

Ю. М. Ахметов, А. В. Целищев

ЭФФЕКТ ФАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В КАМЕРЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Рассматривается процесс массовой стратификации компонентов газожидкостного потока в камере вихревой трубы. Приводится математическая модель двухфазного вихревого течения. Приводятся результаты численного моделирования процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе. *Вихревая труба; фазоразделение; газожидкостный поток; закручивающее устройство; двухфазное вихревое течение*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно хорошо изучен эффект энергетического разделения газовых потоков в вихревых трубах. Процессы же фазоразделения, протекающие в них при работе на газожидкостных потоках, исследованы в значительно меньшей степени. Многими исследователями отмечается, что наряду с получением нагретого и охлажденного потоков, вихревая труба может работать в качестве эффективного сепаратора газожидкостных смесей и представляет значительный интерес в области очистки природных газов от жидких примесей.

На протяжении долгого времени основным препятствием для широкого использования вихревых устройств являлась сложность изучения вихревых течений с температурной и массовой стратификацией. Закрученный поток в вихревой трубе относится к группе турбулентных пространственных течений с непрерывным изменением структуры потока. Для устройств, работающих с газожидкостными потоками, эта проблема особенно актуальна, поскольку наличие жидкой фазы в потоке приводит к значительным отклонениям эксплуатационных характеристик вихревых аппаратов [1].

При изучении процессов разделения газожидкостных потоков в вихревых трубах необходимо исследовать целый ряд факторов, оказывающих влияние на эксплуатационные характеристики вихревого аппарата. К таким факторам относятся гидродинамические параметры потока, конструктивные параметры устройства,

процессы взаимодействия фаз между собой и с корпусом аппарата. В связи с этим исследование процессов фазоразделения многофазных газожидкостных потоков в вихревых аппаратах, а также совершенствование методов расчета и проектирования таких устройств является задачей весьма актуальной.

При исследовании гидродинамики двухфазных закрученных потоков течение рассматривается, как правило, в одномерной постановке с использованием осредненных по сечению параметров, таких как концентрация, скорость, температура и давление. Но для расчета гидродинамических параметров многофазных течений, необходимо определять изменение локальных концентраций и скоростей фаз в осевом и радиальном направлении, в особенности при расчете движения дисперсных частиц в поле центробежных сил [2].

Экспериментальные исследования многофазных закрученных течений осложняется неравномерностью распределения параметров в продольном и поперечном направлениях, а также наличием зон циркуляции. Поэтому для исследования течений такого рода предпочтительнее использовать современные средства численного моделирования, а именно специализированные пакеты прикладных программ. Программные комплексы вычислительной гидродинамики позволяют проводить анализ процесса массовой стратификации компонентов газожидкостного потока в вихревых устройствах с учетом неравномерности статических и полных значений температуры и давления, а также обеспечивают частичную замену натуральных испытаний вычислительным экспериментом.

Таким образом, подход к исследованию вихревых течений с использованием численного моделирования является обоснованным, поскольку закрученный поток в вихревой трубе относится к пространственным течениям в поле

Контактная информация: 8 (347) 273-09-44

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0164 «Научно-практическое обоснование эффективности применения вихревых сепараторов для подготовки попутного нефтяного газа к рациональному использованию».

центробежных сил и характеризуется наличием турбулентных пульсаций, значительно усложняющих его изучение. Вычислительный эксперимент дает возможность определить оптимальные соотношения конструктивных и режимных параметров устройства, что в свою очередь должно повысить интенсивность и эффективность процессов фазоразделения закрученных газожидкостных потоков в вихревых аппаратах.

ЭФФЕКТ ФАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В КАМЕРЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Эффект фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе является результатом протекания ряда взаимосвязанных процессов и начинается он при расширении газа в сопловом вводе. При истечении газожидкостной смеси из соплового ввода в закручивающем устройстве вихревой трубы создается интенсивное вихревое движение. Жидкие компоненты, присутствующие в газовом потоке, под действием центробежных сил перемещаются к стенке камеры вихревой трубы, образуя пристеночный слой жидкой фазы (пленку либо жгуты жидкости). Характер течения слоя жидкости по стенке камеры зависит от массового содержания жидкой фазы в смеси. Образовавшийся в закручивающем устройстве слой жидкости продолжает движение в камере энергетического разделения вихревой трубы в направлении дроссельного вентиля [3].

