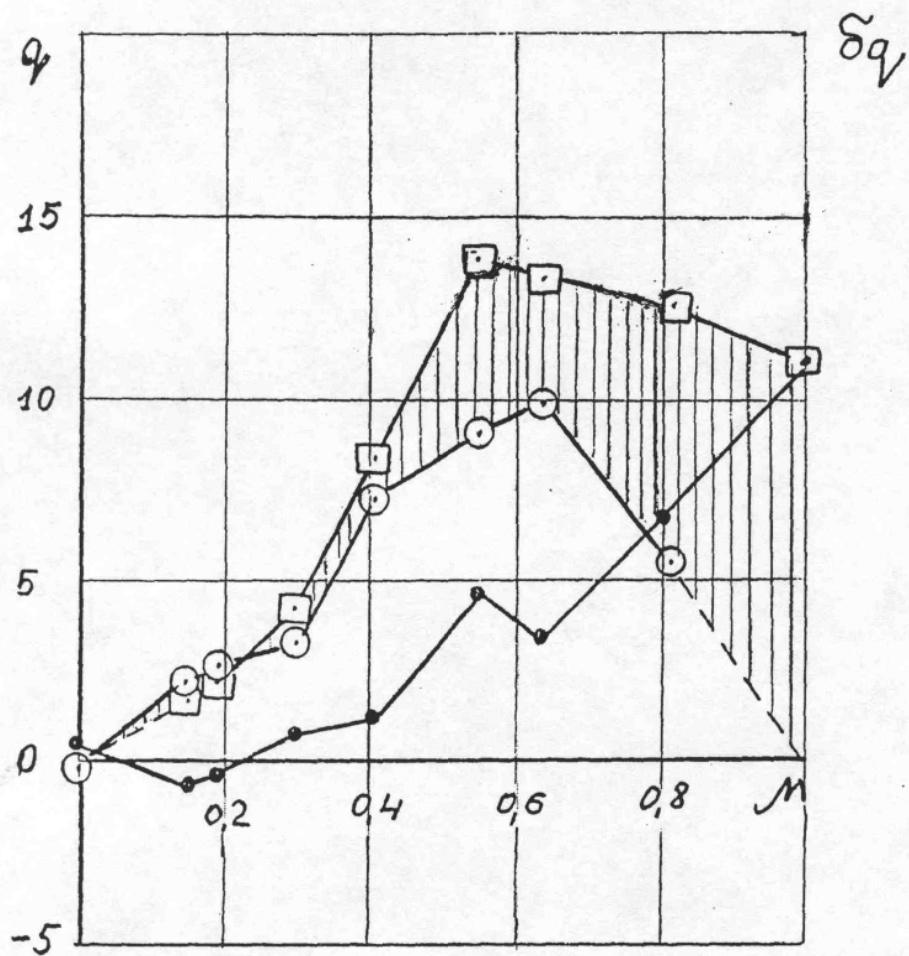


Рис. 2 Холодо – и теплопроизводительность ТВТ – осушителя в зависимости от μ

- - q_x , $D_{гр}$ 8 мм, $d_d=7$ мм
- - q_g , $D_{гр}$ 8 мм, $d_d=7$ мм
- - δq

жить концепцию температурного реверса потоков, выходящих из газового эжектора, положенную в основу волнового подхода к теории эффекта Ранка-Хилша. Она основана на многочисленных экспериментальных данных показывающих, что в вихревых трубах имеют место волновые (пульсационные) проявления, которые по своей энергетике сопоставимы с наблюдаемыми температурными эффектами.

В пространстве камеры смешения эжектора под воздействием истекающей высоконапорной струи возникают продольные и поперечные ударные волны сжатия и разрежения. Они образуются благодаря пульсациям самой высоконапорной струи, ее взаимодействию с газом и со стенками камеры. При этом речь идет не о турбулентных пульсациях, которые также будут иметь место в газовом потоке, а о макроволновом процессе, включающем турбулентность, как некий микропроцесс. Установлено, что продольные волны могут давать в газовом эжекторе эффект пульсационной трубы и тогда при сплошной тупиковой стенке должно наблюдаться нормальное распределение температуры, то есть газ в районе тупика нагревается, а отходящий через форкамеру поток оказывается охлажденным.

