

Ю. М. АХМЕТОВ, В. С. ЖЕРНАКОВ, А. В. ЦЕЛИЩЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ**

Рассматриваются вопросы исследования процесса фазоразделения газожидкостного потока при вихревом течении. Приводится описание методики расчета параметров процесса конденсации жидких компонентов в вихревой трубе. Представлены результаты экспериментального исследования процесса сепарации газожидкостного потока в вихревой трубе с сепарационным узлом. *Вихревая труба; сепарация газожидкостного потока, осушка газа*

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в России разрабатывается более 1200 нефтяных и нефтегазовых месторождений. Вместе с нефтью извлекается растворенный в ней газ. Его содержание колеблется от 5 до 300 кубических метров на тонну нефти. В отличие от природного газа, добычу которого можно регулировать в зависимости от объема его потребления, попутный нефтяной газ (ПНГ) извлекается из недр вместе с нефтью, независимо от того, имеются или отсутствуют условия для его использования. При отсутствии необходимых условий его вынужденно сжигают в факелах. Это приводит к невосполнимым потерям энергоносителя и углеводородного сырья.

Утилизируя ПНГ, можно получать электроэнергию, тепло, сжиженный газ для отопления, моторные топлива и растворители. Одной из основных причин неполного использования добываемого вместе с нефтью газа заключается в том, что стоимость его переработки значительно выше, чем у природного газа. Это связано, прежде всего, с особенностями технологии добычи нефти по сравнению с технологией добычи природного газа.

Специфической особенностью попутного нефтяного газа является невозможность его транспортировки на большие расстояния без предварительной подготовки, так как появляется риск образования кристаллогидратов. В отличие от природного газа, который состоит большей частью из метана и этана, нефтяной газ содержит в своем составе значительное количество пропана, пентана, более тяжелых углеводородов, а также пары воды. Таким образом, для использования попутного газа требуется очистка его от жидких примесей, что при нерациональном подходе к

технологическим решениям влечет за собой большие капитальные и энергетические затраты и малую доходность инвестиций. Наиболее приемлемы в промышленных условиях технологии, основанные на низкотемпературной конденсации компонентов, когда в качестве генераторов холода используются относительно простые и надежные расширители газа, каковыми на сегодня являются дроссельные вентили и вихревые трубы (ВТ).

Следует отметить, что для дроссельного расширителя необходим большой перепад давления, который может быть обеспечен в основном только при добыче и подготовке природного газа. При подготовке попутного нефтяного газа такого благоприятного условия, как правило, нет, поэтому разработчики низкотемпературной технологии очистки и осушки ПНГ все чаще обращаются в своих проектах к более эффективному расширителю – вихревой трубе Ранка – Хилша. Она прельщает не только своей конструктивной простотой при феноменальной способности одновременного получения холода и тепла, но и возможностью одновременной низкотемпературной сепарации компонентов газового потока. Такая возможность реализуется в трехпоточных вихревых трубах (ТВТ), в которых наряду с охлажденным и подогретым потоками выводится сконденсированная и отделенная жидкость (или газожидкостная смесь) [1].

Возможны следующие варианты использования эффекта сепарации газовых потоков в вихревой трубе:

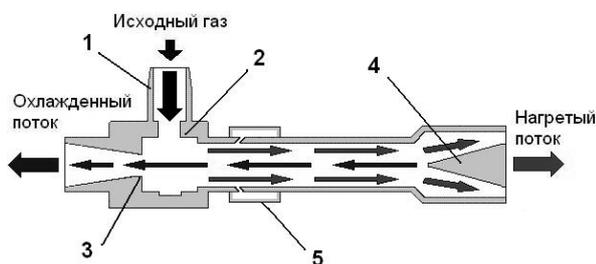
- очистка газа от дисперсной влаги, имеющейся в исходном газе;
- компонентное разделение газоконденсатных смесей;
- низкотемпературная очистка газа (конденсация высококипящих компонентов);
- «сухое» компонентное разделение газовых смесей.

## 1. ЭФФЕКТ СЕПАРАЦИИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

В газодобывающей отрасли компонентному разделению подвергаются довольно сложные углеводородные смеси, состоящие из различных углеводородов и примесей, концентрация которых колеблется в зависимости от вида газового сырья и технологического режима его получения. Так, наиболее нежелательными примесями являются пары воды и тяжелые углеводороды (газовый конденсат).

