

УДК 66.063

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ  
В КАНАЛАХ ПРОТОЧНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
СТАТИЧЕСКИХ КАВИТАТОРОВ**

**М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин**

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная  
безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; [mahp@tambov.ru](mailto:mahp@tambov.ru)*

**Ключевые слова и фразы:** гидродинамический кавитатор; давление; кавитация; поток жидкости; скорость.

**Аннотация:** Описаны результаты исследований гидродинамических и кавитационных характеристик потока жидкости при течении в каналах гидродинамического кавитатора. Исследования проводились при помощи компьютерного моделирования в системе ANSYS и на экспериментальном стенде. В результате исследований установлено, что пристеночные эффекты и вихреобразование при течении потока жидкости в канале могут изменять его кавитационные характеристики.

**Обозначения**

$C$ – гидродинамическое число кавитации;	$t$ – температура жидкости, °С;
$d$ – диаметр канала, м;	$v$ – скорость потока жидкости в канале статора, м/с;
$h, l$ – расстояние до гидрофона, м;	$\Delta P$ – перепад давления, Па;
$I$ – интенсивность кавитации;	$\gamma$ – доля выделившейся воды, %;
$L$ – длина канала, м;	$\rho$ – плотность, кг/м <sup>3</sup> ;
$P$ – давление, Па;	$\tau$ – время, ч.
$Q$ – расход жидкости, м <sup>3</sup> /с;	

В химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности широко используются проточные гидродинамические (статические) кавитаторы (ПГК) для интенсификации технологических процессов в потоке жидкости. Экономическая эффективность их применения обусловлена малыми металлоемкостью оборудования, капитальными и эксплуатационными затратами [1 – 6]. Основные достоинства таких кавитаторов – простота изготовления рабочих органов, быстрота их замены, отсутствие застойных зон в каналах, малый объем рабочей зоны, высокая прочность и герметичность, что позволяет использовать их при больших давлениях и температурах, а также для токсичных, взрывопожароопасных веществ с широким диапазоном вязкости. Основным недостатком ПГК является большое гидравлическое сопротивление.

Существует большое число конструкций кавитаторов: с винтовыми элементами, промежуточными камерами, пластинчатыми и гофрированными элементами и т.п. Для каждого из типов ПГК характерна своя картина движения потоков, однако, общим является то, что увеличение поверхности раздела между микрообъемами жидкости достигается двумя способами: за счет сдвигового течения и за счет разделения и переориентации потоков.

Из множества элементов конструкций ПГК широко используются перегородки с круглыми или другой формы отверстиями. Перегородка с отверстиями может быть выполнена в форме диска, в котором имеются каналы для прохождения жидкости. Каналы, как правило, равномерно распределены на рабочей поверхности диска и имеют различную форму поперечного сечения и длину. В каналах могут быть расширения или сужения, вызывающие изменение скорости потока жидкости и вихреобразование.

При прохождении жидкости через каналы перегородок в потоке жидкости возникают вихреобразования, отрывные течения и кавитация. Данные эффекты воздействуют на частицы гетерогенной жидкости, способствуют их интенсивному дроблению и гомогенизации, срыву пограничных слоев на частицах. При внезапном расширении канала потери энергии расходуется на вихреобразование, связанное с отрывом потока от стенок, то есть на поддержание непрерывного вращательного движения жидких масс и постоянный их обмен [7].

Внезапное сужение канала вызывает обычно меньшую потерю энергии, чем внезапное расширение при одинаковых площадях поперечных сечений канала. Потеря энергии в этом случае обусловлена трением на входе в узкую часть канала и потерями на образование вихрей, вызванное тем, что поток на границе входа в цилиндрическую часть канала срывается с нее и сужается; кольцевое же пространство вокруг суженной части потока заполняется малоподвижной завихренной жидкостью.

Для расчета параметров потока жидкости в канале применяются уравнения Навье–Стокса и неразрывности. Для корректного расчета турбулентных течений необходимо использовать уравнения Рейнольдса или Буссинеска для средних элементов движения и рейнольдсовых напряжений совместно с приближенными уравнениями переноса, либо другие известные модели. В прямой постановке задача о детальном изучении закономерностей движения потока жидкости на основе модели Навье–Стокса развитых крупномасштабных турбулентных структур при очень больших числах Рейнольдса трудновыполнима без использования мощных ЭВМ [8].

