

А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, А. Ю. Пархимович, А. В. Свистунов,
А. А. Соловьев, В. А. Целищев, А. А. Чиндина

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА КАФЕДРЕ ПГМ УГАТУ

Рассматриваются разработки в области развития вихревых технологий, представлены проекты практической реализации результатов исследований, рассмотрены возможности создания энергосырьевого комплекса, изотермического регулятора давления природного газа и вихревой системы охлаждения. *Природный газ; энергосырьевой комплекс; система охлаждения; вихревая труба; дросселирование; математическая модель; численное моделирование; газодинамика; термодинамика*

Одним из приоритетных направлений развития промышленности является повышение экономичности производства продукции, его экологичности и безопасность. Применение вихревых технологий течения одно- и многофазных сред позволяет обеспечить выполнение современных требований к оборудованию и развитию технологий транспорта энергоресурсов.

С 2000 г. на кафедре прикладной гидромеханики ФГБОУ «Уфимский государственный авиационный технический университет» под руководством профессора А. М. Русака начались работы, связанные с изучением вихревых течений сжимаемых и несжимаемых жидкостей и газов, применением вихревых технологий в промышленности. Приведенная схема (рис. 1) показывает пути реализации различных технологий в некоторые области промышленности: авиационная, газовая, химическая, нефтяная, текстильная и др.

В настоящей статье приводятся материалы на основании публикаций по работам в области изучения вихревых технологий, проводимых на кафедре ПГМ за период 2000–2011 гг. В связи с этим сделаны ссылки только на публикации работ кафедры, а ссылки на работы других авторов приводятся в каждой из использованных статей.

Одним из направлений исследований является изотермическое дросселирование газа на основе вихревого эффекта.

В работах А. П. Меркулова, А. Д. Сулова, Ш. А. Пиралишвили и других авторов рассматривается схема работы вихревой трубы с предварительным охлаждением горячего потока и возвратом в осевую зону ВТ. При этом горя-

чий поток охлаждается в теплообменнике, и его подача в зону повышенных температур приводит к увеличению холодильного эффекта.

Было сделано предположение, что возврат неохлажденного горячего потока в осевую зону вихревой трубы позволит повысить температуру холодного потока. Для проверки данного предположения УГАТУ совместно с ОАО НИИТ была разработана конструкция крестовины с возвратом горячего потока с периферии горячей зоны вихревой трубы в приосевую область с наиболее низкой температурой [2].

Расчетная оценка теплового баланса смешения горячего и холодного потоков по результатам анализа экспериментальных исследований вихревого устройства на различных режимах показала, что после дросселирования в вихревой трубе при определенном соотношении расходов ($\mu = 0,5..0,85$) температура смеси оказывается выше температуры исходного потока (рис. 2). Такие же данные были получены при испытании вихревой трубы с замером реальной температуры смешения (продувки проводились на ФГУП НПП «Мотор»). Эти данные не соответствуют существующим представлениям о природе дроссельного эффекта Джоуля-Томпсона, и требуют дополнительного исследования для объяснения данного противоречия.

Вихревая труба с крестовиной обратного тока позволяет, кроме режима изотермического дросселирования, существенно повысить уровень температур горячего потока, что может быть использовано в двухтрубном энергетическом комплексе, разработанном предприятиями ОАО НИИТ, ФГУП НПП «Мотор» и учеными УГАТУ [2].

