

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КАВИТАТОРА С ТОРОИДАЛЬНОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

THE CALCULATION OF HYDRODYNAMIC CAVITATOR WITH TOROIDAL MIXING CHAMBER

Одним из прогрессивных и эффективных процессов очистки жидкостей в последнее время является кавитация, которую можно получить искусственно в специальных аппаратах-кавитаторах. В статье предложена конструкция гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой, как наиболее компактная и энергосберегающая. Указаны методы оценки эффективности кавитации: визуальный, акустический, фотоэлектрический, гидродинамический, химический, механический, технологический и радиоактивный. Проведен анализ существующих методов, который показал, что наиболее простым и в то же время достаточно точным является акустический. Выполнена оптимизация конструкции кавитатора по пяти факторам, к которым относятся: Ψ — эксцентриситет входного сопла, мм; L — расстояние между соплом и диффузором, мм; F_2/F_1 — отношение площадей выходного отверстия к входному камеры смешения; Δp — перепад давлений, кПа; T — температура воды, °С. В результате экспериментальных исследований на специально разработанном стенде была получена математическая модель работы кавитаторов производительностью 1–13 м³/ч. Обработаны результаты методом корреляционно регрессионного анализа. На основании математической модели были определены оптимальные характеристики кавитаторов.

One of the most progressive and effective processes for purifying liquids in recent times is cavitation, which can be obtained artificially in special apparatus-the cavitator. The paper proposed a design of hydrodynamic cavitator with toroidal chamber, as the most compact and energy saving. Specified methods of evaluating the effectiveness of cavitation: visual, acoustic, photo-electric, hydrodynamic, chemical, mechanical, technological and radioactive. The analysis of existing methods, which showed that the most simple and at the same time is sufficiently accurate acoustic. Performed design optimization of a cavitator on 5 factors, which include: Ψ is the eccentricity of the inlet nozzle, mm; L is the distance between the nozzle and the diffuser, mm; F_2/F_1 is the ratio of the area of the outlet to the inlet of the mixing chamber; Δp is the pressure drop, kPa; T is the water temperature, °C. As a result of experimental studies on a specially designed stand was obtained mathematical model of the cavitator performance (1–13) m³/h. The processed results using correlation and regression analysis. On the basis of the mathematical model were determined the optimum characteristics of the cavitator.

Ключевые слова: кавитатор, тороидальная камера смешения, плавательный бассейн.

Key words: cavitator, a toroidal mixing chamber, swimming pool.



Для изучения процессов, происходящих в гидродинамическом кавитаторе при изменении его конструкции и параметров рабочих сред, необходимо выполнить предварительный расчет по определению размеров кавитатора с учетом соблюдения условий возникновения кавитации [1] – [5]. Согласно [5], гидродинамические устройства с тороидальной камерой смешения способны создавать кавитацию и стабильно функционировать в кавитационном режиме при низких значениях числа кавитации γ . При этом при схлопывании сферического пузырька в жидкости достигается максимальное давление 1,0 МПа и температура в каверне – до 4 000 °С. В соответствии с работой А. А. Рязанцева и Н. Б. Васильевой [4] рассмотрим схему гидродинамического кавитатора применительно к системе очистки воды плавательных бассейнов (СОВБ) —

рис. 1. Рабочий поток жидкости, проходя входное сопло 1, поступает в камеру смешения 2. При этом часть его поступает в тороидальную камеру, а вторая – проходит напрямую к входному отверстию диффузора 5. В зоне, образованной стенкой внутреннего кольца 4 и тороидальной камерой, формируется область пониженного давления, которая обеспечивает подачу воздуха (газа) в камеру смешения через патрубок 3 и протекание вторичной искусственной кавитации.

Смещение входного сопла на величину Ψ , мм, обеспечивает поступление первой части потока внутрь камеры, что позволяет повысить время контакта транзитной струи с водоворотными областями, увеличивая при этом силу трения, закручивающую жидкость в полости кавитатора. Вследствие этого происходит снижение числа кавитации с образованием вихревого движения жидкости вдоль стенки камеры смешения и сужение потока за счет конструкции кольца, позволяющей создавать вакуум. При соударении набегающего рабочего потока с потоком газа в условиях пониженного давления и большой скорости движения происходит образование вторичной кавитации.