Эффективным и широко используемым современным средством определения параметров потока жидкости при течении в каналах различной формы является использование метода конечных элементов (КЭ). В настоящее время существует достаточно много программных продуктов для решения отдельных классов задач, основанных на методе КЭ. Можно подобрать программные продукты практически для любой задачи, например, ANSYS – универсальная система КЭ анализа со встроенным препостпроцессором; FlowVision – система КЭ анализа для расчета задачи внешней и внутренней аэрогидродинамики; MSC.Nastran – универсальная система КЭ анализа с препостпроцессором MSC.Patran; FlexPDE – система КЭ анализа для решения задач систем дифференциальных уравнений первого или второго порядка в частных производных, FloEFD – система КЭ анализа для расчета задачи внешней и внутренней аэрогидродинамики. Одним из наиболее мощных коммерческих программных продуктов для решения таких задач является ANSYS, который известен уже более двадцати лет и широко используется для научных и инженерных расчетов [9].

Для моделирования течения потока жидкости в отверстиях перегородок ПГК создана полноразмерная трехмерная модель в AutoCAD и импортирована в рабочую среду ANSYS CFX. В качестве параметров жидкости использовались физические свойства воды при начальной температуре 25 °С. Для определения расчетных зависимостей течения жидкости в ПГК моделировали течение потока жидкости в каналах цилиндрической формы различного диаметра.

Эффективность воздействия на поток обрабатываемой жидкости может быть представлена гидродинамическим числом кавитации  $C$ . Если  $C > 1$ , то кавитация слаборазвита, при  $C < 1$  интенсивность кавитации возрастает.

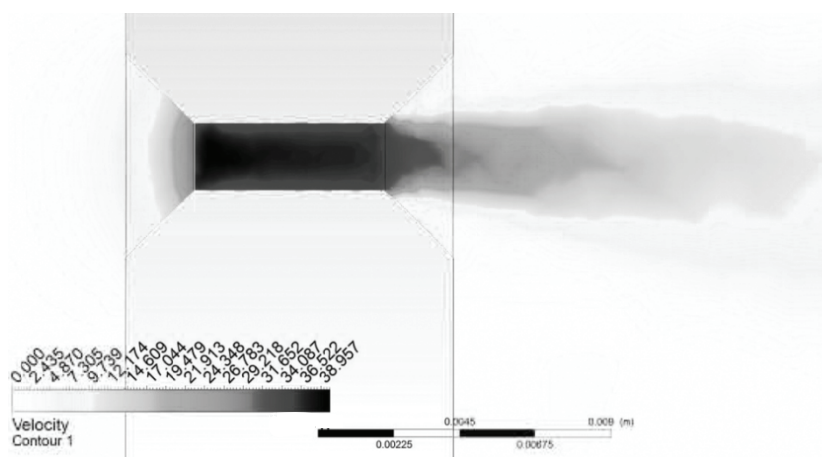
Для расчета гидродинамического числа кавитации  $C$  написана подпрограмма в рабочей среде ANSYS CFX, которая интегрировала необходимые данные результатов расчета в формулу  $C = (P_{\text{вых}} - P_{\text{нас.пара}}) / (\rho v^2 / 2)$ , где  $P_{\text{вых}}$  – давление на выходе из канала, Па;  $P_{\text{нас.пара}} = 3167$  Па – давление насыщенных водяных паров при температуре  $25^\circ\text{C}$ ;  $v$  – скорость потока жидкости на выходе из канала, м/с;  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ .

Моделирование течения потока жидкости в каналах перегородки ПГК проводилось на дисках диаметром 70 мм, установленных в корпус. Первый диск имел центральный канал цилиндрической формы, диаметр канала равен 2...6 мм. Второй диск имел 57 каналов цилиндрической формы, диаметр каналов равен 2 мм, каналы равномерно распределены по диску. Канал имел длину 10 мм, конфузор и диффузор на входном и выходном участках с углом конусности  $90^\circ$  и наибольшим диаметром 7 мм. Пример поля скоростей в канале диаметром 2 мм, смоделированного в программе ANSYS, показан на рис. 1. Результаты расчетов числа кавитации  $C$  на основе моделирования течения потока жидкости в диске с каналами представлены на рис. 2.