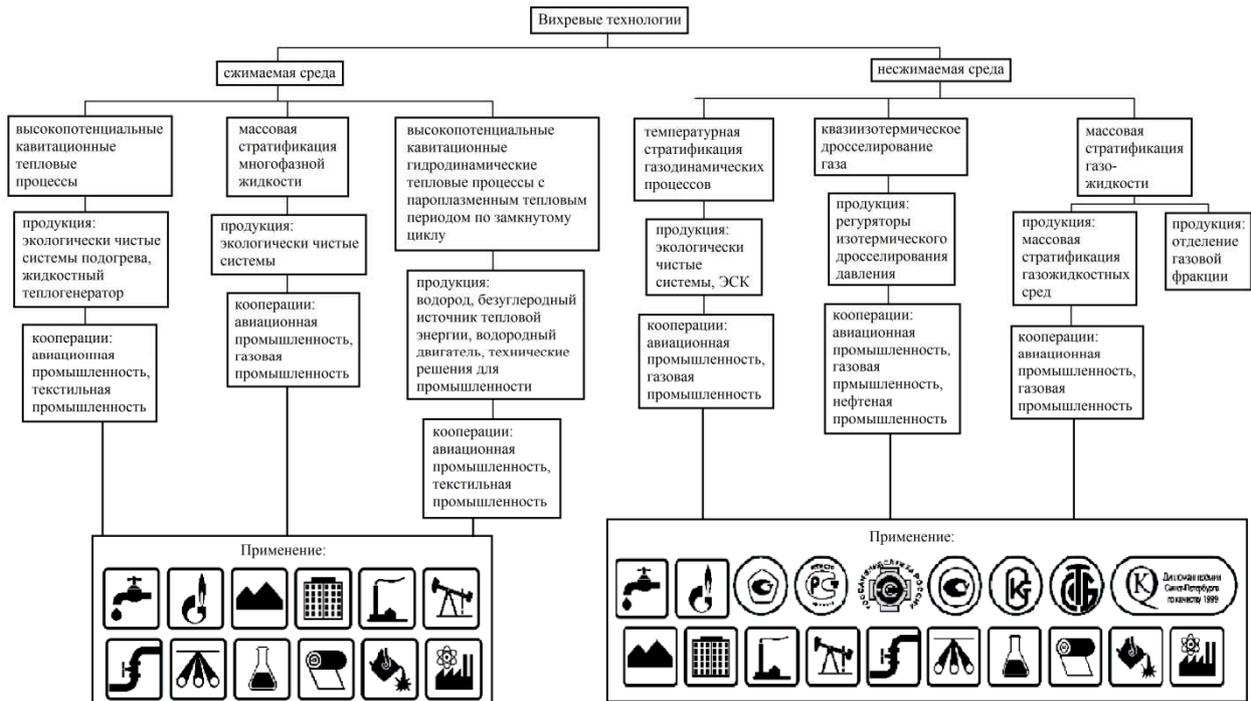


Рис. 1. Вихревые технологии

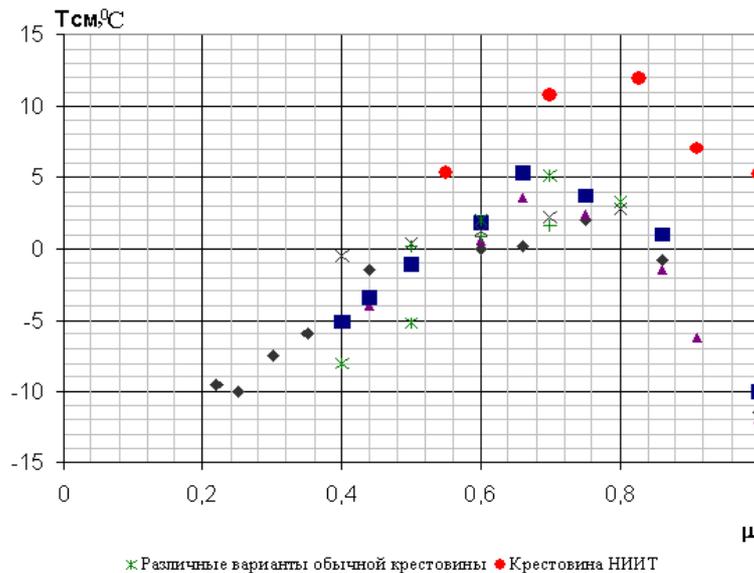


Рис. 2. Температура смешения холодного и горячего потоков [2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ГАЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Существующие системы дросселирования давления и регулирования расхода газа при транспортировке его потребителю предусматривают введение различных устройств (дожигание газа, подогрев от постороннего источника тепла) для компенсации снижения температуры.

При давлениях магистральных трубопроводов до 7,5 МПа потребителю поступает до $3 \cdot 10^{-3}$ МПа, что вызывает снижение температуры не менее чем на 25 градусов. Это вызывает необходимость увеличения эксплуатационных и материальных затрат на подготовку магистрального газа, а также является причиной усиления негативного воздействия на окружающую среду. Для решения вопросов энергетической эффективности и повышения экологичности процессов транспортировки и распределения

газа, был разработан энергосырьевой комплекс, включающий в себя ряд технологических и конструктивных решений.

Энергосырьевой комплекс (ЭСК) [7, 11], описываемый в [10], основан на применении особенностей вихревых течений высоконапорных потоков. Магистральный поток газа поступает на вихревую трубу первой ступени, где разделяется на горячий поток, насыщенный фракциями тяжелых углеводородов, и холодный поток, практически полностью осушенный. Холодный сухой газ поступает в турбодетандер, где срабатывает оставшаяся часть перепада давления с получением механической (электрической) энергии.

Горячий поток подается в вихревую трубу второй ступени, в которой также происходит его деление на холодную (сухую) и горячую составляющие (рис. 3).

Холодный газ второй ступени вихревой трубы подается в основной поток за турбодетандером. Горячий поток, значительно обогащенный тяжелыми углеводородами делением в двух вихревых трубах (в 15..20 раз по сравнению с процентным содержанием исходного магистрального газа), подается в теплообменник, где охлаждается холодным газом из турбодетандера

и сепарируется с отделением жидкой фракции тяжелых углеводородов и кристаллогидратов.

Путем рекомбинации процессов теплообмена между горячим обогащенным и холодным сухим газом обеспечивается повышение мощности турбодетандера за счет частичного возврата тепла горячего газа и получения оптимальных управляемых режимов конденсации тяжелых углеводородов (рис. 4).

По заказу ООО «Баштрансгаз» (договор № 489 от 16.07.02 г.) в 2001-2002 гг. в ОАО НИИТ под руководством В. Л. Юрьева, совместно с кафедрой ПГМ УГАТУ под руководством А. М. Русака, выполнены исследовательские работы по изучению особенностей процессов температурной и массовой стратификации при дросселировании давления газов в вихревых устройствах (вихревых трубах).

В область исследования был включен ряд направлений исследования вихревого эффекта.

Выделенный ряд включал в себя исследование процессов изотермического дросселирования потока газа, дросселирования потока газа с охлаждением и дросселирование с подогревом выходного потока газа. Одним из ключевых было дросселирование потока газа в вихревой трубе.

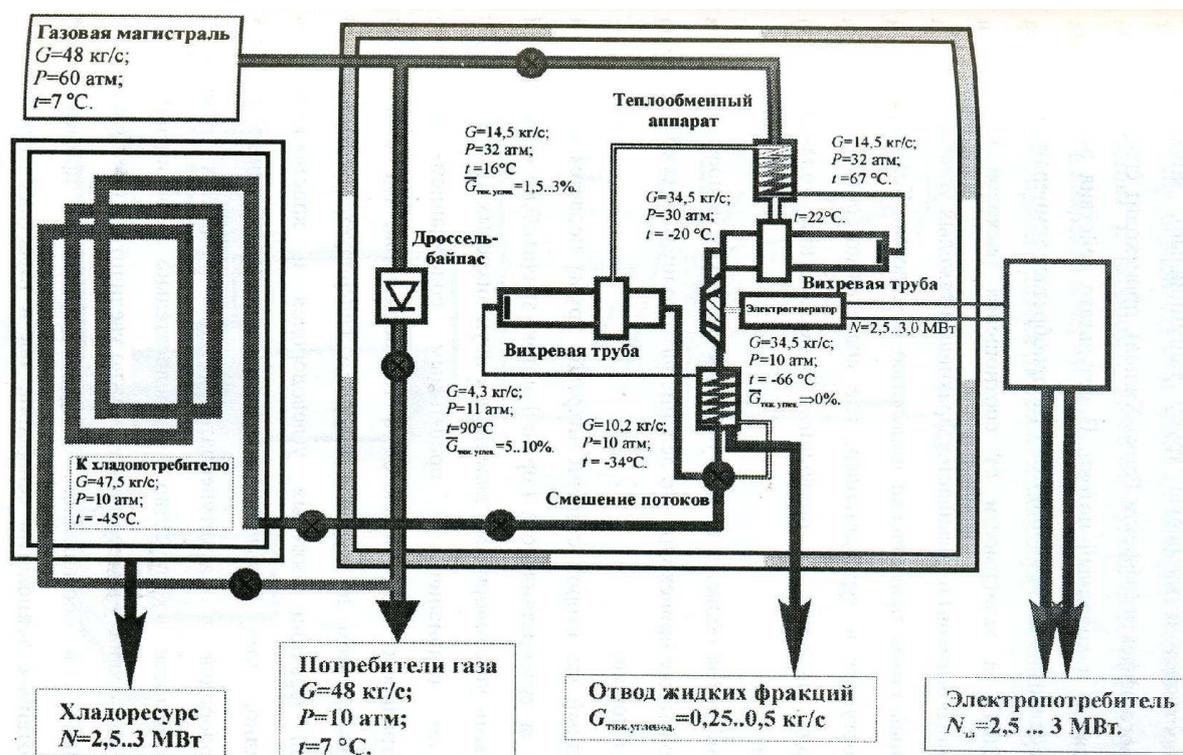


Рис. 3. Энергосырьевой комплекс [10]