Уникальность вихревой трубы состоит в том, что наряду с получением холода и тепла, она является высокоскоростным сепаратором. Высокая скорость газовой струи позволяет получить не только эффективную сепарацию дисперсной влаги, имеющейся в исходном газе, но и приводит к скачкообразному понижению термодинамической температуры газа, вследствие чего создается возможность конденсации высококипящих компонентов. Дальнейшая центробежная сепарация образовавшихся капель и вывод их из вихревой трубы может обеспечить низкотемпературную осушку газа.

Для сепарации газожидкостных потоков используются ТВТ, в которых отделяемые жидкие компоненты отводятся с частью газа в виде третьего потока (рис. 1). Основными функциональными элементами ТВТ 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.** Трехпоточная вихревая труба:  
1 – сопловый ввод; 2 – закручивающее устройство; 3 – диафрагма; 4 – дроссельный клапан; 5 – сепарационный узел

При подаче газа в сопловый ввод трехпоточной вихревой трубы жидкие компоненты, содержащиеся в нем, под действием центробежных сил отбрасываются на стенку, образуя пленку жидкости. Образовавшаяся пленка жидкости продолжает

движение в камере энергоразделения до сепарационного узла, где выводится из вихревой трубы с частью горячего потока газа.

В настоящее время хорошо изучено и широко используется в промышленности свойство вихревой трубы генерировать холод (тепло). Процессы же сепарации, протекающие в ней, исследованы значительно слабее. На процесс фазоразделения газожидкостного потока в трехпоточной вихревой трубе влияют два фактора. Первый фактор – это сложная совокупность процессов центробежной сепарации дисперсной жидкой фазы и конденсации высококипящих компонентов с последующим образованием мелкодисперсной жидкой фазы, сепарации капелек с формированием пленки жидкости на внутренней стенке вихревой камеры и выводом этой жидкости из вихревой трубы. Второй фактор – это оптимальное конструктивное оформление узла сепарации и определение его месторасположения в вихревой камере по отношению к сопловому сечению. Целью данного исследования является определение взаимосвязи сепарационных и термодинамических характеристик трехпоточной вихревой трубы и анализ влияния конструктивного исполнения сепарационного узла на эффект температурного разделения.

## 2. ЗОНЫ КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Рассматривая процессы конденсации компонентов газа в вихревой трубе, в том числе в ТВТ, необходимо иметь в виду, что теоретически в ней имеются две зоны охлаждения газа и, соответственно, две зоны возможного появления капельной жидкости.

Первая зона конденсации находится в сопловом вводе и частично во внешнем высокоскоростном вихре. На выходе из сопла, где имеет место максимальная скорость потока, термодинамическая температура минимальна. Значит, именно в сопловом сечении и в сочетаниях близких к нему создаются (с термодинамической точки зрения) наиболее благоприятные условия для конденсации углеводородных компонентов. Далее вступают в силу законы кинетики. Для завершения процесса конденсации нужно определенное время нахождения системы в данном термодинамическом состоянии.

Кроме того, в процессе сепарации должна образоваться устойчивая пленка жидкости, чтобы отобрать и вывести ее из ТВТ с

минимальными потерями. Поэтому до сепарационного узла необходимо иметь некоторую протяженность вихревой камеры в направлении дроссельного вентиля. На рис. 2 представлена структура течения потока газа в камере вихревой трубы.

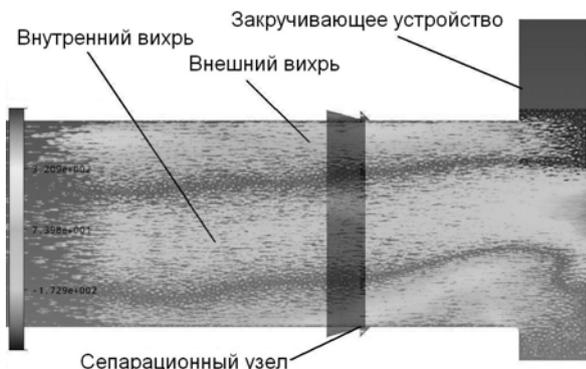


Рис. 2. Структура течения газового потока в ТВТ

Вторая зона конденсации находится в приосевых слоях вихревого потока, то есть во внутреннем низкоскоростном вихре. Здесь определяющую роль играет не термодинамическая температура, а температура торможения, которая начинает снижаться при формировании внутреннего вихря в районе дросселя и достигает минимального значения на срезе диафрагмы. По мере понижения этой температуры, в слоях внутреннего вихря также появляется дисперсная влага, которая также отбрасывается центробежными силами на периферию, к стенке вихревой камеры.