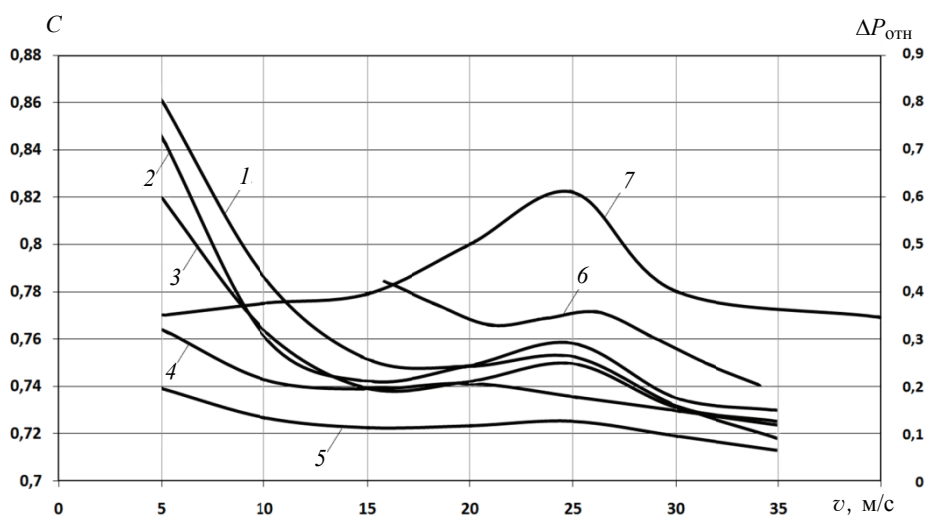
Численный расчет течения потока жидкости в каналах выявил локальные максимумы числа кавитации на интервале скорости течения жидкости  $v = 20...30$  м/с, при отношении длины канала  $L$  к диаметру канала  $d$  в пределах  $1 < (L/d) < 3$ ,  $L = 10$  мм. Положение локального максимума на кривой графика зависимости числа кавитации от скорости не изменяется для диска с центральным каналом при различных значениях диаметра канала. С уменьшением диаметра канала локальный максимум числа кавитации становится более заметно выраженным.

Можно предположить, что чем меньше диаметр канала, тем больше на течение жидкости в нем влияют пристеночные эффекты и вихреобразование, вследствие которых повышается давление на выходе из канала. Происходит выравнивание перепада давления между значениями на входе и выходе из канала  $P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}} \approx 1/3$ .

Кривая графика зависимости относительного перепада давления  $\Delta P_{\text{отн}}$  между входом  $P_{\text{вх}}$  и выходом  $P_{\text{вых}}$  канала  $\Delta P_{\text{отн}} = (P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}}$  также имеет выраженный максимум в интервале скорости потока жидкости в канале  $v = 20...30$  м/с. Картина поля давления показывает, что при  $v = 20$  м/с зона основного гид-



**Рис. 1. Поле скоростей для диска с одним каналом цилиндрической формы, конфузором и диффузором при средней скорости потока  $v = 35$  м/с,  $d = 2$  мм**



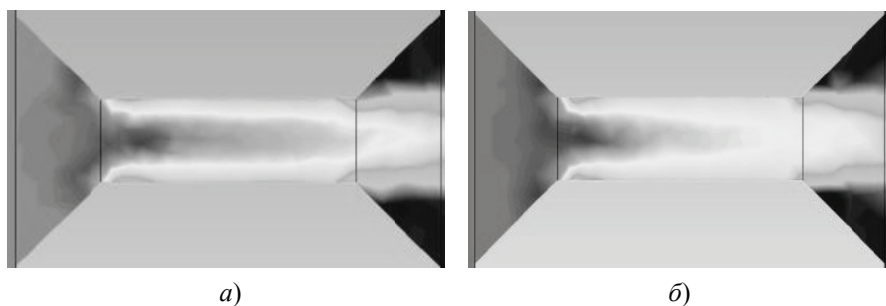
**Рис. 2. Графики расчетных зависимостей числа кавитации  $C$  от скорости  $v$  для диска с центральным каналом:**

$1 - d = 2$  мм;  $2 - d = 3$  мм;  $3 - d = 4$  мм;  $4 - d = 5$  мм;  $5 - d = 6$  мм;  $6 -$  для диска с 57 каналами,  $d = 2$  мм;  $7 -$  относительный перепад давления  $\Delta P_{отн}$ ,  $d = 2$  мм

равлического сопротивления находится на выходном участке канала, а при  $v = 25$  м/с – на входном участке канала (рис. 3).

