

УДК 621.643

Ю. М. АХМЕТОВ, А. А. СОЛОВЬЕВ, А. А. ТАРАСОВ, А. В. ЦЕЛИЩЕВ

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Рассматривается актуальная проблема процесса фазоразделения в вихревой трубе классической противоточной схемы с целью повышения эффективности отделения конденсирующихся компонентов из газа. Представлены результаты численного моделирования. *Вихревая труба; осушение; фазоразделение*

Исследование процессов фазоразделения двухфазных потоков в вихревых устройствах, реализующих эффект Ранка, в частности, многопоточной вихревой трубе, а также совершенствование методов расчета и проектирования таких устройств является задачей весьма актуальной.

Устройства фазоразделения на основе вихревого эффекта представляют интерес в области подготовки газа к транспортировке. Добываемый попутный (нефтяной) газ в большинстве случаев содержит большое количество воды и тяжелых углеводородов, которые при определенных соотношениях давления и температуры газа могут конденсироваться, образовывать твердые гидраты и жидкие эмульсии. Это создает трудности при транспортировании газа и при работе различных узлов оборудования газопровода.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В процессе нефтедобычи в составе скважинной продукции поступает попутный нефтяной газ (ПНГ), который зачастую сжигают на промыслах, что приводит к необоснованным потерям углеводородного сырья и ущербу экологии всего региона.

По данным министерства природных ресурсов, в России ежегодно добывается около 60 миллиардов кубических метров этого газа. Причем только 25% извлеченного газа нефтяные компании продают на газоперерабатывающие заводы (ГПЗ), 45% либо списывается на технологические потери, либо используется как сырье в энергетике. Оставшиеся 30% (18 миллиардов кубических метров) – сжигаются в промысловых факелах, при этом загрязняющие выбросы в атмосферу исчисляются тысячами тонн.

Министерство природных ресурсов РФ оценило потери России от нерационального использования попутного газа в 13 миллиардов долларов в год.

Данное исследование входит в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации до 2011 года и в перечень критических технологий Республики Башкортостан.

Для подачи попутного нефтяного газа в магистральный газопровод необходима очистка и осушение газа до показателей, соответствующих нормативам газопровода. При больших объемах транспортируемого газа его осушение является наиболее эффективным и экономичным способом предупреждения образования кристаллогидратов в магистральном газопроводе.

В настоящее время для удаления из газа конденсирующихся компонентов (осушения газа) применяют методы абсорбции, адсорбции и низкотемпературной сепарации.

Но, как показывает практика подготовки попутного газа к транспортировке, применение абсорбции, адсорбции, низкотемпературной очистки с помощью холодильных машин и других методов требует значительных капитальных и энергетических затрат [2]. Указанные способы применяются в основном для очистки природных газов. Осушение попутного нефтяного газа этими методами осуществляется довольно редко по причине того, что стоимость попутного газа не покрывает экономических затрат на его подготовку. Установлено, что более экономичной является газодинамическая технология в специальных устройствах, таких как: пульсационные охладители газа, волновые детандеры, газодинамические осушители, вихревые трубы (ВТ).

Небольшой перепад давлений попутного газа практически исключает возможность реа-

лизации традиционной схемы низкотемпературной сепарации, основанной на эффекте дросселирования. Расширители с более высоким температурным КПД (турбодетандеры, ВД, ПОГ) весьма сложны и ненадежны в эксплуатации. Технология с применением ГДО практически не проработана [1].

Наиболее целесообразна и эффективна технология для осушения нефтяного газа, основанная на вихревом эффекте, которая реализована в других процессах газовой, нефтяной и химической промышленности.

