

На правах рукописи

РЯБОВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОЧИСТКИ И ОСУШКИ
НЕФТЯНОГО ПОПУТНОГО ГАЗА**

Специальность 25 00 17 – Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Тюмень – 2007

Работа выполнена в научно-исследовательском и проектном институте технологий строительства скважин (НИПИ ТСС) при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет» (ТюмГНГУ) Федерального агентства по образованию

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Овчинников Василий Павлович, ТюмГНГУ

Официальные оппоненты: – доктор геолого-минералогических наук
Лапердин Алексей Николаевич,
ООО «ТюменНИИгипрогаз»
– кандидат технических наук, доцент
Леонтьев Сергей Александрович,
кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений» ТюмГНГУ

Ведущая организация – Открытое акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт нефтяной промышленности» (ОАО «СибНИИНП»)

Защита состоится 5 октября 2007 года в 11-00 часов 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 библиотечно-информационном центре ТюмГНГУ по адресу 625039, г Тюмень, ул Мельникайте, 72, каб 32

Автореферат разослан 5 сентября 2007 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



В.П. Овчинников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время в России осваивается более 1200 нефтяных, нефтегазовых и нефтеконденсатных месторождений. При их разработке в скважинной продукции зачастую содержится попутный газ, который сжигают на промыслах. Годовые потери этого ценного сырья и энергоносителя по стране составляют около 15 млрд кубометров. Сжигание его на факелах приводит не только к невосполнимым потерям углеводородов, но и наносит экологический ущерб окружающей среде.

Известны пути утилизации нефтяного газа – это подача его в магистральный газопровод либо использования в качестве горючего в газотурбинных и газопоршневых электростанциях. Для этого требуется, как правило, компрессия низконапорного нефтяного газа, его очистка и осушка до действующих нормативов с применением оборудования и соответствующих технологических схем, которые позволяют извлечь пары воды и высококипящие углеводородные компоненты.

Технологические аппараты и схемы осушки, очистки и разделения углеводородных газов, основанные на процессах абсорбции, адсорбции и низкотемпературной конденсации с применением холодильных машин, требуют значительных энергоматериальных и эксплуатационных затрат. Это делает их нерентабельными в промысловых условиях, особенно на малых месторождениях. Продиктованное экономической целесообразностью ограничение перепада давления попутного газа, создаваемого с помощью компрессии, практически исключает возможность реализации традиционной схемы низкотемпературной сепарации, основанной на эффекте Джоуля-Томсона. Турбодетандеры весьма сложны и дороги в эксплуатации при малорасходных потоках.

Более экономичными являются низкотемпературные процессы, основанные на расширительных газодинамических аппаратах, в которых потенциальная энергия давления высоконапорного газа преобразуется либо в звуковые и сверхзвуковые течения (газодинамические осушители, вихревые сепараторы,

трубы Леонтьева, сверхзвуковые сепараторы Twister и 3-S), либо в пульсации с определенной частотой и амплитудой (пульсационные охладители газа, волновые детандеры) В них наряду с генерацией холода создаются термодинамические условия (в частности, низкая статическая температура высокоскоростного потока), обеспечивающие конденсацию компонентов, которые в жидком состоянии могут быть выведены из газа за пределы устройства

В ряду газодинамических аппаратов особое место занимают вихревые трубы (ВТ), в которых одновременно реализуются и температурные и фазовые эффекты Если другие газодинамические расширители в части реализации еще не вышли за рамки опытно-промышленных испытаний или единичного внедрения, то ВТ постепенно заполняют свою технологическую нишу Их эффективность и надежность в работе убедительно подтверждается многолетней эксплуатацией на ряде предприятий газовой, нефтедобывающей и химической отраслей промышленности

По температурной эффективности ВТ занимают промежуточное положение между дросселем и детандером Наряду с генерацией холода, они, в своей трехпоточной модификации, обеспечивают одновременно конденсацию и отделение жидкости из закрученного потока Однако в теоретическом и эмпирическом аспектах трехпоточная вихревая труба (ТВТ) еще недостаточно изучена, что вызывает определенные затруднения при проектировании обустройства нефтяных месторождений с ее применением Кроме того, даже более высокая температурная эффективность ВТ по сравнению с дросселем не всегда может обеспечить необходимые параметры подготавливаемого газа, если технологическая схема вихревой установки (ВУ) несовершенна в части рекуперации холода всех технологических потоков, а также не учитывает возможность использования охлаждающего потенциала других (внешних) технологических источников промысла

Цель работы

Повышение эффективности подготовки попутного нефтяного газа к транспорту в магистральные трубопроводы с применением вихревых труб Ранка-Хилша

Основные задачи исследований

- 1 Разработка методики расчета эффективности процесса конденсации компонентов в вихревой трубе
- 2 Экспериментальные исследования термодинамических и сепарационных характеристик высокопроизводительной ТВТ
- 3 Разработка оптимальной конструкции сепарационного узла ТВТ при работе на нефтяном и природном газе
- 4 Исследование вариантов технологических схем подготовки нефтяного газа с вихревыми трубами двухпоточной и трехпоточной модификации, в том числе схем с внутренним холодильным циклом. Разработка технологической схемы с ТВТ установки подготовки попутного нефтяного газа (УПГ) и получения широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) Загорского и Лебяжинского нефтяных месторождений
- 5 Анализ результатов эксплуатации реализованной УПГ с применением трехпоточных вихревых труб в рекуперационной схеме с внутренним холодильным циклом и с использованием внешних источников дополнительного холода

Научная новизна выполненной работы

- 1 Установлено наличие сверхзвукового течения в ВТ с числом Маха до $M = 1,75$
- 2 Установлено преимущество конусно-цилиндрической сепарационной насадки по сравнению со щелевой при работе ТВТ на углеводородном газе, содержащем большое количество конденсирующихся компонентов
- 3 Научно обоснованы технологические схемы очистки и осушки углеводородных смесей с применением двухпоточных и трехпоточных вихревых труб, в том числе с внутренним холодильным циклом и с использованием внешних источников дополнительного холода
- 4 Проанализированы результаты эксплуатации первой в мировой практике системы очистки и осушки низконапорного нефтяного газа с применением компрессии и трехпоточных вихревых труб в технологической схеме с внутренним холодильным циклом и с использованием холода внешних технологических источников

Практическая ценность и реализация

1 Разработана и реализована на установке комплексной подготовки нефти и газа ДНС «Загорская» ООО «Терминал» низкотемпературная технология подготовки низконапорного попутного газа на базе компримирования и трехпоточных вихревых труб, позволившая обеспечить необходимую точку росы попутного газа по воде и углеводородам перед подачей его в магистральный газопровод Оренбург-Самара. При этом получаемые сжиженные углеводороды (СУГ) реализуются в качестве сырьевого продукта – ШФЛУ.