По картине распределения давления внутри цилиндрического канала можно заметить, что в ядре потока давление выше, чем в пристеночной зоне. Такое распределение давления в потоке жидкости в цилиндрическом канале подтверждено экспериментальными исследованиями, описанными в работе [10].

По графикам на рис. 2 видно, что число кавитации для канала большого диаметра (6 мм) имеет меньшее значение, чем для канала малого диаметра (2 мм) при одном и том же значении скорости. Это объясняется тем, что для поддержания одного и того же значения скорости потока жидкости в канал большого диаметра необходимо подавать жидкость с большим давлением, чем в канал меньшего диаметра. При большом значении давления на входе в канал статическое давление на выходе из канала также имеет большую величину. Зависимость между перепадом давления (статическим давлением на выходе из канала) и диаметром канала имеет нелинейный характер для одного и того же значения скорости потока жидкости в канале.



**Рис. 3. Поле давления в канале диска с одним отверстием диаметром  $d = 2$  мм, длина канала (с конфузуром и диффузором) – 20 мм при скорости потока, м/с:**  
 $a - v = 20$ ;  $b - v = 25$

Анализируя графики на рис. 2, полученные по данным моделирования в ANSYS, можно сделать вывод, что для диска с центральным каналом цилиндрической формы (входной участок – конфузор, выходной участок – диффузор), с диаметром каналов 2...6 мм, при значении скорости течения потока жидкости в канале  $v = (24 \pm 3)$  м/с, наблюдается локальное увеличение значения числа кавитации и относительного перепада давления. Чем меньше диаметр канала, тем больше локальное увеличение значения числа кавитации. Наибольшее увеличение значения расчетного числа кавитации равно 0,02 (для  $d = 3$  мм).

Экспериментальные исследования кавитации при течении жидкости через диск с каналами производилось на воде ГОСТ Р 51232–98 [11] при температуре 25 °С. В качестве исследуемого элемента использовался диск с изменяемым числом каналов цилиндрической формы. Диск с каналами устанавливался в корпус камеры высокого давления. Подачу воды на вход камеры высокого давления осуществляли плунжерным насосом. Вода, прошедшая через камеру высокого давления, поступала обратно на вход плунжерного насоса. Объем гидравлической системы составлял 45 л. Частоту вращения вала электродвигателя плунжерного насоса и, соответственно, подачу насоса регулировали при помощи частотного преобразователя VFS11-4110PL-WN. Давление на входном и выходном патрубках рабочей камеры измеряли манометрами МТ-100, температуру воды – измерителем температуры SH-04016.

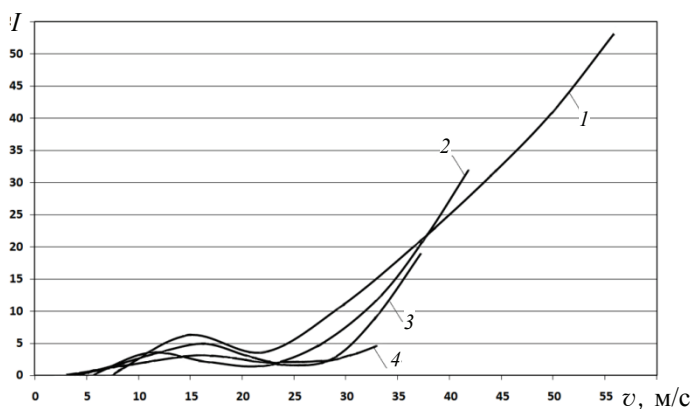
Уровень интенсивности кавитации измеряли при помощи кавитометра IC-4D. Выносной датчик кавитометра (гидрофон) устанавливался в камере перед исследуемым диском на расстоянии  $h = 10$  мм и глубине  $l = 25$  мм от стенки корпуса. Все измерения проводились при постоянных величинах  $h$ ,  $l$  и расходе  $Q$ . После каждого измерения вода сливалась из гидравлической системы и для нового измерения заливалась свежая вода. Давление на входном  $P_{\text{вх}}$  и выходном  $P_{\text{вых}}$  патрубках рабочей камеры измеряли манометрами МТ-100, температуру обрабатываемой жидкости – измерителем температуры SH-04016.