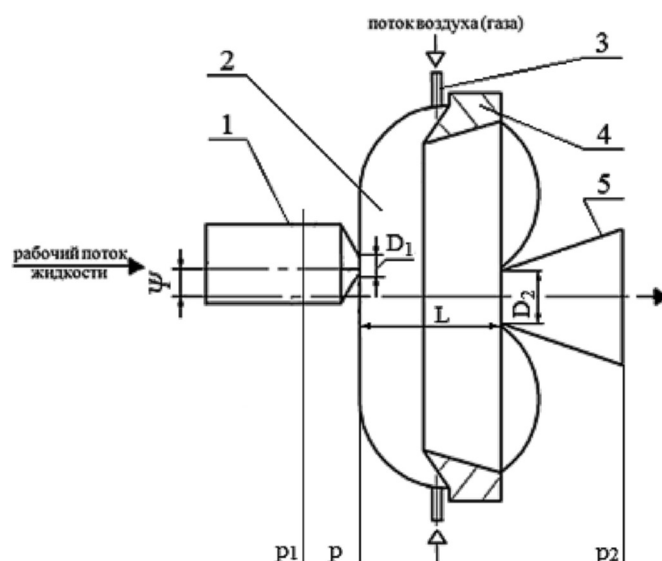


Рис. 1. Схема гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой:
1 — входное сопло; 2 — камера смешения; 3 — патрубок подсоса воздуха (газа);
4 — внутреннее кольцо; 5 — диффузор

Расчет любого узла судовой системы начинается с определения размеров одного из основных элементов, например, с вычисления диаметра входного отверстия D_1 , от которого зависит производительность кавитатора.

Определим площадь входного отверстия F_1 , м, из уравнения производительности устройства, м²:

$$F_1 = \frac{Q}{\mu \sqrt{2gH}}, \quad (1)$$

где Q — производительности устройства, м³/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; μ — коэффициент расхода. Принимаем $\mu = 0,65$ [6]; H — напор перед кавитатором. С учетом работы кавитатора в судовых условиях принимаем $H = 60$ м.

В работах [2] – [5] при исследовании процесса возникновения кавитации получен диапазон скорости течения воды v , который находится в пределах 16 ... 24 м/с. В связи с этим необходимо осуществить проверку скоростного режима кавитатора:

$$v = \frac{Q}{F_1} = 16 \dots 24 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Однако для развития и поддержания процесса кавитации необходимо также обеспечить соблюдение условия превышения скорости на выходе из устройства над скоростью входа в него.

Согласно исследованиям Т. Н. Витенько и Я. М. Гумницкого [7] установлено, что кавитационный режим сопровождается разрушением сплошности среды, а, следовательно, уменьшением плотности потока. Поэтому, в первом приближении, принимаем значение плотности выходящего потока, равное 500 кг/м^3 , т.е. в два раза ниже плотности входящего (1000 кг/м^3). В связи с этим происходит увеличение расхода через выходное отверстие на то же значение.

Площадь выходного отверстия вычисляется относительно рекомендованного отношения площади сечений выходного и входного отверстий: $F_2/F_1 = 3$ [4].

Анализируя данные по площадям и объемам бассейнов на круизных пассажирских судах и в соответствии с требованиями СанПиН 2.1.2.1188-03 [9] к обязательной кратности водообмена в ванне [8], [9], производительность СОВБ для круизных пассажирских судов составляет $1 \dots 13 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для стендовых испытаний принимаем минимальное и максимальное значения производительности, в результате чего будет выявлено возможное отсутствие «масштабного» эффекта. Независимо от производительности параметры оптимизации выбираем по одному из методов оценки эффективности кавитации, указанных в табл. 1 [3], [5].

Анализ существующих методов показывает, что наиболее простым и в то же время достаточно точным методом определения эффективности кавитации является акустический, а именно, давление в камере смещения $p(y)$.

Для расчета экспериментального образца кавитатора необходимо уточнить внешние параметры работы устройства, к которым относятся:

- давление перед кавитатором p_1 , кПа — $450 \dots 600$;
- давление после кавитатора p_2 , кПа — 150 ;
- температура рабочей среды T , °С — $4 \dots 30$.