2 По результатам внедрения предложенной технологии подготовки попутного газа получен годовой экономический эффект (2006-2007 гг.) в сумме 199 010 тыс. рублей.

3 Выданы рекомендации по разработке системы утилизации попутного газа нефтедобычи с применением вихревой технологии для Капитоновского месторождения предприятия ОАО «Южуралнефтегаз», вводимой в эксплуатацию в 2007 году.

4 Выдано техническое предложение на разработку двух технологических линий установки подготовки попутного нефтяного газа для месторождения «Кожасай» (Республика Казахстан) с применением сепарирующих и холодообразующих ТВТ.

Апробация результатов исследований

Основные положения работы были доложены на научно-техническом совете Рыбинской государственной авиационной технологической академии (Рыбинск, 2006 г.), научно-техническом совете предприятия ООО «Терминал» (Оренбург, 2006 г.), заседаниях кафедр «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений» и «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений» ТюмГНГУ (Тюмень, 2006-2007 гг.)

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 5 статей и получено положительное решение госпатента РФ по одной заявке на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, основных

выводов и рекомендаций, списка использованных источников (88 наименований) и приложение на 18 страницах Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка и 56 таблиц

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследования, их научная новизна и практическая значимость

В первом разделе проанализирована работа вихревых труб, в основном трехпоточных, и других газодинамических аппаратов, по механизму функционирования наиболее близких к ТВТ, в том числе вихревых сепараторов (ВС), газодинамических осушителей (ГДО), сверхзвуковых сепараторов Twister и 3-S (supersonic separation)

Конструктивно ВС и ГДО идентичны В них природный газ закручивается до околозвуковых скоростей в завихрителе, расположенном в головной части аппаратов В струе газа происходит конденсация углеводородов и коагуляция влаги Центробежные силы отбрасывают капли жидкости на внутреннюю цилиндрическую стенку, откуда жидкость вместе с газом отдувки отводится через сепарационные щели Несмотря на обнадеживающие результаты испытаний, сведения о промышленном использовании ВС и ГДО отсутствуют

В аппарате Twister сепарация сверхзвукового потока осуществляется с помощью закрутки газа на «сверхзвуковой лопасти» При этом отбор газожидкостной фракции с внутренней стенки аппарата обеспечивается либо с помощью сепарационного зазора, либо посредством щелей в сепарационной трубе В идентичном сепараторе 3-S завихрение потока, как и в ВС, создается с помощью завихряющего устройства в напорной камере перед соплом Ловалья, принцип отбора жидкости аналогичен аппарату Twister На сегодня в России метод сверхзвуковой сепарации опробован только в опытно и опытно-промышленном масштабе

Все эти устройства, несмотря на определенные различия, объединяет наличие механизма конденсации компонентов газовой смеси в высокоскоростном

потоке, имеющем низкую статическую температуру. При этом газ в них разгоняется от околосвуковых до сверхзвуковых скоростей. Конструктивно газодинамические аппараты также похожи. Они имеют критические сечения, камеры фазовых переходов и энтальпийного (для ВТ) разделения, узлы сепарации и выводы разделенных потоков. Но если в ВТ превалирующее значение имеет тангенциальный ввод и первоначальная закрутка газа, обеспечивающая энтальпийное разделение газа, то в основу конструкции других газодинамических аппаратов положено сопло Ловала и конфузор для частичного восстановления давления газа. Закрутка потока в этих аппаратах играет вспомогательную роль, позволяющая только отделить дисперсную жидкость в поле центробежных сил. Процесс энтальпийного разделения потоков в этих аппаратах отсутствует. В этом заключается основное отличие и преимущество вихревых труб Ранка-Хилша от ВС, ГДО и сверхзвуковых сепараторов Twister и 3-S.

Трехпоточные вихревые трубы, по конструктивным компонентам наиболее похожие на сепараторы 3-S, работают в промышленности и поэтому изучены в большей степени и в части генерации холода, и в части определения сепарационных характеристик. Однако пока не найдена оптимальная конструкция сепарирующего узла ТВТ, позволяющая эффективно отделять жидкую фракцию, не оказывая при этом негативного влияния на вихревой эффект. Остается невыясненным также вопрос о наличии сверхзвукового течения газа в вихревой трубе и отсутствует методика расчета процесса конденсации примесей в скоростном потоке ВТ.

Во втором разделе представлена разработка методики расчета параметров конденсации компонентов в ВТ, основанная на оценке скорости истечения газа из сопла и расчете соответствующей статической температуры с использованием следующих показателей: число Маха ($M = v/a$), скорость звука ($a = \sqrt{\kappa g R T}$), критическая скорость при $M = 1$ ($v_{кр}^2 = a^2 = 2 \kappa_{в} [\kappa_{в} + 1]^{-1} R_{в} T_{в}$), скорость газа при $M > 1$ ($v = [2 \kappa_{в} (\kappa_{в} + 1)]^{-1} R_{в} T_{в}$)^{0,5} M).

