

УДК 532.528

Мизгирев Дмитрий Сергеевич¹, доцент, д.т.н., профессор кафедры ПТМ и МР,
e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Власов Дмитрий Владимирович¹, студент электромеханического факультета
e-mail: dv_vlasov@vk.com

Власов Владимир Николаевич¹, ст. преподаватель кафедр ПТМ и МР, ЭСЭУ, физики
e-mail: vn_vlasov@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ В СТРУЙНЫХ АППАРАТАХ

Аннотация. В статье рассматривается аналитическое выражение, отражающее поведение основного потока несжимаемой жидкости в струйном аппарате с учетом протекания в нем гидродинамической кавитации и рассматриваются задачи экспериментальных исследований с целью оптимизации конструкции аппарата с учетом уже разработанных проектов.

Ключевые слова: кавитация, струйный аппарат, эжекция, кавитатор, эжектор, кавитационная каверна, давление рабочей среды, геометрические параметры струйного аппарата.

В общем случае под понятием кавитации подразумевается процесс образования в потоке жидкости полостей, заполненных паром (каверн или же кавитационных пузырьков) и последующего их схлопывания, которое сопровождается шумом и гидравлическими ударами [1].

Описание кавитации, как нестационарного процесса, является одной из актуальных проблем гидродинамики, так как данное явление значительно снижает эффективность машин, приводит к эрозионному разрушению рабочих поверхностей гребных винтов, рабочих колес насосов, турбин и подобного оборудования, работающего в высокоскоростных потоках жидкости [2].

Однако, несмотря на вышеперечисленные отрицательные стороны данного явления, процесс кавитации находит широкое полезное применение во многих сферах промышленности. Кавитация интенсифицирует физико-химические процессы, что, в частности, используется для обеззараживания бактериологически загрязненных вод. Вследствие подобных взрывам ударным воздействиям, возникающим при схлопывании пузырьков, сопровождаемым скачками температуры в множестве точек объема обрабатываемой среды, активнее протекают физические и химические процессы, происходит разрушение органических и неорганических соединений, клеточных мембран микроорганизмов и даже уничтожение вирусов.

Реализация вышеперечисленных процессов происходит в специально созданных для этих целей аппаратах – кавитаторах. Общий вид конструкции подобного устройства с его основными параметрами представлен на Рисунке 1.

