

В. С. Жернаков, А. В. Целищев

## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ГАЗА ПРИ ВИХРЕВОМ ТЕЧЕНИИ

Рассматриваются вопросы численного и физического моделирования процесса массовой стратификации компонентов газожидкостного потока в вихревой трубе. Приводится описание процесса образования конденсата и пленочного течения жидкой фазы на стенке камеры вихревого устройства. Представлены результаты численного и физического исследования процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе с сепарационным узлом. *Вихревая труба; фазоразделение; газожидкостный поток*

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности широко распространены устройства для отделения дисперсных включений из газовых потоков. Максимальную эффективность имеют циклонные и вихревые устройства, реализующие закрутку многофазного потока с целью разделения его на компоненты. Устройства фазоразделения на основе вихревого эффекта представляют интерес в области осушения воздуха для производственных целей, а также для очистки природных газов от жидких примесей (воды и тяжелых углеводородов), так как одной из основных проблем, с которыми сталкиваются при транспортировке природных газов, является конденсация влаги и образование кристаллогидратов [1].

Существующие методы расчета рабочих параметров вихревых устройств основаны на экспериментальных зависимостях, полученных для определенных конструкций аппаратов, и не позволяют описывать тенденции изменения технологических характеристик аппаратов при вариации режимных параметров. Для вихревых устройств, работающих с газожидкостными смесями, эта проблема особенно важна, поскольку наличие в потоке жидкой фазы приводит к непрерывному изменению структуры течения и значительному отклонению эксплуатационных характеристик аппаратов.

Экспериментальные подходы в изучении закрученных потоков не позволяют в полной мере выявить закономерности, управляющие процессами фазоразделения при вихревом турбулентном течении газожидкостного потока в связи со сложностью замера параметров потока, ис-

пытывающих высокочастотные пульсации значений. По этой причине для исследования такого рода течений применяются современные методы численного моделирования. Вычислительный эксперимент позволяет определить оптимальные соотношения конструктивных и режимных параметров устройства, а также значительно повысить интенсивность и эффективность процессов фазоразделения газожидкостных потоков в вихревых аппаратах. Использование численных исследований наряду с натурным экспериментом позволяет с достаточной точностью выявить необходимые закономерности, управляющие процессом фазоразделения, и сформировать инженерную методику расчета и проектирования вихревых устройств фазоразделения.

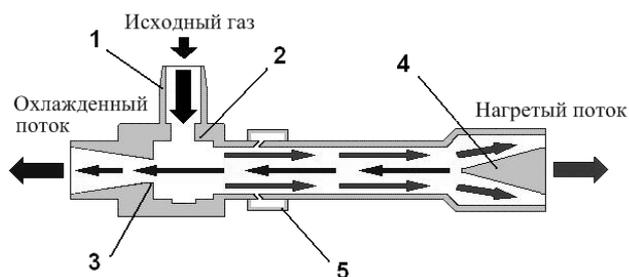
Таким образом, в настоящее время важным является проведение комплекса исследований по разработке методики расчета и моделирования процессов массовой стратификации компонентов газожидкостных потоков в вихревых аппаратах.

### 1. ЭФФЕКТ ФАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Вихревой эффект – эффект разделения газа при закручивании в цилиндрической или конической камере на два потока. На периферии образуется закрученный поток с большей температурой, а в центре – закрученный охлажденный поток, причем вращение в центре происходит в обратную сторону.

Наряду с получением холода и тепла, вихревая труба позволяет отделять жидкие примеси, присутствующие в газах непосредственно из закрученного потока. Использование свойств центробежного поля позволяет получить высокую степень очистки газа от дисперсных вклю-

чений. Для сепарации газожидкостных потоков используются вихревые трубы с сепарационным узлом, в которых отделяемые жидкие компоненты отводятся с частью газа в виде третьего потока (см. рис. 1). Основными функциональными элементами вихревой трубы являются: вихревая камера с тангенциальным сопловым вводом; диафрагма, примыкающая к камере; дроссельный клапан в камере энергетического разделения для обеспечения необходимого соотношения потоков и сепарационный узел.



**Рис. 1.** Вихревая труба: 1 – сопловый ввод; 2 – закручивающее устройство; 3 – диафрагма; 4 – дроссельный клапан; 5 – сепарационный узел

При подаче газа в сопловый ввод вихревой трубы жидкие компоненты, содержащиеся в нем, под действием центробежных сил отбрасываются на стенку, образуя пленку жидкости. Образовавшаяся пленка жидкости продолжает движение в камере энергетического разделения до сепарационного узла, где выводится из вихревой трубы с частью газа [2].