В соответствии с принятыми предположениями и внешними условиями выполним расчет экспериментальных образцов кавитаторов производительностью $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $13 \text{ м}^3/\text{ч}$ по формулам (1), (2):

- для $1 \text{ м}^3/\text{ч}$: $D'_1 = 4,0 \text{ мм}$, $F'_1 = 1,24710^{-5} \text{ м}$, $v'_1 = 22,2 \text{ м/с}$;
- для $13 \text{ м}^3/\text{ч}$: $D''_1 = 14,37 \text{ мм}$, $F''_1 = 16,20610^{-5} \text{ м}$, $v''_1 = 22,3 \text{ м/с}$.

Для изготовления кавитатора производительностью $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ принимаем диаметр входного отверстия $D_1 = 4,0 \text{ мм}$. Исходя из значения соотношения площадей $F_2/F_1 = 3$, выбираем $D_2 = 7,0 \text{ мм}$. По аналогии выбираем значение диаметров устройства производительностью $13 \text{ м}^3/\text{ч}$: $D_1 = 14,0 \text{ мм}$ и $D_2 = 42,0 \text{ мм}$. Остальные размеры кавитаторов выражаются через соотношения между ними или конструктивно.

Согласно принятым округлениям диаметров входного отверстия кавитаторов, произведем уточнение скоростного режима по формуле (2): $v'_1 = 22,2 \text{ м/с}$, $v''_1 = 23,5 \text{ м/с}$. Все факторы, от сочетания которых зависит давление в камере смещения $p(y)$, делятся на две группы. К первой группе относятся конструктивные факторы, такие как эксцентриситет входного сопла Ψ , расстояние между соплом и диффузором L и отношение площадей выходного отверстия к входному отверстию камеры смещения F_2/F_1 , а во вторую группу входят внешние условия протекания следующих процессов: перепад давления на кавитаторе Δp и температура среды T [1], [3], [7], [10]. Таким образом, оптимизация конструкции кавитатора производится по пяти факторам, к которым относятся (см. рис. 1): Ψ — эксцентриситет входного сопла, мм; L — расстояние между соплом и диффузором, мм; F_2/F_1 — отношение площадей выходного отверстия к входному камеры смещения; Δp — перепад давлений; $\Delta p = p_1 - p_2$, кПа; T — температура воды, °С.

Значения возможного варьирования указанных факторов приняты на основании работы А. А. Рязанцева, Н. Б. Васильевой [4] и с учетом конструкции входящих в кавитатор элементов (табл. 2), откуда видно, что для всех факторов интервалы возможного изменения невелики, поэтому можно предположить, что в области их определения зависимость величины $p(y)$ от факторов не будет противоречить линейным законам, а также распределению этой величины нормальному закону. Следовательно, функцию $p(y)$ можно приблизительно представить в виде ряда Тейлора:

$$p(y) = p_0 + a_1(\Psi - \Psi_0) + a_2(L - L_0) + a_3(F_2/F_1 - (F_2/F_1)_0) + a_4(\Delta p - \Delta p_0) + a_5(T - T_0) + a_1 a_2(\Psi - \Psi_0)(L - L_0) + a_1 a_3(\Psi - \Psi_0)(F_2/F_1 - (F_2/F_1)_0) + \dots \quad (3)$$

Таблица 1

Методы оценки эффективности кавитации

№ п/п	Наименование	Описание	Преимущества	Недостатки
<i>Прямые</i>				
1	Визуальные	Фото-, кино- и видеосъемка кавитационных образований	Визуальное фиксирование процесса	Трудоемкость, требует специализированное оборудование, высокая стоимость
2	Акустические	Измерение давления в камере смещения (всасывающая способность), ультразвуковая, замер шума	Легко поддается автоматизации, затраты ручного труда минимальны, возможность обработки больших объемов воды	Требует специализированное оборудование, более высокая энергоемкость
<i>Косвенные</i>				
3	Фотоэлектрические	Регистрация сонолюминесценции при кавитации	Визуальное фиксирование процесса	Трудоемкость, требует специализированное оборудование, высокая стоимость
4	Гидродинамические	Изменение гидродинамических параметров потока жидкости, связанных с интенсивностью кавитации	Легко поддается автоматизации, затраты ручного труда минимальны	Требует специализированное оборудование, более высокая энергоемкость
5	Химические	Исследование изменения массы, концентрации или объема хим. реагентов за счет звукохимических реакций в кавитационном поле	Удобен при экспресс-определении	Быстро теряют активность, затраты ручного труда, необходимость в реагентном хозяйстве
6	Механические	Измерение величины кавитационной эрозии, которую обычно выражают через убыль веса образцов в виде алюминиевых цилиндриков или через площадь вырывов в алюминиевой фольге	Затраты ручного труда минимальны	Требует спец. оборудование, более высокая энергоемкость, длительное время фиксирования процесса
7	Технологические	Изменения качественных показателей обрабатываемой среды, связанных с интенсивностью кавитации	Легко поддается автоматизации, затраты ручного труда минимальны	Требует спец. оборудование, более высокая энергоемкость, требует совмещение методов для фиксирования эффективности процесса, высокая стоимость
8	Радиоактивные	Пропускание гамма-лучей через объект исследования	Точный метод исследования, для широкого диапазона плотностей жидкостей	Требует спец. оборудование и специальные средства защиты персонала, более высокая энергоемкость. Опасный для здоровья человека метод