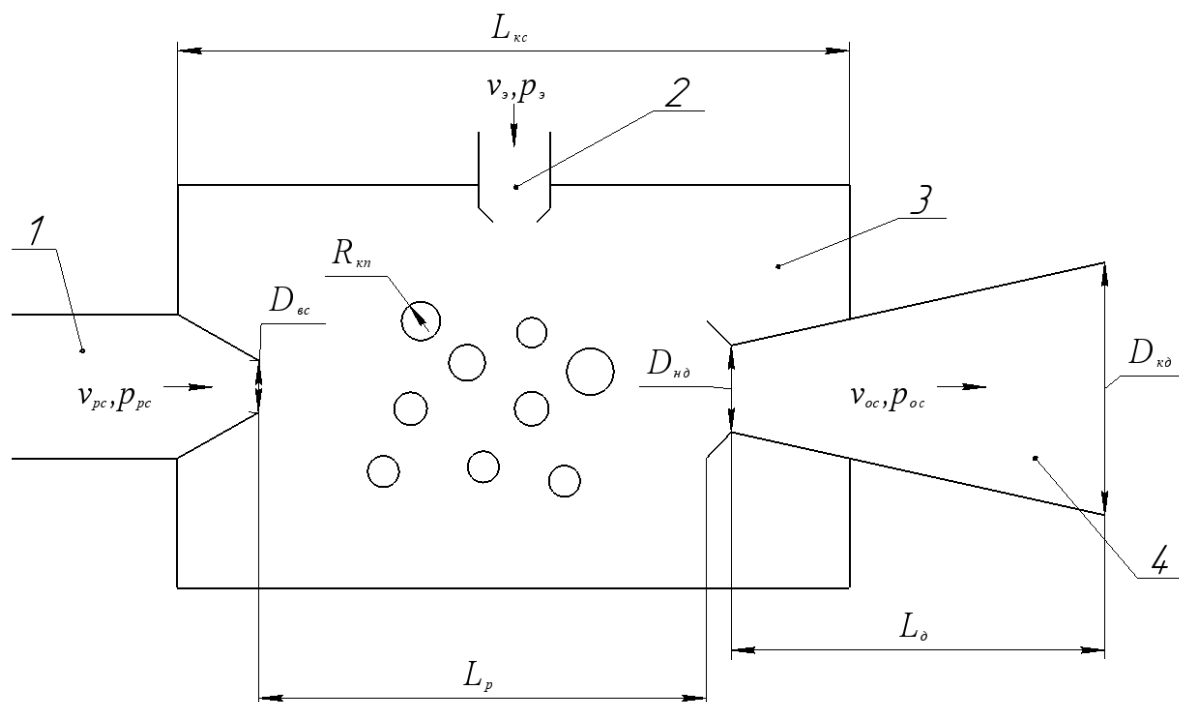


Рисунок 1 – Общий вид гидродинамического кавитатора и его основные параметры:
 1 – входное сопло; 2 – патрубок эжектируемого потока; 3 – камера смешения;
 4 – диффузор; $v_{рс}, p_{рс}$ – скорость и давление рабочей среды; $D_{вс}$ – диаметр входного сопла; $R_{кп}$ – радиус кавитационного пузырька; $L_{кc}$ – длина камеры смешения; $v_{э}, p_{э}$ – скорость и давление рабочей среды; L_p – расстояние между входным соплом и выходным диффузором; $D_{нд}, D_{кд}$ – начальный и конечный диаметры диффузора; $v_{ос}, p_{ос}$ – скорость и давление обработанной среды.

Для описания процессов, происходящих в кавитаторах, справедлива теория струйного аппарата, а также методика проектирования наиболее распространенных представителей струйных насосов – эжекторов, так как эжектор исходя из своей конструкции уже является источником для возникновения процесса гидродинамической кавитации. Применение кавитаторов на основе струйных аппаратов позволит обеспечить нужную интенсивность происходящих процессов в жидкости, что обусловлено осуществлением профильной, т.е. возникновения на обтекаемой поверхности кавитационных каверн, и срывной, подразумевающей собой образование вихрей за плохообтекаемыми элементами, гидродинамической кавитации с эжекцией жидкости или газа. Однако здесь скрыты определенные проблемы, поскольку все существующие на сегодня методики исследования эжекторов позволяют обеспечить их устойчивую работу лишь при невысоких давлениях сжатия (до 200 кПа) [3, 4, 5].

В струйном аппарате генерация кавитационных каверн и их схлопывание протекают в его рабочей камере. Необходимо отметить, что условия работы струйного аппарата (кавитатора) довольно жесткие вследствие резкого перепада давлений до (давления рабочей среды перед аппаратом p_p) и после него (давления сжатия $p_{сж}$). Также

необходимо обеспечение работоспособности кавитатора в качестве струйного насоса (эжектора) и смесителя. Кроме того, энергия потока воды после генератора кавитации должна тратиться не только на преодоление гидродинамического, но и гидростатического сопротивления, создаваемого оборудованием и трубопроводами системы после него.

Основным параметром, характеризующим работоспособность эжектора в составе системы, является давление эжектируемого потока газа ($p_э$). При достижении величины $p_э$ уровня атмосферного давления происходит «срыв» эжекции и возникновение кавитации.

Для ее усиления необходимо изменение классической конструкции аппарата – добавление в эжектор ступенчатого диффузора позволит обеспечить условия для возникновения вторичной кавитации. Предварительные исследования показывают, что данная конструкция позволяет решить задачу получения колебаний давления потока с частотами, распределенными в широкой полосе при минимальных затратах энергии [4].

Другой вариант достижения образования вторичной кавитации предполагает создание кавитатора с тороидальной камерой смешения. Вторичная кавитация в подобных аппаратах образуется при взаимодействии потока рабочей среды с эжектируемым потоком газа в условиях пониженного давления и большой скорости движения [6].

При проектировании подобных аппаратов для достижения нужного эффекта необходимо создание условий возникновения кавитации с нужной интенсивностью. Интенсивность кавитации в струйном аппарате, в общем случае, будет определяться следующими параметрами [3]:

1. Гидростатическим давлением в жидкости, развиваемым на данном участке гидросистемы;
2. Скоростью потока, определяемой проходным сечением обозначенного участка;
3. Размерами рабочей камеры аппарата;
4. Начальным радиусом пузырька, определяющим количество выделяемой им при схлопывании энергии;
5. Давлением насыщенных паров и реологическими характеристиками жидкости, в которой протекает описываемый гидродинамический процесс.

