

На правах рукописи
УДК 621.565.83; 665.66

Жидков Дмитрий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОРАСХОДНЫХ
ТРЕХПОТОЧНЫХ ВИХРЕВЫХ ТРУБ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОЧИСТКИ
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ**

**Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Девисилов Владимир Аркадьевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, доцент
Российский государственный университет нефти
и газа НИУ имени И. М. Губкина
Федорова Елена Борисовна

Кандидат технических наук, доцент
Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П. А. Соловьева
Шайкина Анастасия Александровна

Ведущая организация: ПАО «Криогенмаш»

Защита состоится «___» сентября 2022 года в _____ на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5. Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

О.В. Белова

Актуальность темы:

В газовой и нефтяной промышленности существует проблема недостаточной энергетической эффективности выполнения регламентных норм по концентрации паров воды и высококипящих углеводородов в процессе промысловой подготовки природного газа (ПГ) и попутного нефтяного газа (ПНГ) к транспортировке по газопроводам (Постановление Правительства РФ от 8 ноября 2012 г. № 1148).

Из существующих методов разделения углеводородных смесей в промышленных установках высокой производительности (более 25 тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$) на практике наиболее целесообразно применять низкотемпературные. Большинство технологических схем промысловой подготовки ПГ и ПНГ основаны на дроссельных циклах с сепарацией высококипящих углеводородов, имеющих низкую энергетическую эффективность ввиду низкой степени термодинамического совершенства процесса дросселирования.

Альтернативой применению дросселя и сепаратора по простоте изготовления аппаратов, их стоимости и надёжности работы в системах низкотемпературной сепарации (НТС), при этом более энергетически эффективной являются вихревые трубы Ранка-Хилша (ВТ). При этом их трёхпоточная модификация (ТВТ), когда наряду с охлажденным и нагретым потоками из аппарата выводится конденсат (третий поток), обеспечивает не только генерацию большего, чем при дросселировании количества холода (при том же давлении), но и эффективную сепарацию конденсирующихся компонентов при низкой статической температуре.

Несмотря на применение на практике ТВТ малой и средней производительности (до 25 тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$), отсутствует системный анализ их эксплуатации, эксперименты носят фрагментарный и разрозненный характер, даже в условиях лабораторного эксперимента не разработаны теоретические основы обнаруженного феномена превышения температурной эффективности ТВТ по смешанному потоку над дросселем (тепловой дисбаланс). Недостаток информации не позволяет выработать научно-обоснованные технические решения по разработке ТВТ и вихревых установок (ВУ) большой мощности (с расходом до 200 тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$).

Цель работы:

Разработка и исследование высокорасходных трёхпоточных вихревых труб с целью повышения эффективности низкотемпературной очистки углеводородных газов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- 1) Ввести критерий сравнения температурной эффективности вихревых труб при смешении стратифицированных потоков.
- 2) Провести термодинамический анализ работы промышленных ТВТ в низкотемпературных рекуперативных циклах на основе единого критерия, а также существующих на данный момент теорий.
- 3) Провести экспериментально-теоретическое обоснование, поясняющее увеличение теплового напора промышленных ТВТ по смешанному

потоку по сравнению с дросселем.

4) Провести исследования вихревых труб на воздухе для оценки дисбаланса в адиабатных условиях.

5) Дать практические рекомендации по разработке высокопроизводительных ТВТ от 120 до 200 тыс. нм³/час.

Научная новизна:

1) Впервые введен критерий теплового дисбаланса λ , на основе которого проведен анализ термодинамических характеристик промышленных ТВТ, эксплуатируемых в системах очистки ПНГ и ПГ.

2) Впервые проведен анализ термодинамических характеристик стендовых воздушных ВТ, на основе которого выявлены зависимости критерия дисбаланса λ от степени расширения π и доли холодного потока μ , выявившие разнознаковые (от минус 8,2 до 6,5) значения экстремумов λ в функции μ .

3) Дано описание ударно-волновой (пульсационной) гипотезы вихревого эффекта (ВЭ), которая позволила объяснить феномен эффективной работы ТВТ в рекуперативных схемах НТС.

4) Впервые получены вибрационные характеристики стендовой и промышленной вихревых труб, подтвердившие правомочность трактовки ВЭ с позиции ударно-волновой (пульсационной) гипотезы.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1) Обоснована и реализована на практике технологическая схема ВУ с внешним смещением стратифицированных потоков ТВТ.

2) Экспериментально выявлен и рекомендован при эксплуатации высокорасходных ТВТ оптимальный режим работы при $\mu = 0,95$;

3) Разработана конструкция ТВТ с производительностью от 120 тыс. до 200 тыс. нм³/час углеводородного газа;

4) Сформулированы рекомендации по расчёту температурной эффективности высокорасходных ТВТ при проектировании вихревых установок;

5) Разработаны исходные данные на проектирование промышленных ВУ для промысловой подготовки ПНГ и ПГ к транспорту, соответственно, Комсомольского и Берегового месторождений.

Внедрение результатов работы:

При участии автора реализованы проекты ВУ Комсомольского и Берегового месторождений.

Достоверность полученных данных:

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается применением поверенных средств измерения, апробированных методик измерения, использованием классических зависимостей и сравнением с данными других исследований.

На защиту выносятся:

1) Результаты анализа работы вихревых труб различной модификации и производительности по критерию дисбаланса λ , позволившие выявить дополнительную генерацию холода и теплоты вне процесса стратификации газа.

2) Экспериментальные данные на стендовой воздушной ВТ диаметром

от 5 до 8 мм (два соосных цилиндра, имитирующих конусность) и ТВТ диаметром 15 мм, подтвердившие генерацию дополнительного количества холода по расчётно-смешанному потоку при $\mu \rightarrow 1,0$.

3) Вибрационные характеристики стендовой ВТ диаметром от 5 до 8 мм и промышленной ВТ диаметром 55 мм.

4) Описание ударно-волновой (пульсационной) гипотезы ВЭ, основанной как на собственных экспериментах, так и на экспериментах других авторов.

5) Конструкция высокопроизводительной регулируемой ТВТ с двухсопловым вводом.

6) Результаты промышленных испытаний ТВТ производительностью до 160 тыс. нм³/час углеводородного газа в составе установок НТС.

7) Практические рекомендации по разработке высокопроизводительных ТВТ от 120 тыс. до 200 тыс. нм³/час.

Апробация работы:

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

– Седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2014).

– Научном семинаре по вихревому эффекту (Рыбинск, 2015).

– Пятой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 2015).

– Научном семинаре на кафедре холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016).

– Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference (San Francisco, California, 2017).

Личный вклад автора заключается в анализе работы промышленных ТВТ, разработке и создании лабораторного стенда для исследования ВТ, конструкций воздушных ВТ и ТВТ, разработке методики и проведении экспериментов на стенде, в т.ч. по замеру вибрационных характеристик ВТ, развитию ударно-волновой (пульсационной) концепции ВЭ, расчетной оценке эффективности промышленной ВТ, расчёте технологических схем ВУ, проработке и рабочем проектировании узлов высокорасходных ТВТ, участии в их изготовлении и пуско-наладке.

