

В. С. Жернаков, А. В. Целищев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРОТИВОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ В КАЧЕСТВЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА

Рассматриваются вопросы эффективности очистки газовых потоков от жидких компонентов в вихревых трубах. Приводится описание основных конструктивных параметров вихревого аппарата и гидродинамических параметров течения, влияющих на эффективность сепарации газожидкостного потока. Приводятся результаты численного моделирования процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе с сепарационным узлом. *Вихревая труба; газожидкостный поток; сепарационный узел; центробежная сепарация*

ВВЕДЕНИЕ

Очистка газовых потоков от жидких и твердых примесей, а также разделение многокомпонентных газожидкостных смесей – наиболее распространенные технологические процессы в газодобывающей и газоперерабатывающей промышленности [1]. Для отделения дисперсных включений из газов используются, как правило, устройства, реализующие закрутку многофазного потока с целью разделения его на компоненты. Вихревые трубы (ВТ) относятся к аппаратам, использующим свойства закрученного потока и представляют значительный интерес в области очистки природных газов от жидких примесей [2].

Наряду с получением охлажденного и нагретого потока ВТ позволяют отделять жидкие примеси, присутствующие в газах, непосредственно из закрученного потока. При подаче газожидкостного потока в сопловой ввод вихревой трубы, жидкие компоненты, присутствующие в газе, перемещаются под действием центробежных сил к стенке камеры аппарата, образуя пристеночное течение жидкой фазы. Вывод образовавшегося на стенке слоя жидкой фазы из камеры вихревой трубы обеспечивает очистку газового потока от жидких примесей [3].

Помимо сепарации дисперсной жидкой фазы под действием центробежных сил, ВТ позволяют проводить также низкотемпературную очистку газа. Вследствие расширения газа в сопловом вводе вихревого устройства и снижения

температуры приосевых слоев вихревого течения происходит резкое снижение температуры потока, что позволяет получить возможность конденсации части компонентов потока (высококипящие компоненты природных газов либо влагу в паровой фазе) непосредственно в камере вихревого аппарата. Наряду с очисткой газа от жидких примесей непосредственно в камере вихревого аппарата, также можно проводить рекуперацию охлажденного потока вихревой трубы в теплообменных устройствах для предварительной осушки газа [3].

Использованию устройств, реализующих эффект Ранка-Хилша, на практике препятствует сложность изучения вихревых течений с температурной и массовой стратификацией. Для устройств, работающих с газожидкостными потоками, эта проблема особенно актуальна, поскольку наличие жидкой фазы в потоке приводит к значительным отклонениям эксплуатационных характеристик ВТ. Процесс фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе сочетает в себе несколько одновременно протекающих процессов, особенно при работе аппарата на углеводородных газах. Влияние данных процессов на общий эффект фазоразделения существенно зависит от гидродинамических параметров потока, а также геометрических характеристик вихревого аппарата.

Существующие методы расчета параметров работы вихревых устройств основаны, как правило, на экспериментальных зависимостях, полученных для определенных конструкций аппаратов, и не позволяют в полной мере выявить закономерности, управляющие процессами тепло- и массообмена при вихревом турбулентном течении газожидкостного потока [4]. По этой причине для исследования течений такого рода применяются современные методы численного моделирования. Вычислительный эксперимент

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».

позволяет определить оптимальные соотношения конструктивных и режимных параметров устройства, а также значительно повысить интенсивность и эффективность процессов фазоразделения закрученных 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.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ С УЗЛОМ ОТБОРА ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Для организации отвода выделенной из потока жидкой фазы разрабатывались разнообразные конструкции узлов отбора, посредством которых отделяемые жидкие компоненты выводились из камеры вихревой трубы с частью газа в виде третьего потока. Различные варианты отбора жидкости или газожидкостной смеси были предложены М. А. Жидковым, М. Ф. Ткаченко, Ю. Г. Исуповым, П. А. Колодезным, А. В. Мартыновым, Н. Я. Романовым, В. Н. Косенковым.

Отвод перемещенной на стенку жидкой фазы из камеры энергетического разделения позволяет существенно повысить эффективность процесса очистки газа от жидких компонентов в камере вихревой трубы [5]. На рис. 1 представлена схема вихревой трубы с узлом отбора жидкой фазы в камере энергетического разделения.