Таким образом, плёнка жидкости образуется практически по всей длине вихревой камеры, причём на начальных участках закрученного потока она формируется из основной, дисперсной компоненты «термодинамической» фазы конденсации. В этой связи было бы правильным улавливать плёнку либо дискретно по всей длине камеры энергетического разделения, либо в районе дроссельного вентиля. Однако в этом случае не учитывается второй фактор, имеющий место в вихревых трубах, это нагрев газа горячего потока. Из-за нагрева, который может достигать 50–70 °С, идёт нежелательное испарение компонентов из сформированной плёнки жидкости и, соответственно, обогащение горячего потока.

Выход из возникшего противоречия есть. Он заключается в улавливании отделенной жидкой фазы в непосредственной близости или на небольшом удалении от сопла, то есть там, где должно образовываться максимальное количество как «термодинамической», так и

жидкой фазы «торможения», и в то же время нагрев горячего потока не столь существенен по сравнению с нагревом в районе дроссельного вентиля.

### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАЦИИ ЖИДКИХ КОМПОНЕНТОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Методика предназначена для выявления и расчетной оценки параметров процесса конденсации жидких компонентов в ТВТ и, соответственно, определения потенциальных возможностей ТВТ при использовании ее в качестве низкотемпературного сепаратора, позволяющего конденсировать углеводородные компоненты с получением жидкой фазы в виде третьего потока.

Термодинамика вихревого эффекта в данном случае рассматривается как основа процессов конденсации компонентов в ТВТ, которую можно получить либо из имеющихся экспериментальных данных, либо оценить по имеющимся полуэмпирическим методикам [2]. А далее, имея ключевые температуры и давления в низкотемпературных зонах ТВТ, можно будет рассчитать процесс конденсации компонентов. Такой подход позволяет получить наглядную инженерную методику расчета конденсационных возможностей трехпоточной вихревой трубы и адекватно анализировать вновь получаемые экспериментальные данные.

Описание методики расчета конденсации компонентов в вихревой трубе начнем с рассмотрения первой зоны конденсации примесей, которая находится в тангенциальном сопловом вводе вихревой трубы и на входе высокоскоростного потока в вихревую камеру. В этой зоне за счет высокой скорости истечения газа имеет место статическая температура  $T_{ст}$ , которая ниже температуры торможения  $T_{в}$ . Статическая температура, как показатель перехода потенциальной энергии давления газа в кинетическую энергию движущегося потока, определяется из известного газодинамического выражения

$$T_{ст} = T_{в} - v^2 / 2C_p.$$

Как видно из формулы, статическая температура тем ниже, чем выше скорость истечения газа, причем эта зависимость квадратичная. Из газовой динамики также известно, что относительная величина скорости истечения газа  $v$  характеризуется числом Маха:  $M = v/a$ .

Скорость звука определяется из известного соотношения  $a = \sqrt{kgRT}$ . Таким образом, величина скорости звука инвариантна к давлению газа и зависит только от его физических свойств и температуры торможения, в частности от температуры газа на входе в вихревую трубу.

Рассчитываем статическую температуру по термодинамическим зависимостям, имеющимся в работе [2]. При  $M < 1$  статическая температура будет равна

$$T_{ст} = T_b [1 - M^2 (k_b - 1)(k_b + 1)^{-1}],$$

при  $M = 1$

$$T_{ст} = T_b [2(k_b + 1)^{-1}],$$

при  $M > 1$

$$T_{ст} = T_b [2(k_b + 1)^{-1} \cdot [1 + 0,5(k_b - 1)] / [1 + 0,5(k_b - 1) \cdot M^2]].$$