Помимо слоя жидкой фазы на стенке камеры энергетического разделения, имеется газокпельный слой, состоящий из частиц жидкости, которые либо перемещаются в пленку, либо срываются с нее, продолжая движение в области высокоскоростного периферийного потока. По мере охлаждения приосевого вихревого потока, вследствие процессов конденсации в нем также может образовываться и отбрасываться на стенку жидкая фаза, которая не была выделена из потока в закручивающем устройстве.

Процесс образования и удержания пленки жидкости на стенке камеры вихревой трубы обусловлен сильным полем центробежных сил, под действием которого вводимые в камеру жидкие компоненты переносятся на ее периферию и осаждаются на стенке. Слой жидкости на стенке формируется преимущественно в сечениях

камеры энергетического разделения, близких к сопловому вводу, так как именно в сопловом сечении значения тангенциальной составляющей скорости потока максимальны. При приближении слоя жидкой фазы к дроссельному вентилю, происходит его разрушение вследствие срыва капель и переноса их в приосевую зону камеры. Возможно также испарение компонентов из сформированной пленки, вследствие нагрева потока, выходящего через дроссельный вентиль. Турбулентные пульсации течения в вихревой трубе способствуют реализации эффекта температурной стратификации потока, но в тоже время создают существенные помехи для центробежной сепарации жидких компонентов газового потока. Радиальное перемещение частиц жидкой фазы на стенку и их испарение снижает степень нагрева периферийного потока, однако оно составляет основу компонентного разделения газожидкостных смесей [3].

При работе вихревой трубы на углеводородных газах эффект массовой стратификации потока еще больше усложняется. Снижение температуры потока вследствие расширения газа в сопловом вводе вызывает конденсацию части высококипящих компонентов, и образовавшаяся газожидкостная смесь поступает в камеру энергетического разделения, где образуется закрученный двухфазный поток, состоящий из слоя жидкой фазы на стенке камеры и газового ядра. Вследствие температурной стратификации газа происходит нагрев его периферийных слоев и охлаждение приосевых, что в свою очередь приводит к испарению жидкости со стенки камеры. Одновременно происходит конденсация высококипящих компонентов в приосевых слоях вихревого потока. Для компонентного разделения углеводородной смеси необходимо обеспечить наряду с максимальной эффективностью температурного разделения потока в вихревой трубе также вывод жидкой фазы из камеры устройства [3]. Таким образом, процесс центробежной сепарации дисперсной фазы в вихревой трубе очень сложен и трудно поддается аналитическому описанию.

Общий эффект фазоразделения газожидкостного потока в камере противоточной вихревой трубы включает в себя следующие процессы:

- первоначальное осаждение частиц жидкой фазы под действием центробежных сил и образование слоя жидкости на стенке камеры вихревой трубы;

- срыв частиц жидкости с поверхности пленки, текущей по стенке;
- разбрызгивание слоя жидкости перемещаемыми из потока каплями;
- образование конденсата при расширении газа в сопловом вводе;
- образование конденсата в приосевых слоях вихревого течения и перемещение образовавшихся капель в область периферийного потока;
- дробление и коагуляция частиц дисперсной жидкой фазы;
- испарение жидкой фазы вследствие нагрева газа горячего потока.

Исходя из анализа опубликованных материалов видно, что математическое описание процесса фазоразделения газожидкостного потока при вихревом течении возможно лишь с применением значительных упрощающих допущений. Для описания распределения параметров в закрученном многофазном потоке, а также расчета конструктивных параметров вихревых устройств, зачастую применяются различные эмпирические и полуэмпирические зависимости [4–6].

