

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОД РАСЧЕТА КАВИТАЦИОННО-ВИХРЕВОГО АППАРАТА

Ф.Ш. Хафизов¹

А.А. Александров²

С.П. Суцев^{2,3}

Е.М. Абуталипова¹

И.Ф. Хафизов¹

pkpb@mail.ru

rector@bmstu.ru

esrc@esrc.ru

elenaabutalipova.ea@gmail.com

ildar.hafizov@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

³ ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработана принципиально новая технология конструирования тепло- и массообменных аппаратов на основе использования кавитационно-вихревого эффекта. Исследована и изучена структура потока в аппарате. Показано, что создание нескольких режимов движущихся потоков, увеличение их скорости и турбулентности позволяют не только создать оптимальный режим абсорбции при существенном упрощении конструкции устройства, но и значительно снизить энергозатраты на проведение технологических процессов. Доказано, что для создания эффективного режима кавитации достаточно энергии потока обрабатываемой жидкости. Обоснована применимость кавитационно-вихревых аппаратов для подготовки нефти, газа и продуктов их переработки к транспортировке. Предложены технические решения по расширению функциональных возможностей кавитационно-вихревых аппаратов для повышения эффективности процессов очистки нефти и газа

Ключевые слова

Кавитация, диспергирование, турбулизация, критерий Рейнольдса, попутный нефтяной газ, абсорбер, сопло

Поступила в редакцию 28.10.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Выделяющийся в виде легких углеводородов в процессе нефтепереработки попутный нефтяной газ (ПНГ) является ценным сырьем и играет значительную роль в энергетике и в химической промышленности. Однако регулировать его добычу, равно как осуществлять его переработку на месте добычи или транспортировать, в большинстве случаев невозможно или нерентабельно. Это связано со сложной технологией подготовки, транспортировки и переработки ПНГ. Поэтому четверть добываемого в Российской Федерации нефтяного газа сжигается на факелах, что приводит не только к загрязнению окружающей среды, но и к потере перспективного сырья. Вовлечение неисполь-

зуемых объемов нефтяного газа в промышленный оборот существенно улучшит экономическую эффективность нефтедобычи. Практика применения различных методов промысловой подготовки ПНГ, его очистки и утилизации показывает, что практически всегда возникает ряд сопутствующих проблем, связанных с повышенной коррозией оборудования и металла трубопроводов, обусловленной содержанием кислых компонентов в газе. Решить эти проблемы можно применением непосредственно на нефтепромыслах новых технологий и современного оборудования, в том числе основанного на принципах кавитационно-вихревых эффектов.

В настоящее время для очистки ПНГ, нефти и продуктов переработки применяют различные физические процессы и массообменные аппараты, выбор которых обусловлен влиянием таких факторов, как состав и свойства продукта, необходимая степень его очистки, область использования и пр. Интенсификация массообменных процессов при очистке ПНГ и нефти в системах газ-жидкость и жидкость-жидкость в технологических кавитационно-вихревых аппаратах (абсорберах) достигается дроблением (диспергированием) рабочей жидкости путем ее распыливания.

Диспергирование жидкости — сложный, многофакторный процесс, который протекает за счет действия внутренних и внешних движущих сил. Распыливание рабочей жидкости происходит на выходе из кавитационно-вихревого устройства [1, 2].

К внутренним силам относятся межмолекулярные силы, режим движения потока и его турбулизация. Интенсивность турбулентных потоков (пульсаций) зависит от свойств жидкости, перепада давлений и от особенности конструкции распылителя (аппарата). Увеличение скорости истечения способствует росту интенсивности пульсаций турбулизации и повышению качества диспергирования жидкостей. Внешние (газодинамические) силы вызваны взаимодействием диспергируемой жидкости со средой, в которую она распыляется, а также перемешиванием струй или их соударением с твердой поверхностью. Их величины зависят от плотности среды, скорости струйного потока и диаметра капель жидкости. Увеличение скорости движения струйного потока также приводит к скорому дроблению жидкости и к улучшению качества диспергирования.

Турбулентные и кавитационно-вихревые эффекты, зависящие от свойств жидкости, способствуют дроблению сплошного потока жидкости на мелкие капли.

При каплеобразовании распыливание струи происходит следующим образом: формируется поверхностный слой, разделяющийся под воздействием турбулентных сил на частицы различной формы и величины, затем мелкие частицы при действии сил поверхностного натяжения приобретают форму шара, в результате чего образуются капли, а крупные частицы продолжают распадаться. В процессе деления капельной жидкости в потоке газа неизменно возникает осцилляция, вызванная циркуляцией жидкости в каплях и приводящая к их изменению.