На рис. 4 показаны графики зависимостей уровня интенсивности кавитации  $I$ , определяемого по величине напряжения, снимаемого с гидрофона, от скорости течения жидкости в каналах  $v$  для различных площадей проходного сечения каналов. Полученные экспериментальные зависимости интенсивности кавитации  $I$  от скорости  $v$  подтверждают расчетные зависимости числа кавитации  $C$  от скорости  $v$ .

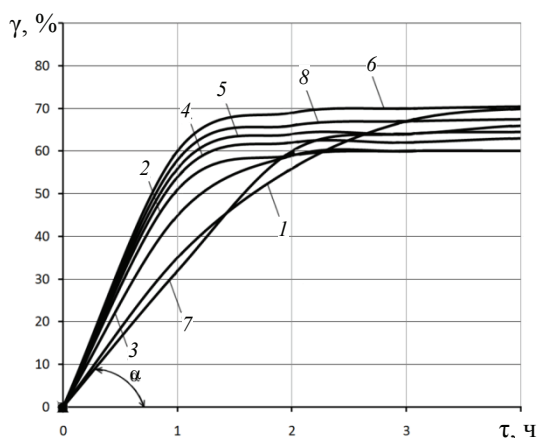
Проведено исследование эффективности приготовления эмульсии при течении жидкости через диск с каналами. В качестве модельной эмульсии использовалась эмульсия вода–подсолнечное масло в соотношении 20 % растительного масла на 80 % воды по объему при температуре масла и воды 25 °С. В качестве параметра, характеризующего эффективность процесса эмульгирования, использовалась зависимость расслоения полученной эмульсии от времени. В корпус камеры устанавливали диски с каналами разного диаметра и прокачивали через них эмульсию вода–подсолнечное масло. Графики зависимостей расслоения эмульсии при различных расходах через диски с каналами показаны на рис. 5.

Для анализа процесса эмульгирования в качестве параметра, характеризующего стойкость эмульсии (качество эмульсии) выбран коэффициент скорости расслоения эмульсии  $K$ , равный тангенсу угла наклона прямого участка графика зависимости расслоения эмульсии от времени к оси абсцисс  $K = \text{tg} \alpha$  (см. рис. 5). Графики зависимостей коэффициента скорости расслоения эмульсии  $K$  от скорости потока жидкости  $v$  в канале диаметром  $d = 2$  мм представлены на рис. 6.

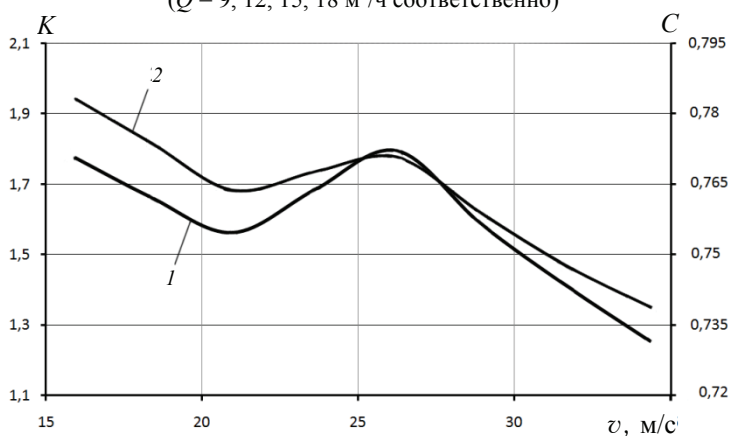
На основании анализа графиков (см. рис. 6) можно сделать вывод, что экспериментальные зависимости коэффициента скорости расслоения эмульсии