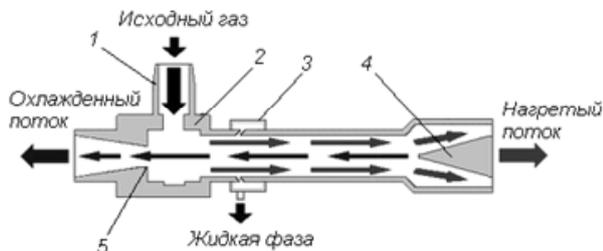


Рис. 1. Схема вихревой трубы с узлом отбора жидкой фазы: 1 – сопловый ввод; 2 – закручивающее устройство; 3 – сепарационный узел; 4 – дроссельный вентиль; 5 – диафрагма

Отвод жидкости со стенки камеры вихревой трубы приводит к повышению температуры периферийных слоев вихревого потока, так как уменьшается количество испаряемой жидкой

фазы. Одновременно с этим происходит снижение температуры приосевого потока вследствие уменьшения паров, поступающих из периферийного потока. Таким образом, данный вариант отбора жидкой фазы является наиболее эффективным с точки зрения отделения жидкой фазы из газа непосредственно в камере вихревого аппарата [3].

В данной работе проводилось исследование конструкции узла отбора жидкой фазы, разработанной инжиниринговым центром ОАО «НИИТ» (г. Уфа) совместно с сотрудниками УГАТУ. Сепарационный узел представляет собой приставку к цилиндрической вихревой трубе противоточной конструкции, выполненную в виде двух регулируемых кольцевых щелей (рис. 2).



Рис. 2. Исследуемая конструкция сепарационного узла

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. 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 [6].

Конструктивные параметры вихревого устройства рассчитываются в соответствии с рекомендациями по проектированию ВТ с учетом особенностей конструирования вихревых аппаратов, работающих на газожидкостных смесях. Оптимальный выбор геометрических характеристик аппарата позволяет обеспечить эффективную

центробежную сепарацию жидкой фазы и вывод ее из камеры вихревой трубы.

Исходя из предварительных расчетов, а также на основании результатов исследований вихревых устройств фазоразделения, проведенных на кафедре прикладной гидромеханики УГАТУ и в УНИЦ «Гидропневмоавтоматика» были определены основные геометрические параметры вихревой трубы с сепарационным узлом [7]. Объектом моделирования была выбрана цилиндрическая вихревая труба классической противоточной схемы. Вихревая установка состоит из корпуса, закручивающего устройства; камеры энергетического разделения, сепарационного узла, диафрагмы и дроссельного вентиля (рис. 3).

Основные геометрические параметры вихревого аппарата:

- диаметр камеры энергетического разделения – 42 мм;
- диаметр диафрагмы – 20 мм;
- угол раскрытия диффузора – 60°;
- длина камеры энергетического разделения – 300 мм;
- ширина критического сечения соплового ввода – 14 мм;
- высота критического сечения соплового ввода – 9 мм.

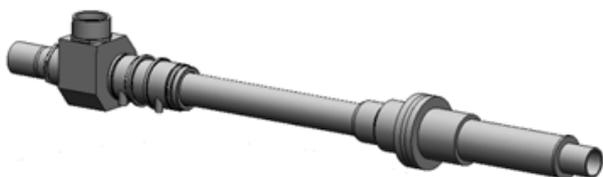


Рис. 3. Трехмерная модель вихревой трубы с сепарационным узлом

Процесс центробежной сепарации жидких компонентов при вихревом течении исследуется посредством проведения вычислительного эксперимента на предложенной численной модели. В данном исследовании, для численного моделирования процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе, был выбран пакет вычислительной гидродинамики Ansys CFX.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ФАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Оценка влияния ширины щели сепарационного узла на эффективность отделения жидкой фазы из газа исследуется посредством проведе-

ния вычислительного эксперимента в специализированном пакете прикладных программ Ansys CFX. При увеличении ширины щели будет возрастать расход через узел отбора жидкой фазы, что является нежелательным, поскольку обогащенный жидкими компонентами газ на выходе из сепарационного узла также будет необходимо в последующем осушать. При уменьшении ширины щели также возможно снижение эффективности фазоразделения. Причиной этому может служить то, что образующийся на выходе из закручивающего устройства пристеночный слой жидкой фазы не полностью будет отбираться щелью, то есть часть его будет срезаться и уходить вместе с нагретым потоком.