Число Маха определялось из выражения

$$M^2 = 2(\kappa_{в} - 1)^{-1} [(P_{в} / P_{ст})^{(\kappa_{в} - 1) / \kappa_{в}} - 1], \quad (1)$$

статическая температура при $M = 1$ из

$$T_{ст} = T_B [2(\kappa_B + 1)^{-1}], \quad (2)$$

статическая температура при $M > 1$ из

$$T_{ст} = T_B [2(\kappa_B + 1)^{-1}] [1 + 0,5(\kappa_B - 1)] / [1 + 0,5(\kappa_B - 1) M^2] \quad (3)$$

Статическое давление на выходе из сопла ($P_{ст}$) находили из соотношения

$$P_{ст} = \pi P_x \quad (4)$$

При этом статическую степень расширения ($\pi_{ст}$) определяли из имеющихся в литературе экспериментальных данных А В Мартынова и В М Бродянского, исходя из параметров работы исследуемой вихревой трубы. Значения величины $\pi_{ст}$ представлены в таблице 1. В выше представленных выражениях κ_B – показатель адиабаты, P_B , P_x , T_B – соответственно давления, температура в точках, указанных на рисунке 2 (на входе в ТВТ, выходе из ТВТ в потоке холодного газа), μ – доля холодного потока ($\mu = G_x / G_B$ или $\mu = V_x / V_B$), π – степень расширения ($\pi = P_B / P_x$)

Таблица 1 – Зависимость $\pi_{ст}$ от параметров работы вихревой трубы π и μ

μ	$\pi_{ст}$							
	π							
	1*	2	3	4	5	6	8	10
1,0	1,00	1,50	1,90	2,20	2,45	2,60	2,84	3,00
0,8	1,00	1,45	1,80	2,15	2,40	2,53	2,75	2,90
0,5	1,00	1,35	1,75	2,00	2,20	2,30	2,45	2,58
0,3	1,00	1,30	1,70	1,90	2,10	2,20	2,33	2,45
0,2	1,00	1,27	1,67	1,85	2,05	2,15	2,27	2,39

Примечание * - теоретическое значение

Приведенные выше соотношения и данные таблицы 1 позволяют оценить термодинамические параметры высокоскоростного потока ($P_{ст}$ и $T_{ст}$), что в свою очередь дает возможность по имеющемуся компонентному составу на входе в ВТ рассчитать фазовое равновесие компонентов и сопоставить расчетный компонентный состав газа с данными хроматографического анализа холодного потока ВТ.

Расчет проводится методом последовательных приближений, находя величину M , соответствующую компонентному составу газа холодного потока

ВТ, полученному в непосредственном эксперименте Алгоритм расчета следующий

- имея исходные данные по режиму работы ВТ (P_b , P_x , T_b , состав газа на входе в ВТ), по таблице 1 находится значение параметра $\pi_{ст}$ и далее по соотношению (4) значение $P_{ст}$, которое в дальнейших расчетах считается величиной постоянной,

- зная исходный состав газа, определяется показатель адиабаты κ_a ,

- задается первоначальное значение числа Маха (M), и далее по соотношениям (2) или (3) рассчитывается статическая температура $T_{ст}$,

- исходя из полученных $P_{ст}$ и $T_{ст}$, а также состава исходного газа, в первом приближении рассчитывается фазовое равновесие компонентов с нахождением относительного количества и состава фаз,

- определяется наличие конденсата при заданных условиях и принятых допущениях Если конденсация компонентов отсутствует, задается меньшее значение величины $T_{ст}$ и вновь проводится расчет фазового равновесия,

- методом последовательных приближений находится величина $T_{ст}$ при которой начинается конденсация компонентов и далее по методу хорд находится значение $T_{ст}$, при которой расчетный состав холодного потока ВТ наиболее близок к составу реального анализа,

- имея искомое значение $T_{ст}$, из соотношения (3) находится число M

Результаты расчетов числа Маха для двухпоточной регулируемой вихревой трубы (ДВТ) производительностью до $V = 50\,000$ $\text{м}^3/\text{ч}$ и с внутренним диаметром $D_{гр} = 143$ мм представлены в таблице 2, а состав природного газа по потокам ДВТ в таблице 3, где β_c – степень открытия соплового ввода ДВТ

Таблица 2 – Расчет числа Маха при работе ДВТ на природном газе

Расчетные точки	Избыточное давление, МПа		Температура, °С		Отношение давлений		Число Маха	Степень выделения углеводородов ф, % мас
	P	$P_{ст}$	T	$T_{ст}$	π	$\pi_{ст}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вход в сопло	4,40	-	18	-	-	-	-	0,0

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Выход из диафрагмы	0,85	-	-32	-	4,7	-	-	0,0
Выход из сопла, вариант 1	-	1,8	-	-24	-	2,0	1,0	0,0
Выход из сопла, вариант 2	-	1,8	-	-39	-	2,0	1,2	0,0
Выход из сопла, вариант 3	-	1,8	-	-58	-	2,0	1,4	Свыше 0,0
Выход из сопла, вариант 4	-	1,8	-	-70	-	2,0	1,6	0,12*

Примечание * - расчетный состав газовой фазы см таблицу 3, графа 4

Таблица 3 – Компонентный состав газа при работе ДВТ с $\mu = 0,3$ и $\beta_c = 75\%$

Компонент	Концентрация, % об		
	Эксперимент		Холодный поток (расчет)
	Вход в сопло	Холодный поток	
1	2	3	4
Метан	98,335	98,370	98,36086
Этан	0,230	0,230	0,22969
Пропан	0,280	0,234	0,27626
Изобутан	0,050	0,035	0,04724
Н-бутан	0,060	0,055	0,05415
Изопентан	0,010	0,007	0,00701
Н-пентан	0,005	0,009	0,00279
Гексан	0,010	0,010	0,00164
Азот	1,010	1,040	1,01035
Диоксид углерода	0,010	0,010	0,01000

Как видно из таблицы 2, в режиме при $M = 1,4$ (вариант 3) зафиксировано начало конденсации компонентов При $M = 1,6$, когда $T_{ст} = (-70)^\circ\text{C}$, получается такая же степень выделения компонентов природного газа, как и по данным хроматографического анализа