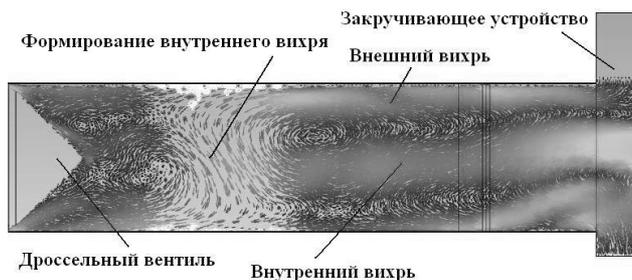
Наряду с сепарацией дисперсной жидкой фазы в поле центробежных сил, вихревые трубы позволяют проводить низкотемпературную очистку газа. Вследствие расширения газа в сопловом вводе устройства и снижения температуры приосевых слоев вихревого течения происходит снижение температуры потока, что позволяет получить возможность конденсации части компонентов газожидкостного потока непосредственно в камере вихревого аппарата.

## 2. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ОЧИСТКА ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

В вихревой трубе есть две зоны охлаждения газа и, соответственно, две зоны возможного появления сконденсированной жидкой фазы. Первая зона находится в сопловом вводе вихревой трубы и обусловлена понижением температуры газа при расширении. Вторая низкотемпературная зона находится в охлажденном приосевом потоке. Температура формирующегося

холодного потока начинает снижаться в районе дроссельного клапана и достигает минимального значения на срезе диафрагмы.

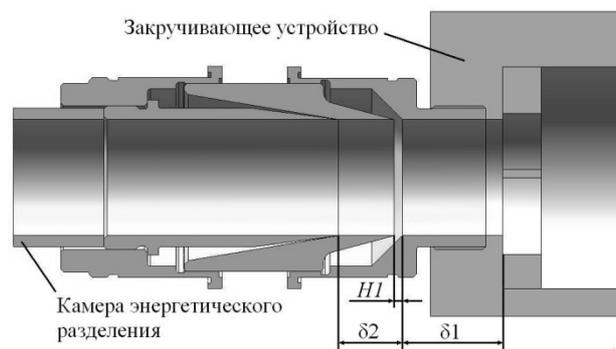
По мере снижения температуры газа в приосевом потоке может образовываться конденсат, который переносится под действием центробежных сил на стенку камеры энергетического разделения вихревой трубы и образует пленку жидкости [3]. На рис. 2 представлена структура течения газового потока в вихревой трубе.



**Рис. 2.** Структура газового потока в вихревой трубе

Таким образом, жидкая фаза может образовываться по всей длине камеры энергетического разделения, но в основном это должно происходить на участках, близких к сопловому вводу, где имеет место минимальная температура приосевых слоев вихревого потока.

В 2003 году инженеринговым центром ОАО «НИИТ» совместно с сотрудниками ФГБОУ ВПО «УГАТУ» был разработан и изготовлен экспериментальный сепарационный узел, представляющий собой приставку к вихревой трубе (см. рис. 3).



**Рис. 3.** Исследуемый сепарационный узел

В настоящей работе проводилось численное и экспериментальное исследование процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе с данным сепарационным узлом. Исследуемый сепарационный узел выполнен

в виде двух кольцевых щелей с регулируемой шириной  $H$ .

Жидкие компоненты, содержащиеся в газовом потоке, под действием центробежных сил отбрасываются на периферию закручивающего устройства и продолжают движение по стенке камеры энергетического разделения в виде пленки жидкости. Затем пленка жидкости попадает в кольцевую щель сепарационного узла и выводится из вихревой трубы с частью газа в виде третьего потока. Жидкая фаза, которая не была выведена из потока сепарационным узлом, продолжает движение в направлении дроссельного вентиля и выходит из вихревой трубы вместе с нагретым потоком.

В исследовании предлагается подход, предусматривающий поэтапное использование одномерных и многомерных моделей течения газа для определения конденсационных возможностей вихревой трубы с учетом температурной стратификации газового потока. Исследование проводится посредством расчетной оценки параметров газового потока, определяющих возможность образования конденсата в низкотемпературных зонах вихревой трубы.