Циркуляция жидкости в капле определенного размера возникает при приближении скорости сплошной среды, обтекающей ее, к определенному критическому значению [3, 4]. Предположим, что при неизменной относительной скорости газа все капли распадаются на части меньшего (стабильные, без внутренней циркуляции) и большего (нестабильные, с внутренней циркуляцией, подверженные изменению и дроблению) размера.

Условный критический диаметр капли $d_{кр}$, при котором начинается ее дробление, определяют из соотношения

$$\frac{\sigma_{ж}}{d_{кр} \rho_{ж}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \left(\frac{u \mu_{г}}{\sigma_{ж}} \right)^{0,78} \left(\frac{\sigma_{ж}^2 \rho_{г}^2}{\mu_{г} \rho_{ж} g} \right)^{0,42},$$

где $\sigma_{ж}$ — поверхностное натяжение диспергируемой жидкости; $\rho_{ж}$ — плотность распыляемой жидкости; u — разность скоростей жидкости капли и обдувающего ее газа; $\mu_{г}$ — динамическая вязкость газа; $\rho_{г}$ — плотность газа; g — ускорение свободного падения.

Критическому диаметру соответствует критическое значение критерия Рейнольдса:

$$Re_{кр} = \frac{4,55 \sigma_{ж}^2 \rho_{г}^2}{\mu_{г}^2 g (\rho_{ж} - \rho_{г})}.$$

Изменение и дробление капель начинается при возникновении отрывного течения сплошной среды в задней части капли [5]. Количественно степень устойчивости капли оценивают по критерию Вебера, характеризующему соотношение инерционных сил и сил поверхностного натяжения:

$$We = \frac{u^2 d_{к} \rho_{ж}}{\sigma_{ж}},$$

где $d_{к}$ — диаметр капли.

Для определения критического значения критерия Вебера (дробление капли) учитываются не только физические свойства жидкости, но и другие факторы, которые влияют на устойчивость капли [5], в том числе критерий Рейнольдса, определяющий режим обтекания капли:

$$Re = \frac{u d_{к} \rho_{г}}{\mu_{г}},$$

критерий Лапласа, определяющий соотношение сил вязкости с силами поверхностного натяжения:

$$Lp = \frac{\sigma_{ж} \rho_{ж} d_{к}}{\mu_{ж}^2},$$

а также соотношение плотностей и вязкостей сплошной среды и капель жидкости:

$$We_{кр} = 0,5 Re_{кр}^2 \left(\frac{\mu_{г}}{\mu_{ж}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}} \right) Lp^{-1}.$$

Здесь $\mu_{ж}$ — вязкость жидкости.

Для определения значения критического числа Вебера с учетом влияния вязкости часто используют следующую эмпирическую зависимость [6]:

$$We_{кр} = 10 (1 + Lp^{-0,37}).$$

Рассмотренная схема разделения струи на капли вследствие турбулентного движения представляет собой упрощенную модель процесса распыливания жидкости [7]. Как уже было отмечено, причиной дробления потока жидкости на капли являются как турбулентные, так и кавитационные процессы.

При равенстве давлений жидкости и ее насыщенных паров в данном объеме в жидкости начинается образование полостей. Следовательно, кавитацию можно вызвать уменьшением давления жидкости или повышением давления насыщенных паров, а также обоими действиями одновременно.

Процесс кавитации в сопле форсунки возникает за счет резкого повышения гидродинамического напора жидкой фазы, при котором гидростатический напор и давление понижаются. При этом увеличение скорости потока, способствующее росту гидродинамического напора, достигается уменьшением площади сечения канала. Образовавшиеся в сопле форсунки пустоты (каверны) на выходе, где давление, как правило, близко к атмосферному, пропадают, разрушая целостность струйного потока.

Процесс возникновения кавитационных полостей имеет периодический и непостоянный характер, частота его зависит от скорости потока. С повышением скорости потока образование кавитационных пузырьков происходит как на поверхности, так и внутри струи, что приводит к высвобождению из сопла парожидкостной смеси. Активизации и интенсификации кавитации по всему сечению струи также способствует характер движения потока.

Для высоковязких жидкостей режим кавитации (наиболее эффективное дробление струи) достигается при скорости потока 8...10 м/с, для жидкостей, имеющих малую вязкость, — при скорости истечения жидкости 15...25 м/с [8–10].