Для нерегулируемой ТВТ производительностью до $V = 5\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ природного газа и с внутренним диаметром $D_{вп} = 147\ \text{мм}$ результаты расчета величины M представлены в таблице 4, а в таблице 5 – состав газа

Из таблицы 4 видно, что по данным хроматографического анализа холодного потока число Маха расчетно может достигать величины $M = 1,75$

Таблица 4 – Расчет числа Маха при работе ТВТ на природном газе

Расчетная точка	Избыточное давление, МПа		Температура, °С		Отношение давлений		Число Маха М	Степень выделения углеводородов ф, % мас
	P	P _{ст}	T	T _{ст}	π	$\pi_{ст}$		
Вход в сопло	0,560	-	20	-	-	-	-	0,0
Выход из диафрагмы	0,065	-	0		4,0			0,0
Выход из сопла, вариант 1	-	0,20	-	-16	-	1,85	1,00	0,0
Выход из сопла, вариант 2	-	0,20	-	-29	-	1,85	1,20	0,0
Выход из сопла, вариант 3	-	0,20	-	-55	-	1,85	1,57	Свыше 0,0
Выход из сопла, вариант 4	-	0,20	-	-68	-	1,85	1,75	1,95*

Примечание * - расчетный состав газовой фазы см таблицу 5, графа 5

Таблица 5 – Компонентный состав газа при работе ТВТ с $\mu = 0,2$ ($\beta_c = 100\%$)

Компонент	Концентрация, % об			
	Эксперимент			Холодный поток (расчет)
	Вход в сопло	Холодный поток	Горячий поток	
1	2	3	4	5
Метан	91,900	93,500	92,000	92,41229
Этан	4,200	3,380	3,820	4,19963
Пропан	1,200	1,000	1,440	1,14352
Изобутан	0,290	0,212	0,292	0,22996
Н-бутан	0,500	0,330	0,476	0,33272
Изопентан	0,190	0,086	0,154	0,05803
Н-пентан	0,130	0,067	0,123	0,02450
Неуглеводородные компоненты	1,590	1,425	1,695	1,59920

Следует отметить, что в данной ТВТ зафиксирована очистка не только холодного потока (например, $\Phi_{пент} = 52\%$ об), но в определенной степени и горячего потока ($\Phi_{пент} = 13\%$ об) В двухпоточных вихревых трубах при конденсации компонентов в сопле имеет место обогащение горячего потока

В третьем разделе описаны результаты экспериментов на установке с вы-

сокопроизводительной ТВТ ($D_{тр} = 85,0$ мм) в схеме без рекуперативного теплообменника, по сути являющейся газодинамическим вихревым осушителем газа. Принципиальная схема промышленной установки подготовки природного газа к транспорту, включающая последовательно 1-ю ступень сепарации (дроссель $Dp1$ и сепаратор $C1$), подогреватель газа ($\Pi1$) и вторую ступень сепарации (дроссель $Dp2$ и сепаратор $C2$) представлена на рисунке 1. ТВТ была смонтирована в параллель к дросселю $Dp2$. Схема ее привязки, включая приборы КИПиА, показаны на рисунке 2.

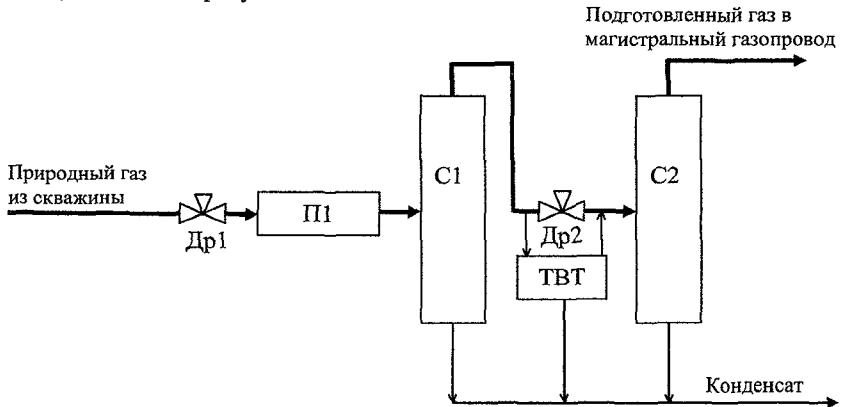


Рисунок 1 – Схема установки подготовки природного газа к транспорту с блоком трехпоточной вихревой трубой

В экспериментах было испытано два сепарационных узла. Первый узел представлял собой цилиндрическую втулку с внутренним диаметром равным $D_{тр}$ и с шестью продольными тангенциальными щелями длиной около $5,5D_{тр}$ и шириной 5 мм, равномерно расположенными навстречу закрученному потоку. Второй узел имеет втулку длиной $7,0 D_{тр}$, состоящую из цилиндрического и конического участков. Последний образовывал с трубой горячего потока кольцевой зазор, куда попадал конденсат, отброшенный центробежными силами на периферию.

Лучшие показатели и по температурной эффективности [$\Delta T_x = (T_b - T_x)$] и по сепарирующей способности показал второй вариант сепарационного узла,