Расчет процесса низкотемпературной сепарации в одномерной постановке проводится посредством определения среднemasовых параметров течения по зависимостям, представленным в литературе [4, 5, 6, 7]. В первой низкотемпературной зоне оценка проводится посредством расчета температуры газа на выходе из соплового ввода, при достижении которой происходит образование конденсата, на основании чего определяется режим истечения газа из сопла. Верификации полученных расчетов данных, а также определение параметров потока во второй низкотемпературной зоне осуществляется посредством проведения вычислительного эксперимента. Численное моделирование проводится в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX и позволяет проводить исследование процесса течения газожидкостного потока в вихревой трубе с учетом неравномерности распределения параметров в осевом и радиальном направлении.

Таким образом, при известных геометрических параметрах проточной части вихревой трубы и параметрах течения газового потока на входе можно посредством проведения вычислительного эксперимента определять конденсационные возможности вихревого аппарата. Обеспечив условия для образования конденсата в камере вихревого аппарата можно наряду

с сепарацией дисперсной жидкой фазы, имеющейся в исходном газе, получить возможность низкотемпературной очистки газа вследствие снижения температуры потока.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории газодинамики высоких давлений кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВПО «УГАТУ». На рис. 4 представлен внешний вид установки, на которой проводились экспериментальные исследования процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе с сепарационным узлом.

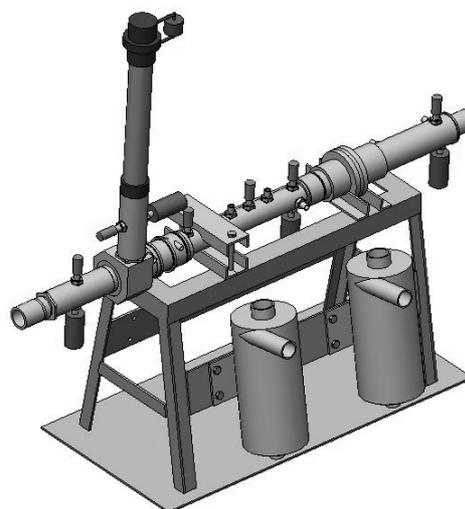


Рис. 4. Экспериментальный стенд

Натурные испытания были направлены на определение влияния конструктивных параметров вихревого устройства и параметров течения двухфазной смеси на процесс фазоразделения. Определялось оптимальное соотношение этих параметров для достижения максимальной эффективности отделения жидких компонентов из газового потока. К исследуемым параметрам относились: давление газа на входе в установку, соотношения расходов холодного и горячего потоков, ширина щелей сепарационного узла.

Было установлено, что сепарационный узел, установленный после соплового ввода весьма эффективен с точки зрения отделения влаги из газового потока, но с другой стороны ухудшает функцию ВТ как генератора холода. Для того, чтобы получить помимо центробежной сепара-

ции дисперсной жидкой фазы еще и образование конденсата, необходимо минимизировать влияние сепарационного узла на эффект охлаждения газа в вихревой трубе. Это может быть обеспечено оптимальным конструктивным оформлением сепарационного узла и определением его расположения в вихревой камере по отношению к сечению соплового ввода.

На рис. 5 представлена зависимость, демонстрирующая влияние ширины щели сепарационного узла на температуру холодного потока вихревой трубы при различных значениях давления газа на входе. На данном графике также показана зависимость температуры холодного потока от давления на входе при закрытом сепарационном узле. Проведенные эксперименты показали, что сепарационный узел снижает эффективность вихревой трубы как генератора холода на 30–40 %.

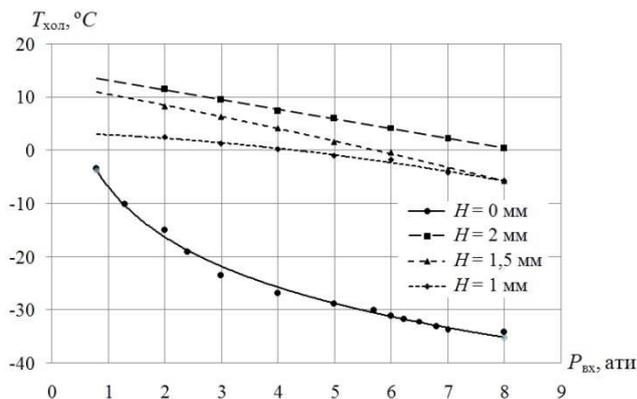


Рис. 5. Влияние ширины щели сепарационного узла  $H$  на температуру холодного потока вихревой трубы

Несмотря на низкую эффективность вихревой трубы с сепарационным узлом как генератора холода, получены убедительные экспериментальные данные по эффективности работы устройства в качестве сепаратора жидких компонентов, присутствующих в газе. На рис. 6 представлена зависимость эффективности отделения жидкой фазы из газового потока от ширины щели сепарационного узла.