Из приведенных соотношений видно, что для оценки  $T_{ст}$  при наиболее практикуемом критическом истечении газа из сопла нужно минимум данных: температура газа на входе в ВТ и показатель адиабаты  $k$ . Для дозвукового и сверхзвукового истечения газа при оценке  $T_{ст}$  необходимо рассчитать число Маха. Оно определяется из следующего соотношения

$$M^2 = 2(k_b - 1)^{-1} [(P_b / P_{ст})^{(k_b - 1)/k_b} - 1].$$

Отдельной оценки требует величина статического давления на выходе газа из сопла  $P_{ст}$ . К настоящему времени наиболее достоверные экспериментальные данные, которые можно использовать для оценки  $P_{ст}$ , приведены в работе [3]. Они представлены в таблице в виде дискретной зависимости статической степени расширения ( $\pi_{ст} = P_{ст} / P_x$ ) от ключевых параметров работы вихревой трубы  $\pi_{ст} = f(\mu, \mu)$ . Имея эту зависимость, легко найти статистическое давление на выходе из сопла  $P_{ст} = \pi_{ст} P_x$ .

Как видно из таблицы, все значения  $\pi_{ст} > 1$ . Это значит, что величина статического давления газа на выходе из сопла  $P_{ст}$  для всех имеющихся в таблице режимов превышает давление на холодном потоке вихревой трубы  $P_x$ .

**Зависимость  $\pi_{ст}$  от параметров работы вихревой трубы  $\mu$  и  $\mu$**

$\mu$	$\pi_{ст}$ при $\mu=0,2-1,0$						
	$\mu$						
	1	2	3	4	5	6	8
1,0	1,00	1,50	1,90	2,20	2,45	2,60	2,84
0,8	1,00	1,45	1,80	2,15	2,40	2,53	2,75
0,5	1,00	1,35	1,75	2,00	2,20	2,30	2,45
0,3	1,00	1,30	1,70	1,90	2,10	2,20	2,33
0,2	1,00	1,27	1,67	1,85	2,15	2,15	2,27

Таким образом, приведенные выше соотношения и исходные данные позволяют оценить параметры высокоскоростного потока на выходе из соплового ввода, что в свою очередь дает возможность рассчитать фазовое равновесие компонентов. При этом предполагается, что процесс конденсации компонентов в сопле вихревой трубы проходит равновесно.

Алгоритм расчета процесса конденсации компонентов в первой зоне охлаждения газа и нахождения числа Маха сводится к следующему:

1. Имея исходные данные по режиму работы ВТ ( $P_b, P_x, T_b$ , состав газа на входе), по таблице находится значение параметра  $\pi_{ст}$  и далее определяется значение  $P_{ст}$ , которое в дальнейших расчетах считается величиной постоянной.

2. Зная исходный состав газа, определяем показатель адиабаты  $k_b$ .

3. Задается первоначальное значение числа Маха  $M$  и далее по соотношению для выбранного числа Маха рассчитывается статическая температура  $T_{ст}$ .

4. Исходя из полученных  $P_{ст}$  и  $T_{ст}$ , а также состава исходного газа, рассчитывается в первом приближении фазовое равновесие компонентов с нахождением относительного количества и состава фаз.

5. Определяется наличие конденсата при заданных условиях и принятых допущениях. При отсутствии конденсации задается меньшее значение величины  $T_{ст}$  (больше  $M$ ) и вновь проводится расчет фазового равновесия.

6. Методом последовательных приближений находится величина  $T_{ст}$ , при которой начинается конденсация компонентов, и далее по методу хорд находится значение  $T_{ст}$ , при котором расчетный состав холодного потока ВТ наиболее близок к составу реального анализа [4].

7. Имея искомое значение  $T_{ст}$ , находим число Маха.

Как указывалось ранее, вторая возможная зона конденсации компонентов находится в приосевых слоях вынужденного вихря, где определяющую роль играет температура торможения газа на выходе из диафрагмы вихревой трубы. Для оценки процесса конденсации компонентов во второй зоне конденсации для ТВТ принимаются следующие допущения:

- жидкая фаза, образовавшаяся в сопловом вводе и отброшенная на периферию, полностью отводится в третий поток;

- в условиях высоких скоростей закрученного потока и относительно близкого расположения сепарационного узла от соплового сечения жидкость из первой зоны конденсации не претерпевает фазовых превращений (испарение);

- состав исходной газовой смеси для расчета фазового равновесия во второй зоне конденсации соответствует компонентному составу газовой фазы на выходе из соплового ввода ВТ;

- термодинамические параметры для расчета фазового равновесия компонентов в холодном потоке принимаются по параметрам торможения холодного потока;

- образовавшийся в холодном потоке конденсат полностью отбрасывается центробежными силами на периферию и уходит в третий поток.