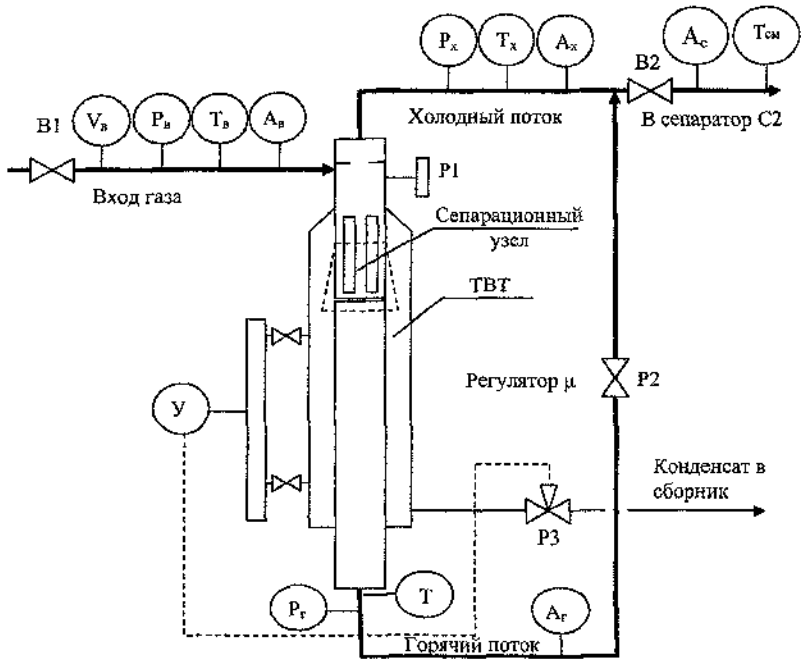


Рисунок 2 – Схема блока с трехпоточной вихревой трубой
 В1, В2 – вентили, P1, P2, P3 – регуляторы, V – расход,
 P – давление, T – температура, A – анализ, Y – уровень

Таблица 6 – Режимы работы высокопроизводительной ТВТ

№	$P_{в}$ (из), МПа	$P_{х}$ (из), МПа	π	$T_{вв}$ °C	$T_{хв}$ °C	$T_{гв}$ °C	$\Delta T_{хв}$ °C	$\Delta T_{др}$ °C	$\Delta T_{внх}$ °C	$V_{в}$, тыс. нм ³ /ч	$\mu_{др}$
1	10,8	5,3	2,0	61	28,0	42,0	33,0	22,1	10,9	20,7	-
2	11,3	5,4	2,1	48	15,0	25,0	33,0	25,6	7,4	20,7	-
3	11,3	5,6	2,0	48	15,0	19,0	33,0	24,5	8,5	20,7	-
4	10,8	5,4	2,0	54	23,0	44,0	31,0	22,7	8,3	18,6	0,60
5	10,8	5,4	2,0	52	22,0	35,0	30,0	23,0	7,0	18,6	0,46
6	9,7	5,5	1,8	54	28,5	46,0	25,5	17,9	7,6	21,2	0,57
7	10,0	5,7	1,7	44	18,5	38,5	25,5	19,3	6,2	21,2	0,69
8	9,9	5,5	1,9	59	26,5	40,5	32,5	18,0	14,5	21,2	-
9	9,9	5,5	1,9	60	28,0	42,0	32,0	17,9	14,1	21,2	-

характеристики работы которого приведены в таблице 6 В среднем из третьего потока ТВТ отбирали до 480 л/ч стабилизированного конденсата, что соответствует удельному количеству 23 см³/нм³ Это в три-пять раз больше показателей шелевой насадки

В таблице 7 представлены составы газа на входе и выходе (смешанный поток) из ТВТ Из этих данных видно, что имеет место очистка природного газа от высококипящих углеводородов Так, например, по пропану степень очистки составила $\varphi_{\text{проп}} = 19\% \text{ об}$, по бутанам в среднем $\varphi_{\text{бут}} = 33\% \text{ об}$, по гексану $\varphi_{\text{гек}} = 40,7\% \text{ об}$

Таблица 7 – Компонентный состав природного газа при работе ТВТ

Компонент	Концентрация, % об		Степень выделения φ , %
	вход	выход	
Метан	82,131	83,782	-
Этан	9,769	9,270	5,1
Пропан	3,420	2,768	19,1
Изобутан	0,259	0,173	33,2
Н-бутан	0,746	0,503	32,6
Изопентан	0,177	0,183	-
Н-пентан	0,197	0,180	8,6
Гексан + высшие	0,091	0,054	40,7
Азот	0,211	0,147	-
Диоксид углерода	2,999	2,938	-
Плотность, кг/нм ³	0,8895	0,8695	-

Для оценки скорости истечения газа в ТВТ был выполнен расчет по методике, изложенной в разделе 2, имея в виду исходный состав газа (таблица 7) для параметров режима № 4 (таблица 6), когда отношение давлений составляло $\pi = 2,0$ Расчет показал, что начало конденсации компонентов соответствует числу Маха $M = 1,37$, т.е. жидкая фаза образуется при сверхзвуковом истечении газа на выходе из сопла

В четвертом разделе обоснованы требования к качеству транспортируемого углеводородного газа Эти требования (точка росы по влаге и по углеводородам) диктуют уровень температур, который необходимо иметь в низкотемпературной схеме и это предопределяет структуру технологических схем

низкотемпературных установок с вихревыми трубами

Один из относительно простых вариантов технологической схемы подготовки нефтяного газа до необходимой кондиции представлен на рисунке 3. Этот вариант базируется на компремировании нефтяного газа с последующим его охлаждением и сепарацией образующейся жидкости. При этом в качестве охладителя сжатого газа используется низконапорный газ, поступающий во всасывающую линию компрессора. В этой схеме применяется неадиабатная ДВТ, которая может охлаждаться либо конденсатом, либо подготовленным газом. Данная схема рекомендуется к применению, когда необходима компактная УПГ в контейнерном исполнении и есть возможность создать значительное отношение давлений ($\pi > 4$), как, например, при подготовке нефтяного газа в качестве топлива для газопоршневых или газотурбинных электростанций.