Теперь рассмотрим ситуацию с поперечными волнами. Они возникают и стабилизируются на некотором расстоянии от высоконапорного сопла и устойчиво существуют в объеме камеры смешения на определенной ее длине. На рисунке 3 приведена схема, проясняющая работу поперечных волн. Если из объема цилиндрической камеры смешения выделить мысленно цилиндрический элемент (диск) шириной dl и рассмотреть в нем распространение волн, то можно заметить, что каждый сектор с углом $d\varphi$ работает как элементарная пульсационная труба с глухой стенкой. Тогда интегрально по сечению радиально пульсирующего диска dl возникает градиент температуры, то есть кольцо газа и цилиндрической стенки окажется нагретым, а приосевой цилиндр охлажденным. В пульсирующем элементе dl устанавливается определенный закон радиального распределения пульсаций

.3

-

.

давления и соответственно температуры торможения. Абсолютное значение этих величин зависит от текущего радиуса r и расстояния l от среза сверхзвукового сопла.

Благодаря такому механизму поперечного переноса тепла, в объеме камеры смешения эжектора возникает приосевая зона пониженной температуры (холодное ядро). Однако при отсутствии отбора газа из этого ядра, локальное понижение температуры газа не окажет заметного влияния на доминирующий процесс пульсационного разделения температур за счет поперечных волн. На выходе газа из камеры смешения в форкамеру холодные и горячие слои газа смешиваются, и в итоге устанавливается обычный тепловой баланс пульсационной трубы.

Картина меняется, если на торцевой стенке имеется центральное отверстие, через которое выходит часть газа. В этом случае холодное ядро деформируется в сторону отверстия и появляется возможность выхода через диафрагму холодного газа. Внутренний тепловой баланс эжектора по сравнению с вариантом глухой пробки становится другим: в форкамеру выходит уже менее охлажденный, или даже подогретый воздух.

Следует отметить еще один важный момент - влияние продольных и поперечных волн друг на друга и возможности перераспределения между ними энергии. Продольные волны передают свою энергию усиливающимся поперечным волнам и вследствие этого возникает ударно-волновое разделение газа на холодный (приосевые области) и горячий (периферия потока). Далее внешне все происходит как в обычной вихревой трубе: холодные слои газа выходят через диафрагму, а нагретые в противоположную сторону.

По сути дела схема работы ТВТ по ударно-волновому принципу остается той же, что и для эжектора. При закрутке газовой струи имеют место все те же продольные и поперечные волны, также происходит энергетический обмен между пульсирующими волнами. Но есть и отличия, т.к. энергетическое преимущество имеют поперечные волны и их «подпитка» продольными

волнами происходит на определенном расстоянии от соплового сечения, когда амплитуда поперечной волны значительно уменьшается по сравнению с первоначальной величиной (длинные цилиндрические трубы).

Представленный ударно-волновой механизм ни в коей мере не отменяет устоявшуюся картину закрученного потока в вихревой трубе, т.е. наличия внешнего и внутреннего вихрей. Естественно остается той же картина температурных полей в ТВТ и наличие градиента давления по радиусу в различных сечениях вихревой трубы. Изменяется только трактовка преимущественного механизма температурного расслоения газа, а именно: вместо хаотичных турбулентных пульсаций в радиальном направлении вводится волновой процесс, которому для передачи энергии не нужна мощная ротация газообразного вещества. Скорость распространения колебаний в газе соответствует скорости звука, поэтому, учитывая масштабы современных вихревых труб можно сделать вывод о практически мгновенном выходе их на рабочий режим, что подтверждается на практике.

В четвертом разделе приведены результаты исследования сепарационных характеристик конструктивных вариантов вихревой трубы при различных давлениях попутного газа, так как аналитическим изучением известных экспериментальных результатов выявлена только качественная оценка сепарирующей способности ТВТ диаметром 50 мм.

В этой связи была разработана и установлена на ДНС «Загорская» (Оренбургская область) опытная установка производительностью до 10 000 $\text{нм}^3/\text{час}$ (рисунок 4). Попутный газ после сепаратора 1 поступал в трубное пространство теплообменника 2, где охлаждался холодным потоком из ТВТ. При этом происходила конденсация высших углеводородов и паров воды. Далее попутный газ направлялся в трехпоточную вихревую трубу 3, расширялся, сепарировался и разделялся на два потока - холодный и горячий. Холодный поток поступал в межтрубное пространство теплообменника, горячий смешивался с холодным потоком после теплообменника и далее

смешанный поток после окончательного отделения конденсата в сепараторе 4 поступал потребителю в магистральный газопровод. ТВТ рассчитана на расход попутного газа (6 500-10 000) $\text{нм}^3/\text{час}$.