С учетом вышеперечисленных допущений, проводится расчет фазового равновесия компонентов. Общий эффект процесса конденсации углеводородных компонентов в ТВТ складывается из суммы эффектов конденсации компонентов в обеих зонах.

#### 4. РАСПОЛОЖЕНИЕ СЕПАРАЦИОННОГО УЗЛА В КАМЕРЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Экспериментальное изучение температурной эффективности трехпоточных вихревых труб на углеводородных смесях, проведенное разными исследователями, показало, что температурная эффективность ТВТ, имеющей разрыв или возмущение вихревого потока в сепарационном узле, ниже температурной эффективности ДВТ. Причем чем большее возмущение вносит в вихревой поток сепарационное устройство, тем существеннее влияние этого негативного фактора на холодопроизводительность ТВТ.

Большее значение эффекта охлаждения газа имеют ТВТ с отводом жидкости непосредственно в сопловом сечении за счет цилиндрического осевого отбора (но здесь имеется один негативный нюанс, связанный с кинетикой образования пленки жидкости – она не успевает полностью сформироваться) или с кольцевым отбором жидкости на некотором расстоянии от соплового сечения [5]. В последнем случае и жидкостная пленка успевает сформироваться под действием центробежных сил, и влияние разрыва вихревого потока на температурную эффективность ТВТ не столь существенно. Кроме того, на таком, относительно небольшом, расстоянии от соплового сечения, периферийный вихрь не успевает существенно нагреться в вихревой

камере. Это позволяет отобрать пленку жидкости с минимальными потерями на испарение жидких компонентов.

Оптимальное конструктивное оформление узла сепарации и определение его месторасположения в вихревой камере по отношению к сопловому сечению должно основываться на экспериментальной проверке. В работе [5] была проведена серия экспериментальных исследований на ТВТ с неизменной геометрией основных элементов. Варьировалось лишь конструктивное исполнение и расположение сепарационного узла.

Было исследовано три варианта оформления узла сепарации:

1) узкий кольцевой зазор в осевом направлении высотой 1,0 мм, непосредственно примыкающий к срезу соплового ввода со стороны горячего потока ( $\delta_1 = 0$ ); данный вариант максимально приближается к конструкции двухпоточной ВТ;

2) восемь равномерно расположенных по окружности щелей шириной  $H_2 = 35$  мм ( $0,7 D_{тр}$ ) и высотой 8 мм, выполненных радиально; расстояние от среза соплового ввода до начала щелей составляет  $\delta_2 = 15,0$  мм ( $0,3 D_{тр}$ );

3) кольцевой сепарационный зазор в радиальном направлении шириной  $H_3 = 6$  мм и  $\delta_3 = 55$  мм.

На рис. 3 представлены эти конструктивные варианты.

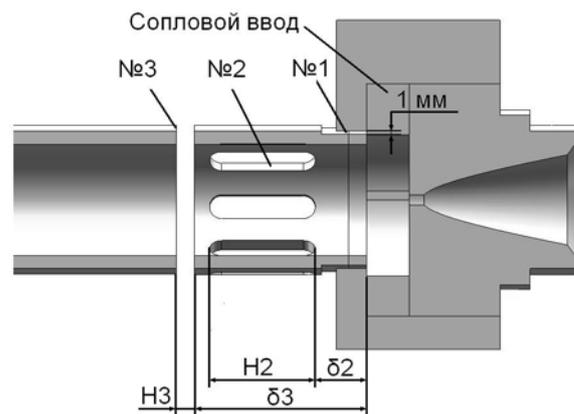
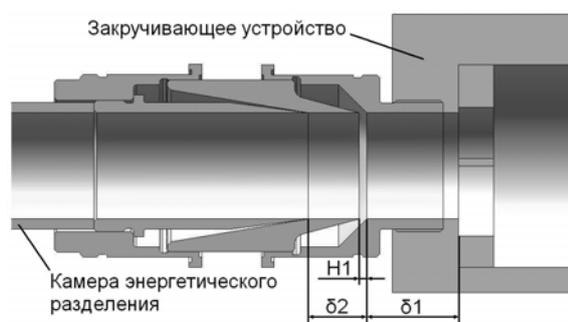