Публикации:

Результаты диссертации отражены в 15 научных статьях в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, в том числе 3 в журналах из базы индексирования SCOPUS, опубликованы тезисы 5 докладов.

Структура и объём диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, приложения. Работа изложена на 150 страницах основного текста, содержит 38 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены основные характеристики ВТ, критерии её эффективной работы, в частности, приведен энтальпийный баланс ВТ для воздуха, принимаемого в качестве идеального газа ($\Delta T_{др} = 0$ К):

$$i_B = \mu \cdot i_x + (1 - \mu) \cdot i_T. \quad (1)$$

Для ТВТ энтальпийный баланс можно представить уравнением:

$$i_B = \mu_x \cdot (i_x - i_K) + \mu_T \cdot (i_T - i_K) + i_K. \quad (2)$$

Следует сразу отметить, что доля третьего потока в тепловом балансе ТВТ весьма мала (финишная стадия очистки в рекуперативной схеме), поэтому для упрощения анализа предлагается пользоваться только двумя выходящими из ТВТ потоками, холодным и горячим. Тогда в температурном выражении тепловой баланс (1) записывается:

$$\mu \cdot \Delta T_x = (1 - \mu) \cdot \Delta T_T. \quad (3)$$

В системах НТС рабочий газ далек от идеального состояния ($\Delta T_{др} > 0$). Тогда формулы КПД с учётом эффекта дросселирования будут иметь вид:

$$\eta_T = \Delta T_x / \Delta T_S, \quad (4)$$

$$\eta_{ад} = \mu \cdot \eta_T \quad (5)$$

В разделе 1.1 освещён вопрос автоматического регулирования площади сопловых вводов ВТ, что позволяет обеспечивать относительно стабильные η_T и $\eta_{ад}$ в широком диапазоне производительности аппарата. Показано, что наиболее эффективная и надёжная конструкция регулируемого соплового ввода – это вариант с подвижным клином (схема приведена на Рисунке 2).

В разделе 1.2 показана специфика работы ВТ в рекуперативных схемах (простейшая представлена на Рисунке 1).

В отличие от однопоточных расширительных аппаратов (дроссели, детандеры, пульсационные) ВТ имеет два разноэнтальпийных потока. В этом случае адиабатная ВТ будет эффективнее дросселя только при соблюдении неравенства:

$$i_2 > i_{xm}, \text{ или (при равенстве теплоемкостей) при } T_2 > T_{xm} \quad (6),$$

где $T_{хт}$ – температура холодного потока после теплообменника.

Если же $T_T < T_{хт}$, то неизбежны потери холода с горячим потоком.

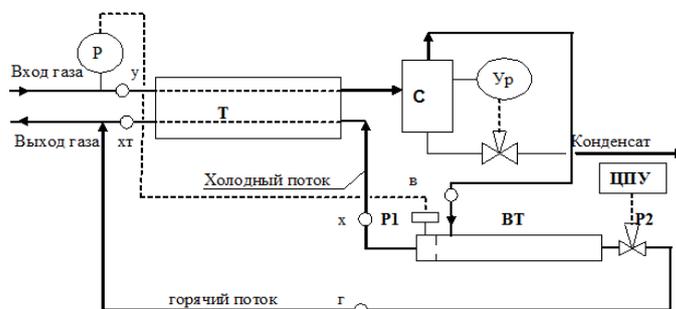


Рисунок 1. Принципиальная рекуперативная схема вихревой установки:

Т – теплообменник; С – сепаратор; ВТ – адиабатная вихревая труба

Аналогичная ситуация имеет место в рекуперативных холодильных циклах с ТВТ (Рисунок 2).

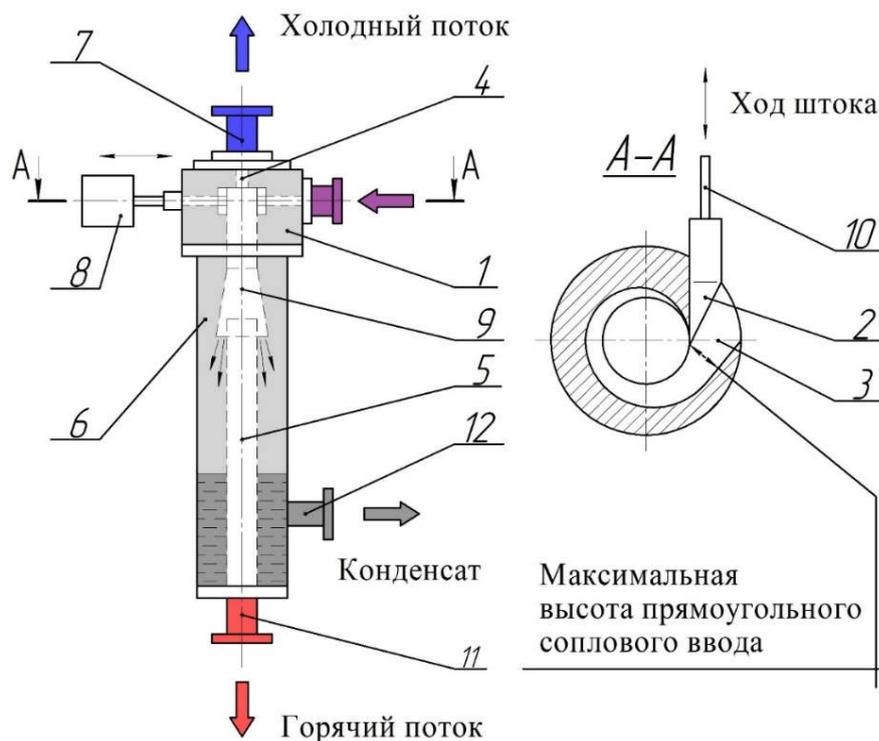


Рисунок 2. Схема регулируемой ТВТ: 1 – корпус; 2 –регулирующий клин; 3 – сопловой ввод; 4 – диафрагма; 5 – вихревая камера; 6 – конденсатосборник; 7, 11, 12 – отводы потоков; 8 – приводной механизм; 9 – конус; 10 – шток

На промышленных ТВТ был зафиксирован тепловой дисбаланс. Для его оценки введен показатель теплового дисбаланса λ по смешанному потоку (реальном или расчётном), который рассчитывается по соотношению:

$$\lambda = \frac{\Delta T_{см} - \Delta T_{др}}{\Delta T_{др}} \quad (7)$$

Результаты расчёта λ для промышленных ТВТ представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Тепловой дисбаланс при эксплуатации промышленных ТВТ