Таким образом, эффект массовой стратификации компонентов газожидкостного потока в камере вихревой трубы достаточно сложен и включает в себя ряд взаимосвязанных процессов. Для обеспечения максимальной эффективности процесса отделения жидких примесей из газового потока необходимо учитывать большое количество параметров. Это обстоятельство осложняется также тем, что для различных конструкций вихревых устройств достаточно трудно определить закономерности, управляющие процессами энерго- и фазоразделения. В связи с этим для проведения комплексного исследования влияния различных факторов на эффект фазоразделения газожидкостного потока в камере вихревого устройства необходимо использовать современные вычислительные средства, такие как пакеты прикладных программ для расчета трехмерных течений жидкости и газа в технических объектах.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОГО ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

В данном исследовании не ставилась задача определения характера движения частиц жидкой фазы, по причине того, что потоки, с кото-

рыми работают вихревые трубы, представляют собой разнообразные углеводородные смеси. К углеводородным смесям относятся природный газ, попутный нефтяной газ и другие газоконденсатные потоки, компонентный состав которых является не постоянным и зависит от большого количества факторов. В связи с этим для исследования процесса течения газожидкостного потока в вихревой трубе выбран метод Эйлера, при котором дисперсная фаза (частицы жидкости) равномерно распределена в потоке и рассматривается как сплошная среда, а общее течение – как двухфазная смесь. Двухфазный поток (сплошная и дисперсная фаза) задается объемными долями от общего массового расхода смеси. Также предусматривается задание температуры компонентов смеси.

Для описания процесса течения газожидкостного потока в камере вихревого устройства были приняты следующие допущения:

- теплообмен системы с окружающей средой отсутствует;
- теплообмен потока со стенкой камеры вихревой трубы отсутствует;
- фазовые переходы отсутствуют;
- теплообмен между фазами отсутствует;
- течение дискретной фазы имеет дисперсный характер.

Вследствие того, что жидкая фаза рассматривается как сплошная среда, то в математической модели не учитываются следующие факторы:

- дробление частиц дисперсной фазы;
- коагуляция частиц дисперсной фазы;
- полидисперсность частиц дисперсной фазы;
- выделение из жидкой фазы растворенных газов;
- испарение жидких компонентов газового потока.

На основе приведенных допущений была составлена система уравнений математической модели. Модель многофазных течений в форме Эйлера включает уравнения неразрывности, импульса и полной энергии, решаемые для каждой фазы. Турбулентность течения моделируется на основе двухпараметрической k - ε модели для высоких чисел Рейнольдса [7].

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} \alpha_p + \frac{\partial (\rho_p u_p)}{\partial x_j} \alpha_p = 0,$$

где α_p – массовая концентрация фазы ($p = c, d$,

где c – газовая фаза, d – жидкая фаза); ρ_p – плотность фазы; u_p – средняя скорость фазы.

Уравнение импульса:

$$\frac{\partial(\rho_p u_p)}{\partial t} \alpha_p + \frac{\partial(\rho_p u_p u_p)}{\partial x_j} \alpha_p = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \alpha_p + \frac{\partial(\tau_p + \tau_p^t)}{\partial x_j} \alpha_p + \alpha_p \rho_p g_p + M_p,$$

где g_p – вектор силы тяжести; p – давление, равное для обеих фаз; τ_p и τ_p^t – молекулярное и турбулентное напряжения; M_p – передача межфазного импульса.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho_p h_p)}{\partial t} \alpha_p + \frac{\partial(\rho_p u_p h_p)}{\partial x_j} \alpha_p = -\frac{\partial p}{\partial t} \alpha_p + \frac{\partial T_p \lambda_p}{\partial x_j} + \frac{\partial[(\tau_p + \tau_p^t) u_p]}{\partial x_j} \alpha_p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_p \left(\frac{\mu_p^t}{Pr^t} \right) \frac{\partial h_p}{\partial x_j} \right) + Q_p,$$

где h_p – энтальпия; T_p – температура; λ_p – коэффициент теплопроводности; Pr^t – турбулентное число Прандтля; μ_p^t – турбулентная вязкость; Q_p – межфазный теплоперенос.