В диапазоне относительного весового расхода холодного потока  $\mu$  от 0,2 до 0,5 максимальная эффективность фазоразделения была достигнута при установке ширины щели сепарационного узла на значении 1 мм. Количество жидкости, отбираемой из третьего потока, достигало 95 % от общего количества жидкости, подаваемой на вход.

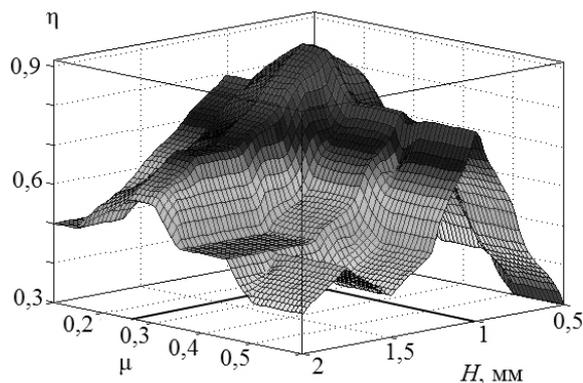


Рис. 6. Зависимость эффективности отделения жидкой фазы  $\eta$  от ширины щели сепарационного узла  $H$  и относительного весового расхода холодного потока  $\mu$

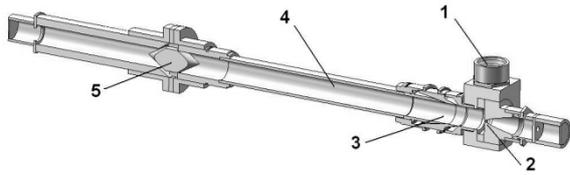
Согласно зависимости, представленной на рис. 5, при ширине щели, равной 1 мм, наблюдается наименьшее влияние сепарационного узла на эффект энергетического разделения, что, в свою очередь, обеспечивает возможность образования конденсата.

#### 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Для оптимизации конструктивных параметров вихревого устройства и параметров течения двухфазной смеси наряду с экспериментальными исследованиями проводилось также численное моделирование процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе с помощью пакета вычислительной гидродинамики Ansys CFX. Геометрические размеры модели соответствовали параметрам вихревой трубы, используемой в экспериментах: диаметр камеры энергетического разделения – 42 мм; диаметр диафрагмы – 20 мм; угол раскрытия диффузора – 60°; длина камеры энергоотделения – 300 мм; ширина критического сечения – 14 мм; высота критического сечения – 9 мм.

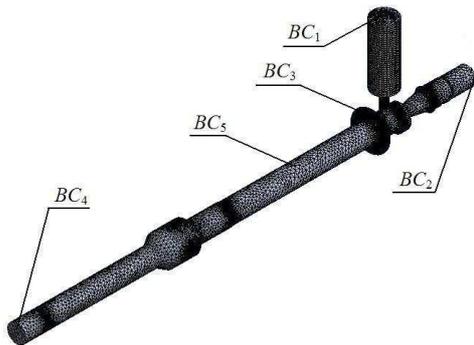
По указанным размерам в среде пакета твердотельного моделирования Solid Works была разработана трехмерная модель вихревой трубы с сепарационным узлом, представленная на рис. 7.

Следующим этапом после построения геометрической модели было выделение проточной части и, на ее основе, создание расчетной сетки для области решения. Расчетная область течения газа представлена на рис. 8. Суммарное количество расчетных ячеек составило 3 019 000.



**Рис. 7.** Твёрдотельная модель вихревой трубы: 1 – сопловой ввод; 2 – диафрагма; 3 – сепарационный узел; 4 – камера энергетического разделения; 5 – дроссельный вентиль

В области решения задавались следующие параметры потока: сплошная фаза – воздух; дисперсная фаза – вода; размер частиц дисперсной фазы. На твердые поверхности ( $BC_5$ , см. рис. 8) ставилось граничное условие *Wall* – твердая, непроницаемая, гладкая адиабатическая стенка. Скорость и градиент температуры на стенке равнялся нулю. На входной поверхности ( $BC_1$ ) задавалось граничное условие Bulk Mass Flow – общий массовый расход. Двухфазный поток (сплошная и дисперсная фаза) задавался объемными долями от общего массового расхода.



**Рис. 8.** Расчетная область

На выходе холодного потока ( $BC_2$ ) был задан массовый расход, соответствующий относительному весовому расходу холодного потока  $\mu = 0,3$ . На выходах горячего потока ( $BC_4$ ) и сепарационного узла ( $BC_3$ ) ставилось условие по давлению. Для моделирования турбулентности использовалась *k-ε* модель со стандартными пристеночными функциями.