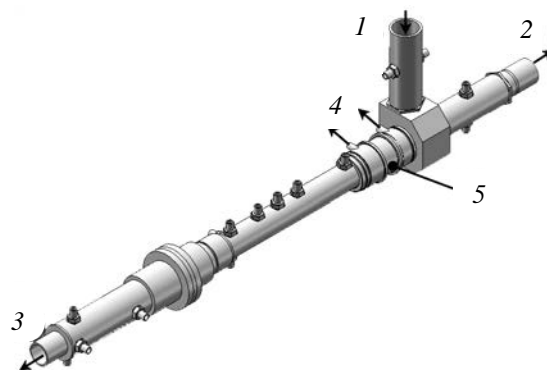
## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Способ очистки газов от конденсирующихся компонентов путем применения вихревого эффекта не применяется широко по причине недостаточной изученности процесса течения двухфазного потока в камере вихревой трубы. Также существует необходимость исследования влияния конструктивных и газодинамических параметров на процесс фазоразделения и эффективность отделения жидкой фракции из газа. В 2001 г. в УГАТУ в рамках выполнения работ по федеральной целевой программе «Интеграция» были начаты работы по разработке теоретических и методологических основ создания энергосырьевых комплексов на основе вихревого эффекта для утилизации энергии давления магистральных газопроводов. Инжиниринговым центром ОАО «НИИТ» совместно с учеными УГАТУ был разработан и изготовлен экспериментальный фазоотборник, представляющий трехпоточную приставку к вихревой трубе. В данной работе применялось экспериментальное и численное исследование процесса течения газожидкостной смеси в вихревой трубе.

Как численное, так и экспериментальное исследование было направлено на определение влияния конструктивных параметров вихревой установки и параметров течения двухфазной смеси на процесс фазоразделения. Определялось оптимальное соотношение этих параметров для достижения максимальной степени осушения газа.

## 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполненные экспериментальные исследования направлены на определение влияния различных параметров на эффективность отделения влаги из воздуха. Объектом испытания служила вихревая труба цилиндрическая газовая с фазоразделителем, представленная на рис. 1.



**Рис. 1.** Экспериментальная вихревая труба: 1 – подвод сжатого воздуха; 2 – выход холодного потока; 3 – выход горячего потока; 4 – вывод отделенной жидкой фазы; 5 – фазоразделитель

Экспериментальное исследование процесса отделения влаги из газа можно условно разбить на несколько серий. Во всех сериях экспериментов производились замеры давления и температуры на различных участках вихревой трубы.

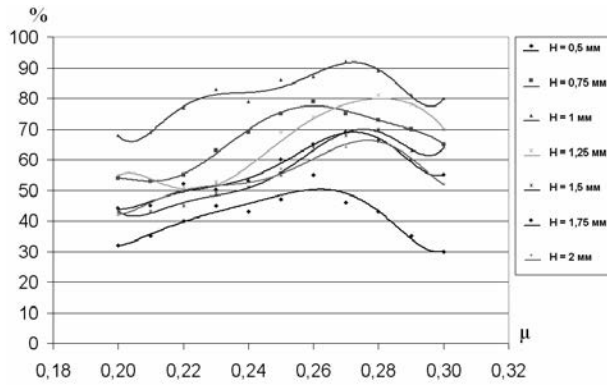
Первая серия экспериментов была направлена на исследование влияния давления и температуры подаваемого на вход вихревой установки воздуха на эффективность отделения жидкой фракции из газового потока. В этой серии экспериментов на вход в вихревую трубу подавался сжатый воздух в диапазоне давлений от 2 до 8 атм. при различной температуре.

Вторая серия экспериментов была направлена на оценку эффективности осушения газа при различных внутренних диаметрах дроссельной шайбы холодного выхода вихревой трубы. При проведении этой серии экспериментов использовался набор шайб с диаметрами от 6 до 25 мм.

Третья серия экспериментов была посвящена определению влияния положения регулятора расхода горячего выхода вихревой трубы на эффективность фазоразделения.

В четвертой серии экспериментов исследовалось влияние высоты щели фазоразделителя на эффективность осушения газа. Исследование производилось при следующих значениях высоты щели: 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2 мм.

На рис. 2 представлена зависимость эффективности осушения от высоты щели фазоразделителя и относительного весового расхода холодного потока.



**Рис. 2.** Зависимость эффективности осушения от высоты щели фазоразделителя и относительного весового расхода холодного потока

Данный график наглядно подтверждает то, что в диапазоне относительного весового расхода холодного потока  $\mu$  от 0,2 до 0,3 наибольшая эффективность отделения влаги была достигнута при установке высоты щели фазоразделителя на значении 1 мм.

В результате проведения экспериментальных исследований было определено оптимальное соотношение конструктивных и газодинамических параметров для достижения максимальной эффективности осушения.