Модель турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_c k_c}{\partial t} \alpha_c + \frac{\partial \rho_c u_c k_c}{\partial x_j} \alpha_c &= \tau_{ij} \frac{\partial u_c}{\partial x_j} \alpha_c - \\ &- \alpha_c \rho_c \varepsilon_c + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_c \left(\mu_c + \frac{\mu_c^t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_c}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial \rho_c \varepsilon_c}{\partial t} \alpha_c + \frac{\partial \rho_c u_c \varepsilon_c}{\partial x_j} \alpha_c &= C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_c}{k_c} \tau_{ij} \frac{\partial u_c}{\partial x_j} - \\ &- C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon_c^2}{k_c} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_c \left(\mu_c + \frac{\mu_c^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial x_j} \right); \\ \mu_c^t &= C_{\mu} \rho_c \frac{k_c^2}{\varepsilon}, \end{aligned}$$

где k_c – турбулентная кинетическая энергия газовой фазы; σ_k – турбулентное число Прандтля для уравнения кинетической энергии; μ_c и μ_c^t – молекулярная и турбулентная вязкость газовой фазы; ε_c – скорость диссипации турбулентной

кинетической энергии; σ_ε – турбулентное число Прандтля для уравнения диссипации кинетической энергии; τ_{ij} – декартовы компоненты тензора напряжений; $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$.

Представленная математическая модель предназначена для исследования течения исходного двухфазного потока в камере вихревой трубы и процесса центробежной сепарации жидких компонентов, присутствующих в газовом потоке. Решение математической модели проводилось с использованием современных средств численного моделирования, поскольку закрученный поток в вихревой трубе относится к турбулентным течениям, в которых действуют значительные массовые и центробежные силы. Также вследствие наличия в потоке жидкой фазы происходит непрерывное изменение структуры вихревого течения, поэтому для решения данной задачи требуется использование программного комплекса высокого уровня.

В данном исследовании решение представленной математической модели выполнялось в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX. На основании геометрии проточной части вихревого аппарата, а также граничных условий, представленная математическая модель позволяет проводить исследование всей области вихревого течения с учетом неравномерности распределения параметров в осевом и радиальном направлении и наличия возвратно-циркуляционных зон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА МАССОВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ КОМПОНЕНТОВ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В КАМЕРЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Решение представленной математической модели в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX позволило визуализировать эффект фазоразделения газожидкостного потока в камере вихревой трубы. При истечении газожидкостной смеси из соплового ввода в закручивающем устройстве вихревой трубы создается высокоскоростное вихревое движение. Жидкие компоненты, присутствующие в газовом потоке, под действием центробежных сил перемещаются на стенку, образуя пристеночный слой жидкой фазы (рис. 1).

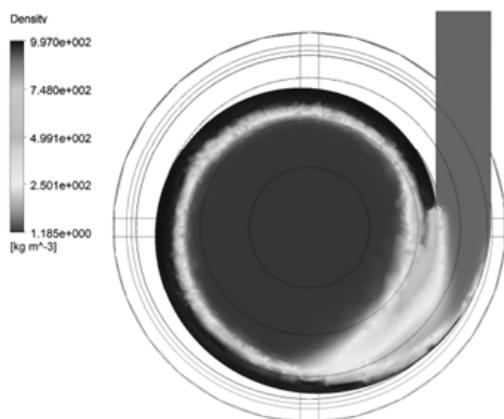


Рис. 1. Распределение плотности потока в закручивающем устройстве вихревой трубы

При проведении численных расчетов было принято, что область течения возле стенки камеры вихревой трубы, где плотность потока составляет более 990 кг/м^3 , соответствует сплошному течению жидкой фазы (рис. 1). Характер течения жидкой фазы по стенке камеры вихревой трубы зависит от массового содержания ее в смеси и представляет собой пленку либо жгуты жидкости. Пленка жидкости, образовавшаяся в закручивающем устройстве, продолжает движение в камере энергетического разделения вихревой трубы в направлении дроссельного вентиля. Часть жидких компонентов может уноситься охлажденным приосевым потоком через диафрагму (рис. 2).