Таблица 2

Значения варьирования факторов при проведении экспериментального исследования

Наименование фактора	Производительность кавитатора, м³/ч	
	1,0	13,0
Эксцентриситет входного сопла Ψ , мм	1 ... 3	3,5 ... 8,5
Расстояние между соплом и диффузором L , мм	17 ... 23	50 ... 70
Отношение площадей выходного отверстия к входному камеры смещения F_2/F_1	2 ... 4	2 ... 4
Перепад давлений Δp , кПа	310 ... 450	310 ... 450
Температура воды T , °C	4 ... 30	4 ... 30

Определив экспериментально величину $p(y)$, можно оценить степень влияния на нее факторов, указанных в табл. 2. На основании расчетов и интервалов варьирования параметров кавитатора в лаборатории «Металлорежущего оборудования» кафедры «Технологии конструкционных материалов и машиноремонта» ВГУВТ в 2013 г. были изготовлены два опытных кавитатора, конструкции которых позволяют изменять значения факторов Ψ , L и F_2/F_1 в соответствии с данными табл. 2. Внешний вид конструктивных элементов гидродинамических кавитаторов приведен на рис. 2. При проведении экспериментальных исследований были рассмотрены только пропорциональные изменения всех факторов, оказывающих влияние на параметры кавитатора. Это обеспечило геометрическое подобие устройства, что позволит распространить выводы, полученные в результате экспериментов, на весь их ряд, т. е. для производительности 1 ... 13 м³/ч.

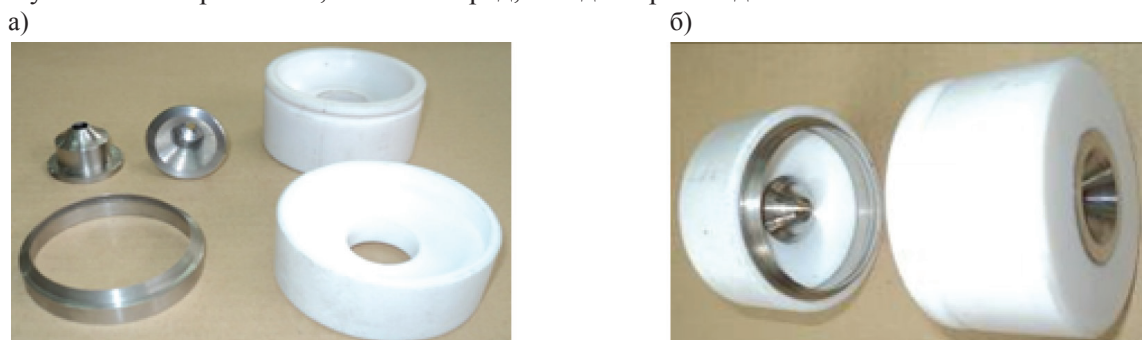


Рис. 2. Внешний вид конструктивных элементов гидродинамических кавитаторов:
а — детали устройства (входное и выходное сопло, внутреннее кольцо, полукамеры);
б — гидродинамический кавитатор в сборе без корпуса

По завершении экспериментальных исследований кавитаторов и математической обработки полученных данных были составлены уравнения регрессии по $p(y)$ для производительности 1 м³/ч и 13 м³/ч. Расхождение между полученными результатами по уравнениям регрессии не превышает 5 %, что свидетельствует об отсутствии масштабного эффекта, поэтому окончательно составлено общее уравнение регрессии для кавитаторов производительностью 1 – 13 м³/ч:

$$p(y) = -209,800 + 0,779 \Psi + 0,900 L + 1,794 \Delta p + 64,015 F_2/F_1 + 0,305 \Psi \Delta p - 2,695 L F_2/F_1 - 0,446 \Delta p F_2/F_1. \quad (4)$$

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены оптимальные характеристики кавитатора для производительности 1 м³/ч и 13 м³/ч (табл. 3).