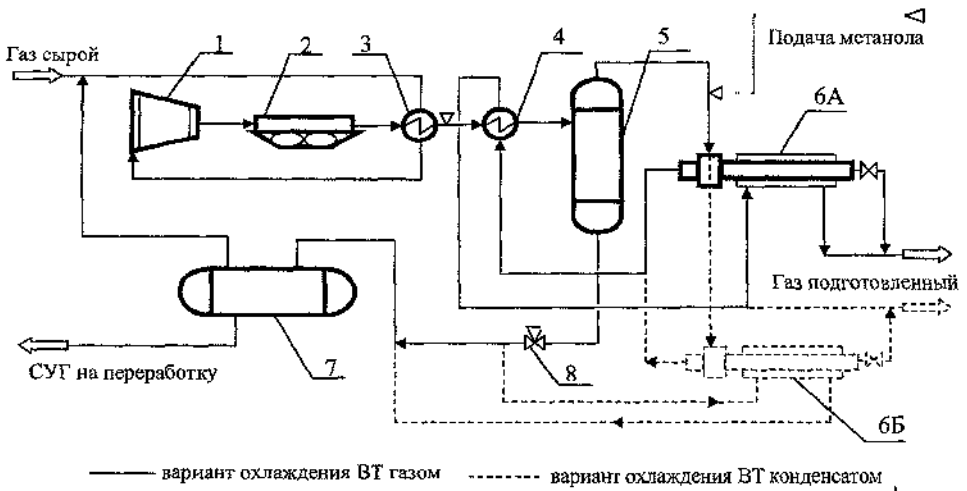


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки подготовки нефтяного газа с неадиабатной вихревой трубой

Технологический процесс низкотемпературной подготовки нефтяного газа осуществляется следующим образом. Очищенный от капельной жидкости и механических примесей нефтяной газ смешивается с газами выветривания из

сепаратора конденсата 7 и с температурой 12 °С и давлением 0,4 МПа отдает свой холод сжатому газу, нагреваясь при этом в охлаждающем теплообменнике 3 до температуры 28 °С, и затем сжимается в компрессоре 1 до давления 3,0 МПа, нагреваясь до температуры 146 °С. После компрессора 1 сжатый газ охлаждается сначала в аппарате воздушного охлаждения 2 до температуры 35 °С, а затем в охлаждающем теплообменнике 3 до температуры 24 °С и в рекуперативном теплообменнике 4 до температуры минус 10 °С. После чего охлажденный нефтяной газ подается в газовый сепаратор 5, где от него отделяется образовавшийся при охлаждении конденсат.

После отделения конденсата практически подготовленный нефтяной газ направляют на расширение до давления 0,3 МПа в неадиабатную вихревую трубу 6А, где он разделяется на горячий и холодный потоки. Холодный поток (85-90 % от исходного газа) с температурой до минус 40 °С направляется на рекуперацию в теплообменник 4, откуда выходит с температурой 9 °С и далее направляется в охлаждающую рубашку вихревой камеры ДВТ. Здесь он нагревается до температуры 15 °С и после смешения с охлажденным горячим потоком направляется потребителю. Газы выветривания из сепаратора 7 поступают на смешение с сырым газом.

При распределении технологических потоков в варианте с вихревой трубой 6А конденсат из сепаратора 5 дросселируется до давления 0,4 МПа и после разделения газожидкостной смеси в сепараторе 7 направляется на переработку. В варианте 6Б газожидкостная смесь после дросселя 8 сначала поступает в камеру охлаждения горячего потока неадиабатной ДВТ и затем в сепаратор 7. При этом, отдавая тепло горячего потока, ДВТ играет роль дегазатора конденсата.

Для предотвращения гидратообразования в трубопроводы на входе в теплообменник 4 и вихревую трубу 6 подается метанол.

Возможна реализация и более сложных схем УПГ на основе ДВТ, которые только генерируют холод, и ТВТ, которые наряду с генерацией холода обеспечивают низкотемпературную сепарацию компонентов. При этом, в зависимости от конкретной технологической задачи, предлагаются схемы с одной

ТВТ (одновременные генерация холода и сепарация), с двумя ТВТ (одна в основном сепарирующая, другая в основном холодообразующая) и с ТВТ и ДВТ (ТВТ – в основном сепарирующая, а ДВТ – только холодообразующая)

Например, схема с одной ТВТ включает четыре ступени охлаждения и сепарации сжатого газа после АВО, в том числе охлаждение низконапорным газом, поступающим на «вход» компрессора и охлаждение за счет рекуперации холода газовых и жидкостных потоков. Конечная, пятая, ступень охлаждения и сепарации нефтяного газа обеспечивается с помощью ТВТ

В таблице 8 представлены параметры пяти ступеней охлаждения сжатого газа после АВО, полученные путем расчета материально-теплового баланса схемы с одной ТВТ (летние условия работы)

Таблица 8 – Параметры ступеней охлаждения нефтяного газа в схеме с одной ТВТ

№	Наименование ступеней охлаждения	Давление, МПа	Перепад температуры, °С	Расход, кг/ч
1	Охлаждение исходным газом	7,000	11,28	14497,8 газ 6,2 жидкость
2	Первоначальное охлаждение конденсатом	6,998	2,39	14491,2 газ 12,8 жидкость
3	Охлаждение товарным газом	6,968	10,53	14146,7 газ 348,5 жидкость
4	Окончательное охлаждение конденсатом	6,968	3,30	13768,6 газ 386,1 жидкость
5	Охлаждение в ТВТ	6,968 - 5,250	7,34	12423,9 газ 1344,7 жидкость

Как видно из представленных данных, общее понижение температуры газа от выхода из АВО до выхода из ТВТ составляет 34,84 °С, причем основная доля охлаждения высоконапорного газа (21,81 °С) обеспечивается газовыми носителями. Количество сжиженных углеводородов по отношению к сырому газу составляет 7,26 % масс

Компонентный состав газа в ключевых точках представлен в таблице 9

Расчетная точка росы по углеводородам товарного газа равна $T_p = (-3)^\circ\text{C}$. Это даже несколько превышает требования ОСТ 51 40-93 для умеренного макроклиматического района в летний период эксплуатации

Таблица 9 – Расчетный состав фаз в схеме с одной ТВТ, мольн. доли

Компонент	Сырой газ	Вход в ТВТ	Товарный газ	ШФЛУ
Азот	0,034	0,033	0,035	0
Метан	0,701	0,697	0,724	0,001
Диоксид углерода	0,015	0,015	0,015	0,001
Этан	0,152	0,160	0,154	0,095
Пропан	0,070	0,072	0,059	0,409
Изобутан	0,006	0,006	0,004	0,085
Н-бутан	0,014	0,012	0,007	0,220
Изопентан	0,002	0,001	0,001	0,048
Н-пентан	0,003	0,002	0,001	0,064
Гексан	0,001	0	0	0,032
Метанол	0	0	0	0,008
Вода	0,002	0	0	0,036