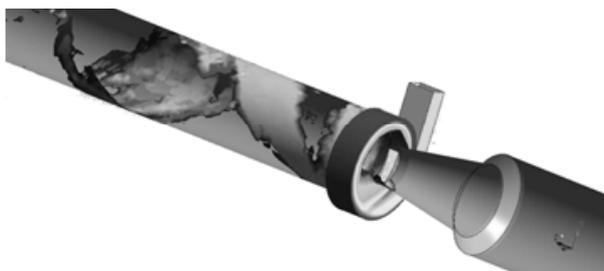


Рис. 2. Пристеночное течение жидкой фазы на внутренней стенке камеры вихревой трубы

Распределение частиц жидкой фазы после выхода потока из соплового ввода представлено на рис. 3. Чем больше масса частицы дисперсной фазы, тем раньше происходит перемещение ее на стенку под действием центробежных сил.

При проведении предварительных численных расчетов было выявлено, что размер и характер распределения частиц жидкой фазы на входе в вихревую трубу не оказывает существенного влияния на механизм процесса фазоразделения газожидкостного потока в камере аппарата. Вследствие расширения потока в со-

пломом вводе и его интенсивной закрутки, происходит кардинальное изменение структуры течения жидкой фазы.

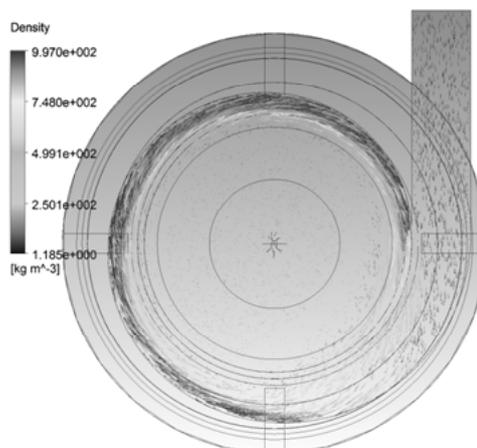


Рис. 3. Характер распределения частиц дисперсной фазы в закручивающем устройстве вихревой трубы

В случае работы вихревой трубы на многокомпонентных смесях, таких как углеводородные газы, механизм процесса фазоразделения не изменится. Компоненты смеси с большей массой будут под действием центробежных сил перемещаться к стенке камеры вихревой трубы и частично обогащать периферийный поток, движущийся в направлении дроссельного вентиля. Компоненты смеси с меньшей массой будут находиться в приосевом потоке, выходящем из вихревой трубы через отверстие диафрагмы.

Помимо слоя жидкости на стенке камеры вихревого аппарата, имеется также газокapельный слой, состоящий из частиц жидкой фазы, которые либо перемещаются в пленку, либо срываются с нее, продолжая движение в области высокоскоростного периферийного потока (рис. 4).

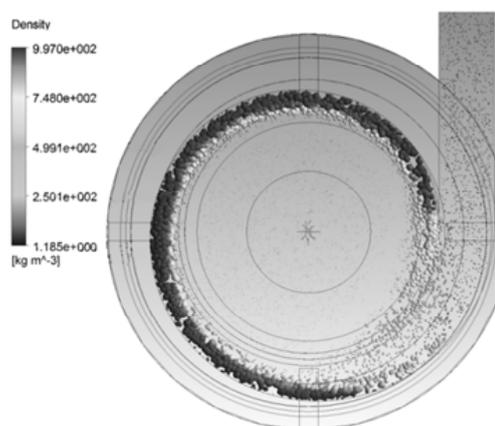


Рис. 4. Структура газокapельного слоя в закручивающем устройстве вихревой трубы

Таким образом, результаты численного моделирования подтвердили гипотезу о характере распределения компонентов газожидкостного потока в камере вихревой трубы, согласно которой жидкие примеси, присутствующие в газе, под действием центробежных сил перемещаются на периферию камеры, образуя пристеночный слой жидкой фазы. Слой жидкости начинает образовываться в закручивающем устройстве и продолжает движение в камере энергетического разделения вихревого аппарата в направлении дроссельного вентиля. В процессе движения слоя жидкости в камере энергетического разделения вихревой трубы происходит срыв компонентов из сформированной пленки и обогащение потока, выходящего через дроссельный ventиль.