Рис. 3. Варианты конструкции сепарационных узлов ( $D_{тр} = 50$  мм)

В соответствии с результатами исследования было выявлено, что с точки зрения температурной эффективности самая выгодная конструкция узла сепарации – первый вариант, то есть тот, где практически отсутствует разрыв вихревого потока. В случае же существенного нарушения вихревого

течения газа, то есть при наличии большого сепарационного зазора (третий вариант), наблюдается значительное уменьшение эффекта охлаждения газа. Лучшая сепарационная способность получена на третьем варианте узла, хотя он имел весьма низкие показатели по холодопроизводительности.

В 2003 году инжиниринговым центром ОАО «НИИТ» совместно с сотрудниками ГОУ ВПО УГАТУ был разработан и изготовлен экспериментальный сепарационный узел, представляющий собой приставку к вихревой трубе (см. рис. 4). Сепарационный узел выполнен в виде двух кольцевых щелей с регулируемой шириной ( $H$ ), расположенных на расстоянии  $\delta_1 = 35$  и  $\delta_2 = 60$  мм от среза соплового ввода.



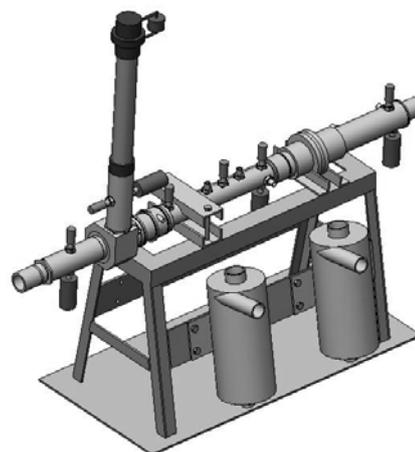
**Рис. 4.** Исследуемый сепарационный узел:  
 $\delta_1$  – расстояние от среза соплового ввода до первой щели;  $\delta_2$  – расстояние от среза соплового ввода до второй щели;  
 $H_1$  – ширина первой щели

В настоящей работе проводилось экспериментальное исследование процесса сепарации газожидкостного потока в вихревой трубе с разработанным сепарационным узлом. На рис. 5 представлен внешний вид экспериментальной установки, на которой проводились исследования.

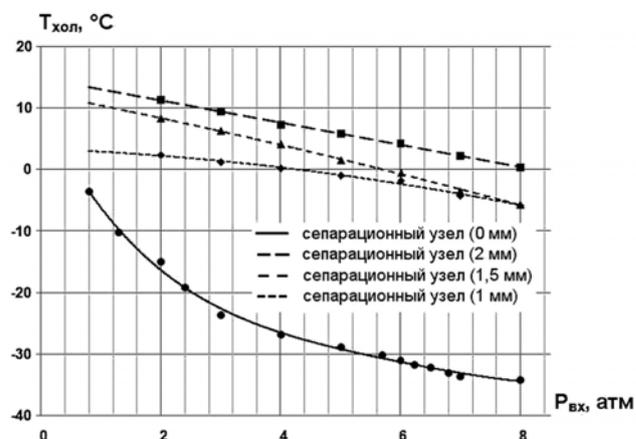
Вихревая труба имеет следующие геометрические параметры: диаметр вихревой трубы – 42 мм; диаметр диафрагмы – 20 мм; угол раскрытия диффузора –  $60^\circ$ ; длина камеры энергоразделения – 300 мм; ширина критического сечения – 14 мм; высота критического сечения – 9 мм.

Для того чтобы наряду с сепарацией крупнодисперсной жидкой фазы, имеющейся в исходном газе, обеспечить еще и конденсацию мелкодисперсной жидкости (низкотемпературную очистку газа), необходимо оценить влияние сепарационного узла на эффект охлаждения газа в вихревой трубе. Для этого была проведена серия экспериментальных исследований на ТВТ с неизменной геометрией основных элементов,

варьировалась только ширина щели сепарационного узла. На рис. 6 представлена зависимость, показывающая влияние ширины щели сепарационного узла на температуру холодного потока при различном давлении газа на входе (при  $\mu = 0,25$ ,  $T_{вх} = 15^\circ\text{C}$ ).