На процесс смешения жидкостей совокупное влияние оказывают критерии Вебера и Рейнольдса, определяя тип разрушения капель (таблица).

Тип разрушения капель

Критерий	Разрушение капель
$4 \leq We < 20;$ $0,1 \leq We Re^{-0,5} < 0,8$	Деление на 2-4 капли. Размер вторичных капель приблизительно равен размеру основных
$10 \leq We < 10^4;$ $0,5 \leq We Re^{-0,5} < 10$	Дробление жидкости и образование капель как больших, так и маленьких размеров
$10^3 \leq We < 10^5;$ $10 \leq We Re^{-0,5} < 100$	Взрывной распад, за счет которого образуются капли меньшего размера по сравнению с начальным

Максимальный диаметр капли, которая может существовать в факеле распыла, определяют из условия равенства силы поверхностного натяжения

$$F_{\text{пов}} = 2\pi r_k \sigma_{\text{ж}}$$

и силы аэродинамического давления

$$F_{\text{аэр}} = \varphi \frac{\pi r_k^2 \rho_{\text{ж}} u^2}{2}$$

по формуле

$$d_k = \frac{8 \sigma_{\text{ж}}}{\varphi \rho_{\text{ж}} u^2},$$

где r_k — максимальный радиус капли; φ — коэффициент сопротивления движению капли.

Технология кавитационной очистки попутного нефтяного газа, основанная на вихревых принципах. Предлагаемая технология заключается в многократном взаимодействии тангенциально движущегося потока газа с диспергированной рабочей жидкостью и может быть использована в различных отраслях народного хозяйства: в нефтегазовой промышленности для поглощения серосодержащих соединений из нефти и газов селективными абсорбентами, в машиностроении для охлаждения инструментов и кавитационной очистки деталей, а также в энергетике, медицине и пр.

Кавитационно-вихревую очистку ПНГ осуществляют путем абсорбирования из газов отдельных компонентов с использованием специального устройства — абсорбера (рис. 1).

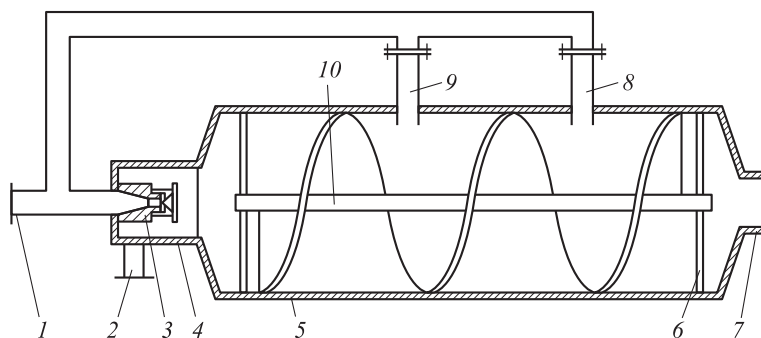


Рис. 1. Схема кавитационно-вихревого абсорбера:

1, 8, 9 — входные патрубки подачи жидкости; 2 — входной патрубок ввода газа на очистку; 3 — газожидкостной диспергатор; 4 — выносная кавитационно-вихревая камера смешения; 5 — цилиндрический корпус; 6 — опоры; 7 — патрубок выхода газожидкостной смеси в сепарационное устройство; 10 — шнек-завихритель

Через входные патрубки 1 и 2 в выносную кавитационно-вихревую камеру смешения (вихреобразования) 4 аппарата поступают рабочая жидкость (абсорбент) и газ на очистку. После прохождения жидкости через диспергатор 3 на выходе из сопла происходит разрыв сплошности жидкой фазы, и выходящий газожидкост-

ный поток набирает скорость около 10...14 м/с. За соплом установлен конический рассекатель жидкости (кавитатор-рассекатель), функциями которого являются разделение жидкостного потока и возбуждение кавитации в двухфазной среде, что обеспечивает лучшее смешение жидкости с газовым потоком. Затем в кавитационно-вихревой камере под действием кавитационно-вихревых эффектов тангенциально движущийся газ взаимодействует (перемешивается) с 70 % подаваемой жидкой фазы. Далее процесс протекает в пенном режиме. При достижении шнека-завихрителя 10 образование пены гасится, и процесс протекает в режиме двухфазного течения. Для достижения высокой степени очистки газа по ходу шнека-завихрителя через заглубленные в корпус патрубки 8 и 9, расположенные в верхней части аппарата, добавляется новая порция (до 30 %) абсорбента. В корпусе шнека происходит многократное перемешивание газового и жидкостного потоков. Далее смесь, пройдя шнек-завихритель, через патрубок 7 выходит в сепарационное устройство [11].