Для оценки влияния массового содержания жидких примесей в газовом потоке на процесс формирования пристеночного течения жидкой фазы в закручивающем устройстве вихревой трубы, была проведена серия численных расчетов при различном содержании жидкости в смеси m_d . В ходе проведения расчетов конструктивные параметры вихревого устройства и газодинамические параметры потока оставались неизменными. На рис. 5–7 приведены зависимости распределения плотности потока в поперечном сечении закручивающего устройства при различной доле жидкой фазы в смеси.

На основании результатов численного моделирования, была определена зависимость толщины пристеночного слоя жидкой фазы (H_{liquid}) от угла поворота закручивающего устройства (α) при различном содержании жидкости в газовом потоке (рис. 8).

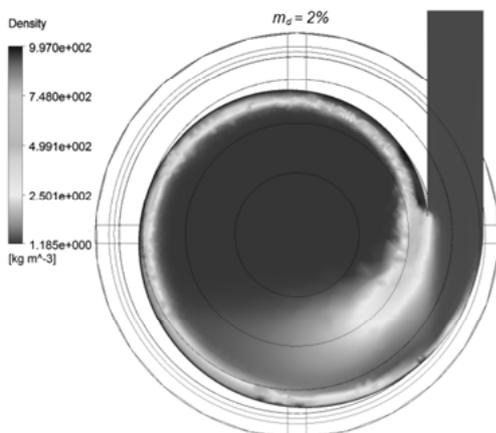


Рис. 5. Распределение плотности потока в поперечном сечении закручивающего устройства при массовом содержании жидкой фазы в смеси, равном 2%

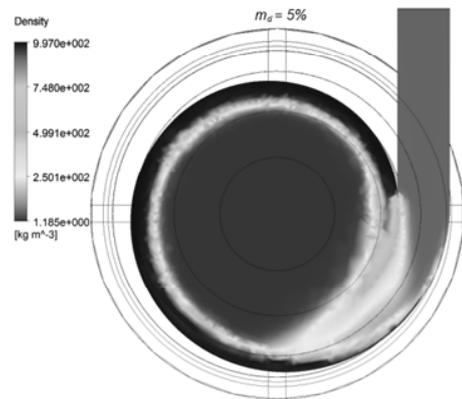


Рис. 6. Распределение плотности потока в поперечном сечении закручивающего устройства при массовом содержании жидкой фазы в смеси, равном 5%

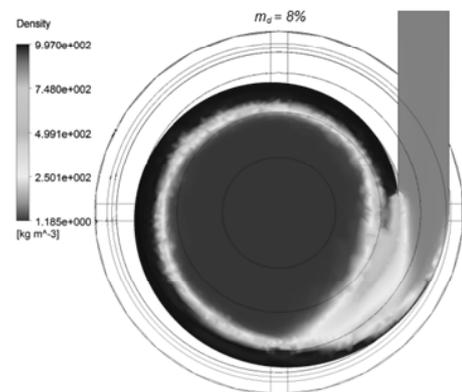


Рис. 7. Распределение плотности потока в поперечном сечении закручивающего устройства при массовом содержании жидкой фазы в смеси, равном 8%