Для проведения численного исследования была выбрана математическая модель двухфазного течения в постановке Эйлера, где фазы рассматриваются как взаимопроникающие среды, сосуществующие в области течения. Уравнения для сохранения массы, импульса и энергии решаются для каждой фазы. В настоящее время [3, 4] реализована модель шести уравнений и давления, дополненная  $k$ - $\varepsilon$ -моделью турбулентности для высоких чисел Рейнольдса. Набор уравнений для отдельных масс, импульсов и сохранения энергии решается для каждой фазы, а фазы связаны между собой через члены импульсов и теплопередачи. Давление считается одним и тем же для каждой фазы. Для описания членов межфазного взаимодействия и замыкания уравнений предполагаются субмодели [6].

В уравнениях и моделях индекс « $c$ » ставится для «непрерывной фазы», а индекс « $d$ » – для «дисперсной фазы». Базовые уравнения для эйлеровой модели следующие:

Уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) = 0, \quad (1)$$

Перечисления оформляются так:  $\alpha_i$  – объемная доля;  $\rho_i$  – плотность;  $u_i$  – средняя скорость фазы;  $i = c, d$ .

Кроме того, объемные доли должны удовлетворять соотношению:

$$\sum_{i=c}^d \alpha_i = 1. \quad (2)$$

Уравнение импульса

$$\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\alpha_i \nabla p + \alpha_i \rho_i g + \nabla [\alpha_i (\tau_i + \tau_i^t)] + M_i, \quad (3)$$

где  $\tau_i$  и  $\tau_i^t$  – молекулярное и турбулентное напряжения;  $p$  – давление (равное для обеих фаз);  $g$  – вектор силы тяжести;  $M_i$  – передача межфазного импульса на единицу объема.

Передача межфазного импульса представляет сумму всех сил фаз, влияющих друг на друга и удовлетворяющих соотношению  $M_c = -M_d$ . Внутренние силы представляют силы внутри фазы, эти силы ограничены взаимодействием частиц между собой в дисперсной фазе.

Уравнение энергии решается для статической энтальпии в химико-термической форме.

$$\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i h_i) - \nabla \cdot \left( \alpha_i \left( \lambda_i \nabla T_i + \frac{\mu_i^t}{\sigma_h^t} h_i \right) \right) = \alpha_i (\tau_i + \tau_i^t) : \nabla u_i + Q_i, \quad (4)$$

где  $h_i$  – статическая энтальпия;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности;  $T_i$  – температура;  $\mu_i^t$  – турбулентная вихревая вязкость;  $\sigma_h^t$  – турбулентное термодиффузионное число Прандтля;  $Q_i$  – межфазная теплопроводность.

Турбулентность течения моделируется на основе  $k$ - $\varepsilon$ -модели для больших чисел Рейнольдса. Модифицированные уравнения решаются для первой фазы, а турбулентность второй фазы вычисляется с использованием полуэмпирических моделей. Дополнительные члены учитывают эффекты частиц в турбулентном поле. Уравнения для турбулентности имеют вид:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c k_c) &= \nabla \cdot \left( \frac{\alpha_c (\mu_c + \mu_c^t)}{\sigma_k} \nabla k_c \right) + \\ &+ \alpha_c (G - \rho_c \varepsilon_c) + S_{k2}, \\ \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c \varepsilon_c) &= \nabla \cdot \left( \frac{\alpha_c (\mu_c + \mu_c^t)}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_c \right) + \\ &+ \alpha_c \frac{\varepsilon_c}{k_c} (C_1 G - C_2 \rho_c \varepsilon_c) + S_{\varepsilon2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k_c$  – турбулентная кинетическая энергия непрерывной фазы;  $\mu_c$  – молекулярная вязкость непрерывной фазы;  $\sigma_k$  – турбулентное число Прандтля для уравнения  $k$ ;  $\varepsilon_c$  – скорость дисси-

пации для  $k_\varepsilon$ ;  $\sigma_\varepsilon$  – турбулентное число Прандтля для уравнения  $\varepsilon$ ;  $C_1$  и  $C_2$  – константы для  $k$ - $\varepsilon$ -модели для больших чисел Рейнольдса:

$$G = \mu_c \cdot (\nabla \cdot u_c + (\nabla \cdot u_c)^T) : \nabla \cdot u_c, \quad (7)$$

а члены  $S_{k2}$ ,  $S_{\varepsilon2}$  представляют двухфазное взаимодействие, которое должно моделироваться.