Для усиления кавитационного воздействия на жидкость и повышения дисперсности жидкой фазы создается акустическое поле, для чего в сопле устанавливают конический рассекатель (форсунку) (при этом изменяется режим течения жидкой фазы), а также на сопле выполняют нарезку в виде закручивающегося винта [12–14].

Изменение скорости в канале форсунки. Соотношение гидростатического и гидродинамического напора жидкости в разных местах канала корпуса и сопла форсунки определяется уравнением Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_{\text{ж}} g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_{\text{ж}} g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{\text{н}},$$

где z_1, z_2 — высота произвольных точек форсунки; p_1, p_2 — давления в этих точках; ω_1, ω_2 — скорости потока; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность распыляемой жидкости;

$h_{\text{н}} = \xi \frac{\omega_2^2}{2g}$ — потеря напора на трение; ξ — коэффициент сопротивления форсунки (сопла). Следовательно, при малых размерах устройства ($z_1 \approx z_2$) уравнение Бернулли примет следующий вид:

$$\frac{p_1}{\rho_{\text{ж}}} + \frac{\omega_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_{\text{ж}}} + (1 + \xi) \frac{\omega_2^2}{2}.$$

Для обеспечения равномерного подвода жидкости к соплу (т. е. равной эпюры скоростей в проходном сечении на входе в сопло) необходимо исключить пульсации скорости. Согласно уравнению неразрывности, постоянную скорость можно сохранить при постоянной площади сечения канала в корпусе форсунки.

Значение площади поперечного сечения входного патрубка форсунки равно

$$S_{\text{вх}} = \pi R_{\text{вх}}^2, \quad (1)$$

где $R_{\text{вх}}$ — радиус входного патрубка форсунки.

Площадь проходного сечения канала и сопла форсунки, которая представляет собой боковую поверхность усеченного конуса в любой точке, вычисляют по формуле

$$S_{y.ki} = \pi \left(2 R_i \Delta l_i - \Delta l_i^2 \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (2)$$

где R_i — радиус вращения любой точки, которая располагается на внутренней поверхности внешней стенки корпуса форсунки; Δl_i — длина образующей усеченного конуса для точки с радиусом R_i ; α — угол раствора срединной конической поверхности канала в корпусе форсунки.

Скорость потока распыляемой жидкости на выходе из форсунки зависит от степени изменения площади канала или сопла форсунки по сравнению с площадью поперечного сечения ее входного патрубка. Степень изменения определяют по отношению

$$k_i = \frac{S_{y.ki}}{S_{вх}}, \quad (3)$$

а при использовании закручивающих устройств, когда вектор скорости приобретает тангенциальную составляющую, — по соотношению

$$k_i = \frac{S_{y.ki}}{S_{вх} \cos \beta_i}, \quad (4)$$

где β_i — угол отклонения вектора скорости в заданной точке от радиально-осевого направления.

Для форсунки, предназначенной для распыливания малого количества жидкости, предлагается принимать $k_i = 1,0$ и по мере удаления от входного сечения плавно уменьшать это значение. Для остальных случаев следует принять $k_i = 1$.

Длину образующей усеченного конуса в произвольной точке с учетом формул (1)–(4) определяют по формуле

$$\Delta l_i = \frac{R_i - \sqrt{R_i^2 - k_i R_{вх}^2 \cos(\alpha/2) \cos \beta_i}}{\cos(\alpha/2)}.$$

Скорость потока жидкости в любой точке канала или сопла форсунки определяется в зависимости от параметров подводимого потока и конструкции форсунки. Тогда из уравнения неразрывности следует

$$\omega_{вх} S_{вх} = \omega_i S_{y.ki};$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2(p_{вх} - p_i)}{\rho_{ж} (1 + \xi - k_i^2 \cos^2 \beta_i)}}, \quad (5)$$

где $p_{вх}$ — давление жидкости при входе в сопло; p_i — давление жидкости в рабочей части сопла.

Эффективность работы форсунки зависит от физических параметров жидкости, проходящей через сопло, поэтому формулой (5) целесообразно связывать основные параметры потока жидкости в рабочей части сопла форсунки и параметры подводимого потока. Таким образом, скорость жидкости в рабочей части сопла находят по формуле

$$V_{ж} = \sqrt{\frac{2(p_{вх} - p_c)}{\rho_{ж} (1 + \xi - k^2 \cos^2 \beta)}}$$

где k — степень изменения проходного сечения рабочей части сопла форсунки; β — угол отклонения вектора скорости на выходе из форсунки от радиально-осевого направления; p_c — давление жидкости в рабочей части сопла.