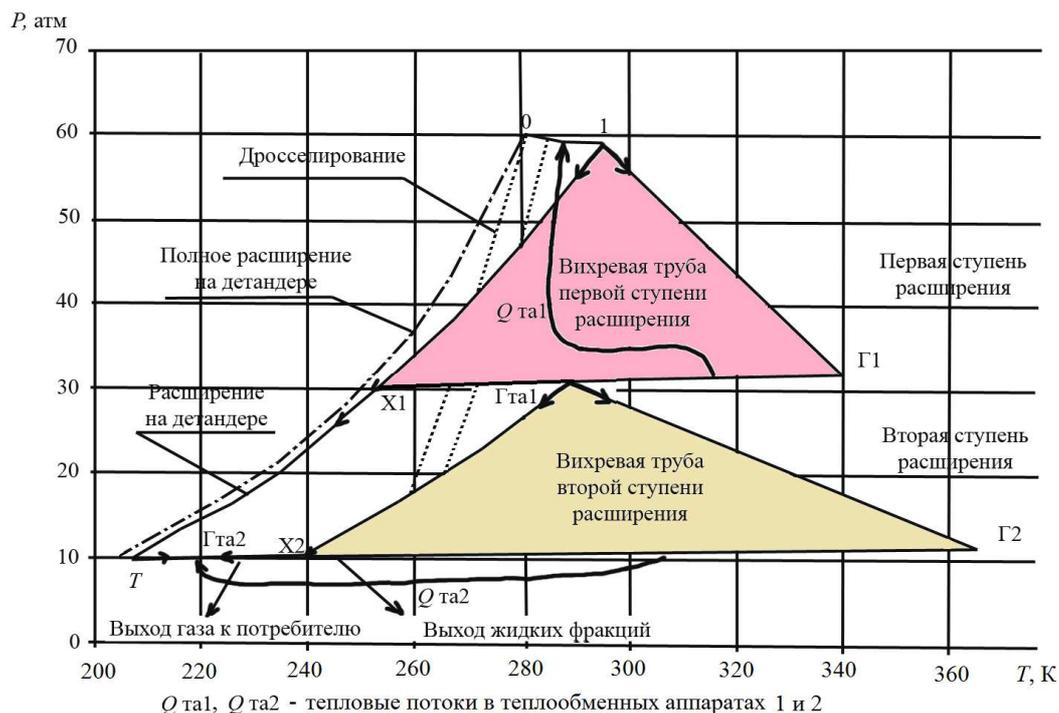


Рис. 4. Представление процесса в P - T координатах [10]

Проведенные исследования позволили разработать принцип дросселирования давления газа, позволяющий получить снижение давления практически без снижения температуры, а в определенной области перепадов давлений – с некоторым увеличением температуры. Разработанный принцип основан на использовании эффекта температурной стратификации (температурного разделения) при течении газа в вихревых аппаратах типа «вихревых» труб [2, 4, 5, 6, 9].

Особенность процессов в вихревых трубах состоит в том, что эффект Джоуля – Томсона при дросселировании давления нарушается дважды: по «холодному» потоку (значительное превышение эффекта охлаждения) и по «горячему» (меняется знак температурного эффекта).

Как показано в [3, 4, 5, 12, 13, 14], в ОАО НИИТ совместно с кафедрой ПГМ УГАТУ разработаны и испытаны на специальном стенде регуляторы давления газа с внутренним смешением «холодного» и «горячего» потоков после температурной стратификации. Показано, что температура «смесового» потока на выходе регулятора, в определенном диапазоне условий по расходу газа и давлению, может превышать температуру газа на входе. Это говорит о возможности реализации квазиизотермического цикла процесса дросселирования, что дополни-

тельно исследовалось в работах [15, 16, 18, 19] методом численного моделирования.

Изотермический вихревой регулятор давления (ИВРД) [8, 15] газа позволяет решить насущные проблемы, связанные с наружным и внутренним обмерзанием трубопроводов и необходимостью заменять дорогостоящее оборудование.

Применение ИВРД позволяет:

- снизить эксплуатационные затраты на оборудование газовых распределительных станций (ГРС);
- снизить затраты на транспортировку газа на газораспределительных станциях за счет исключения необходимости «дожигания» части природного газа для компенсации охлаждения при дросселировании;
- снизить затраты на экологические мероприятия.

Идеей создания регулятора было уменьшение влияния эффекта Джоуля-Томсона, для чего было реализовано предположение о том, что если в процессе дросселирования эффект нарушается по двум направлениям, то область подогрева потока можно использовать как источник предварительного подогрева потока для повышения входной температуры. А следовательно, повышению выходной из регулятора температуры, для чего в конструкцию регулятора была введена вихревая труба с коэффициентом

расхода по холодному потоку $\mu = 1$, а в области горячего потока было реализовано торможение и возврат потока в осевую область в направлении выходной диафрагмы. Результаты, полученные в результате численного моделирования, подтвердили предположение о возможности осуществления положительной обратной связи по температуре.

Основные качественные положения (наличие «положительной» обратной связи, наличие повышения температуры газа после дросселирования давления в вихревом регуляторе) нашли подтверждение в экспериментальной обработке двух типов вихревых газовых регуляторов: для газораспределительных станций в интервале давлений в магистрали 0,6–4,5 МПа при расходе газа до 20000 Нм³/час и для газораспределительных пунктов (ГРП) в интервале давлений 0,3–0,6 МПа при расходе газа до 500 Нм³/час.

В результате реализации положительной обратной связи, выполняется подогрев потока. Экспериментальные работы выявили подогрев входного потока газа на 5...8 °С, данные температуры на выходе из регулятора не соответ-

ствуют прогнозам в соответствии с эффектом Джоуля-Томсона более чем на 12...23 °С.

Для определения причин изменения параметров потока при дросселировании была составлена принципиальная схема взаимодействия потоков газа и стенок представленная на рис. 5.

В схеме описан механизм взаимодействия потока по всей проточной части изотермического вихревого регулятора давления, описаны параметры потока до и после каждого элемента проточной части. Для этого конструктивную схему было предложено описать поэлементно, для выявления промежуточных областей взаимодействия потоков.