Межфазная передача импульса включает силы лобового сопротивления, эффективную массу и подъемную силу:

$$M_d = F_D + F_{VM} + F_L. \quad (8)$$

Сила лобового сопротивления  $F_D$  включает среднюю составляющую и флуктуацию, действующие между дисперсной фазой и окружающими турбулентными вихрями. В общем виде, следуя выводам Госмана (Gosman) и др. [5], сила лобового сопротивления (drag force) моделируется так:

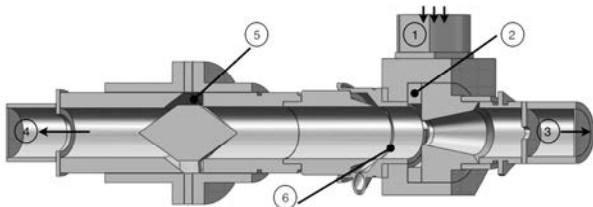
$$F_D = A_D u_r - A_D \frac{v_c^t}{\alpha_d \alpha_c \sigma_\alpha} \nabla \alpha_d, \quad (9)$$

где

$$A_D = \frac{3}{4} \frac{\alpha_d \rho_c C_D}{d} |u_r|, \quad (10)$$

$u_r$  – относительная скорость между фазами;  $d$  – средний диаметр дисперсной фазы;  $\sigma_\alpha$  – турбулентное число Прандтля (обычно равно 1,0);  $v_c$  – турбулентная кинематическая вязкость непрерывной фазы;  $C_D$  – коэффициент лобового сопротивления, вычисляемый на основе соотношений Шиллера и Наумана (Schiller и Naumann) [4].

В соответствии с ними была построена модель проточной части вихревой трубы с фазоразделителем, представленная на рис. 3. Численное моделирование процесса фазоразделения проводилось в пакете ANSYS CFX.



**Рис. 3.** Модель проточной части вихревой трубы: 1 – подвод сжатого воздуха; 2 – камера закручивающего устройства; 3 – выход холодного потока; 4 – выход горячего потока; 5 – регулятор расхода воздуха на горячем выходе; 6 – фазоразделитель

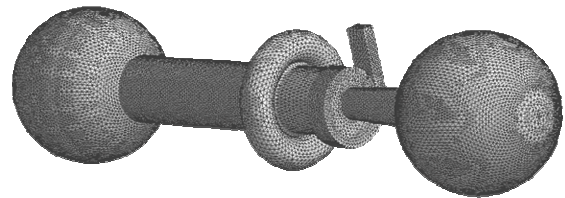
Для численного моделирования была выбрана цилиндрическая вихревая труба класси-

ческой противоточной схемы. Основные конструктивные параметры моделируемой вихревой трубы соответствовали экспериментальной вихревой установке, на которой проводились экспериментальные исследования.

Вихревая труба имеет следующие геометрические параметры:

- диаметр вихревой трубы – 42 мм;
- диаметр диафрагмы – 20 мм;
- угол раскрытия диффузора – 60°;
- длина камеры энергоразделения – 300 мм;
- ширина критического сечения – 14 мм;
- высота критического сечения – 9 мм;
- диаметр дроссельной шайбы холодного выхода – 10 мм;
- положение регулятора расхода горячего выхода – 0,8 оборота (смещение конуса – 1,2 мм, площадь проходного сечения – 81,96 мм<sup>2</sup>);
- высота щели устройства фазоразделения – 1 мм.

Из представленной трехмерной модели была создана расчетная область течения газа, в которую были добавлены шаровидные элементы для исключения влияния граничных условий. Расчетная модель представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Проточная часть вихревой трубы, используемая в качестве расчетной области

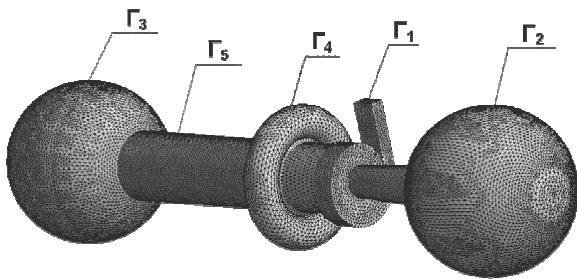
Цель расчета – определить относительную эффективность отделения частиц дисперсной фазы (частиц воды) из двухфазного потока устройством фазоразделения при следующих параметрах потока:

- сплошная фаза – воздух, 25°С (298°К);
- дисперсная фаза – вода, 25°С (298°К);
- расход воздуха – 0,18 кг/с = 9 м<sup>3</sup>/ч;
- давление сжатого воздуха на входе в ВТ – 7 атм. (0,709 МПа);
- размер частиц дисперсной фазы – 0,05 мм;
- плотность частиц дисперсной фазы – 1000 кг/м<sup>3</sup>;
- сила тяжести – 9,81 м/с<sup>2</sup>;
- коэффициент поверхностного натяжения (воздух–вода) – 0,07286 Н/м.

На твердые поверхности ( $\Gamma_5$ , см. рис. 5) ставилось граничное условие Wall – твердая, не-

проницаемая, гладкая адиабатическая стенка. Скорость и градиент температуры на стенке равнялся нулю ( $V|_{\Gamma_5} = 0$ ,  $\partial T/\partial n|_{\Gamma_5} = 0$ ). На входной поверхности ( $\Gamma_1$ ) задавалось граничное условие Bulk Mass Flow – общий массовый расход (0,1766 кг/с). Двухфазный поток (сплошная и дисперсная фаза) задавался объемными долями от общего массового расхода. Объемная доля сплошной фазы задавалась равной 0,97 (97% от всего потока). Объемная доля дисперсной фазы задавалась равной 0,03 (3%).

В начальный момент времени задавались давление, скорость, температура, параметры турбулентности ( $V|_{t=0} = V_0$ ,  $P|_{t=0} = P_0$ ,  $T|_{t=0} = T_0$ ,  $k|_{t=0} = 0$ ,  $\varepsilon|_{t=0} = 0$ ).



**Рис. 5.** Задание граничных условий:  $\Gamma_1$  – вход;  $\Gamma_2$  – выход холодного потока;  $\Gamma_3$  – выход горячего потока;  $\Gamma_4$  – выход устройства фазоразделения;  $\Gamma_5$  – стенка

Для описания движения частиц в аппаратах вихревого типа используются две модели. Первая (Лагранжева) рассматривает траектории одиночных частиц и может достоверно описывать движение крупных и среднедисперсных частиц, если имеет место упругое соударение частиц со стенкой аппарата. Модель позволяет решить задачу об эффективности фазоразделения статистически. Полученное этим способом решение для всех частиц строится по принципу обобщения поведения в потоке небольшой группы частиц (порядка 1000). Особенностью решений такого типа является расчет «граничного» размера частиц. Частицы меньше этого размера не оседают на стенку камеры вихревой трубы и, следовательно, не могут быть отобраны фазоразделителем.

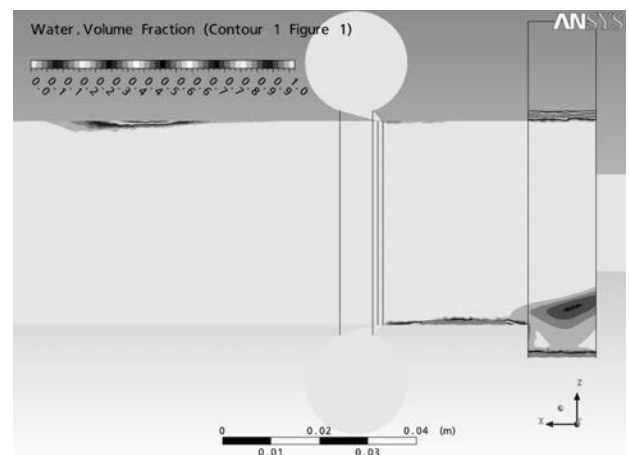
В случае тонкодисперсных (до 10 мкм) и мелкодисперсных частиц (до 100 мкм) соударениями со стенкой пренебрегают, так как они уже не играют существенной роли. Жидкая фаза не может изучаться уже на модели одиночных частиц, так как было доказано теоретически, что частицы взаимодействуют друг с другом, приобретая свойства сплошной среды.