Из вышеперечисленных параметров, наименее управляемыми при проектировании реальных струйных аппаратов являются 4 и 5. В свою очередь, для параметров 1-3 вполне реально установление математической взаимосвязи. Так в работе [3] была получена аналитическая формула (1) для вычисления давления рабочей среды перед струйным аппаратом (гидродинамическим кавитатором):

$$p_p = 10^{-3} \cdot \frac{\left(1,09 \sqrt{\frac{\sigma^3}{p_n R^3 \sqrt{2-1+2\sigma}}} + p_n\right) \left(1,39 - \left(\frac{Q_э}{Q_ж} + 1\right)^{-2}\right) - 39,4}{1 - \left(\frac{Q_э}{Q_ж} + 1\right)^{-2}}, \quad (1)$$

где p_p – давление рабочей среды перед эжектором, Па;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

R – мгновенный радиус захлопывающейся сферы, м.

p_n – начальное давление, Па;

$Q_э$ – объемная скорость (расход) эжектируемой среды (жидкости или газа), м³/с;

$Q_ж$ – объемная скорость (расход) рабочей среды (воды), м³/с;

Данное выражение позволяет определить давление перед струйным аппаратом в зависимости от режимных, реологических и энергетических характеристик процесса, но нуждается в подтверждении реальными экспериментальными исследованиями в условиях лаборатории.

Следует отметить, что значение начального радиуса пузырька, неразрывно связанное с конечным радиусом схлопывания, будет определять в конечном итоге количество выделяемой им при схлопывании энергии, что в значительной степени определяет эффективность кавитации, и будет варьироваться в зависимости от задачи обработки жидкости в струйном аппарате, но данное значение весьма проблематично определить при прямом экспериментальном исследовании, вследствие чего остаются только косвенные методы либо применение компьютерного моделирования протекающего процесса. Последнее, разумеется, предпочтительней, но сложнее в реализации.

Авторами работы [4] отмечено, что соотношение расходов эжектируемой и рабочей сред должно составлять $Q_r/Q_{ж} = 0,1$. Для достижения данного соотношения необходимо обеспечить определенные давления рабочей и эжектируемой сред, которые, в свою очередь, будут зависеть и от геометрических размеров камеры смешения.

В свою очередь для регулирования давления рабочей среды предлагается размещать на входе кавитатора небольшой струенаправляющий элемент, способствующий снижению давления всасывания [4].

Таким образом, давление рабочей среды может быть рассчитано исходя из известных величин и коэффициентов только после экспериментального определения параметров кавитационного пузырька. Кроме того, необходимо выполнить поиск оптимальных режимов работы кавитатора в зависимости от свойств обрабатываемых сред с учетом геометрических параметров аппарата.

Список литературы:

1. Наприенко А. А. Кавитация // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Молодежь и наука». – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. – 4 с.
2. Пирсол И. Кавитация / И. Пирсол; пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. – Москва: МИР, 1975. – 98 с.
3. Mizgirev D., Vlasov D., Vlasov V. Mathematical description of the cavitation process in the jet apparatus // Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 052054, DOI:10.1088/1742-6596/2131/5/052054
4. Мизгирев Д. С., Курников А. С., Михеева Т. А. Проектирование эжектора-кавитатора как одного из элементов судовых систем. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2016. – С. 68-76
5. Миличенко С. Л. Ремонт кавитационных разрушений гидротурбин. - Москва: Энергия, 1971. - 105 с.
6. Курников А. С., Мизгирев Д. С., Черепкова Е. А. Расчет гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой смешения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2015. №4(32)

PROBLEMS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CAVITATION PROCESS IN JET APPARATURES

Dmitry S. Mizgirev, Dmitry V. Vlasov, Vladimir N. Vlasov

Abstract. The article considers an analytical expression reflecting the behavior of the main incompressible fluid flow in a jet apparatus, taking into account the flow of hydrodynamic cavitation in it, and considers the tasks of experimental research in order to optimize the design of the apparatus, taking into account already developed projects.

Keywords: cavitation, jet apparatus, ejection, cavitator, ejector, cavitation cavity, working medium pressure, geometric parameters of the jet apparatus.