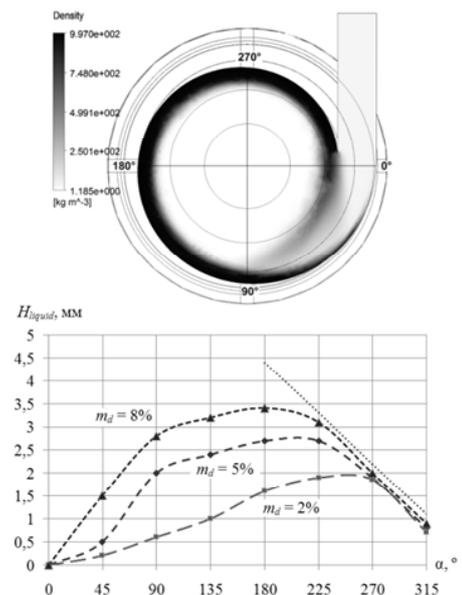


Рис. 8. Зависимость толщины пристеночного слоя жидкой фазы H_{liquid} от угла поворота закручивающего устройства α при различной доле жидкой фазы в потоке

По представленной зависимости можно судить о характере нарастания пленки жидкости в закручивающем устройстве при различном содержании жидкой фазы в потоке. Из зависимости, представленной на рис. 8, видно, что при значении угла поворота закручивающего устройства более 225° происходит резкое уменьшение толщины слоя жидкости на стенке. Причиной этому является то, что при превышении толщины слоя жидкой фазы высоты уступа, образованного улиткой и камерой энергетического разделения, происходит переход части пристеночного слоя в камеру энергетического разделения (рис. 9–10).

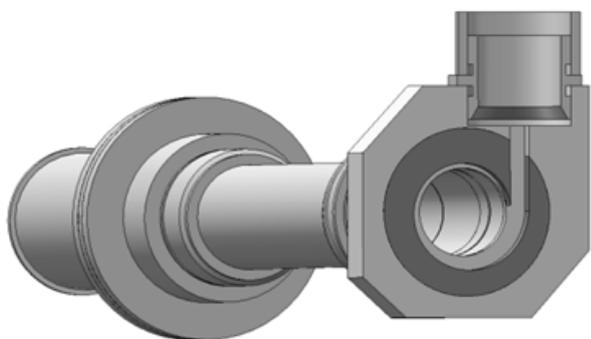


Рис. 9. Поперечное сечение закручивающего устройства вихревой трубы

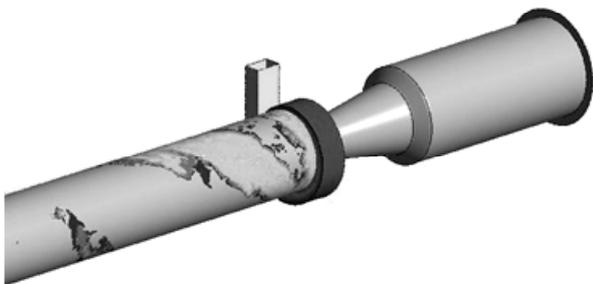


Рис. 10. Визуализация пристеночного течения жидкой фазы на внутренней стенке камеры вихревой трубы

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают механизм массовой стратификации компонентов газожидкостного потока в вихревой трубе, при котором под действием центробежных жидкие компоненты, обладающие большей массой, отбрасываются на стенку камеры вихревой. Мелкодисперсная жидкая фаза находится в области периферийного потока и образует газокapельный слой над пленкой жидкости, а также частично присутствует в приосевых слоях вихревого течения. Выявлено, что размер и характер распределе-

ния частиц жидкой фазы на входе в вихревую трубу не оказывает существенного влияния на механизм процесса фазоразделения газожидкостного потока в камере аппарата, поскольку вследствие расширения потока в сопловом входе и его интенсивной закрутки, происходит кардинальное изменение структуры течения дисперсной фазы.

Также выявлено, что характер течения слоя жидкости на стенке камеры энергетического разделения существенно зависит от массового содержания жидкой фазы в потоке. Чем влагосодержание выше, тем раньше происходит переход образующегося в закручивающем устройстве слоя в камеру вихревой трубы. Серия проведенных вычислительных экспериментов позволила определить характер распределения частиц дисперсной фазы в камере вихревого устройства при различном содержании жидкости в смеси.