Обозначение ТВТ, рабочая среда	V_{\max} , $\text{нм}^3/\text{час}$	$P_{вх}$, МПа	μ	π	λ (диапазон)	$\lambda_{ср}$ (среднее)
ТВТ1 (ПНГ, ПГ)	3 200	2,7-3,2	1,0	5,6-12,7	0,43-0,67	0,56
ТВТ2 (ПНГ)	10 000	2,9-5,4	1,0	1,4-4,8	0,53-0,93	0,77
ТВТ3 (ПНГ)	25 000	5,5-5,8	~1,0	1,18-5,56	0,42-1,22	0,72
ТВТ4 (ПНГ)	16 000	4,9-7,1	~1,0	1,08-2,26	0,11-2,21	0,30
ТВТ5 (ПГ)	10 000	5,1-6,5	~1,0	1,10-1,28	1,50-2,65	1,19
ТВТ6 (ПНГ)	160 000	5,36-5,40	ср. 0,95	2,83-2,85	0,35	0,35
ТВТ7 (ПГ)	140 000	1,38-1,48	ср. 0,87	1,38-1,48	0,14-0,27	0,20

Как видно из Таблицы 1, на всех промышленных ТВТ выявлен устойчивый тепловой дисбаланс в сторону увеличения перепада температур на смешанном потоке по сравнению с дросселированием ($\lambda > 0$). В этом случае целесообразно представить энтальпийный баланс в виде:

$$i_B = \mu \cdot i_x + (1 - \mu) \cdot i_T + \delta i \quad (8)$$

Здесь традиционное соотношение (1) дополнено поправкой δi , эквивалентной показателю λ , компенсирующей реально зафиксированный холодильный дисбаланс.

Приведены результаты расчёта λ по экспериментам исследователей адиабатных ВТ диаметром от 10 до 50 мм на воздухе умеренного давления (Хилш, Шпренгер, Финько, Чижиков, Мухутдинов и др.) Здесь также имеют место дисбалансы по расчётно-смешанному потоку, подтверждающие правомочность уравнения (7). Причём параметр дисбаланса λ принимает не только положительные ($\lambda = 1,7 \div 7,4$), но и отрицательные значения ($\lambda = -0,5 \div -8,2$). Последнее говорит о нагреве газа расчётно-смешанного потока.

В разделе 1.4 критически рассмотрены основные теории ВЭ (центробежные, радиальных потоков, турбулентных микрохолодильных циклов и «демона Максвелла»), а также современные концепции – теория циклострофического приспособления и трактовка ВЭ на основе гипотетических волн градиента давления Белявского. Сделан вывод, что ни одна из ранее предложенных и разработанных гипотез ВЭ не в состоянии объяснить тепловые дисбалансы, фиксируемые как на ТВТ, так и на ВТ.

Исследователи головных промышленных ТВТ высказали предположение по ударно-волновому механизму ВЭ, способному привести к возникновению холодильной поправки δi . В пространстве ВК под воздействием входящей высокоскоростной газовой струи возникают продольные β - и поперечные ϵ -волны (Рисунок 3). Они создают газодинамический эффект стратификации газа Гартмана-Шпренгера (ГШ) в осевом и радиальном направлениях. Ударно-волновой процесс закономерно приводит к вибрациям стенок ВК, возникновению звука и к диссипации акустической энергии в окружающую среду. Теоретическое осмысление и экспериментальное обоснование этой концепции не проводились.

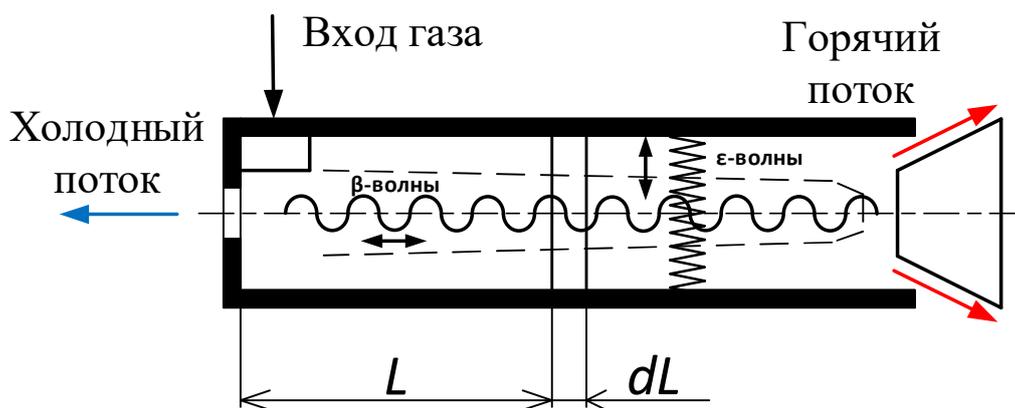


Рисунок 3. Схема ударно-волнового механизма ВЭ

В разделе 1.5 обозначены цели и задачи исследования, основными пунктами которого является выявление теплового дисбаланса на адиабатной ВТ на лабораторном стенде, определение зависимостей и коэффициентов

дополнительной холодопроизводительности, а также учёт этих зависимостей в термодинамических и конструкционных расчётах ВТ повышенной производительности. Модернизация конструкции ТВТ и разработка рекомендаций по их эксплуатации.

Во второй главе представлена уточненная ударно-волновая концепция вихревого эффекта, в котором основной акцент сделан на пульсационные проявления закрученного потока газа.

Реальное проявление ε -пульсаций фиксировались ранее в экспериментальных работах С. Лукачёва, Ш. Пиралишвили, Я. Белявского и других. Косвенное проявление β -пульсаций в ВТ прослеживается в экспериментах Б. Парулейкара и А. Борисенко.

Раздел 2.1 посвящен диссипации акустической энергии в окружающую среду. Оценка акустической компоненты L стендовой ВТ, выполненная по известному соотношению:

$$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{W}{W_0} \right), \quad (9)$$

(где $W_0 = 10^{-12}$) показала, что акустическое излучение не должно оказывать существенного влияния на наполнение холодильного дисбаланса ВТ. Так, чтобы получить дополнительный холод только за счет звукового излучения в слышимом диапазоне частот, необходимо иметь удельную звуковую мощность на поверхности стендовой ВТ не менее 880 Вт/м^2 , труднореализуемо.

Однако опыт создания вихревых генераторов звука (Ю. А. Кныш, С. В. Лукачов) с акустическим КПД до $\eta_{\text{ак}} = 2,8\%$ и волновых криогенераторов В. Бондаренко с адиабатным КПД $\eta_{\text{ад}}$ от 5 до 15% говорит о существенном влиянии звуковых волн на холодопроизводительность аппаратов.