При описании процессов теплообмена в области кольцевого канала должен учитываться подогрев потока газа от стенки вихревой трубы, имеющей большую температуру, нежели входной поток. Связывая источник тепла и область, воспринимающую тепло на схеме теплового взаимодействия, была определена обратная связь по тепловому контуру между элементами проточной части регулятора и потоком в кольцевом канале.

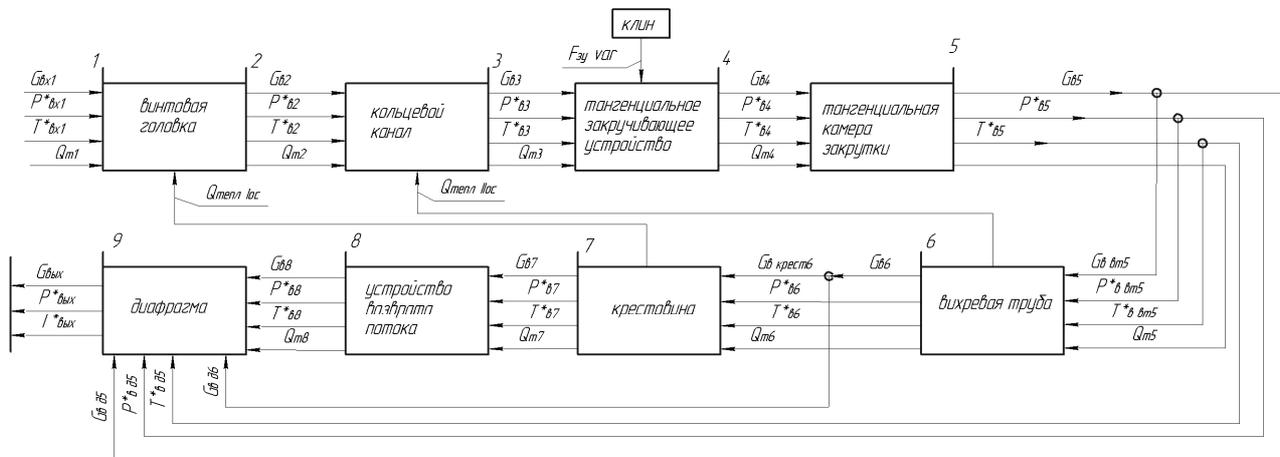


Рис. 5. Структурная схема тепловых процессов в ИВРД: $G_{вх1}$ – расход на входе в регулятора; $P_{вх1}^*$ – полное давление на входе в регулятора; $T_{вх1}^*$ – полная температура на входе в регулятора; $G_{в2}$ – расход после винтовой головки; $P_{в2}^*$ – полное давление после винтовой головки; $T_{в2}^*$ – полная температура после винтовой головки; $G_{в3}$ – расход после кольцевого канала; $P_{в3}^*$ – полное давление на входе в закручивающее устройство; $T_{в3}^*$ – полная температура на входе в на входе в закручивающее устройство; $F_{зy var}$ – проходная площадь; $G_{в4}$ – расход через сопловой ввод в закручивающее устройство; $P_{в4}^*$ – полное давление в сопловом вводе в закручивающее устройство; $T_{в4}^*$ – полная температура в сопловом вводе в закручивающее устройство; $G_{в вт5}$ – расход в вихревую трубу; $P_{в вт5}^*$ – полное давление на входе в вихревую трубу; $T_{в вт5}^*$ – полная температура на входе в вихревую трубу; $G_{в дб}$ – расход из камеры закрутки в диафрагму; $P_{в дб}^*$ – полное давление на входе в диафрагму; $T_{в дб}^*$ – полная температура на входе в диафрагму; $G_{в д}$ – расход из вихревой трубы в диафрагму; $G_{в крест}$ – расход через крестовину; $P_{в7}^*$ – полное давление в крестовине; $T_{в7}^*$ – полная температура в крестовине; $Q_{тепл.loc}$ – количество теплоты в I обратной связи; $Q_{тепл.Пос}$ – количество теплоты во II обратной связи; $P_{в8}^*$ – полное давление на выходе из крестовины; $T_{в8}^*$ – полная температура на выходе из крестовины; $G_{вых}$ – расход на выходе из регулятора; $P_{вых}^*$ – полное давление на выходе из регулятора; $T_{вых}^*$ – полная температура на выходе из регулятора

Структурная схема позволила выявить возможные взаимосвязи как по тепловому контуру, так и по расходу потока газа, связывающего все термогазодинамические параметры.

Дороговизна проведения натуральных экспериментов и большие затраты по времени стали определяющими в выборе средств исследования.

Численное моделирование явилось одним из самых удобных инструментов для проведения экспериментов. Для проведения численного моделирования была разработана трехмерная твердотельная модель и методика проведения численного эксперимента.

Математическая модель состоит из следующих допущения и уравнений:

- система не имеет теплообмена с окружающей средой;
- газодинамические поля во входном сечении однородны;
- уравнение неразрывности;
- уравнение движения;
- уравнение энергии;
- уравнение теплопереноса;
- уравнение состояния газа в форме Редлиха–Квонга.

При решении данной задачи использовалась двухпараметрическая $k - \epsilon$ – модель турбулентности. Ее выбор обусловлен соответствием условиям универсальности, эффективности по затратам счетного времени и широко известным приложениям.

Для описания термогазодинамических характеристик турбулентных течений в квазистационарной постановке, уравнения математической модели из классической формы преобразуются методом Рейнольдса и записываются в тензорном виде.

Численным моделированием показано наличие тепловых потоков, определены их направления и влияние на температурную стратификацию, а также выявлены обратные связи по тепло- и массопереносу. Показанное течение газа во внутреннем контуре ИВРД позволило определить взаимодействие вихревых потоков. Для верификации результатов численного моделирования был выполнен натуральный эксперимент, по результатам анализа и сопоставления с численным экспериментом можно судить об адекватности математической модели и математического аппарата, примененного в пакете прикладных программ SolidWorks.

В рамках численного моделирования были выполнены исследования распределения полной и статической температур, давления, скоростей и плотностей в тормозном устройстве (межлопаточное пространство и вход него) и устройстве возврата потока, распределение температур в металле по лопастям, стенке вихревой трубы и устройству возврата потока.

Немаловажным достижением проведенных исследований явилось обоснование принципов реализации квазиизотермического дросселирования и ряд рекомендаций для усовершенствования конструкции, дан ряд рекомендаций по проектированию отдельных элементов ИВРД, таких как винтовая головка, кольцевой канал, устройство торможения и возврата потока и диафрагма [17, 18, 19].