С другой стороны, при небольшой ширине щели снижение доли сепарации может быть обусловлено ее «запиранием» потоком газа, что в свою очередь препятствует проникновению в нее жидкости. Ширину щели сепарационного узла необходимо подобрать таким образом, чтобы обеспечить наряду с эффективным отделением жидкой фазы минимальный расход газа через сепарационный узел. Данная задача решается посредством численного моделирования.

Помимо ширины щели сепарационного узла к регулируемым геометрическим параметрам вихревой трубы относятся также площадь проходного сечения дроссельного вентиля и диаметр проходного сечения дроссельной шайбы, установленной за диафрагмой. Дроссельный вентиль на конце камеры энергетического разделения обычно выполняется в виде регулируемого игольчатого дросселя [6] и предназначен для регулирования соотношения расхода газа на выходах вихревой трубы и перепада давления в камере вихревого устройства.

При открытии дроссельного вентиля возрастает расход газа через него, что в свою очередь может приводить к снижению эффективности процесса фазоразделения вследствие уноса части жидких компонентов с нагретым потоком. Также при увеличении расхода через дроссельный вентиль происходит повышение температуры периферийных слоев вихревого течения и, следовательно, испарение части жидкости.

При значительном уменьшении расхода газа через дроссельный вентиль эффективность сепарации также будет снижаться по причине возрастания относительного весового расхода холодного потока μ и уноса части жидкой фазы

после выхода из соплового ввода вместе с охлажденным потоком. Таким образом, в процессе отладки вихревой установки необходимо определить диапазон расхода газа через дроссельный вентиль, обеспечивающий необходимый перепад давления в камере устройства и высокую степень очистки газа.

Уровень давления в камере устройства и долю холодного потока можно регулировать также путем установки после диафрагмы дроссельных шайб, с различными диаметрами проходного сечения. Диаметр дроссельной шайбы определяет расход газа через диафрагму при неизменном положении дроссельного вентиля. В данном случае относительная доля холодного потока μ зависит от расхода газа на входе в вихревую трубу и диаметра дроссельной шайбы.

При установке дроссельной шайбы с большим диаметром проходного отверстия происходит снижение эффективности процесса фазоразделения вследствие возрастания доли холодного потока и уноса части дисперсной жидкой фазы через диафрагму при выходе потока из соплового ввода. При использовании шайб с небольшим диаметром проходного отверстия также возможно снижение эффективности отделения жидкости по причине образования ледяной пробки на дроссельной шайбе.

К основным гидродинамическим параметрам течения, влияющим на процесс фазоразделения газожидкостного потока, относятся:

- температура газа на входе в ВТ T^* ;
- содержание жидкой фазы в смеси m_d ;
- давление газа на входе в ВТ P^* ;
- степень расширения газа в ВТ π ;
- массовый расход газа на входе $G_{вх}$;
- относительная доля холодного потока μ ;
- температура газа на выходе из дроссельного вентиля $T_{гор}$;
- температура газа за диафрагмой $T_{хол}$;
- температура газа на выходе из соплового ввода T_c .

Содержание жидких примесей в газовом потоке существенно влияет на работу вихревого аппарата. Основное отличие характера работы вихревой трубы, работающей на газожидкостных потоках, являются процессы тепло- и массообмена между газом и жидкой фазой. При попадании в камеру вихревой трубы, жидкие компоненты, присутствующие в газе перемещаются к стенке камеры под действием центробеж-

ных сил и образуют пристеночный слой жидкой фазы. Слой жидкой фазы, образовавшийся в закручивающем устройстве, продолжает движение в камере энергетического разделения вихревой трубы в направлении дроссельного вентиля. Также по мере охлаждения приосевого вихревого потока в нем может конденсироваться и отбрасываться на стенку жидкая фаза, которая не была выделена из потока в закручивающем устройстве. Часть жидких примесей, сконденсированных при охлаждении газа, не успевает покинуть приосевую поток и выходит из камеры разделения через диафрагму вместе с охлажденным потоком.