Для центробежных форсунок тангенс угла раскрытия факела равен отношению тангенциальной и осевой составляющих вектора скорости. В предлагаемом устройстве большое влияние на выход жидкости из сопла оказывает радиальная составляющая скорости, полученная потоком в корпусе форсунки, поэтому минимальный угол раскрытия факела распыла определяют по формуле

$$\varphi = 2 \arccos \left(\cos \beta \cos \frac{\alpha}{2} \right).$$

Угол раскрытия факела распыла увеличивается при увеличении угла раскрытия срединной конической поверхности канала в корпусе форсунки.

Аналогичная зависимость рассматриваемого параметра наблюдается от угла отклонения вектора скорости на выходе из форсунки от радиально-осевого направления, при этом, чем выше интенсивность закрутки потока, тем меньшее влияние на раскрытие факела оказывает угол раствора срединной поверхности канала.

Согласно зависимости, приведенной на рис. 2, закручивающее устройство в корпусе форсунки следует устанавливать при небольшом угле раствора срединной поверхности канала.

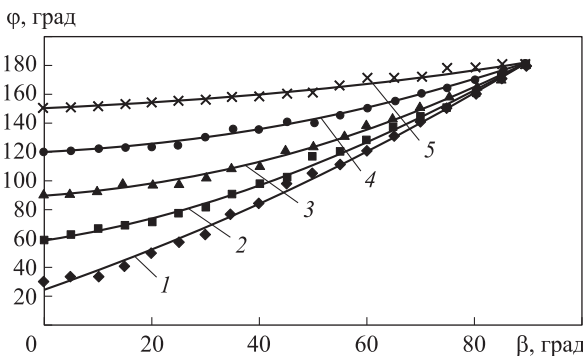


Рис. 2. Зависимость минимального угла φ раскрытия факела от угла отклонения β при $\alpha = 30^\circ$ (1), 60° (2), 90° (3), 120° (4) и 150° (5) (♦, ■, ▲, ●, × — эксперимент)

Геометрические размеры (диаметр) сопла определяются в зависимости от расхода жидкости, подаваемой в аппарат, и располагаемого запаса давления на технологической линии трубопровода

$$d_c = \sqrt{4 + \frac{q_p}{\left(\mu_{ж} \pi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ж}}} \right)}}$$

где q_p — среднечасовой расход жидкости, подаваемой в аппарат; ΔP — располагаемый запас давления на технологической линии трубопровода.

Описание конструкции камеры смешения. Методом имитационного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS [15, 16] авторами настоящей работы была разработана конструкция камеры смешения. В расчетах использована модель турбулентного движения вязкой жидкости с малыми изменениями плотности при больших числах Рейнольдса. В целях определения концентрации также было решено уравнение конвективно-диффузионного переноса.

Предлагаемая камера смешения жидкости (рис. 3) состоит из патрубка для подачи продукта, патрубка для подачи реагента, конфузора и гидродинамического кавитатора. Результаты моделирования камеры смешения приведены на рис. 4.