ВЫВОДЫ

Эффект фазоразделения газожидкостного потока в камере вихревой трубы является результатом сложной совокупности взаимосвязанных процессов. Влияние этих процессов на эффект фазоразделения зависит от гидродинамических параметров течения газожидкостного потока, а также конструктивных характеристик вихревого аппарата.

Высокая турбулентность течения в вихревой трубе положительно влияет на эффект энергетического разделения потока, однако создает существенные помехи для эффективной центробежной сепарации жидких компонентов газожидкостной смеси. Перемещение частиц жидкой фазы на стенку и их испарение снижает степень нагрева периферийного потока, но в то же время оно является одним из основных процессов, обеспечивающих разделение газожидкостных смесей. Для расчета гидродинамических процессов в двухфазных системах также необходимо определять изменение локальных концентраций и скоростей фаз по длине и радиусу, в частности при движении дисперсных частиц под действием центробежных сил [2].

Известно, что вихревые аппараты позволяют значительно интенсифицировать процессы тепло и массообмена газовых и газожидкостных потоков, однако существующие методы расчета рабочих параметров данных устройств,

подобраны в основном для конкретных конфигураций конструкций и режимов их работы [8–10].

Опубликованные в настоящее время исследования посвящены изучению какой-либо одной из сторон сложного комплекса взаимосвязанных процессов, протекающих в вихревой трубе при работе на газожидкостных смесях [3]. В связи с этим для проведения комплексного исследования влияния различных факторов на эффект фазоразделения газожидкостного потока в камере вихревого устройства необходимо использовать современные вычислительные средства, такие как пакеты прикладных программ для расчета трехмерных течений жидкости и газа в технических объектах.

Полученное посредством численного моделирования решение разработанной математической модели двухфазного течения в вихревой трубе позволяет проводить исследования организованных высокопотенциальных газожидкостных течений в устройствах, реализующих эффект Ранка-Хилша в широком диапазоне варьируемых конструктивных параметров устройства и газодинамических параметрах потока. Также численное моделирование процесса фазоразделения газожидкостного потока при вихревом течении позволило усовершенствовать существующий подход к исследованию процессов очистки газов от конденсирующихся компонентов в противоточных вихревых трубах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терновский П. Г. Кутепов А. М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.
2. Сугак Е. В., Воинов Н. А., Николаев Н. А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань: Отечество, 2009. 224 с.
3. Суслов А. Д., Иванов С. В., Мурашкин Ю. В., Чижиков Ю. В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 249 с.
4. Артемов И. Л., Шваб А. В. Численное исследование гидродинамики закрученного течения в вихревой камере на основе двухпараметрической модели турбулентности // Инж.-физ. журн. 2001. Т. 74, № 3. С. 117–120.
5. Судаков В. Г. О применимости моделей турбулентности для задач с сильной закруткой потока // Учен. записки ЦАГИ. 2003. Т. 34. С. 76–78.
6. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: уч. пос. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
7. Ахметов Ю. М., Соловьев А. А., Тарасов А. А., Целищев А. В. Численное моделирование течения газожидкостного потока в вихревой трубе // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 32–39.
8. Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Хакимов Р. Ф., Целищев В. А. Экспериментальные исследования вихревого течения жидкости в теплогенераторе // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 169–174.
9. Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Константинов С. Ю., Хакимов Р. Ф., Целищев Д. В. Исследование гидродинамических и термодинамических процессов высоконапорного многофазного вихревого течения жидкости // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 163–168.
10. Ахметов Ю. М., Тарасов А. А., Целищев А. В. Исследование процесса фазоразделения жидкости и газа в вихревой трубе // Наука – производству. 2010. С. 156–166.

ОБ АВТОРАХ

Ахметов Юрий Мавлютович, доц. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инженер-механика (УАИ 1959). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидравлическ. течений и систем упр. энергетическ. установок.

Целищев Антон Владимирович, м.н.с. НИЧ той же каф. Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2007). Дипл. магистра (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. вихревого эффекта.