Выделяющаяся теплота конденсации приводит к повышению температуры в охлажденном приосевом потоке и снижению температуры периферийных слоев вихревого потока вследствие перемещения образовавшихся капель к стенке камеры и их испарения [3]. Таким образом, радиальное перемещение капель из приосевого потока и их испарение снижает эффективность температурного разделения газа, но, с другой стороны, оно обеспечивает протекание процесса фазоразделения. Конденсации компонентов газожидкостной смеси в приосевом потоке с последующим их выводом из вихревой трубы, обеспечивает наряду с центробежной сепарацией дисперсной жидкой фазы в закручивающем устройстве, также и возможность низкотемпературной очистки газа.

В связи с вышесказанным, для достижения максимальной степени отделения жидких примесей из газового потока необходимо обеспечить условия для образования конденсата в приосевом потоке. Процесс конденсации зависит от состава газожидкостного потока и определенных термодинамических параметров течения в камере вихревой трубы. Достижение требуемых значений температуры и давления в камере вихревой трубы осуществляется изменением указанных выше регулируемых при эксплуатации конструктивных параметров вихревого устройства.

С ростом температуры подаваемого на вход вихревой трубы газа возрастает эффект нагрева и охлаждения газа в аппарате, в то время как температурная эффективность устройства практически не изменяется [8]. Возрастание температуры подаваемого на вход в вихревую трубу газа негативно влияет на эффективность процесса

фазоразделения, так как существенный нагрев газа приводит к нежелательному испарению жидкости из сформированного пристеночного слоя и, соответственно, обогащению газа, выходящего через дроссельный вентиль жидкими компонентами. При увеличении эффекта охлаждения, с одной стороны, создаются более благоприятные условия для образования конденсата в приосевых слоях вихревого течения, но с другой стороны повышается вероятность образования ледяной пробки на диафрагме вихревой трубы.

При неизменном давлении охлажденного потока за диафрагмой, с повышением давления на входе растет эффект охлаждения и холодопроизводительность вихревой установки. В данном случае возможно как повышение эффективности процесса сепарации газожидкостного потока вследствие процесса конденсации в приосевом потоке, так и возможность образования ледяной пробки в диафрагме вихревой трубы. Вследствие возрастания доли холодного потока возможен также унос части жидких компонентов через диафрагму вихревой трубы сразу после выхода потока из соплового ввода.

Для оценки влияния давления газа на входе вводится понятие степени расширения π газа в вихревой трубе, представляющее отношение полного давления газа на входе в установку P^* к давлению за диафрагмой $P_{\text{хол}}$ [8]. С ростом степени расширения, а именно в диапазоне $1 < \pi < 8$, возрастает эффект охлаждения газа. При дальнейшем возрастании π рост эффекта охлаждения снижается. При $\pi < 2$ возможно снижение доли сепарации жидкой фазы по причине того, что для эффективной центробежной сепарации частиц жидкой фазы необходимо критическое истечение потока из соплового ввода вихревой трубы. При величине $\pi > 8$, наоборот, возможен унос части жидкости на холодный выход и «закупорка» диафрагмы ледяной пробкой.

Эффективность отделения жидкой фазы из газожидкостного потока в вихревой трубе зависит от соотношения тангенциальной составляющей скорости газа и осевой скорости приосевого потока. Эффект фазоразделения зависит от относительной доли весового расхода охлажденного потока μ . При небольших значениях μ , когда центробежные силы, действующие на частицы жидкости значительны, а осевая скорость охлажденного потока относительно мала,

основная масса вводимой в камеру вихревой трубы и выделяющейся в ней жидкой фазы концентрируется на периферии камеры и уносится с нагретым потоком. С ростом μ увеличение осевой скорости приосевого потока приводит к увеличению уноса жидкости с охлажденным потоком [3].

В связи с вышесказанным можно сделать вывод о том, что при исследовании процессов разделения газожидкостных потоков в вихревых устройствах необходимо проводить оценку влияния большого количества факторов на общий эффект фазоразделения. К таким факторам относятся режимные и конструктивные параметры вихревого аппарата, а также гидродинамические параметры течения газожидкостного потока.

Вместе с тем течение в вихревой трубе отличается сложным пространственным характером, наличием неравномерности распределения параметров в продольном и поперечном направлениях, а также наличием циркуляционных зон. Экспериментальные подходы в исследовании многофазных закрученных течений не позволяют в полной мере оценить влияние указанных факторов на эффективность процесса фазоразделения. В связи с этим для комплексного исследования процесса фазоразделения газожидкостного потока в камере вихревой трубы применяются современные методы численного моделирования. Численное моделирование позволяет найти оптимальные соотношения конструктивных и режимных параметров аппарата, воспроизвести реальную картину исследуемых течений, определить основные характеристики потока, а также значительно повысить эффективность процессов разделения закрученных газожидкостных потоков в вихревых устройствах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численное моделирование позволило визуализировать и тем самым подтвердить механизм процесса фазоразделения газожидкостного в камере вихревой трубы. При истечении газожидкостной смеси из тангенциального 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 [9] (рис. 4).