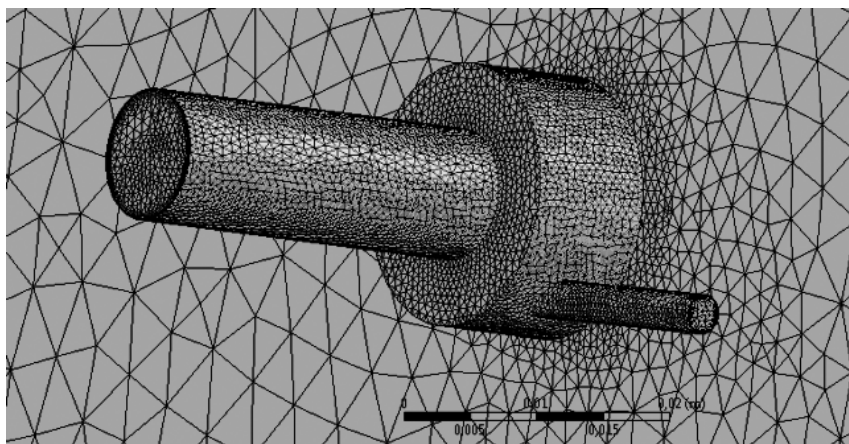
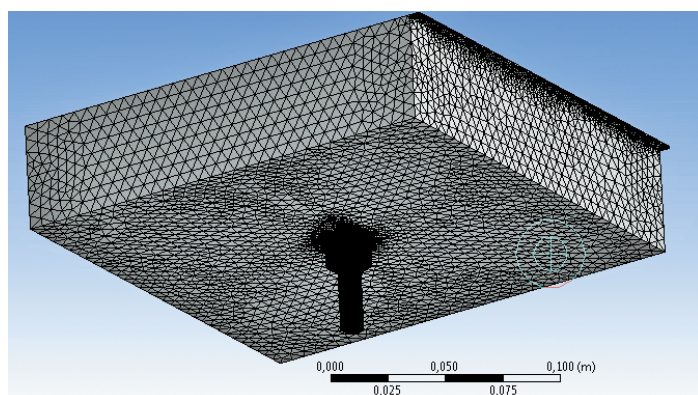
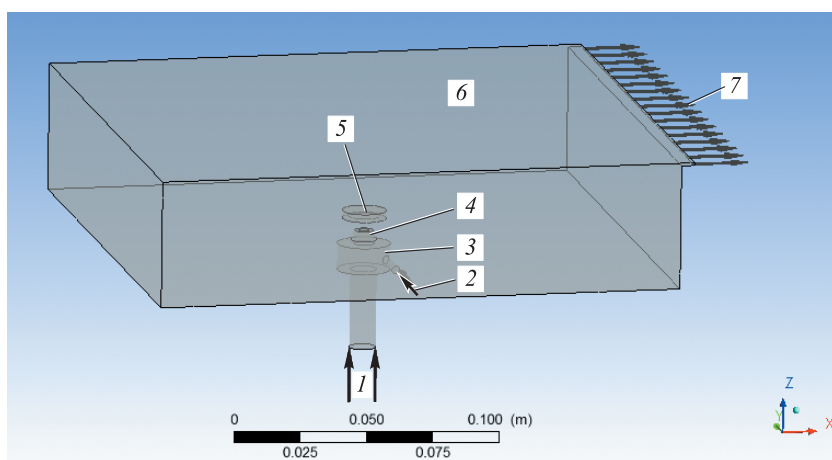


Рис. 3. Модель камеры смешения жидкости

Выводы. Разработаны метод расчета и конструкция прямооточного кавитационно-вихревого аппарата очистки ПНГ от сероводорода. Предложенная технология очистки газа предполагает многократное взаимодействие жидкости с тангенциально движущимся потоком газа под действием кавитационно-вихревого эффекта. Жидкую фазу сжимают в газожидкостном диспергаторе, на выходе из которого она, ударяясь о кавитатор-рассекатель, перемешивается с тангенциально движущимся потоком газа с последующим взаимодействием обоих потоков в камере вихребразования. Создание нескольких режимов высокоскоростных потоков



а



б

Рис. 4. Задание моделей течения, свойств материалов, граничных и начальных условий (а) и модель расчетной области с граничными условиями (б):

1 — вход продукта; 2 — вход реагента; 3 — камера смешения; 4 — сопло; 5 — дефлектор; 6 — стенка с проскальзыванием (остальные поверхности — стенки с прилипанием); 7 — свободный выход

позволило разработать эффективный аппарат с оптимальным режимом абсорбции и значительно снизить энергозатраты на проведение технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 182 с.
2. Гуревич И.Л. Технология переработки нефти и газа. В 2 ч. Ч. 1. Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа. М.: Химия, 2004. 360 с.
3. Хафизов Ф.Ш., Афанасенко В.Г., Хафизов Н.Ф. Кавитирование жидкой фазы как способ интенсификации массообменных процессов // Естественные и технические науки. 2007. № 4. С. 267–268.