МАКРОСТРУКТУРА ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Течение газа в вихревой трубе относится к группе потоков с местной закруткой в осесимметричных каналах и обладает не только характерными свойствами таких потоков, но и своими специфическими особенностями. Закрученные потоки в вихревых трубах характеризуются:

- наличием трех градиентов давления – радиального, осевого прямого тока и осевого обратного тока;
- высокой степенью турбулентности потока по всем направлениям;
- соизмеримыми значениями осевой, тангенциальной, и в некоторых случаях, радиальной составляющими абсолютной скорости;
- непрерывным изменением структуры потока;
- наличием интенсивных процессов теплообмена.

Истечение газа из сопел и насадков подробно изучено и детально описано многими авторами. В данном случае происходит истечение газа из сопла с косым срезом в затопленную среду с пониженным давлением, что при соответствующем перепаде давлений порождает критическую область за сопловым вводом, где число Маха достигает значения $M \geq 1$ с непостоянным значением в радиальном направлении.

Анализ теоретических исследований показал, что главенствующее предпочтение в настоящее время занимает гипотеза взаимодействия вихрей, предложенная А. П. Меркуловым,

и ее интерпретации, в связи с качественной сходимостью теоретических данных с экспериментальными.

Обзор интерпретаций гипотезы взаимодействия вихрей показал основные направления в области объяснения процессов теплопереноса в закрученных течениях:

- передача тепла микрохолодильными циклами;
- турбулентный теплоперенос мелкошабными вихревыми структурами;
- передача тепла волновым взаимодействием, в том числе при помощи звуковых колебаний;
- теплоперенос крупномасштабными вихревыми структурами.

Согласно рассмотренной структуре потока, а также наиболее достоверному гипотетическому подходу о взаимодействии вихрей, можно обратиться к картине вихревого эффекта, основанной на материалах Ш. А. Пиралишвили.

Распределение полной энтальпии по радиусу в вихревой трубе происходит за счет двух потоков энергии:

- поток кинетической энергии от периферии к оси;
- поток тепловой энергии от оси к периферии.

Первый из указанных потоков обусловлен передачей момента количества движения от пе-

риферийного вихря центральному, приводящемуся за счет этого во вращение.

Второй поток энергии обусловлен распределением статических температур в радиальном направлении по сечению вихревой трубы. В соответствии с имеющимися данными о профиле полной скорости по радиусу вихревой трубы и известной зависимостью:

$$T_{ст} = T^* - \frac{V^2}{2c_p},$$

где $T_{ст}$ – статическая (термодинамическая) температура в рассматриваемой точке потока; T^* – полная температура; V – полная скорость; c_p – изобарная теплоемкость.

Можно сделать вывод, что статическая температура обратного течения выше, нежели прямого. Следовательно, радиальный градиент статической температуры направлен к оси трубы, а передача тепла происходит в обратном направлении. Предполагаемый механизм теплопередачи представлен на рис. 6.

При вращении КВС вокруг своей оси, внешние ее слои попеременно сообщаются с областью высокой статической температуры и пониженного давления в центральной части камеры энергоразделения и с областью низкой статической температуры и высокого давления в периферийной части камеры энергоразделения (рис. 7, 8).

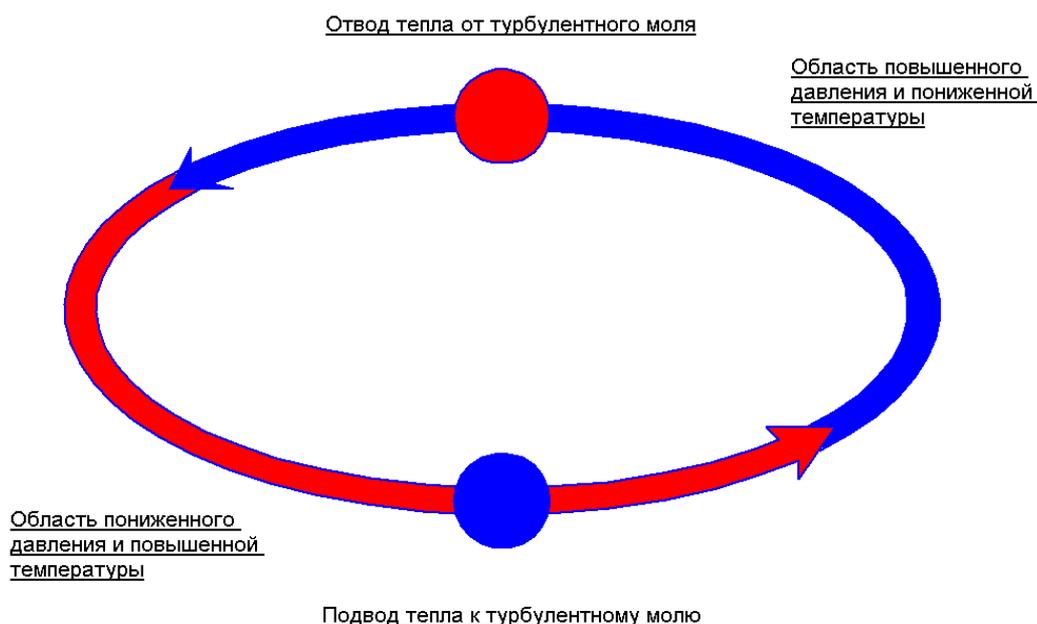


Рис. 6. Микрохолодильный цикл

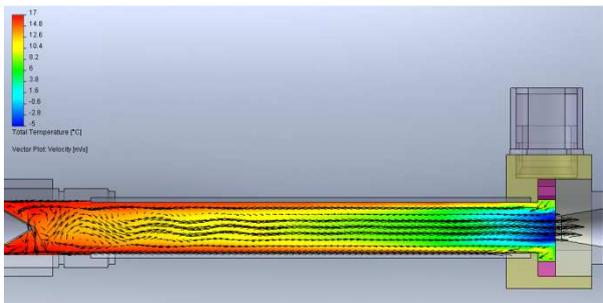


Рис. 7. Поле полной температуры потока

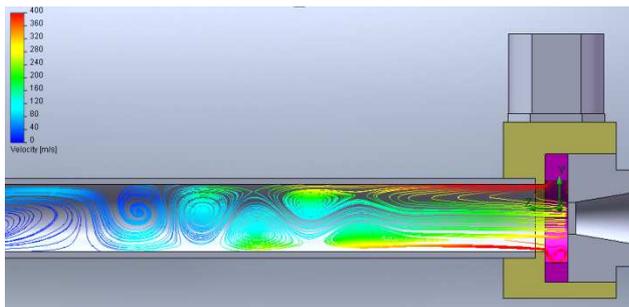


Рис. 8. Проекция крупно вихревых структур в линиях тока на плоскость симметрии камеры энергоразделения

Перемещаемые КВС частицы потока, так называемые турбулентные моли, совершают при этом холодильные циклы. Интенсификация этого механизма теплопереноса происходит вследствие нестационарности турбулентного течения, вызывающего высокочастотные пульсации КВС.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Результаты расчета могут быть представлены в виде полей параметров, радиальных эпюр траекторий движения частиц потока и различных графических зависимостей: турбулентной энергии, коэффициента теплопроводности и других параметров.