**Рис. 5.** Экспериментальный стенд для исследования процесса сепарации газожидкостного потока в ТВТ



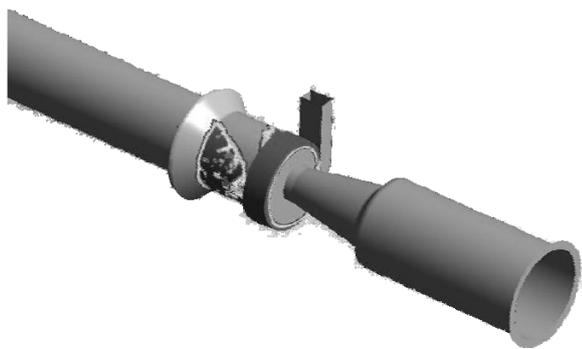
**Рис. 6.** Зависимость температуры холодного потока от давления на входе для двухпоточной и трехпоточной вихревых труб

Проведенные эксперименты показали, что эффект охлаждения газа в вихревой трубе с сепарационным узлом на 30–40 % ниже по сравнению с тем же при закрытой щели сепарационного узла (аналогично конструкции двухпоточной вихревой трубы).

Несмотря на относительно невысокую эффективность ТВТ как генератора холода, получены убедительные экспериментальные данные по эффективности работы вихревой трубы с сепарационным узлом в качестве низкотемпературного сепаратора. В диапазоне относительного весового расхода холодного

потока  $\mu$  от 0,23 до 0,27 максимальная эффективность фазоразделения была достигнута при установке ширины щели сепарационного узла на значении 1 мм. Количество жидкости, отбираемой из третьего потока, составляло (75–93)% от общего количества жидкости, подаваемой на вход. Согласно зависимости, представленной на рис. 6, при ширине щели, равной 1 мм, наблюдается наименьшее влияние сепарационного узла на эффект энергоразделения, что, в свою очередь, обуславливает возможность низкотемпературной конденсации мелкодисперсной влаги.

Для оптимизации конструктивных параметров вихревой трубы и параметров течения двухфазной смеси наряду с экспериментальными исследованиями проводилось также численное моделирование процесса фазоразделения газожидкостного потока в пакете ANSYS CFX. В результате решения задачи были получены поля распределения объемной концентрации фаз. Анализ полученных результатов визуализирует эффект сепарации (массовой стратификации) компонентов двухфазного потока. На рис. 7 представлено распределение объемной доли жидкой фазы при течении газожидкостного потока в вихревой трубе с сепарационным узлом.



**Рис. 7.** Распределение объемной доли жидкой фазы в вихревой трубе с сепарационным узлом

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы проведено исследование взаимосвязи сепарационных и термодинамических характеристик трехпоточной вихревой трубы и анализ влияния конструктивного исполнения сепарационного узла на эффект температурного разделения.

Было выявлено, что температурная эффективность ТВТ, имеющей разрыв или возмущение вихревого потока в сепарационном узле, ниже температурной эффективности ДВТ.

Причем чем большее возмущение вносит в вихревой поток сепарационное устройство, тем существеннее влиянием этого негативного фактора на холодопроизводительность ТВТ.

Согласно результатам экспериментального исследования, максимальная эффективность отделения жидких компонентов из газового потока обеспечивается при ширине щели сепарационного узла, равной 1 мм, что в свою очередь достигается наименьшим влиянием щели на эффект энергоразделения, обеспечивая тем самым возможность низкотемпературной конденсации мелкодисперсной влаги.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численное моделирование течения газожидкостного потока в вихревой трубе / Ю. М. Ахметов, А. А. Соловьев, А. А. Тарасов, А. В. Целищев // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 32-39.
2. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М., 1991. 600 с.
3. **Мартынов А. В., Бродянский В. М.** Что такое вихревая труба? М.: Энергия, 1976. 153 с.
4. **Холпанов Л. Н.** Математическое моделирование нелинейных термогазодинамических процессов. М., 1998. 320 с.
5. Система подготовки попутного газа нефтедобычи к транспорту с применением регулируемой трёхпоточной вихревой трубы / А. П. Гусев и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000, Июль. С. 16–18.

### 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.

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

**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.