На установке подготовки попутного газа нефтедобычи к транспорту с ТВТ диаметром 75 мм проведены эксперименты при достаточном количестве жидкой фазы, попадающей в ТВТ из рекуперационного теплообменника. Причем, изучался режим работы при низком и высоком значении давления нефтяного газа.

Исследования сепарационной возможности конструктивных вариантов ТВТ проведены при непосредственном замере количества жидкости ($Q_{\text{ж}}$) в третьем потоке в режимах ($\alpha=52-100$) % и в таблице 4 представлены сепарационные возможности всех трех испытанных вариантов сепарационных узлов ТВТ. Выявлено, что наибольшей сепарационной эффективностью обладает модификация 3 с тангенциальными продольными щелями, равномерно расположенными по окружности. Дополнительные сепарационные щели варианта 3 значительно улучшают базовый вариант 1; наименьшую сепарационную возможность показала модификация 2 (дырчатая перфорация), которая не только ухудшает сепарационные показатели ТВТ, но и приводит к неустойчивой ее работе (возникают чрезмерные динамические и акустические перегрузки в режимах $\mu > 0,04$ и $\alpha = 100$ %).

Таким образом, в промышленных условиях, подтверждена возможность эффективной работы ТВТ при осушке без дополнительного потока газа через сепарационные элементы.

Это весьма важный результат, так как обеспечение такого потока приводит к усложнению технологической схемы установки подготовки нефтяного газа. Выявлено, что реализация вихревой технологии с применением ТВТ при небольшом отношении давлений сжатого газа на входе в трубу к давлению холодного потока обеспечила необходимый уровень осушки газа для нормального транспортирования по газопроводу.

Таблица 4 – Сепарационная эффективность узлов сепарации ТВТ
диаметром 75 мм

Конструктивный вариант	Давление, МПа		ε	Температура, °С				μ	α , %	ΔT_x	$\mu \cdot \Delta T_x$	$Q_{ж}$ л/час
	$P_{вх.тр}$	P_x		$T_{вх.у}$	$T_{вх.тр}$	T_x	T_r					
1	1,05	0,65	1,53	16,5	16,0		12,0	0,0	100	-	-	6,0
	1,05	0,6	1,64	17,5	12,0	-3,5	24,0	0,51	100	15,5	7,90	3,0
2	0,8	0,6	1,29	15,0	15,0	-	11,5	0,0	100	-	-	1,6
	0,9	0,6	1,43	17,0	16,5	-	13,0	0,0	52	-	-	4,0
	0,9	0,6	1,43	17,0	16,5	2,8	14,5	0,025	52	13,7	0,34	0,4
	0,9	0,6	1,43	17,5	14,5	4,3	23,0	0,51	52	10,2	5,20	0,2
	0,95	0,6	1,50	17,5	16,6	9,8	30,4	0,79	52	6,8	5,37	0,0
	1,1	0,7	1,50	17,5	14,9	9,6	-	1,0	52	5,3	5,30	0,0
3	1,05	0,6	1,64	16,5	16,6	-	12,6	0,0	100	-	-	17,7
	1,15	0,7	1,56	17,0	14,9	4,5	18,1	0,38	100	10,4	3,95	11,0
	1,2	0,65	1,73	17,2	14,4	8,5	21,0	0,68	100	5,9	4,01	8,0
	1,25	0,7	1,69	17,3	14,0	8,4	23,2	0,76	100	5,6	4,26	7,2
	1,2	0,7	1,63	17,4	13,5	7,8	-	1,0	100	5,7	5,70	21,4
	1,2	0,7	1,63	17,3	13,9	7,7	-	1,0	100	6,2	6,20	22,8

Основные выводы и рекомендации

1. Разработана технология подготовки попутного газа нефтедобычи к транспорту низкотемпературным методом с применением регулируемой трехпоточной вихревой трубы. Отличительная особенность данной технологии – работа ТВТ при небольшом отношении давлений $\varepsilon = 1,14-1,40$.

2. Разработана эффективная конструкция ТВТ, устанавливаемая в состав рекуперационной технологической схемы, позволившая обеспечить необходимую кондицию нефтяного газа для подачи его в магистральный газопровод.

3. В результате экспериментальных исследований термодинамической эффективности ТВТ диаметром 75 мм проведено сравнение ее параметров с ТВТ диаметром 50 мм, а также с другими вихревыми трубами с применением показателя политропы n и установлено ее преимущество для применения в составе рекуперационной технологической схемы.