Транспорт частиц в этом случае должен рассматриваться с учетом их концентрации в рамках модели Эйлера. Достоинством этой модели является то, что разность концентраций частиц между двумя точками определяет диффузионный поток частиц, который обеспечивается турбулентными пульсациями сплошной среды (в нашем случае воздуха). Этот механизм объясняет существование в вихревых аппаратах областей аномально высоких концентраций тонкодисперсных частиц, полученных опытным путем.

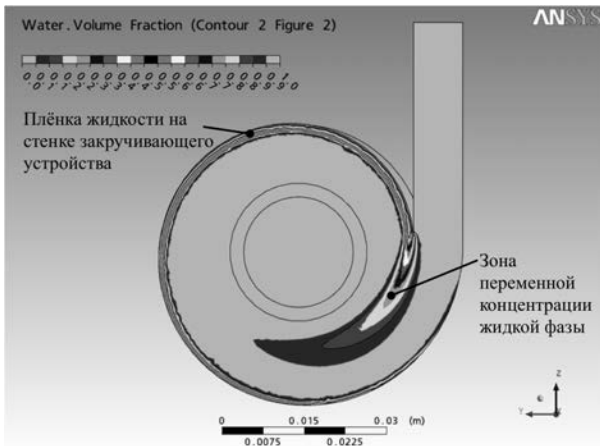
Этот экспериментальный факт не может быть описан в рамках модели частиц Лагранжа. Для описания движения частиц дисперсной фазы в этой работе была выбрана Эйлера модель. Движение сплошной среды также описывалось в рамках модели Эйлера [4]. Турбулентность течения моделируется на основе  $k$ - $\varepsilon$ -модели для больших чисел Рейнольдса.

Расчет проводился с помощью ANSYS CFX Solver. Для достижения потребного критерия сходимости (величины нормализованной невязки) значений не ниже  $10^{-3}$  был остановлен на 845 итерации. Время расчёта составило около 15 часов.

Результаты численного моделирования обрабатывались средствами постпроцессора ANSYS CFX-Post. Результаты численного решения будут представлены в виде распределения параметров в продольном и поперечном сечениях вихревой трубы. Продольное сечение проходит вдоль образующей камеры энерго-разделения. Поперечное сечение – посередине закручивающего устройства.



**Рис. 6.** Распределение объемной концентрации жидкой фазы в сечении вдоль ВТ



**Рис. 7.** Распределение объемной концентрации жидкой фазы в закручивающем устройстве

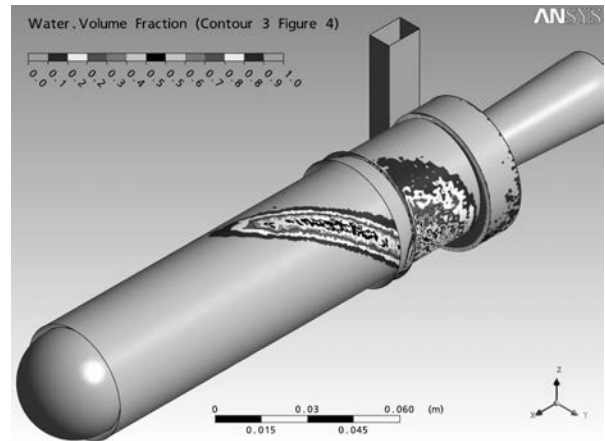
Как видно из рис. 7, пленочное течение начинает формироваться в закручивающем устройстве вихревой трубы [8]. Образовавшаяся пленка жидкости продолжает движение в камере энергоразделения, так как минимальный диаметр улитки, выполненной по архимедовой спирали, составляет 42 мм, что соответствует внутреннему диаметру камеры энергоразделения. Затем эта пленка жидкости на стенке камеры попадает в кольцевую щель устройства фазоразделения (см. рис. 6). Неравномерное распределение пленки жидкости в продольном сечении (см. рис. 6) объясняется вихревым характером ее течения, т. е. она движется по спирали.

Из рис. 7 видно, что на стенке закручивающего устройства концентрация жидкой фазы равна единице.