В балансовом уравнении криогенератора В.Л. Бондаренко упоминается энергия вибраций адиабатного аппарата, которая выводится из системы через корпус устройства:

$$G_{\text{вх}} \cdot i_{\text{вх}} = G_{\text{г}} \cdot i_{\text{г}} + G_{\text{х}} \cdot i_{\text{х}} + W_{\text{вибр}} \quad (10).$$

Уравнение (10) идентично уравнению (8). Здесь «прибавка δi » коррелируется со значением $W_{\text{вибр}}$. Энергию вибраций ВТ можно трактовать, как техническую (внешнюю) работу $l_{\text{техн}}$ над сопряжёнными с газодинамическим аппаратом элементами (опоры, обвязка трубопроводами и пр.). Если дополнительный холод отнести только на счёт вибраций, то $\delta i = l_{\text{техн}}$.

В разделе 2.2 представлено описание ударно-волнового (пульсационного) механизма ВЭ, который состоит в следующем: радиальные ε -пульсации возникают пульсирующим вихревым ядром (ПВЯ), передающим энергию колебаний внешнему вихрю. Можно также говорить о колебаниях газодинамической ПВЯ-струны, которая получает ударную порцию кинетической энергии в районе соплового сечения.

Перестройка вращения ПВЯ приводит к интенсификации ε - и β -пульсаций, особенно ощутимых при $\mu \rightarrow 1$, чем и объясняется значительные виброакустические проявления на данном режиме на ТВТ.

Осциллирующие элементы ПВЯ можно рассматривать как газодинамические микрокомпрессоры, совершающие локальную работу

по сжатию порций газа в радиальном направлении. При этом, по аналогии с эффектом Гартмана-Шпренгера, происходит перенос теплоты из центра на периферию. Сами осциллирующие элементы ПВЯ, совершив работу по сжатию слоев внешнего вихря, охлаждаются. Остаточная кинетическая энергия пульсаций, заторможенных у стенки ВК, порождает вибрацию, и, как следствие, выполнение внешней технической работы.

В этом случае поправку δi можно представить в виде:

$$\delta i = \delta i_{\text{ва}} - \delta i_{\text{ув}} \quad (11),$$

где $\delta i_{\text{ва}}$ – виброакустическая компонента (генерация холода), $\delta i_{\text{ув}}$ – ударноволновая компонента (генерация теплоты).

Знак и величина интегрального параметра δi определяется соотношением абсолютных величин $\delta i_{\text{ва}}$ и $\delta i_{\text{ув}}$ при данном значении μ (аналогичные рассуждения верны и для λ).

Таким образом ударно-волновой (пульсационный) подход к трактовке механизма эффекта Ранка-Хилша позволяет не только объяснить возникновение теплового дисбаланса ВТ, но и понять проявления ВЭ, необъяснимые с позиции других теорий.

Во третьей главе описывается экспериментальное исследование вихревых труб на лабораторных установках.

Раздел 3.1 посвящен описанию лабораторного стенда (Рисунок 4), созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана для оценки значений дисбаланса δi в адиабатных условиях на осушенном воздухе, а также замера вибрационной динамики воздушной ВТ.

Испытывалась противоточная ВТ с односопловым вводом (спираль Архимеда), изготовленная из титанового сплава. Она имела вихревую камеру (ВК), состоящую из двух соосных цилиндров с переходной фаской. Основные размеры элементов ВК: $D_{\text{ВК1}} = 5 \text{ мм}$; $L_{\text{ВК1}} = 5 \cdot D_{\text{ВК1}}$; $D_{\text{ВК2}} = 8 \text{ мм}$; $L_{\text{ВК2}} = 8 \cdot D_{\text{ВК2}}$. В конце ВК2 расположена спрямляющая пластина. Диаметр диафрагмы – $0,5 D_{\text{ВК1}}$. Отношение площади соплового ввода к площади ВК1 – $0,11$.

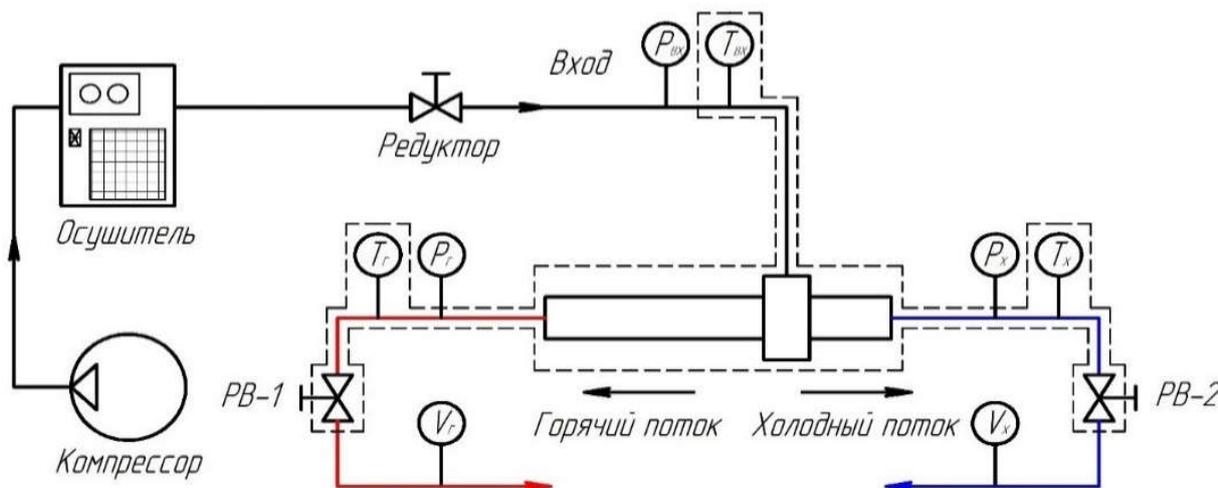


Рисунок 4. Схема лабораторного стенда с ВТ (пунктиром обозначены теплоизолированные участки)

В разделе 3.2 описана методика проведения экспериментов. Эксперименты по снятию термодинамических характеристик ВТ выполнены на разных типах теплоизоляции. При этом полученные значения температур при одинаковых условиях совпадали с точностью до 0,1 – 0,2 °С. Сделан вывод о достижении адиабатности на лабораторной ВТ.

Раздел 3.3 посвящен термодинамическому анализу полученных данных. Температурные зависимости носят традиционный для противоточной ВТ характер. Выявлены важные показания по конечным режимам. Так, например, для отношения давлений $\pi = 5,0$ при $\mu = 0$ воздух перегрет, а при $\mu = 1,0$ переохлажден по сравнению с дросселированием (рис. 5).

Это показано также на Рисунке 6 по зависимостям $\lambda=f(\mu)$. Здесь имеются диапазоны параметра μ , когда расчётно-смешанный поток перегревается ($\lambda < 0$) и диапазоны, когда он переохлаждается ($\lambda > 0$). Диапазон значений λ от плюс 3,0 до минус 3,5 вписывается в диапазон-максимум (λ от плюс 7,4 до минус 8,2) других авторов, приведенные в главе I. На Рисунке 5 нанесена также кривая, полученная обработкой по соотношению (6) классического эксперимента Р. Хилша (пунктирная линия). Её ход несколько отличается от графика стендовой ВТ, но качественно ей соответствует. Это показывает корректность проведенных экспериментов и их представлению по критерию λ .