На рис. 9 представлены радиальные эпюры полной скорости течения воздуха в вихревой трубе. Данное распределение полной скорости по сечению согласуется с исследованиями скоростных полей различными авторами [15]. Видно, что скорость течения в периферийной области превышает скорость центрального течения в 3 раза.

Радиальное распределение полной скорости влечет радиальное распределение статической температуры (рис. 10).

Результаты численного эксперимента указывают на наличие радиального распределения статической температуры, причем центральный «холодный» поток оказывается статически более горячим, чем периферийный, более «горячий» по оценке полной температуры.

По мере удаления от устройства закрутки с выравниванием радиального поля полной скорости выравнивается радиальное распределение статической температуры. Значительное же распределение в области близ устройства закрутки порождает градиент статической температуры и обуславливает наличие теплообменного процесса.

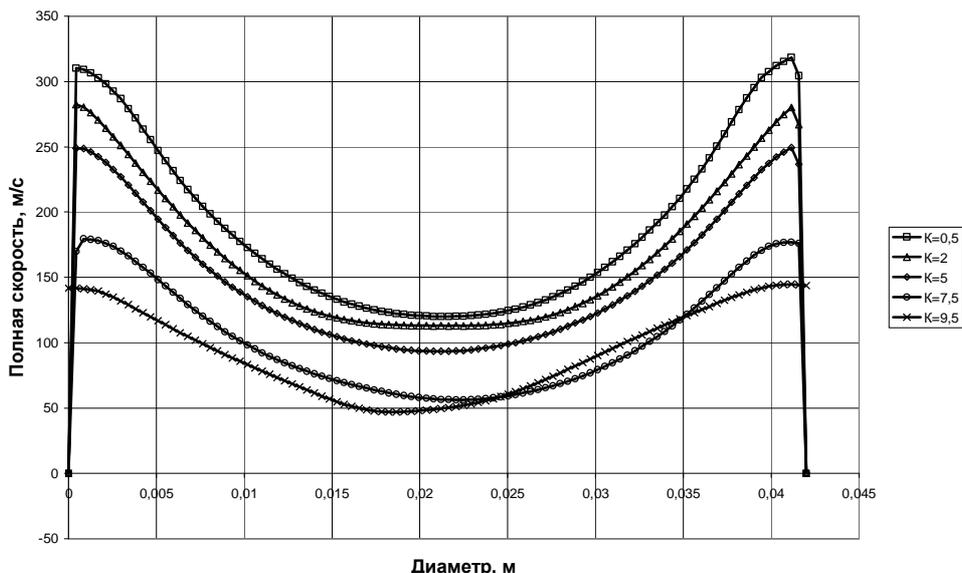


Рис. 9. Радиальная эпюра полной скорости

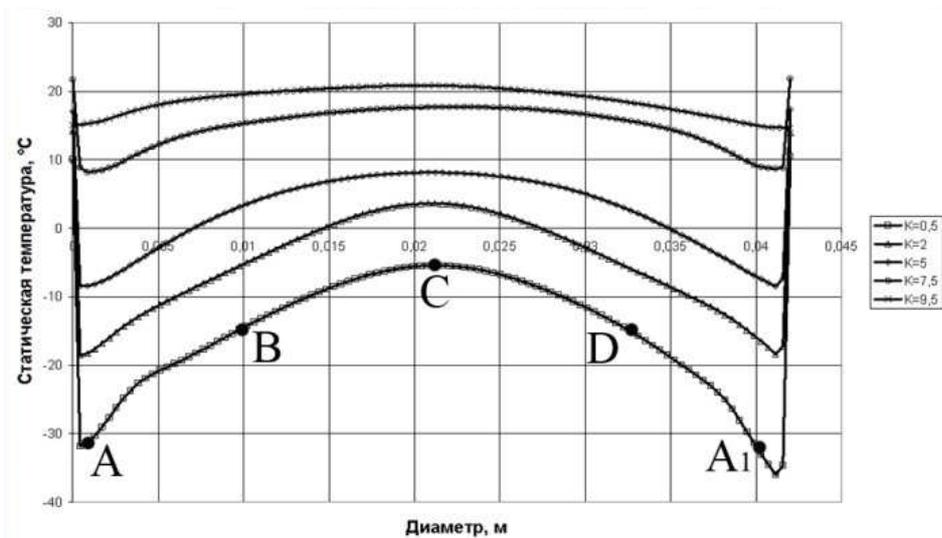


Рис. 10. Радиальные эпюры статической температуры

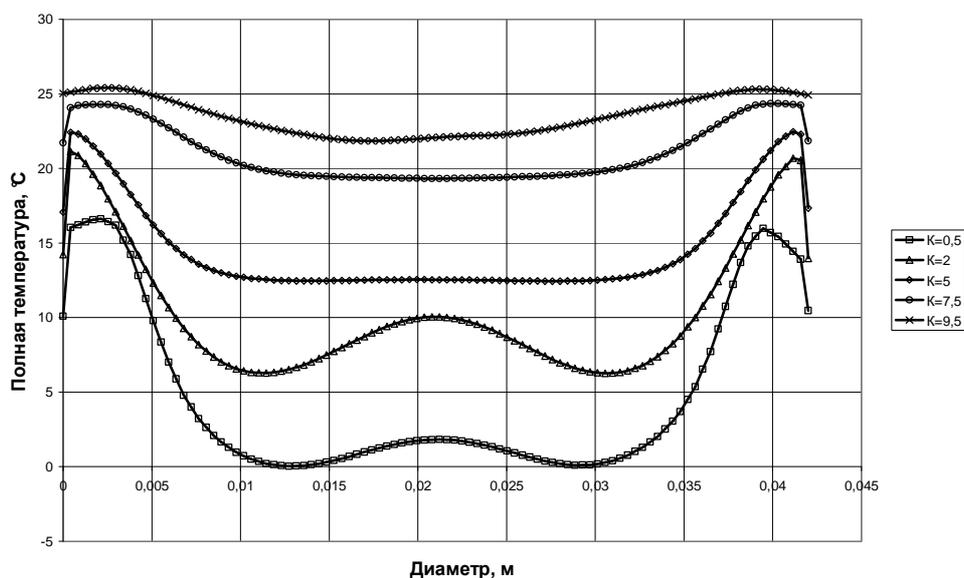


Рис. 11. Радиальные эпюры полной температуры

Все обозначенные процессы приводят к радиальному распределению полной температуры (рис. 11).