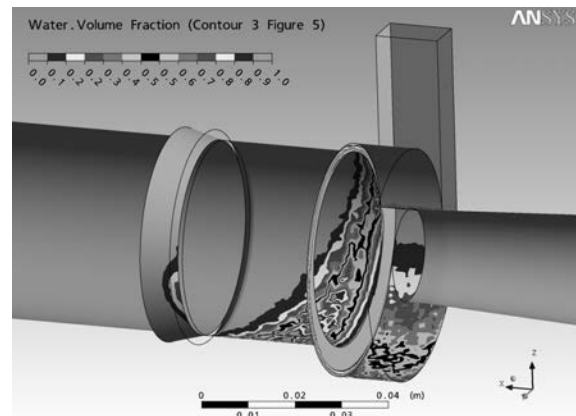
Рис. 8 наглядно подтверждает характер и направления течения жидкости на внутренней стенке камеры вихревой трубы. После выхода пленки жидкости из закручивающего устройства характер ее течения приобретает винтовую форму. По этой причине на рис. 6 в продольном сечении объемная концентрация неравномерно распределена в верхней и нижней части камеры энергоразделения.

На рис. 9 представлено пленочное течение на периферии закручивающего устройства и стенке камеры ВТ. Видно, что на внутренней стенке закручивающего устройства концентрация жидкой фазы максимальна.

Для количественной оценки эффективности сепарации потока были проведены два сечения, для которых определялась массовая концентрация жидкой фазы. Эти сечения расположены на расстоянии 20 мм до и после щели устройства фазоразделения.

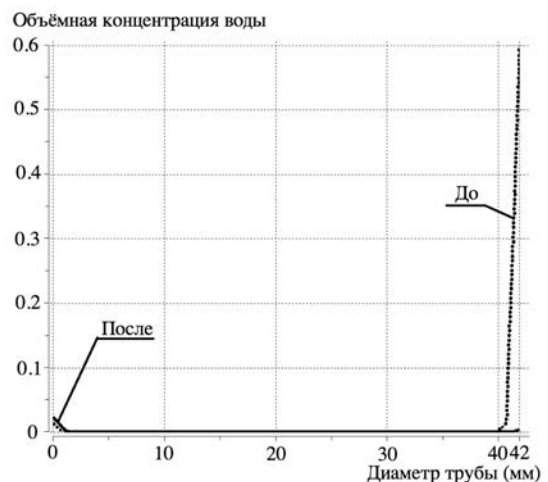


**Рис. 8.** Распределение объемной концентрации жидкой фазы в закручивающем устройстве и на внутренней стенке камеры ВТ



**Рис. 9.** Пленочное течение на периферии закручивающего устройства и стенке камеры ВТ

На рис. 10 приведены графики распределения объемной концентрации жидкой фазы для этих сечений. Судя по данным графикам можно судить об эффективности отделения влаги щелью устройства фазоразделения.



**Рис. 10.** Распределение объемной концентрации жидкой фазы по сечениям

Результаты, полученные с помощью пакета ANSYS CFX, свидетельствуют о возможности использования данного пакета для моделирования двухфазного течения в вихревых установках.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с результатами численного и физического исследования была построена основная характеристика экспериментальной установки для осушения газа – зависимость эффекта сепарации от содержания жидкости в смеси. На данном графике приведены результаты численного эксперимента при различных диаметрах частиц дисперсной фазы (жидкости) (см. рис. 11).

Для построения этой зависимости были введены два безразмерных параметра:

- эффект сепарации ( $S$ ), который определяется отношением расхода отделенной жидкости к расходу вводимой:

$$S = \frac{G''}{G'}$$

где  $G''$  – расход вводимой жидкости;  $G'$  – расход отделенной жидкости.

- содержание жидкости в смеси ( $m$ ), которое определяется отношением расхода вводимой жидкости к расходу смеси:

$$m = \frac{G'}{G_c}$$

где  $G_c$  – расход смеси.