4. Пат. 2176929 РФ. Газожидкостной реактор / Ф.Ш. Хафизов, Н.Ф. Хафизов, В.С. Андреев, В.А. Зязин, Ю.Г. Морозкин, И.Ф. Хафизов. Заявитель и патентообладатель Ф.Ш. Хафизов. № 2000123700/12; заявл. 14.09.2000; опубл. 20.12.2001. Бюл. № 35. 2 с.
5. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч. 1. Гидро-механические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 400 с.
6. Гонор А.Л., Рывкин В.Я. Динамика капли // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. Т. 17. М.: ВИНТИ, 1982. С. 86–159.
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
8. Хафизов Ф.Ш., Афанасенко В.Г., Хафизов И.Ф., Хайбрахманов А.Ш. Использование кавитационно-вихревых эффектов в процессе абсорбционной очистки технологических газов от сероводорода // Нефтепереработка и нефтехимия. 2007. № 11. С. 49–53.
9. Хафизов Ф.Ш., Хафизов Н.Ф., Ванчухин Н.П. Процессы нефтепереработки в кавитационно-вихревых аппаратах. Уфа: УГНТУ, 1999. 110 с.
10. Хафизов И.Ф., Закиров Н.Н., Доронин Д.Б., Мухин И.А. Применение кавитационно-вихревого эффекта в аппарате абсорбции сернистых соединений из нефти // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 4. С. 67–69.
11. Пат. 70153 РФ. Кавитационно-вихревой абсорбер / Ф.Ш. Хафизов, А.Ш. Хайбрахманов, В.Г. Афанасенко, М.А. Аликин, И.Ф. Хафизов. Заявитель и патентообладатель УГНТУ. № 2007136840/22; заявл. 04.10.2007; опубл. 20.01.2008. Бюл. № 2. 1 с.
12. Хафизов И.Ф., Абдуллин Н.А., Дегтерев Н.С. Совершенствование конструкции ультразвукового газогидродинамического смесителя // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. № 1 (79). С. 55–69.
13. Абдуллин Н.А., Хафизов И.Ф. Изучение влияния волновых воздействий и поверхностно-активных веществ на параметры газожидкостной эмульсии // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7. № 2. С. 130–133.
14. Хафизов И.Ф., Доронин Д.Б. Кавитация как интенсификатор в процессах массообмена // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. № 2. С. 106–110.
15. Хафизов И.Ф., Мухин И.А., Доронин Д.Б. Имитационное моделирование смесителя с целью изучения волновых процессов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 4. С. 457–465. URL: http://ogbus.ru/authors/KhafizovIF/KhafizovIF_1.pdf
16. Мухин И.А., Хафизов И.Ф. Имитационное моделирование смесителя горизонтального абсорбера с целью изучения волновых процессов // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 2. С. 75–78.

Хафизов Фаниль Шамильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная и промышленная безопасность» механического факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета (Российская Федерация, Республика Башкортостан, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1).

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Суцев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5), генеральный директор ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций» (ООО «ЦИЭКС») (Российская Федерация, 127015, Москва, ул. Вятская, д. 35, стр. 4).

Абуталипова Елена Мидхатовна — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» механического факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета (Российская Федерация, Республика Башкортостан, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1).

Хафизов Ильдар Фанилевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» механического факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета (Российская Федерация, Республика Башкортостан, 450062, Уфа, ул. Космонавтов д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хафизов Ф.Ш., Александров А.А., Суцев С.П., Абуталипова Е.М., Хафизов И.Ф. Моделирование и метод расчета кавитационно-вихревого аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 1. С. 78–91.

DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-78-91

**SIMULATION AND CALCULATION METHOD OF THE VORTEX
CAVITATION DEVICE**

F.Sh. Khafizov¹

A.A. Aleksandrov²

S.P. Sushchev^{2,3}

E.M. Abutalipova¹

I.E. Khafizov¹

pkpb@mail.ru

rector@bmstu.ru

esrc@esrc.ru

elenaabutalipova.ea@gmail.com

ildar.hafizov@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³ Extreme Situations Research Center, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study centers on development of the new design technology of warm-and-mass-transfer devices on the basis of cavitation and vortex effect. Within the research we investigated and studied the flow pattern in the device. The study shows that creation of several modes of moving streams, increase in their speed and turbulence make it possible not only to create the optimum absorption mode with essential simplification of the device design but also to considerably reduce energy consumption for implementing the technological processes. The study proved that to create the efficient cavitation mode, the energy of the processed liquid flow is enough. Findings of the research prove the applicability of vortex cavitation devices for preparation of oil, gas and its products for transportation. Finally, we provide technical solutions as to how the functionality of vortex cavitation devices could be improved to increase the effectiveness of oil and gas refining processes

Keywords

Cavitation, material dispersion, vortex formation, Reynolds number, associated petroleum gas, absorber, nozzle