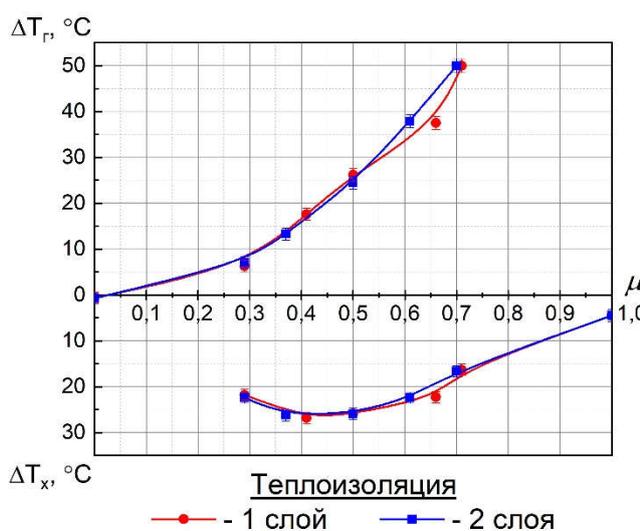


Рисунок 5. График зависимости разностей температур по потокам ВТ от доли холодного потока μ при постоянном значении $\pi = 5,0$

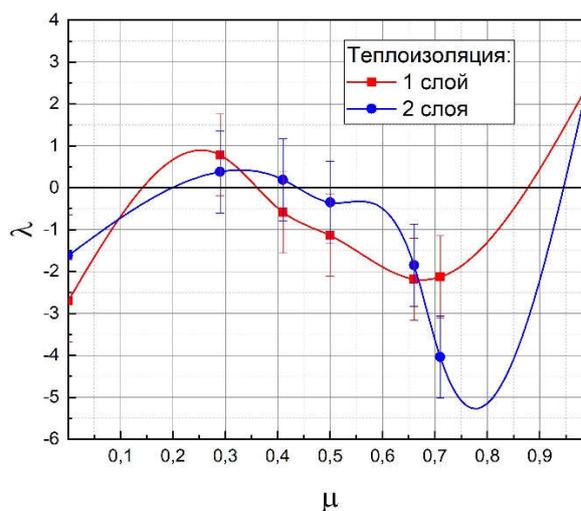


Рисунок 6. Зависимость параметра λ от μ при $\pi = 5,0$

В разделе 3.5 описаны измерения параметров пульсационных проявлений на лабораторной ВТ. Фиксировались характеристики вибраций ВК, к поверхности которой жестко крепился пьезоэлектрический акселерометр.

В Таблице 2 представлен пример таких замеров, где приводится частота f основной гармоники радиальных пульсаций в вертикальной плоскости в зависимости от π при $\mu=const=0,5$ (датчик пульсаций располагался в концевой части ВК).

Таблица 2. Вибропроявления на стендовой ДВТ (воздух)

№	π	μ	f, Гц	Виброскорость, v мм/с
8	2,91	0,50	12 800	0,006992
9	3,85	0,50	14 250	0,02805
10	4,81	0,50	15 100	0,06574
11	5,71	0,50	15 700	0,05571
12	6,67	0,50	16 100	0,06607

На Рисунке 7 представлены зависимости радиальной виброскорости v в функции f . Просматриваются два максимума v : в диапазоне $f = 500 - 1200$ Гц и при $f = 14800 - 16600$ Гц.

Радиальные вибрационные характеристики в вертикальной плоскости были замерены также на ВТ промышленной ВУ очистки сбросных газов производства метанола Новомосковской АК «Азот» ($D_{тр} = 55$ мм, $l_{вк} = 30 D_{тр}$) в штатном режиме эксплуатации ($P_{вх} = 3,71$ МПа; $\pi = 7,8$; $\mu = 0,67$; $\Delta T_x = 42,9$ °С). Результаты представлены на Рисунке 8.

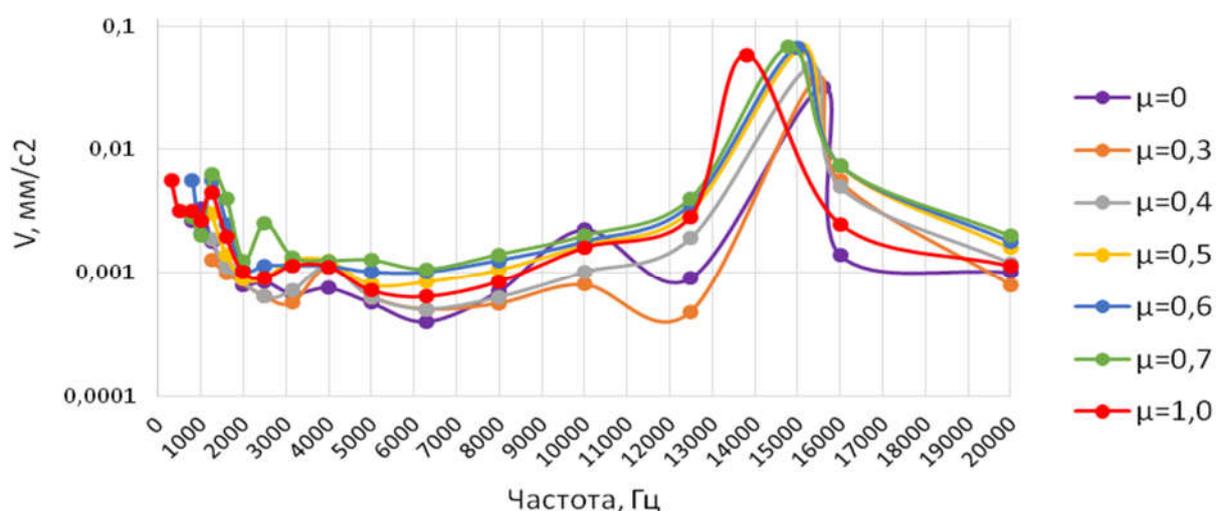


Рисунок 7. Характеристика виброскорости стендовой ВТ при $\pi = 4,55 \div 5,00$ и радиальном (вертикальном) расположении вибродатчика в конце ВК

Виброхарактеристики снимались на расстояниях от соплового блока, кратных $D_{тр}$: т.1 – $2D_{тр}$; т.2 – $9D_{тр}$; т.3 – $18D_{тр}$; т.4 – $27D_{тр}$.

Кривые имеют два экстремума, как и на Рисунке 7. Значительное увеличение массогабаритных характеристик промышленной ВТ по сравнению со стендовой отразилось на абсолютных показателях виброскорости v (увеличение почти на два порядка), на соотношении экстремумов (низкочастотные пульсации преобладают), а также на их относительном расположении.