4. Стендовыми исследованиями сепарационной способности ТВТ на разных режимах работы с использованием трех вариантов исполнения сепарационной части установлено, что оптимальной схемой является вариант с тангенциальными продольными щелями, равномерно расположенными по окружности.

5. Стендовыми исследованиями эффекта Ранка-Хилша обнаружены особенности работы ТВТ при доле холодного потока $\mu=1,0$ при работе на нефтяном газе. На основании этих особенностей разработана ударно-волновая концепция вихревого эффекта, позволившая интерпретировать экспериментальные результаты, полученные на ТВТ в промышленном и опытно-промышленном масштабе.

6. Результаты исследований апробированы и успешно внедрены в промышленное производство на ДНС «Загорская». Экономический эффект от внедрения составил более 24 млн. рублей в год.

Обозначения

$D_{тр}$ -- внутренний диаметр вихревой трубы (мм)

d_d -- диаметр диафрагмы (мм)

n -- показатель политропы

P -- давление газа (МПа, кгс/см², ати, бар)

$q = \mu \cdot \Delta T_x$ -- параметр, характеризующий удельную холодопроизводительность вихревой трубы (°С)

- T -- температура торможения газа (К, °С)
 $T_{\text{рос}}$ -- температура точки росы (К, °С)
 ΔT_x -- эффект охлаждения газа в вихревой трубе (К, °С)
 ΔT_r -- эффект нагрева газа в вихревой трубе (К, °С)
 $\Delta T_{\text{др}}$ -- эффект Джоуля-Томпсона (К, °С)
 α -- степень открытия сопла, %
 δ -- расстояние от среза сопла до сепарационного зазора (мм)
 ε -- отношение давлений
 μ -- доля холодного потока
 θ -- приведенный показатель эффективности, %
 $Q_{\text{ж}}$ -- количество жидкости в третьем потоке, л/час
 d_l -- ширина диска цилиндрической камеры смешения
 $d\gamma$ -- угол
 r -- текущий радиус
 l -- расстояние от среза сверхзвукового сопла

Индексы

- вх.тр -- вход в вихревую трубу
 вх.у -- вход в установку
 вых.т -- выход из теплообменника
 ср -- усредненное значение параметра
 х -- холодный поток

Аббревиатуры

- ВД -- волновой детандер
 ВТ -- вихревая труба
 ГДО -- газодинамический осушитель
 ДНС -- дожимная насосная станция
 НТС -- низкотемпературная сепарация
 ПОГ -- пульсационный охладитель газа
 ТВТ -- трехпоточная вихревая труба

Основные положения диссертации нашли отражение в следующих печатных работах:

1. Гусев А.П., Система подготовки попутного газа нефтедобычи к транспорту с применением регулируемой трехпоточной вихревой трубы / А.П. Гусев, Р.М. Исхаков, М.А. Жидков, Г.А. Комарова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2000. - № 7. - С. 16-18.

2. Жидков М.А., Особенности термодинамических характеристик трехпоточных вихревых труб для очистки и осушки технологических газов / М.А. Жидков, Г.А. Комарова, А.П. Гусев, С.И. Грачев // Холодильная техника. -2001. - № 1. -С. 12-14.

3. Жидков М.А., Взаимосвязь сепарационных и термодинамических характеристик трехпоточных вихревых труб / М.А. Жидков, Г.А. Комарова, А.П. Гусев, Р.М. Исхаков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2001. - № 5. – С. 8-11.

4. Свидетельство на полезную модель № 18945 (РФ). Вихревая труба // Шайхутдинов Р.М., Жидков М.А., Гусев А.П., Громов В. В. // БИ. - 10.08.2001. -№ 22.

5. Жидков М.А., Применение регулируемых и трехпоточных вихревых труб в химической, газовой и нефтедобывающей промышленности / М.А. Жидков, Г.А. Комарова, А.П. Гусев, С.И. Грачев // Сб. трудов. Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды. - Рыбинск, 2001. -С. 46.

Подписано к печати

Бум. писч. № 1

Заказ №

Усл. изд. л. 1,0

Формат 60x84 ¹/₁₆

Усл. печ. л. 1,0

Отпечатано на RISO GR 3750

Тираж 120 экз.

Издательство «Нефтегазовый университет»

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38

Отдел полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52