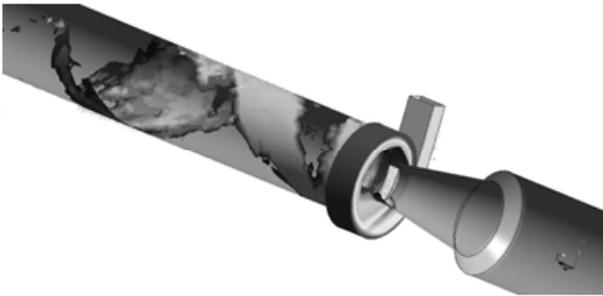


Рис. 4. Визуализация пристеночного течения жидкой фазы на внутренней стенке камеры вихревой трубы

Эффективность процесса фазоразделения газожидкостного потока во многом зависит от формирования пристеночного течения жидкой фазы в камере вихревой трубы. Пристеночный слой жидкой фазы может формироваться практически по всей длине камеры энергетического разделения, причем на начальных ее участках он образуется из дисперсной жидкой фазы, а ближе к дроссельному вентилю – из компонентов, сконденсированных в приосевом охлажденном потоке [3].

В процессе движения слоя жидкости в камере энергетического разделения вихревой трубы происходит срыв компонентов из сформированной пленки и обогащение потока, выходящего через дроссельный вентиль. Возможно также испарение жидкой фазы со стенки камеры вследствие нагрева потока, выходящего через дроссельный вентиль.

На рис. 5 представлено распределение объемной концентрации жидкой фазы в исследуемой вихревой трубе без установки узла отбора. Пленка жидкости, образовавшаяся в закручивающем устройстве, переходит в камеру энергетического разделения. Затем происходит срыв и частичное испарение жидких компонентов из сформированной пленки.



Рис. 5. Распределение объемной концентрации жидкой фазы в камере вихревой трубы

Далее представлены результаты численного эксперимента, проведенного на модели вихревой трубы с исследуемым сепарационным узлом (рис. 6). Пленка жидкости, образуемая на стенке камеры вихревой трубы, после выхода из закручивающего устройства попадает в кольцевую щель сепарационного узла и выводится из вихревого устройства с частью газа в виде третьего потока.

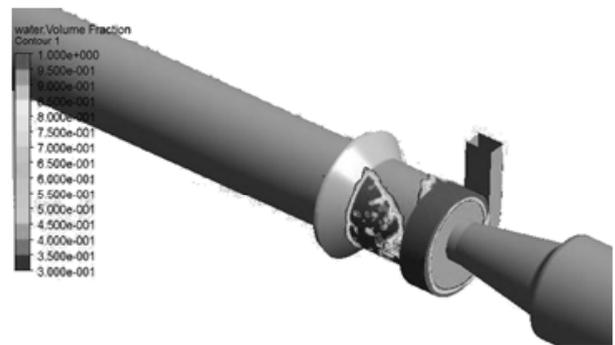


Рис. 6. Распределение объемной концентрации жидкой фазы в камере вихревой трубы с исследуемым сепарационным узлом

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. Отвод жидкости со стенки камеры энергетического разделения приводит к повышению температуры периферийных слоев вихревого течения, и снижению парциального давления паров конденсирующихся компонентов в приосевых слоях. Таким образом, данный способ отбора жидкой фазы одновременно приводит к уменьшению содержания конденсата в охлажденном приосевом потоке, вследствие снижения количества испаряемой жидкости [3]. В связи с этим данный вариант отбора жидкой фазы является наиболее эффективным с точки зрения отделения жидкой фазы из газа непосредственно в камере вихревого аппарата.

Для оценки эффективности процесса фазоразделения газожидкостного потока в вихревой трубе с сепарационным узлом в модели были выбраны контрольные поперечные сечения (рис. 7). Первое сечение (А1) проходит по середине закручивающего устройства, второе (А2) – непосредственно в кольцевой щели сепарационного узла, а третье сечение (А3) располагается на расстоянии 20 мм от щели отбора жидкой фазы.