В пятом разделе описаны результаты, полученные при эксплуатации установки подготовки газа, реализованной на ДНС «Загорская»

Принципиальная схема установки подготовки нефтяного газа приведена на рисунке 4. В ней также реализован принцип рекуперации холода технологических потоков УПГ и использования холода внешних источников. Причем охлаждение сжатого газа после АВО осуществляется не только сырым нефтяным газом, но и отсепарированной нефтью первой ступени сепарации. Кроме того, ввиду относительно небольшого располагаемого перепада давления на ТВТ, часть компрессорной мощности в данной схеме используется для дополнительной генерации холода во второй вихревой трубе. При этом организован внутренний холодильный цикл, где роль хладагента играет сам попутный газ. Конструкция сепарирующей ТВТ позволяет ее эксплуатировать как в трехпоточном, так, при необходимости, и в двухпоточном вариантах.

Процесс подготовки нефтяного газа протекает следующим образом. Сырой газ с первой ступени сепарации нефти, прошедший очистку от капельной жидкости и механических примесей в сепараторе ГС4 (здесь и в дальнейшем обозначения аппаратов приняты в соответствии с проектом), смешивается с газом рециркуляции, поступающим из ТВТ1 через теплообменник Т2. Этот смешанный поток проходит газосепаратор СВЦ, затем теплообменник Т5, где охлаждается сжатый газ, и смешивается с газами выветривания, поступающими из сепараторов

конденсата СК1 и СК2 Далее низконапорный газ проходит концевой газовый сепаратор ГС3 и в качестве исходного газа поступает в компрессор К, где дожимается до необходимого давления

После охлаждения сжатого газа в АВО, в теплообменниках Т4 и Т5, образуется газожидкостная смесь, которая разделяется в сепараторе С501 Отсепарированный газ проходит последовательно рекуперативные теплообменники Т1 и Т2 и, пройдя сепаратор ГС1, направляется на охлаждение и одновременную сепарацию в сепарирующую трехпоточную вихревую трубу ТВТ, где закручивается со сбросом давления до уровня давления транспортировки очищенного нефтяного газа После ТВТ отбензиненный и осушенный нефтяной газ проходит концевой газовый сепаратор ГС2 и после узла учета товарного газа поступает в магистральный газопровод Часть газа высокого давления после сепаратора ГС1 в виде циркуляционного газа поступает в охлаждающую (и сепарирующую) трехпоточную вихревую трубу ТВТ1, где расширяется до давления сырого газа, и проходит теплообменник Т2 На этом цикл замыкается

Конденсат, выделившийся в газовых сепараторах С501, ГС1 и ГС2, а также в третьих потоках ТВТ и ТВТ1, направляется по общему коллектору в сепаратор конденсата СК1, откуда жидкая фаза поступает в рекуперативный теплообменник «газ-конденсат» Т1 Далее, пройдя для дегазации подогревающий теплообменник Т6, жидкая фракция поступает в сепаратор конденсата СК2 и отсюда в виде ЦФЛУ поступают на склад

Технологической схемой УПГ предусмотрен вариант, когда охлаждение сжатого газа в теплообменнике Т4 осуществляется не нефтью, а подготовленным газом после сепаратора ГС2 (пунктир на рисунке 4) Этот вариант применяется тогда, когда «холодоотдача» от очищенного газа становится выше, чем от охлаждающей нефти

Установка подготовки нефтяного газа в 2006 г была принята в эксплуатацию Она показала свою устойчивую работу и обеспечила очистку и осушку нефтяного газа в соответствии с требованиями ОСТ 51 40-93

Анализ работы трехпоточных вихревых труб в составе УПГ выявил, что эффект охлаждения холодного потока при $\mu = 1,0$ превышает эффект

дросселирования (в среднем в 1,6 раза как по ТВТ1, так и по ТВТ) Это превышение наглядно демонстрирует рисунок 5, где приведены экспериментальные данные, полученные в процессе эксплуатации УПГ Эффект дросселирования определялся по соотношению

$$\Delta T_{др} = \alpha_{др} (P_v - P_{др}), \quad (5)$$

где $\alpha_{др} = 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{МПа}$ (найден экспериментально на регуляторах УПГ)

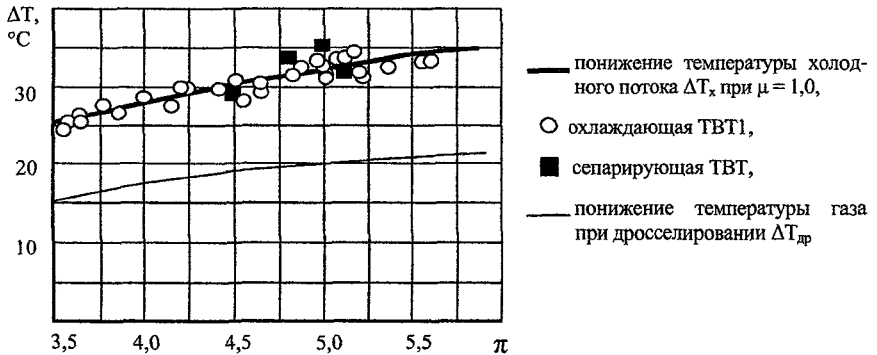


Рисунок 5 – Зависимость понижения температуры (ΔT) от отношения давлений π

Сравнение температурной эффективности вихревых труб при работе в двухпоточном режиме было проведено при $P_v = 1,8 \text{ МПа}$, $\pi = 1,6$ и $\mu = 0,3$ Оказалось, что на этих параметрах ТВТ эффективнее ТВТ1 на 14 % При идентичности конструкций большую эффективность ТВТ можно объяснить ее большими геометрическими размерами по сравнению с ТВТ1