Таблица 3

Оптимальные характеристики гидродинамического кавитатора 1 м³/ч и 13 м³/ч

Признак оптимизации	Значение параметра $p(y)$, кПа	Значение факторов			
		Ψ , мм	L , мм	F_2/F_1	Δp , кПа
Минимизация $p(y)$, кПа	30,069	1,0 / 3,5	17,0 / 50,0	4,0	450,0

В ходе проведения многофакторных экспериментов был зафиксирован процесс нагревания обрабатываемой воды в кавитаторе. Для установления зависимости степени нагрева жидкости от изменения перепада давления было проведено третье экспериментальное исследование на разработанном стенде. Установлено, что эжекция воздуха увеличивает температуру воды по сравнению с работой кавитатора без воздуха. Следует отметить, что дополнительный ввод газа в камеру смешения кавитатора резко уменьшает разрушения пристеночных поверхностей. Кроме того, кавитатор выполняет одновременно четыре функции: смесителя, устройства для дезинфекции жидкости, нагревателя и насоса.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментальных исследований гидродинамических кавитаторов производительностью 1 м³/ч и 13 м³/ч составлены математические модели, описывающие влияние пяти факторов (Ψ , L , F_2/F_1 , Δp и T) на процесс кавитации в камере смешения. Расхождение между полученными математическими моделями работы кавитаторов производительностью 1 м³/ч и 13 м³/ч не превышает 5 %, что свидетельствует об отсутствии *масштабного эффекта*.

2. Среднее значение R^2 составляет 95,0 %, что свидетельствует о высокой адекватности полученной математической модели работы кавитатора.

3. В процессе работы гидродинамического кавитатора происходит нагрев обрабатываемой жидкости, что позволяет исключить из системы электронагреватель в теплый период времени.

Список литературы

1. Хитерхеева Н. С. Кавитационные аппараты: монография / Н. С. Хитерхеева. — Улан-Удэ: Изд-во Бурятского гос. ун-та, 2009. — 157 с.
2. Исаков А. Я. Кавитация в перемешивающих устройствах: монография / А. Я. Исаков, А. А. Исаков. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. — 206 с.
3. Махров В. П. Гидродинамика кавитационных течений, формируемых внешними гидродинамическими особенностями / В. П. Махров. — М.: Изд-во МАИ, 2011. — 158 с.
4. Рязанцев А. А. Окисление нитрофенола в воде с использованием гидродинамической кавитации / А. А. Рязанцев, Н. Б. Васильева, А. А. Батоева // Химия в интересах устойчивого развития. — Новосибирск, 2007. — Т. 15. — № 6. — С. 715–720.
5. Федоткин И. М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности: в 2 ч. / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. — Киев: ОКО, 2000. — Ч. 1. — 898 с.
6. Синтех [Электронный ресурс] // Ртутные лампы среднего давления НОК/НТК/НТQ. — Режим доступа: <http://sentech-medical.ru/files/tuv-lamps.pdf> (дата обращения: 15.03.2015).
7. Витенько Т. Н. Механизм активизирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // Химия и технология воды. — 2007. — Т. 29. — № 5. — С. 422–432.
8. Черепкова Е. А. Основы проектирования плавательных бассейнов на судах / Е. А. Черепкова, А. С. Курников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 107–115.
9. Проектирование, строительство и эксплуатация жилых зданий, предприятий коммунально-бытового обслуживания, учреждений образования, культуры, отдыха, спорта. Плавательные бассейны. Гигиенические требования к устройству, эксплуатации и качеству воды. Контроль качества: СанПиН 2.1.2.1188-03.2.1.2. — Введ. 1.06.2003. — М.: ИИЦ Минздрава России, 2003. — 15 с.
10. Решняк В. И. Регулирование эксплуатационного и аварийного загрязнения окружающей среды на объектах водного транспорта / В. И. Решняк, З. Юзвяк, А. Г. Щуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 85–90.