

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ СКВАЖИН ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ  
ПУЛЬСАТОРАМИ**

**М. Д. Иоффе**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель А. И. Столяров

Общеизвестной является негативная сторона кавитации, представляющей собой процесс разрыва сплошности жидкой среды и последующего схлопывания полостей

разрыва. Однако существуют примеры ее направленного применения: в нефтегазовой отрасли, например, для декольматации призабойной зоны пласта (ПЗП) с созданием в ней сети микротрещин. Это способствует повышению производительности скважины и может достигаться генерацией в ней акустических и ударных волн, обусловленных кавитацией. В этих целях применяются специальные гидродинамические излучатели, спускаемые в скважину на лифтовой колонне и подключаемые к насосному агрегату. Положительным аспектом применения пульсаторов является их ударно-волновое воздействие и на застойные зоны пласта. Причем такое воздействие, передаваемое газожидкостной смесью, способно распространяться на значительные расстояния [1].

Существует большое разнообразие излучателей, однако в данной работе были рассмотрены вихревые, как наиболее неприхотливые и не содержащие подвижных механических узлов, подверженных наибольшему износу в условиях агрессивной и загрязненной среды.

Принцип работы вихревых излучателей базируется на создании вращающихся потоков жидкости посредством ее подачи в камеру завихрения через тангенциально расположенные отверстия, в результате чего образуются два вихря: первичный кольцевой формы по периферии камеры и вторичный в приосевой области, формирующийся вследствие вовлечения в движение первичным потоком фазы из окружающей среды. Если последняя имеет ту же физическую природу, что и рабочая жидкость, то вторичный поток отклоняется от оси вихревой камеры и начинает совершать регулярное прецессионное движение вокруг нее, деформируя с определенной периодичностью первичный поток, что и является причиной пульсаций давления, которые фиксируются в окружающей среде как звуковые колебания. В обратном случае такого рода пульсации не происходят. Частота и амплитуда пульсаций, а следовательно, и мощность излучения зависят от скорости истечения и геометрических параметров камеры завихрения, ее конструкции и формы выходного канала [2], [3].

Целью работы являлось теоретическое установление возможности возникновения пульсаций, в первую очередь кавитационных скважинных условиях при помощи спроектированного вихревого излучателя, определение параметров этого процесса и уточнение на их основе его конструктивных размеров и технологических режимов.

В разработанной конструкции излучателя повышение скорости потока в камере завихрения 5, куда жидкость поступает через муфту 1 по тангенциальным отверстиям 3, достигается за счет конфузора 6 с углом раскрытия 6–7° (рис. 1). Для предупреждения преждевременного разрушения вихревой камеры от действия гидроакустических волн и колебаний давления предусмотрен шпиль-отражатель 4, который крепится к головке камеры 2. За конфузурой следует съемная гидродинамическая насадка 7 в виде диффузора. При такой конструкции излучателя в камере завихрения происходит закручивание потока и значительное увеличение его скорости на выходе из излучателя.

Исходными данными для решения поставленной задачи являлись: конструкция нагнетательной скважины, условный диаметр лифтовой колонны и расход закачиваемой жидкости. Варьировали: угол раскрытия диффузора от 7 до 45°; противодавление от 100 до 500 кПа. Решение производилось методом конечных объемов. Расчет проводился на сеточной модели, содержащей более 2 млн элементов.

Для описания структуры турбулентного движения жидкой среды в скважине использовали концепцию коэффициента турбулентной вязкости и осредненные уравнения неразрывности и Навье–Стокса. Для расчета многофазного течения использовали модель Эйлера и математическую модель динамики сферической кавер-

ны Релея–Плессета с учетом вязкости, сил поверхностного натяжения, влияния газа в каверне, близости границ твердой стенки и давления соседних пузырьков.

В ходе решения было установлено, что при противодавлении 100 кПа с ростом угла раскрытия диффузора объемная доля газа в жидкости и зона изменения насыщенности возрастают до определенного значения, а затем происходит их уменьшение. Максимальное значение газонасыщенности в 97,0 % достигается при угле раскрытия диффузора в  $30^\circ$  (рис. 2, в), а максимальное значение зоны изменения насыщенности при угле в  $15^\circ$  (рис. 2, б). При этом значения газонасыщенности в расчетном диапазоне углов изменяются незначительно по сравнению с зоной изменения насыщенности, которая для угла в  $45^\circ$  практически отсутствует (рис. 2, г): схлопывание пузырей происходит в самом генераторе.

Также было выявлено, что с ростом противодавления при остальных неизменных параметрах степень метастабильности струи увеличивается, а зона изменения насыщенности уменьшается и наиболее стабильна при угле раскрытия диффузора в  $7^\circ$ . Это позволяет сделать вывод, что для глубоких скважин с высокими забойными давлениями вероятность возникновения кавитации уменьшается. Однако кавитация – это не единственная причина пульсаций: в генераторе такой конструкции будут возникать звуковые колебания килгерцового диапазона, эффективные для обработки призабойного пласта. А низкочастотные составляющие естественных колебаний давления в потоке нагнетаемой в пласт жидкости, эффективные для обработки протяженной зоны пласта, могут быть усилены при помощи резонатора.

Работа проводилась при финансовой поддержке ПО «РУП «Белоруснефть». В рамках этого сотрудничества также предполагается создание опытного образца и его испытание в стендовых и промысловых условиях, что позволит верифицировать используемый в работе метод расчета и оценить адекватность модели.