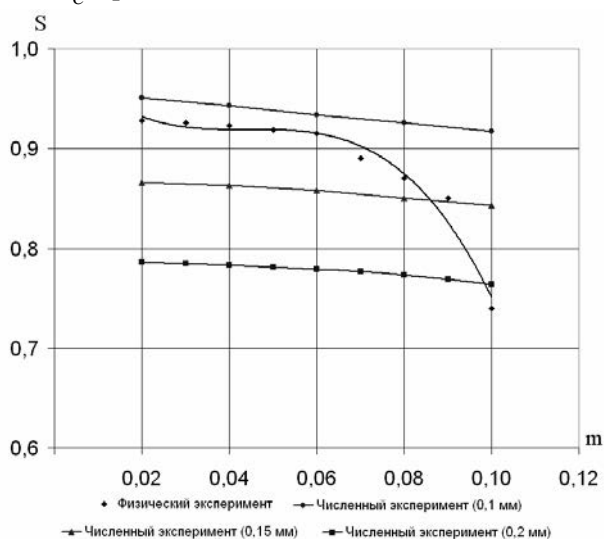


Рис. 11. Сопоставление результатов численного и физического исследования

Исходя из результатов экспериментального исследования, можно сделать вывод о том, что при данных конструктивных параметрах вихревой трубы и устройства фазоразделения обес-

печивается отделение не менее 90% влаги при содержании жидкости в смеси до 7%.

#### 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работы на экспериментальной установке для осушения газа на базе вихревой трубы позволили составить рекомендации по применению многопоточных вихревых труб для сепарации двухфазных потоков со степенью отделения жидкой фракции 90...95%.

Установлено, что при содержании жидкой фазы в несущем газовом потоке до 10% по массе наибольшей эффективностью обладают устройства фазоразделения со следующими параметрами:

- осевое положение щели фазоразделителя: 0,5(21 мм) – 1(42 мм) калибр от устройства закрутки;
- ширина щели фазоразделителя:  $(0,035 - 0,06)r$ , где  $r$  – радиус вихревой трубы;
- коэффициент расхода, при котором достигаются наилучшие показатели сепарации:  $0,24 < \mu < 0,3$ .

#### ВЫВОДЫ

1. Разработана численная модель двухфазного вихревого течения с массовой стратификацией компонентов при прохождении криволинейных каналов закручивающего устройства. Получено количественное решение распределения концентрации фаз в камере вихревой трубы.

2. Проведенные исследования показали, что экспериментальная установка эффективно отделяет влагу из воздуха при содержании водяных паров в газе до  $200 \text{ г/м}^3$ . Точка росы газа по влаге после проведения осушения составляет  $-40^\circ \text{C}$ .

3. Разработаны практические рекомендации по проектированию и применению вихревых устройств фазоразделения для сепарации двухфазных потоков со степенью отделения до 90–95%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А. П. Подготовка ПНГ к транспорту: автореф. дисс... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Тюмень: ТюмГНГУ, 2004.
2. Жидков М. А., Гусев А. П., Комарова Г. А. Применение регулируемых и трехпоточных вихревых труб в химической, газовой и нефтедобывающей промышленности // Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды: сб. тр. Рыбинск, 2001. 46 с.

3. **Кирпиченко В. Е.** Исследование рабочего процесса вихревых труб в двухфазных средах. Куйбышев: КуАИ, 1988. С. 128–130.

4. **Соловьев А. А.** Численное и физическое моделирование процессов энерго и фазоразделения в вихревых трубах: дисс... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2008.

5. Исследование изменения температурных параметров в изотермическом вихревом регуляторе давления газа / А. А. Соловьев [и др.] // Сб. тр. Росийск. науч.-техн. конф. «Мавлютовские чтения». Т. 4. Уфа: УГАТУ, 2006. С. 95–100.

6. **Соловьев А. А., Пархимович А. Ю.** Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 8, № 1. С. 13–15.

7. Численное моделирование системы регулирования давления магистрального газа / А. А. Соловьев [и др.] // Наука – производству: Науч.-техн. сб. Вып. 4. Уфа, 2006. С. 15–21.

8. Использование особенностей вихревых течений для получения квазиизотермического процесса дроселирования давления природного газа / А. М. Русак [и др.] // Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе РБ: Сб. науч. тр. АН РБ. Уфа: Гилем, 2005. С. 37–49.

## ОБ АВТОРАХ



**Ахметов Юрий Мавлютович**, доц. каф. прикл. гидромех., зам. ген. дир. НИИТ. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1959). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.



**Соловьев Алексей Александрович**, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий по энергомашиностр. (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по гидравл. машинам и гидропневмоагр. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. газодинамики и термодинамики закрученных потоков.



**Тарасов Артем Андреевич**, магистрант той же каф. Дипл. бакалавр по энергомашиностр. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. вихревого эффекта.



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