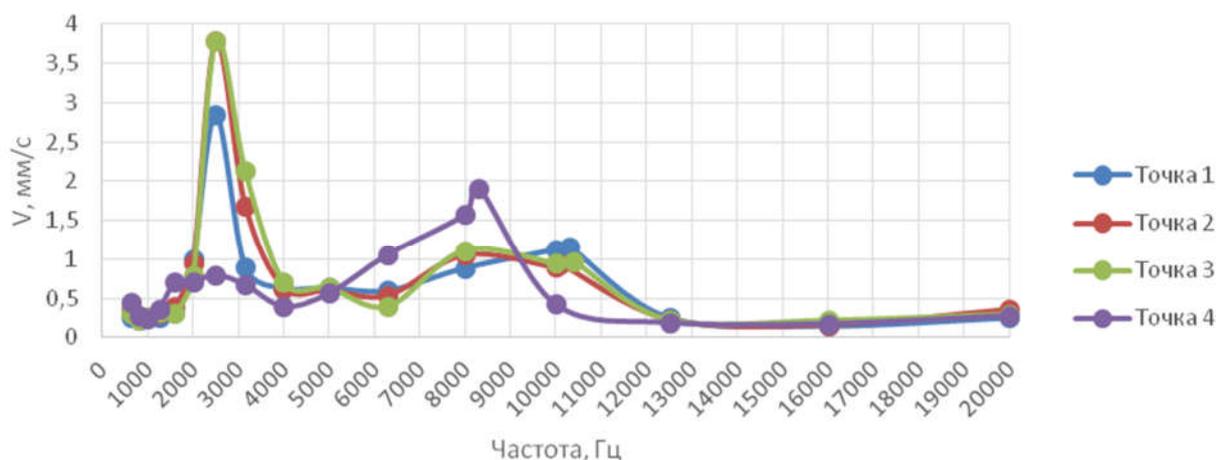


Рисунок 8. Характеристика виброскорости промышленной ТВТ Новомосковской АК «Азот»

Раздел 3.6 посвящен исследованию лабораторной ТВТ со сверхзвуковым вводом газа при совместной работе на лабораторном стенде Дальневосточного Федерального Университета. Температурные характеристики и значения λ были получены также на сверхзвуковой трехпоточной вихревой трубе (СТВТ) диаметром $D_{тр} = 15$ мм. Она имела сверхзвуковой ввод газа (сопло Лавалья) и отбор третьего потока в сопловом сечении (перфорация спиралевидной детали соплового ввода). По температурной эффективности СТВТ была на уровне лабораторной ТВТ. Диапазон изменения параметра λ при $\pi = 8,2$ составлял от плюс 1,5 до минус 3,5.

Замеры температуры стенки ВК СТВТ показали температурный скачек на расстоянии $L = 0,05 L_{СТВТ}$, т.е. в непосредственной близости от соплового сечения. Кроме того, на режиме $\mu \rightarrow 1,0$ на расстоянии $L = 0,25-0,55 L_{СТВТ}$ от соплового сечения наблюдается аномальное охлаждение стенки ВК с дальнейшим повышением температуры по мере приближения к регулирующему вентилю. Эти явления можно объяснить с позиции ударно-волновой (пульсационной) концепции.

В четвертой главе приводится информация по разработке и реализации конструкции высокорасходных регулируемых ТВТ.

Скачок в расходах практически на порядок по сравнению ранее разработанными ТВТ потребовал решения ряда конструктивных задач. Первая связана с функцией регулирования производительности. Вихревые трубы с расходом до 25 тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$ имели односопловой ввод (пример на Рисунке 1) и, соответственно, один привод для автоматического регулирования расхода газа. Вариантная проработка ТВТ на 200 тыс. $\text{нм}^3/\text{час}$ выявила необходимость применения двухсоплового ввода с двумя приводами. Это не только увеличило надёжность работы системы регулирования, но и сбалансировало вертикальную конструкцию ТВТ, что немаловажно в условиях вибраций аппарата. Из Рисунка 9 видно, что сопловые вводы 7 изготавливались из идентично спрофилированных деталей, развернутых на 180° и расположенных друг над другом в сопловом блоке 1.