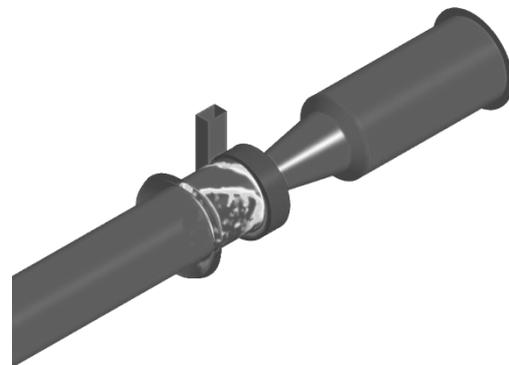
В результате решения задачи были получены поля распределения объемной концентрации фаз в камере вихревой трубы. Анализ полученных результатов визуализирует эффект фазоразделения (массовой стратификации) компонентов двухфазного потока. На рис. 9 представлено распределение объемной доли жидкой фазы при течении газожидкостного потока в вихревой трубе без сепарационного узла.



**Рис. 9.** Распределение объемной доли жидкой фазы в вихревой трубе

Дисперсная жидкая фаза, попадающая в сопловой ввод вихревой трубы, под действием центробежных сил отбрасывается на стенку, образуя пленку жидкости. Образовавшаяся пленка жидкости продолжает движение в камере энергетического разделения. Вследствие нагрева газа в камере энергетического разделения происходит испарение компонентов из сформированной пленки и обогащение газа горячего потока.

На рис. 10 представлено решение той же задачи в вихревой трубе с сепарационным узлом.



**Рис. 10.** Распределение объемной доли жидкой фазы в вихревой трубе с сепарационным узлом

Выявлено, что исследуемая конструкция сепарационного узла позволяет полностью выводить образующийся на стенке камеры вихревой трубы слой жидкости при массовом содержании жидкой фазы в потоке до 10 %. Также подтверждено, что данный вариант отбора позволяет отделить максимальное количество жидких примесей из газового потока, не допуская их испарения вследствие нагрева газа горячего потока.

С другой стороны, расположение сепарационного узла в камере вихревой трубы на неко-

тором удалении от среза соплового ввода минимизирует его влияние на эффект энергетического разделения, что, в свою очередь, обеспечивает возможность образования конденсата во внутреннем низкоскоростном вихре.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численного и физического исследования позволил разработать методику расчета и моделирования процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе противоточной конструкции. Методика позволяет проектировщику или исследователю, используя современные вычислительные средства, проводить анализ эффективности процесса фазоразделения в вихревых аппаратах в широком диапазоне варьируемых конструктивных параметров устройства и гидродинамических параметров течения газового потока. Методика также позволяет определять потенциальные возможности вихревой установки при использовании ее в качестве низкотемпературного сепаратора, позволяющего отделять конденсирующиеся компоненты из газового потока.

Обеспечение численной модели экспериментальными данными позволяет создать «виртуальный стенд», позволяющий проводить исследовать влияние различных узлов вихревой установки и гидродинамических параметров потока на процесс массовой стратификации компонентов газожидкостного потока.

Исходя из результатов исследования, можно сделать вывод о том, что подход к исследованию многофазных вихревых течений с использованием численного моделирования является обоснованным. Полученное решение математической модели двухфазного вихревого течения позволило проводить исследования организованных высокопотенциальных газожидкостных течений в вихревых устройствах в широком

диапазоне варьируемых конструктивных параметров аппарата и газодинамических параметрах потока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численное моделирование течения газожидкостного потока в вихревой трубе / Ю. М. Ахметов [и др.] // Вестник УГАТУ. Т. 14, № 1 (36), 2010. С. 32–39.
2. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов [и др.]. М.: Машиностроение, 1985. 249 с. с.
3. Взаимосвязь сепарационных и термодинамических характеристик трехпоточных вихревых труб / М. А. Жидков [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. Май, 2001. С. 8–11.
4. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
5. **Дейч М. Е.** Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
6. Математическое моделирование нелинейных термогазодинамических процессов в многокомпонентных струйных течениях / Л. Н. Холпанов [и др.]. М.: Наука, 1998. 320 с.
7. **Меркулов А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 184 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Жернаков Владимир Сергеевич**, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

**Целищев Антон Владимирович**, асп. той же каф. Дипл. бакалавр по энергомашиностроению (УГАТУ, 2007). Дипл. магистр гидравл., вакуумн. и компрес. техники (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. вихревого эффекта.