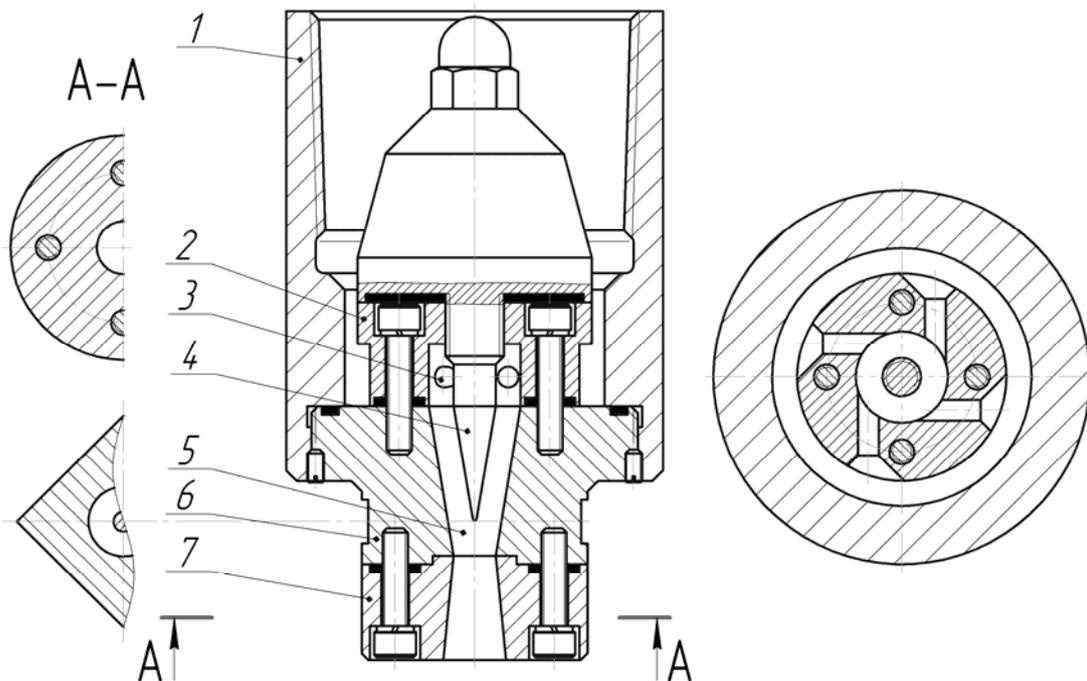


Рис. 1. Принципиальная схема гидродинамического пульсатора-кавитатора

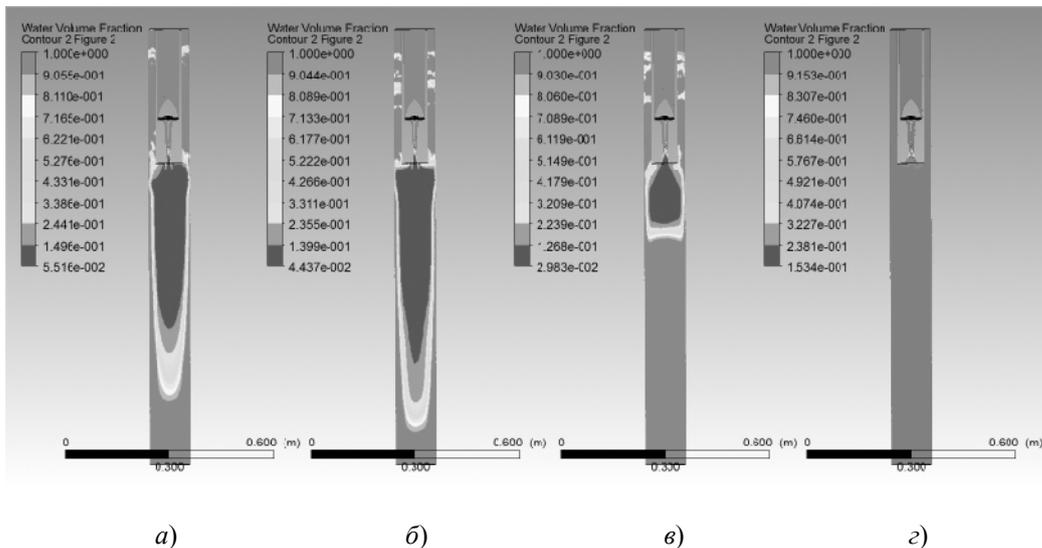


Рис. 2. Распределение коэффициента метастабильности потока в зависимости от координаты при противодавлении 100 кПа и расходе 6 л/с для различных углов раскрытия диффузора: 7° (а), 15° (б), 30° (в) и 45° (г)

### Литература

1. Иванников, В. И. Кавитация и перспективы ее использования в нефтегазовой отрасли / В. И. Иванников, И. В. Иванников // Стр-во нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 3. – С. 14–19.
2. Неволин, В. Г. Опыт применения звукового воздействия в практике нефтедобычи Пермского края / В. Г. Неволин. – Пермь, 2008. – 54 с.
3. Яремийчук, Р. С. Использование кавитационно-пульсационной технологии для уменьшения энергозатрат при бурении скважин / Р. С. Яремийчук, В. Р. Возный, Я. М. Фемяк // Нефтяное хоз-во. – 2011. – № 10. – С. 91–93.