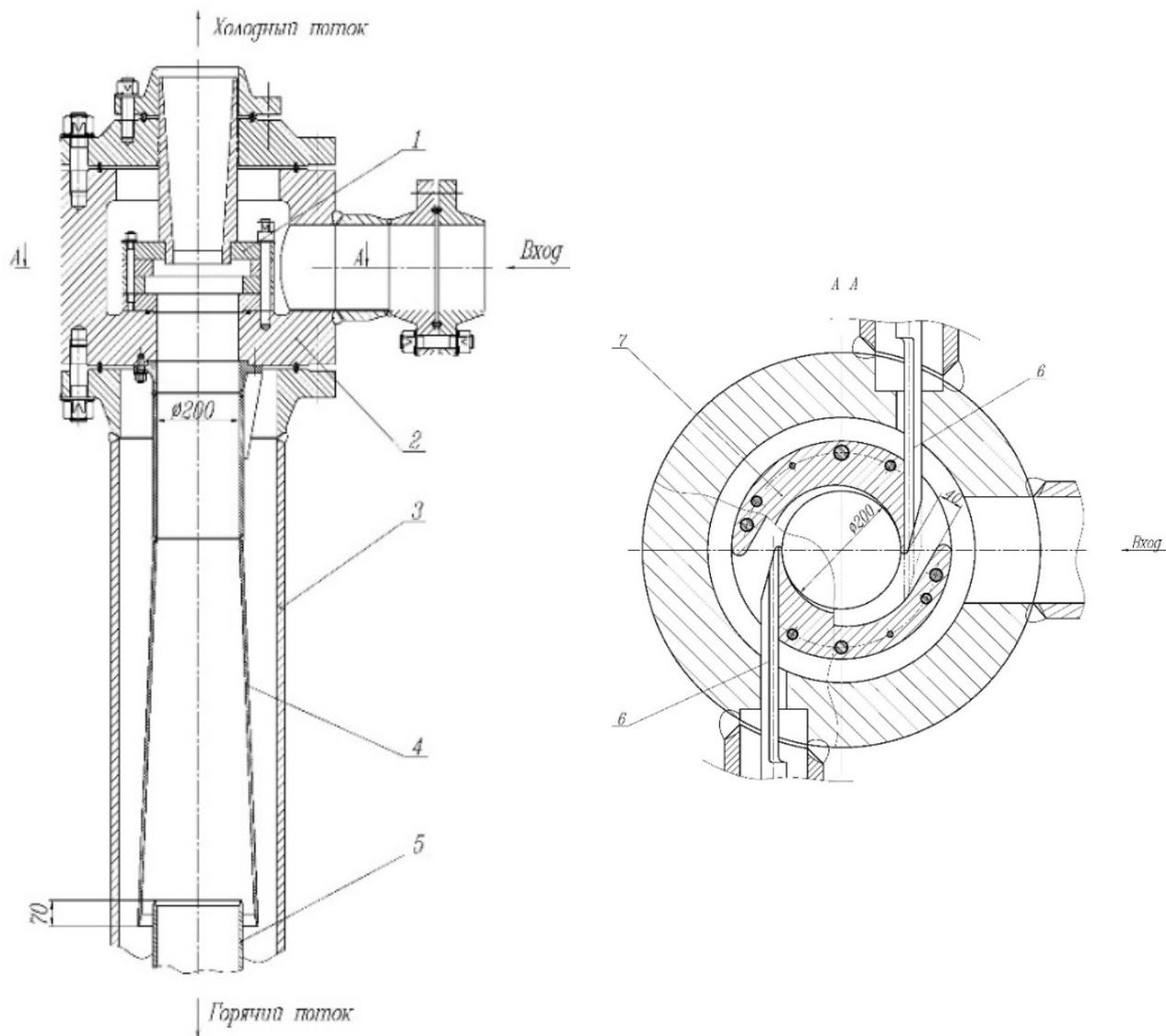


Рисунок 9. Конструкция регулируемой высокорасходной ТВТ:
 1 – сопловой блок; 2 – корпус; 3 – конденсатосборник;
 4 – конусно-цилиндрическая вставка; 5 – труба горячего потока;
 6 – клиновидные задвижки; 7 – спрофилированные сопловые вводы.

Вторая задача была связана с разрывом вихревого потока при организации сепарационного зазора определенной геометрии. Здесь была решена проблема жёсткости трубы горячего потока 5 (протяженная консоль) и рациональной конструкции конусно-цилиндрической вставки (КЦВ).

В состав технологической схемы ВУ производительностью до 320 $\text{nm}^3/\text{час}$ Комсомольского месторождения (Рисунок 10) входят две регулируемые ТВТ (в Таблице 1 обозначены как ТВТ10). Рекуперация холода обеспечивается как по расширенному газу (Т1), так и по жидкости (Т2). При этом 80% сжатого ПНГ, пройдя стадию охлаждения и сепарации (С1), поступает в вихревые трубы ТВТ1/1 и ТВТ1/2, остальное – в блок дросселирования.

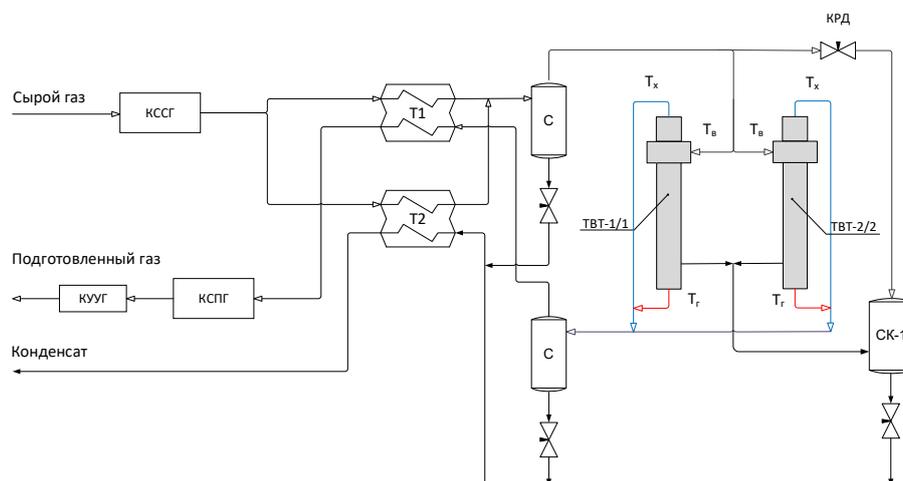


Рисунок 10. Принципиальная схема ВУ Комсомольского месторождения:
 КССГ – компрессор сырого ПНГ; КСПГ – компрессор подготовленного газа;
 Т1, Т2 – теплообменники; ТВТ1/1, ТВТ1/2 – трехпоточные вихревые трубы; С1,
 С2 – газовые сепараторы; СК1 – накопительная емкость; КРД – кран
 дроссельный; КУУГ – узел учета газа; Р1, Р2 – регуляторы

Таблица 3. Режим работы ВУ с трехпоточной вихревой трубой ТВТ1/1

Точка схемы	Технологический поток	Параметры		
		Р, МПа	Т, °С	Другое
1	Вход в Т1 сырого газа	53,8	25	$V_c = 129\ 684\ \text{нм}^3/\text{час}$
2	Вход в С1	53,6	0	
3	Вход в расширители	53,6	1	$\beta_{\text{ТВТ}}=70\%$ (степень открытия)
4	Холодный поток	18,3	-29	$\pi = 2,83; \mu = 0,95; \Delta T_x = 30^\circ\text{C}$
5	Горячий поток	27,4	29	$\Delta T_g = 28^\circ\text{C}$
6	Смешанный поток	18,3	-26	$\Delta T_{\text{см}} = 27^\circ\text{C}; \lambda = 0,35$
10	Газ из дросселя	18,2	-19	$\Delta T_{\text{др}} = 20^\circ\text{C}; \beta_{\text{др}} = 5,9\%$
11	Вход в С2	18,2	-25	
12	Вход в Т1 холодного газа	18,2	-24	
13	Товарный газ из Т1	18,2	13	$V_{\text{п}} = 116\ 489\ \text{нм}^3/\text{час}$

Внешний вид ТВТ1/1 и ТВТ1/2 с площадкой обслуживания представлен на Рисунке 11. На их корпусах видны по два пневмопривода красного цвета. Основные характеристики ТВТ: внутренний диаметр $D_{\text{тр}} = 200\ \text{мм}$, высота – 5,5 м, масса – 3,0 т.

Пример режима работы ВУ в оптимальном режиме ($\mu = 0,95$) с ТВТ1/1 представлен в Таблице 3. Особенностью данной эксплуатации ВУ с параллельно включенными ТВТ и дросселем КРД является разница перепада температур на двух видах расширителей, полученная прямыми замерами при одинаковых условиях эксплуатации.

Реально эта разница составила 7°C , а это увеличение температурной эффективности ТВТ на 35% по сравнению с дросселем.



Рисунок 11. Общий вид трехпоточных регулируемых вихревых труб ТВТ1/1 и ТВТ1/2 в режиме эксплуатации

При эксплуатации ТВТ Комсомольского месторождения замерялись вибрационные характеристики, в частности, виброперемещение при частоте от 10 до 300 Гц (зафиксированный диапазон: от 86 до 195 мкм). Эксплуатация ТВТ показала, что, несмотря на практическое отсутствие перепада статического давления между вихревым потоком и пространством конденсатосборника, ряд вариантов КЦВ разрушался, например, вальцованный конус довольно быстро «раскрывался» по долевого сварному шву. Ранее, на ТВТ среднего расхода, такие явления отсутствовали.