Наиболее интенсивный теплообмен наблюдается в области близлежащей к устройству закрутки, где имеют место наибольшие градиенты статической температуры. Результаты численного исследования процессов стратификации в вихревой трубе подтверждают гипотезу, предложенную выше: разница скоростей движения обуславливает разницу статических температур по радиусу камеры энергоразделения.

С выравниванием скоростного поля происходит выравнивание параметров потока, в том числе и статической температуры, что заметно ослабляет перенос тепла. Механизм переноса тепла определяется наличием крупной вихревой структуры, ось относительного вращательного движения которой соответствует точкам с наименьшей полной температурой и максимальной турбулентной энергией, что указывает на ее значительные пульсации.

На рис. 12 показан результат численного исследования изменения параметров внешней линии тока живого сечения крупной вихревой структуры за один оборот вокруг своей оси.

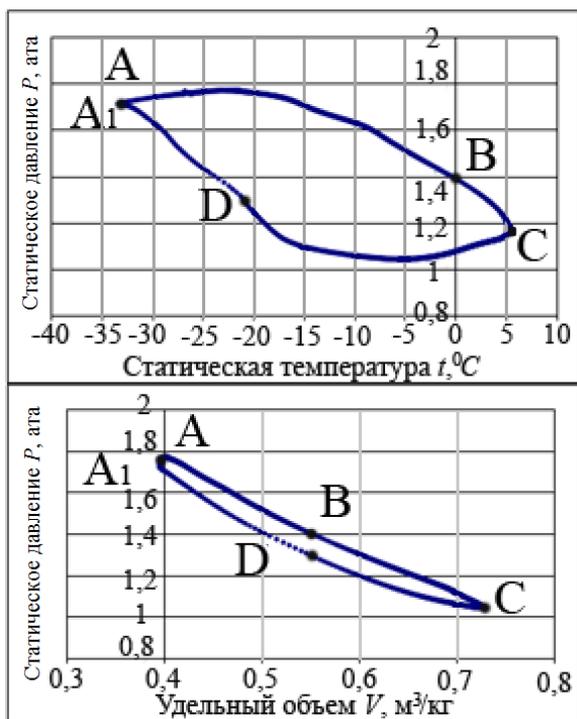


Рис. 12. Термодинамический процесс, совершаемый внешней линией тока живого сечения крупной вихревой структуры в $P-t$ и $P-V$ координатах

Графики приведены для сечения близ устройства закрутки, где наблюдается наиболее развитая турбулентность. Из графиков видно, что изменение параметров на поверхности крупной вихревой структуры указывает на наличие термодинамического процесса с совершением работы и переносом тепла.

ВИХРЕВАЯ ТЕРМОБАРОКАМЕРА

На рис. 13 представлена принципиальная схема системы охлаждения термобарокамеры (ТБК), спроектированной по техническому заданию НИИПМ, г. Пермь.

Подвод воздуха от компрессора к системе охлаждения осуществляется через регулируемый кран (КР) с предварительным охлаждением в двухкамерном теплообменнике (ТО).

На первой ступени системы охлаждения (ВТ1) происходит разделение входного потока на подогретый и охлажденный потоки. Подогретый поток первой ступени поступает в осевой эжектор (Эж), благодаря чему производится отвод воздуха из ТБК для поддержания требуемого давления. Охлажденный поток поступает на вход второй ступени системы охлаждения (ВТ2), где происходит аналогичное разделение

на подогретый и охлажденный потоки. Подогретый поток второй ступени поступает в теплообменник для охлаждения воздуха, подаваемого на первую ступень. Охлажденный поток второй ступени подается в ТБК для охлаждения. Эжектируемый из ТБК воздух также поступает в теплообменник для охлаждения входного потока первой ступени. Таким образом достигается максимальная утилизация остаточной энергии потоков системы вихревых труб. Имеющиеся в схеме краны (КР) необходимы для отключения ТБК от системы охлаждения, для обеспечения циклического режима работы, что также позволяет снизить энергетические затраты.

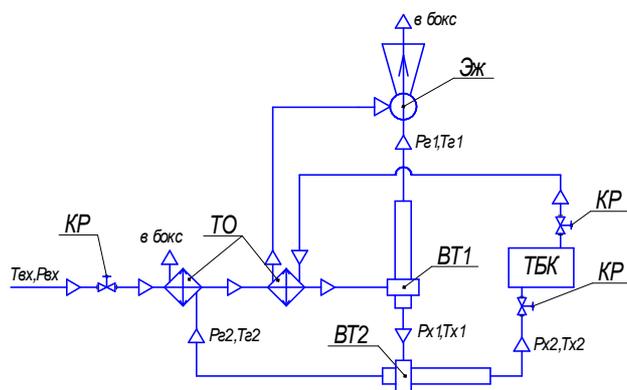


Рис. 13. Принципиальная схема системы охлаждения ТБК

Также повышение эффективности охлаждения осуществляется благодаря конструктивному исполнению узла подачи охлажденного воздуха в ТБК. Равномерное распределение холодного воздуха осуществляется через трехсекционную перфорированную трубу, находящуюся под полом полезного объема (рис. 14).

В режиме технологического охлаждения осуществляется контроль температуры и давления в термобарокамере. При достижении заданных параметров происходит отключение подачи холодного воздуха и перекрытие подвода и отвода холодного воздуха. Также осуществляется отключение (включение) подачи воздуха по сигналу открытия (закрытия) ворот загрузки.

Анализ энергетических характеристик существующей и спроектированной систем охлаждения показывает значительное преимущество предлагаемой вихревой системы. Основные энергетические характеристики приведены в таблице. Время охлаждения приведено для свободного объема ТБК без испытуемого образца.

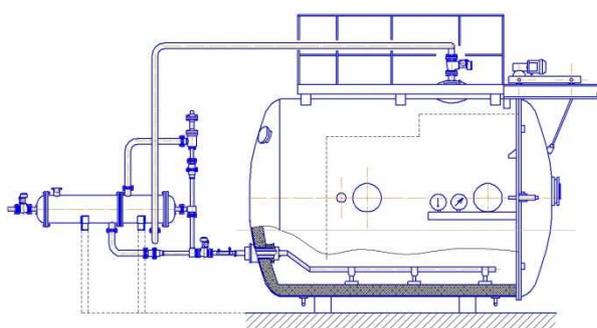


Рис. 14. Конструктивная схема системы охлаждения термобарокамеры

Энергопотребление вихревой системы, двукратно превышающее энергопотребление аммиачной, компенсируется высокой скоростью охлаждения. Хладопроизводительность вихревой системы практически двукратно превышает хладопроизводительность аммиачной.