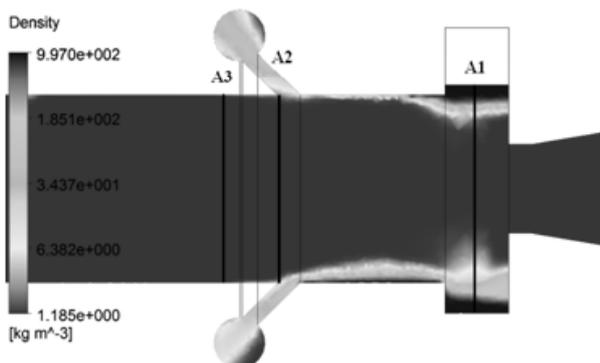


Рис. 7. Расположение контрольных поперечных сечений

В указанных сечениях определялась плотность потока и тем самым производилась оценка эффективности отделения жидких компонентов из закрученного потока. На рис. 8–10 представлено распределение потока в указанных сечениях. В исследовании принято, что область периферийного течения возле стенки камеры вихревой трубы, где плотность потока составляет более 990 кг/м^3 , соответствует сплошному течению жидкой фазы. Данный способ оценки позволяет определять не только количество жидкой фазы отделенной сепарационным узлом, но и количество жидкости, содержащейся в газокapельном слое над пленкой.

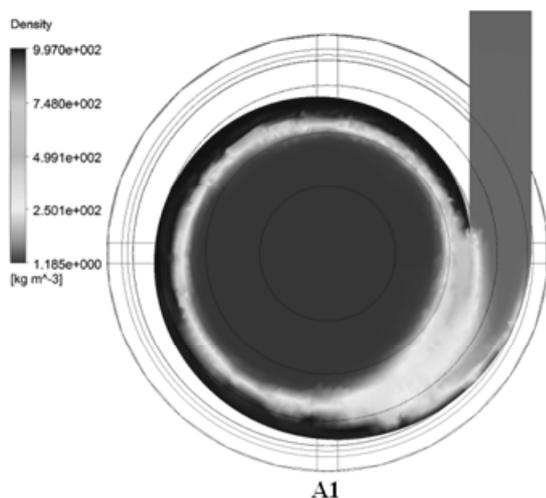


Рис. 8. Распределение плотности потока в закручивающем устройстве вихревой трубы

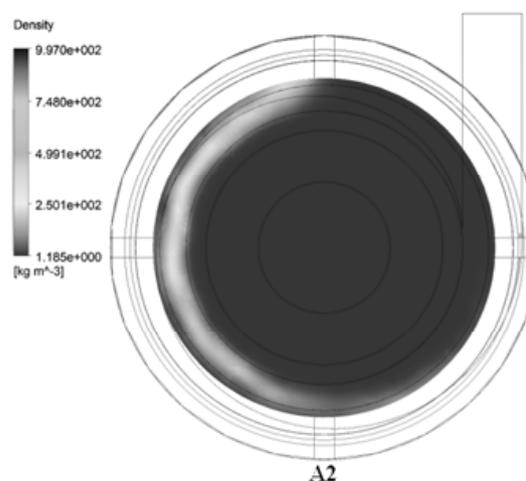


Рис. 9. Распределение плотности потока в кольцевой щели сепарационного узла

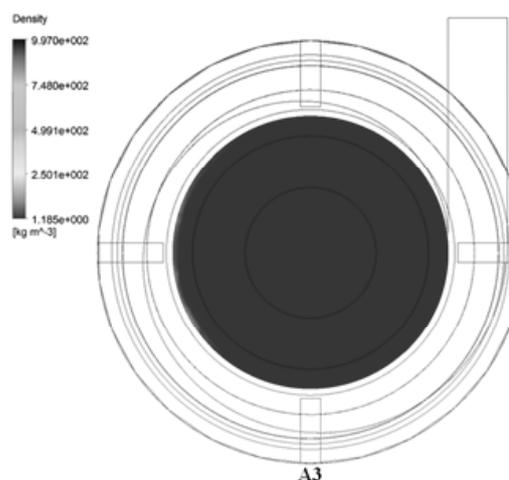


Рис. 10. Распределение плотности потока после узла отбора жидкой фазы

Таким образом, исходя из результатов проведенных численных расчетов, 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 существенного испарения вследствие нагрева газа. С другой стороны, расположение сепарационного узла в камере вихревой трубы на некотором удалении от среза соплового ввода минимизирует его влияние на эффект энергетического разделения потока, что, в свою очередь, обеспечивает возможность образования конденсата во внутреннем низкоскоростном вихре.