Рисунок 12. Слева – КЦВ в начале эксплуатации; справа – спустя 4 месяца

На рисунке 12 показан один из вариантов КЦВ с укрепляющими рёбрами «цилиндр – конус». Видны локальные разрушения, в т.ч. точечные. В диссертации показано, что такого рода разрушения могут иметь место не от общей вибрации аппарата, а при динамической радиально-пульсационной нагрузке, сопровождаемой локальными гидроударами.

Конструкция ТВТ, входящей в систему НТС подготовки природного газа Берегового месторождения, аналогична конструкции ТВТ Комсомольского месторождения. Бескомпрессорная схема с одним теплообменником газ – газ и без сепаратора на входе в ТВТ (мало конденсирующихся компонентов). Эксплуатируется при отношении давлений $\pi = 1,4$, показатель дисбаланса

$\lambda = 0,20$. На этой ТВТ также имели место разрушения. Однако оптимальная конструкция КЦВ (уменьшенная длина конуса, сварка «цилиндр – цилиндр», выполнение конусной части центробежным литьём) позволила устойчиво эксплуатировать аппарат в течение длительного времени.

В данной главе даны также рекомендации по оформлению схем ВУ с ТВТ, в частности, с внешним смещением стратифицированных потоков, с использованием накопительной ёмкости конденсата (на Рисунке 10 – аппарат СК1). Для расчёта технологических схем предлагается принимать ТВТ, как идеальный детандер с изотермическим КПД от 0,3 до 0,4. Представлен конкретный пример расчёта.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Введён показатель степени отклонения от классического теплового баланса λ , позволивший выявить дополнительную генерацию холода и теплоты вне процесса стратификации газа.

2) Проведён анализ работы промышленных ТВТ на углеводородных газах показал положительное значение критерия дисбаланса $\lambda = 0,19 \div 1,19$ (более высокая эффективность по сравнению с дросселированием). Анализ воздушных ВТ выявил как положительное ($\lambda = 0,44 \div 7,38$), так и отрицательное значение указанного критерия ($\lambda = -0,50 \div -8,20$). Последнее указывает на нагрев расчётно-смешанного потока.

3) Уточнена ударно-волновая (пульсационная) концепция ВЭ (УВПК), позволяющая описать специфику работы ТВТ в рекуперативных схемах НТС, а также объяснить ряд нюансов проявлений ВЭ, которые не поддаются трактовке существующими теориями.

4) Испытания воздушной ВТ диаметром 5-8 мм (*два соосных цилиндра, имитирующих конусность*) в лабораторных условиях выявили разнознаковые экстремумы параметра λ в функции μ ($\lambda = 3,0 \div -4,0$ при $\mu = 5,0$). Стендовые эксперименты на воздушной ТВТ диаметром 15 мм подтвердили эту тенденцию.

5) Основные положения УВПК экспериментально обоснованы путем замера виброхарактеристик ВТ в диапазоне частот от 1 000 до 20 000 Гц, экспериментами на СТВТ, а также разрушениями конусно-цилиндрических вставок ТВТ вследствие ударно-волновых (пульсационных) нагрузок.

6) Даны рекомендации расчёта схем низкотемпературной сепарации для очистки ПНГ с применением высокопроизводительных ТВТ

7) Разработана конструкция высокопроизводительных промышленных ТВТ с двухсопловой системой регулирования расхода газа.

8) Промышленный эксперимент при параллельной работе расширителей показал увеличение эффективности ТВТ на 35% по сравнению с дросселем.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Thermodynamics of the Ranque-Hilsch effect in the three-flow vortex tubes. Zhidkov D.A., Devisilov V.A. et al. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. 49(4). P. 523-531. (0,50 п.л./0,10 п.л.). DOI:

10.1134/S0040579515040211

2. Zhidkov, D.A., Devisilov, V.A., Kirikova, O.V. Detailed consideration of the shock-wave (pulsation) concept of the Ranque–Hilsch vortex effect // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. 49 (4). P. 751-759. (0,50 п.л./0,25 п.л.) DOI: 10.1134/S0040579518040346

3. Experimental investigation of vortex tubes with laval nozzle / D.A. Zhidkov [et al.] // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2017. P. 721-728. (0,44 п.л./0,18 п.л.).

4. Ударно-волновые (пульсационные) проявления процесса стратификации газовой среды в вихревых трубах / Жидков Д.А., Девисилов В.А. и др. // Химическая технология. 2015. №8. С. 501-510. (0,56 п.л./0,18 п.л.).

5. Экспериментальное исследование трёхпоточных вихревых труб с соплом Лавалья / Жидков Д.А., Власенко В.С., и др. // Химическая технология, 2019, №2, С 87-95. (0,50 п.л./0,10 п.л.).

6. Особенности работы ТВТ Добринского месторождения (опыт пуска наладки) / Д.А. Жидков [и др.] // Нефть. Газ. Новации. 2010. № 9 (140). С. 6-12. (0,38 п.л. / 0,10 п.л.).

7. Температурная эффективность высокорасходных ТВТ на установке подготовки нефтяного газа Комсомольского месторождения (опыт пуска наладки) / Д.А. Жидков [и др.] // Нефть. Газ. Новации. 2012. № 5 (160). С. 46-52. (0,38 п.л./0,10 п.л.).

9. Жидков М.А., Жидков Д.А. Повышение энергоэффективности процессов на газорегулирующих станциях // Проблемы региональной энергетики. 2012. № 2. С. 66-72. (0,38 п.л./0,20 п.л.).

10. Трёхпоточные вихревые трубы – экологически значимая альтернатива сжиганию попутного нефтяного газа на факелах/ Д.А. Жидков [и др.] // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. № 3. С. 19-27. (0,50 п.л./0,15 п.л.).

11. Девисилов В.А., Жидков Д.А. Применение вихревой технологии очистки сбросных газов производства винилхлорида // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. № 6. С. 46-51. (0,31 п.л./0,20 п.л.).

12. Эксплуатация регулируемых вихревых труб Ранка-Хилша в экологически значимых промышленных установках очистки газов (аналитический обзор) / Жидков Д.А., Девисилов В.А. и др. // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 14-19. (0,31 п.л./0,12 п.л.).

13. Жидков Д.А. Девисилов В.А. Вихревая технология стратификации газов для решения экологических вопросов в нефтегазовых и химических производствах (обзор) // Безопасность в техносфере, 2015, №6, С. 63-78. (0,94 п.л./0,66 п.л.).

14. Жидков Д.А. Девисилов В.А. Вихревая технология стратификации газов для решения экологических вопросов в нефтегазовых и химических производствах (обзор). Окончание. // Безопасность в техносфере. 2016. №1. С. 66-81. (0,94 п.л./0,70 п.л.).

15. Девисилов В.А., Жидков Д.А. Вихревая очистка сбросных газов химических производств // Вестник НЦБЖД. 2014. № 2 (20). С. 93-101. (0,44 п.л./0,31 п.л.).