Таблица

Характеристики систем охлаждения ТБК

Система охлаждения	Потребляемая мощность N, кВт	Хладопроизводительность При температуре -70°C и атмосферном давлении в ТБК Q, Вт	Время охлаждения от 20°C до -70°C
Аммиачная	40	1500,0	3,5 часа
Вихревая	84	2713,5	≈ 15 мин

ВЫВОД

Представленные материалы показывают, что использование вихревого эффекта при течении сжимаемых жидкостей могут значительно повысить эффективность технологий транспортировки сжиженных газов за счет экономии эксплуатационных и экологических затрат, а также исключения необходимости непродуктивного сжигания части транспортируемого газа. Кроме того, разработка высокоэффективного использования потенциальной энергии давления магистральных газов при необходимом дросселировании давления может позволить провести реализацию разнородной энергии в виде хладоресурса, выработке электроэнергии и сжиженного топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 22616-77. Трубы вихревые. Термины и определения.
- Разработка, изготовление и поставка опытного образца изотермического регулятора давления для редуцирования на ГРС без подогрева газа / Ю. М. Ахметов [и др.] // Технический отчет по договору № 489 от 16.07.02г. (I, II этап) / ОАО «НИИТ». Уфа, 2002.
- Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак [и др.] // Наука – производству. 45 лет на пути технического прогресса: Ежегодн. науч.-техн. сб. Уфа, 2003. С. 18–28
- Разработка теоретических и методологических основ создания энергосырьевых комплексов утилизации энергии давления магистральных газопроводов. Этап 2004 г. Оптимизация параметров ЭСК, проектирование и изготовление вихревого газового регулятора. Испытания регулятора: Отчет по проекту ФЦП «Интеграция», гос. контракт № Л0106/1028 от 24.07.02 г. / А. М. Русак [и др.]; ГОУ ВПО УГАТУ, ОАО «НИИТ», ФГУП «МОТОР». Уфа, 2004.
- Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак [и др.] // Сб. научных докладов РАН IV между. совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М: ИМАШ РАН, 2004 – С.133 – 144
- Комплекс утилизации потенциальной энергии давления газа магистрального газопровода / А. М. Русак [и др.] // Сб. научных докладов РАН IV международного совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М: ИМАШ РАН, 2004. С. 145–157.
- Пат. 2227243 РФ, МПК F17D1/04, F25B9/02. Энергосырьевой комплекс утилизации энергии редуцирования давления магистральных газопроводов / М. З. Асадуллин [и др.] (РФ). 2002123442/06; Заявлено 02.09.2002; Опубл. 20.02.2004.(УГАТУ)
- Пат. 2237918 РФ, МПК G05D16/00. Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / М. З. Асадуллин [и др.] (РФ). 2003114801/28; Заявлено 19.05.2003; Опубл. 10.10.2004. Бюл. 28.(НИИТ)
- Редуцирование давления и отделение жидкой фазы газа магистральных газопроводов с использованием вихревой техники / А.М. Русак [и др.] // Динамика машин и рабочих процессов: Сб. докладов Всероссийской научно-техн. конференции. ЮУрГУ, 2005. С. 87–90.
- Разработка системы редуцирование давления природного газа с отделением несанкционированной влаги на газорегуляторных пунктах (ГРП) / А.М. Русак [и др.] // Наука – производству. Ежегодн. науч.-техн. сб. Уфа, 2005. С. 79–91.

11. Пат. 2270396 РФ, МПК F17D1/04, F25B9/02. Энергосырьевой комплекс утилизации энергии редуцирования давления магистральных газопроводов / Ю. М. Ахметов [и др.] (РФ). 2004121019/06; Заявлено 08.07.2004; Опубл. 20.02.2006. Бюл.5.(НИИТ)

12. **Соловьев А. А., Пархимович А. Ю.** Качественный анализ системы регулирования давления магистрального газа // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 8, № 1. С. 7–12.

13. Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем / Ф. Г. Бакиров [и др.] // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 6 (24). С. 3–6.

14. **Свистунов А. В., Ситников А. А., Соловьев А. А.** Вихревой эжектор // Мавлютовские чтения: Сб. тр. Российск. науч.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2007. С. 86–89.

15. **Пархимович А. Ю.** Имитационное моделирование температурной стратификации закрученных потоков в вихревых хладогенераторах: дис. ... канд. техн. наук, 2009. 124 с.

16. **Соловьев А. А.** Численное и физическое моделирование процессов энерго и фазоразделения в вихревых трубах: дис. ... канд. техн. наук, 2009. 125 с.

17. Исследование влияния тормозного устройства на структуру потока и параметры изотермического вихревого регулятора давления / Ю. М. Ахметов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 149–153.

18. **Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В.** Численное моделирование процессов стратификации в изотермическом вихревом регуляторе с внутренним смещением // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 10, № 14(37).

19. **Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В.** Численное моделирование процессов температурной стратификации в изотермическом вихревом регуляторе. М.: ИМАШ РАН, 2010. С. 126–141.

ОБ АВТОРАХ

Русак Анатолий Михайлович, проф. каф. прикл. гидромех. Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. систем управления двигательными установками.

Ахметов Юрий Мавлютович, доц той же каф. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ 1959). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Пархимович Александр Юрьевич, ст. преп. той же каф. Канд. техн. наук по гидравлическ. машинам. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. вихревых течений.

Свистунов Антон Вячеславович, асс. той же каф. Дипл. магистр гидравлическ., вакуумн. и компресс. техники (УГАТУ, 2009). Дипл. бакалавр гидравлическ., вакуумн. и компресс. техники (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. газогидравлическ. течений и систем упр. энергетическ. установок.

Соловьев Алексей Александрович, ст. преп. той же каф. Канд. техн. наук по гидравл. машинам. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. газогидравлическ. течений и систем упр. энергетическ. установок.

Целищев Владимир Александрович, проф., зав. той же каф. Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики летательн. аппаратов и двигательных установок.

Чиндина Александра Александровна, магистрант той же каф. Дипл. бакалавр гидравлическ., вакуумн. и компресс. техники (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. газогидравлическ. течений и систем упр. энергетическ. установок.