Анализ результатов численного моделирования позволил определить оптимальное соотно-

шение конструктивных параметров вихревого аппарата и параметров течения двухфазной смеси, обеспечивающее максимальную эффективность отделения жидких примесей из газового потока. Также была определена ширина кольцевой щели сепарационного узла, обеспечивающая эффективное выведение слоя жидкой фазы из камеры вихревой трубы при массовом содержании жидкости в смеси до 10%.

Разработанная численная модель позволяет исследовать пространственные особенности организованных высокопотенциальных вихревых газожидкостных потоков с различным размером частиц дисперсной фазы и массовой доле жидкой фазы в смеси. Модель позволяет учитывать влияние конструктивных параметров вихревого устройства и узла отбора жидкой фазы, а также параметров течения двухфазной смеси на эффективность процесса фазоразделения газожидкостного потока.

ВЫВОДЫ

Обзор опубликованных работ показал практическую применимость вихревых труб в системах очистки углеводородных газов от жидких примесей не только в качестве генераторов холода, но и одновременно в качестве низкотемпературных сепараторов [10]. Вместе с тем внедрение вихревых устройств в технологические процессы происходит довольно медленно, что объясняется отсутствием надежных методов расчета и моделирования процессов, происходящих в вихревых аппаратах, и говорит о необходимости продолжения их изучения.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что подход к исследованию многофазных вихревых течений с использованием численного моделирования является обоснованным. Закрученный поток в вихревой трубе имеет достаточно сложный пространственный характер вследствие неравномерности распределения параметров в продольном и поперечном направлениях, а также наличия зон возвратных течений.

Современные средства численного моделирования позволяют проводить анализ процесса массовой стратификации компонентов газожидкостных потоков в вихревых устройствах с учетом неравномерности статических и полных значений температуры и давления, а также обеспечивают частичную замену натурных испытаний вычислительным экспериментом. Вычислительный эксперимент также позволяет на этапе проектирования определить оптимальное

соотношение конструктивных параметров вихревого аппарата и гидродинамических параметров течения, обеспечивающих максимальную эффективность процесса фазоразделения газожидкостного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильштейн Л. М., Бойко С. И., Запорожец Е. П. Нефтегазопромысловая сепарационная техника. М.: Недра, 1992. 236 с.
2. Жидков М. А., Гусев А. П., Рябов А. П., Вшивцев С. П., Кошовец Н. В., Коляко Б. Г., Соболев Е. П., Староконев Г. С. Трехпоточная вихревая труба - эффективное газодинамическое устройство для подготовки природного газа к транспорту // Нефтегазовые технологии. 2006, № 11. С. 3–7.
3. Суслев А. Д., Иванов С. В., Мурашкин Ю. В., Чижиков Ю. В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 249 с.
4. Сугак Е. В., Воинов Н. А., Николаев Н. А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань: Издательство «Отечество», 2009. 224 с.
5. Рябов А. П., Гусев А. П., Жидков М. А., Жидков Д. А. Трехпоточные вихревые трубы в нефтедобывающей и газовой промышленности (аналитический обзор) // Нефтегазовые технологии. 2007. С. 2–7.
6. Ахметов Ю. М., Тарасов А. А., Целищев А. В. Исследование процесса фазоразделения жидкости и газа в вихревой трубе // Наука – производству. 2010. С. 156–166.
7. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Соловьев А. А., Кармацкий П. М. Редуцирование давления и отделение жидкой фазы газа магистральных газопроводов с использованием вихревой техники // Динамика машин и рабочих процессов. 2005. С. 87–90.
8. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1997. 292 с.
9. 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.
10. Русак А. М., Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В., Соловьев А. А., Целищев В. А., Чиндина А. А. Исследование и применение вихревых технологий на кафедре ПГМ УГАТУ // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 151–162.

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, м.н.с. НИЧ каф. прикладной гидромеханики. Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2007). Дипл. магистра (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. вихревого эффекта.