REFERENCES

- [1] Merkulov A.P. Vikhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike [The vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1969. 182 p.
- [2] Gurevich I.L. Tekhnologiya pererabotki nefi i gaza. V 2 ch. Ch. 1. Obshchie svoystva i pervichnye metody pererabotki nefi i gaza [Technology of oil and gas processing. In 2 parts. Part 1. General properties and methods of primary oil and gas processing]. Moscow, Khimiya Publ., 2004. 360 p.
- [3] Khafizov F.Sh., Afanasenko V.G., Khafizov N.F. Liquid phase cavitating as a way to intensify the mass transfer processes. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki* [Natural & Technical Sciences], 2007, no. 4, pp. 267–268 (in Russ.).
- [4] Khafizov F.Sh., Khafizov N.F., Andreev V.S., Zyazin V.A., Moroshkin Yu.G., Khafizov I.F. Gazozhidkostnoy reactor [The gas-liquid reactor]. Patent 2176929 RF. Inventor's Certificate 2000123700/12, 2001.
- [5] Dytner'skiy Yu.I. Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. V 2 ch. Ch. 1. Gidromekhanicheskie i teplovye protsessy i apparaty [Processes and apparatus of chemical technology. In 2 Parts. Part 1. Hydromechanical and thermal processes and apparatus]. Moscow, Khimiya Publ., 1995. 400 p.
- [6] Gonor A.L., Ryykind V.Ya. Dinamika kapli. Itogi nauki i tekhniki. Mekhanika zhidkosti i gaza. T. 17 [Dynamics of a drop. The results of science and technology. Fluid mechanics. Vol. 17]. Moscow, VINITI Publ., 1982, pp. 86–159.
- [7] Kasatkin A.G. Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [Basic processes and apparatus of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 752 p.
- [8] Khafizov F.Sh., Afanasenko V.G., Khafizov I.F., Khaybrakhmanov A.Sh. Use of cavitation-vortical effects during the absorptive clearing of technological gases from carbon sulphide. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Refining and Petrochemicals], 2007, no. 11, pp. 49–53 (in Russ.).
- [9] Khafizov F.Sh., Khafizov N.F., Vanchukhin N.P. Protsessy neftepererabotki v kavitatsionno-vikhrevykh apparatakh [Refining processes in cavitation-vortex apparatus]. Ufa, UGNTU Publ., 1999. 110 p.
- [10] Khafizov I.F., Zakirov N.N., Doronin D.B., Mukhin I.A. Use of cavity-vortex effect in the apparatus for absorption of sulfides from crude oil. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz* [Higher Educational Institutions News. Oil and Gas], 2012, no. 4, pp. 67–69 (in Russ.).
- [11] Khafizov F.Sh., Khaybrakhmanov A.Sh., Afanasenko V.G., Alikin M.A., Khafizov I.F. Kavitatsionno-vikhrevoy absorber [Cavitation-vortex absorber]. Patent 70153 RF. Inventor's Certificate 2007136840/22, 2008.
- [12] Khafizov I.F., Abdullin N.A., Degterev N.S. Design improvement of ultrasonic gas-hydrodynamic mixer. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov* [Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products], 2010, no. 1 (79), pp. 55–69 (in Russ.).
- [13] Abdullin N.A., Khafizov I.F. Studying of influence of wave influences and superficially active substances on parameters aerated emulsion. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2009, vol. 7, no. 2, pp. 130–133 (in Russ.).

[14] Khafizov I.F., Doronin D.B. Cavitation as intensifier in mass transfer processes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz* [Higher Educational Institutions News. Oil and Gas], 2014, no. 2, pp. 106–110 (in Russ.).

[15] Khafizov I.F., Mukhin I.A., Doronin D.B. Simulation of mixer for study of wave processes. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2012, no. 4, pp. 457–465. Available at: http://ogbus.ru/authors/KhafizovIF/KhafizovIF_1.pdf

[16] Mukhin I.A., Khafizov I.F. Evaluating impact load for cement stone specifications. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2012, vol. 10, no. 2, pp. 75–78 (in Russ.).

Khafizov F.Sh. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Fire and Industrial Safety Department, Mechanical Faculty, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov ul. 1, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062 Russian Federation).

Aleksandrov A.A. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of Bauman Moscow State Technical University, Head of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sushchev S.P. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation), Director of Extreme Situations Research Center (ESRC) (Vyatskaya ul. 35, stroenie 4, Moscow, 127015 Russian Federation).

Abutalipova E.M. — Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Professor Processing Machinery and Equipment Department, Mechanical Faculty, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov ul. 1, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062 Russian Federation).

Khafizov I.F. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Fire and Industrial Safety Department, Mechanical Faculty, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov ul. 1, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450062 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Khafizov F.Sh., Aleksandrov A.A., Sushchev S.P., Abutalipova E.M., Khafizov I.F. Simulation and Calculation Method of the Vortex Cavitation Device. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 1, pp. 78–91. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-78-91