В таблице 10 приведены результаты анализа сырого и товарного газа на одном из режимов работы УПГ При этом температура холодного потока после ТВТ1 составляла минус $22 \text{ } ^\circ\text{C}$, точка росы по влаге – минус $4 \text{ } ^\circ\text{C}$, по углеводородам – плюс $2 \text{ } ^\circ\text{C}$

С апреля 2007 года УПГ установка начала работать с рекуперацией холода потока из ТВТ в теплообменнике Т4 Кроме того была реализована возможность подачи газа холодного потока ТВТ1, прошедшего теплообменник Т2,

Таблица 10 – Компонентный состав газа при работе УПГ

№	Компонент	Концентрация газа, % об		Степень извлечения компонентов, ф, %
		сырой газ	товарный газ	
1	Метан	69,701	70,849	-
2	Этан	15,842	15,970	-
3	Пропан	6,354	6,113	3,79
4	Изобутан	0,836	0,675	19,22
5	Н-бутан	1,626	1,146	29,48
6	Изопентан	0,295	0,119	59,52
7	Н-пентан	0,253	0,088	65,32
8	Гексан + высшие	0,286	0,140	50,88
9	Диоксид углерода	1,455	1,461	-
10	Кислород	0,072	0,103	-
11	Азот	3,282	3,336	-

непосредственно в теплообменник Т5, не смешивая его с сырым газом до Т5. Основная цель такого режима – понизить температуру сжатого газа перед газосепаратором С501 для получения большего количества ШФЛУ. Температура была понижена до минус 5 °С.

Следует отметить, что без использования ТВТ1 как генератора холода (в этом случае производилось дросселирование газа на задвижке перед теплообменником Т2), несмотря на большее значение параметра π в этом режиме как на дросселе перед Т2, так и на ТВТ, более низкую температуру после АВО по сравнению с предыдущими режимами, не удалось выйти на отрицательную температуру сжатого газа перед сепаратором С501.

Таким образом, экспериментально на промышленной установке подтверждено термодинамическое преимущество трехпоточной вихревой трубы при работе на режиме $\mu = 1,0$ по сравнению с традиционным дроссель-вентилем.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Разработана технология подготовки попутного нефтяного газа к транспорту и получения ШФЛУ на базе компремирования и применения трехпоточных вихревых труб в технологической схеме, использующей рекуперацию всех технологических потоков и холода внешних источников.

2 Установлена работоспособность двух модификаций узла сепарации

трехпоточной вихревой трубы Более эффективной является конусно-цилиндрическая насадка

3 Разработана методика расчета процесса конденсации компонентов в вихревой трубе, позволяющая оценить ее эффективность как газодинамического устройства для подготовки нефтяного газа Установлено наличие сверхзвукового течения газа в вихревой трубе с числом Маха до 1,75

4 Разработаны технологические схемы очистки и осушки углеводородных смесей с применением двухпоточных и трехпоточных вихревых труб, которые рекомендованы к промышленному использованию

5 Экспериментально в промышленном масштабе и промышленным внедрением подтверждено термодинамическое преимущество трехпоточной вихревой трубы при работе на режиме $\mu = 1,0$ по сравнению с дроссель-вентилем

6 Результаты исследований успешно реализованы при реконструкции установки подготовки нефтяного газа к транспорту на ДНС «Загорская» Годовая экономическая эффективность от их внедрения составила за период 2006-2007 гг 199010 тыс рублей

7 Проведен всесторонний анализ работы промышленной установки подготовки нефтяного газа на ДНС «Загорская» и выданы рекомендации к промышленному использованию разработанной технологии при промысловой подготовке нефтяного газа

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1 Жидков М А Трехпоточная вихревая труба – эффективное газодинамическое устройство для подготовки природного газа к транспорту / М А Жидков, А П Гусев, А П Рябов, С П Вшивцев, Н В Кошовец, Б Г Коляко, Е П Соболев, Г С Староконев // Нефтегазовые технологии – 2006 – № 11 – С 3-7

2 Гусев А П Подготовка нефтяного газа к транспорту с использованием трехпоточных вихревых труб / А П Гусев, А П Рябов, М А Жидков, В Г Исламкин, Г Ю Пахомова // Oil & Gas Journal – 2007 – № 1-2. – С 90-95

3 Рябов А П Трехпоточные вихревые трубы в нефтедобывающей и газовой промышленности (аналитический обзор) / А П Рябов, А П Гусев, М А Жидков, Д А Жидков // Нефтегазовые технологии – 2007 – № 2 – С 2-7

4 Жидков М А Сверхзвуковая сепарация углеводородных газов в вихревых трубах Ранка-Хилша / М А Жидков, А П Гусев, А П Рябов, В П Овчинников, Д А Жидков // Oil & Gas Journal – 2007 – № 3-4 – С 101-106

5 Рябов А П Технологические схемы промышленных вихревых установок подготовки попутного нефтяного газа к транспорту / А П Рябов, А П Гусев, В Г Исламкин, Е П Иванова, В Д Мельникова, Г Ю Пахомова, В Ю Бетлинский, М А Жидков, В П Овчинников // Нефтегазовые технологии – 2007 – № 9 – С 3-7

6 Гусев А П Способ промысловой подготовки нефтяного газа (варианты) / А П Гусев, А П Рябов, П Я Солдатов, В Г Исламкин, М А Жидков, В П Новиков, Е П Иванова, Г Ю Пахомова, В Д Мельникова, Ю В Манохин, И Н Денисов, Б И Челпоченко, А Г Горовой (Россия) – Заявка на изобретение № 2007106763 от 26 02 2007 (положительное решение)

Соискатель



А П Рябов

Издательство «Вектор Бук»
Лицензия ЛР № 066721 от 06 07 1999 г

Подписано в печать 01 08 2007г
Печать RISO Бумага финская Формат 60x84/16
Усп печ л 1,40 Тираж 100 Заказ № 271

Отпечатано с готового набора
в типографии Издательства «Вектор Бук»
Лицензия ПД № 17-0003 от 06 07 2000 г

625004, г Тюмень, ул Володарского, 45
Тел (3452) 46-54-04, 46-90-03