**Рис. 4. Графики зависимостей уровня интенсивности кавитации  $I$  в относительных единицах от скорости течения жидкости  $v$  в каналах диаметром  $d = 2$  мм:**  
 1 – для диска с шестью каналами; 2 – для диска с восемью каналами;,  
 3 – для диска с 12 каналами; 4 – для диска с 16 каналами



**Рис. 5. Графики зависимостей расслоения эмульсии при различных расходах через диски с каналами:**  
 1–4 – диск с 57 каналами  $d = 2$  мм; 5–8 – диск с 12 каналами  $d = 4$  мм  
 ( $Q = 9, 12, 15, 18$  м<sup>3</sup>/ч соответственно)



**Рис. 6. Графики зависимостей коэффициента скорости расслоения эмульсии  $K$  (кривая 1, экспериментальные данные) и числа кавитации  $C$  от скорости  $v$  (кривая 2, расчетные данные) для диска с 57 каналами,  $d = 2$  мм**

вода–подсолнечное масло от скорости течения потока жидкости для диска с 57 каналами совпадают по форме с расчетными зависимостями числа кавитации от скорости потока жидкости в каналах дисков ПГК. В диапазоне скорости течения потока эмульсии  $v = 25 \dots 27$  м/с в каналах диска, наблюдается увеличение коэффициента скорости расслоения эмульсии (эффективность работы гидродинамических кавитирующих элементов уменьшается). На этот эффект указывает локальный максимум на графике зависимости коэффициента скорости расслоения эмульсии вода–подсолнечное масло от скорости течения потока жидкости при указанной скорости.

#### *Список литературы*

1. Богданов, В.В. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Е.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
2. Gogate, R.P. Cavitation Reactors for Process Intensification of Chemical Processing Applications: a Critical Review / R.P. Gogate // *Chemical Engineering and Processing*. – 2008. – Vol. 47, No. 4. – P. 515–527.
3. Gogate, R.P. Application of Cavitation Reactors for Cell Disruption for Recovery of Intracellular Enzymes / R.P. Gogate, B.A. Pandit // *Chem. Technol. Biotechnol.* – 2008. – Vol. 83. – P. 1083–1093.
4. Kumar, S.K. Conceptual Design of a Novel Hydrodynamic Cavitation Reactor / S.K. Kumar, V.S. Moholkar // *Chemical Engineering Science*. – 2007. – Vol. 62. – P. 2698–2711.
5. Промтов, М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М.А. Промтов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861–869.
6. Федоткин, И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Киев : ОКО, 2000. – 898 с.
7. Арзуманов, З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / З.С. Арзуманов. – М. : Энергия, 1978. – 303 с.
8. Меньшиков, В.М. О непрерывном сопряжении инвариантных решений / В.М. Меньшиков // *Динамика сплошной среды : сб. науч. тр. / Ин-т гидродинамики СО АН СССР*. – 1972. – Вып. 10. – С. 70–84.
9. Каплун, А.В. ANSYS в руках инженера : практ. рук. / А.В. Каплун. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
10. Кузнецов, В.С. Экспериментальные исследования гидродинамических параметров потоков жидкости в дроссельных каналах [Электронный ресурс] / В.С. Кузнецов, А.С. Шабловский, Г.А. Трошин // *Наука и образование / МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – *Электрон. журн.* – 2011. – 10 окт. – Режим доступа к журн. : <http://technomag.edu.ru/doc/230378.html> (дата обращения 01.06.2013).
11. ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – Введ. 1999-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 18 с.

---

### **Characteristics of Fluid Flow in the Channels of Circulating Hydrodynamic Static Cavitators**

**M.A. Promtov, A.Yu. Stepanov, A.V. Aleshin**

*Department “Technological Processes, Devices and Technosphere Safety”, TSTU;  
mahp@tambov.ru*

**Key words and phrases:** cavitation; fluid flow; hydrodynamic cavitator; pressure; velocity.

**Abstract:** The results of the studies of hydrodynamic and cavitation characteristics of fluid flow in a channel of the hydrodynamic cavitator have been described. The studies were conducted using computer modeling in ANSYS and experimental stand. The studies found that the near-wall effects and vortex formation in the fluid flow in the channel can change its cavitation characteristics.

---

### **Charakteristiken des Stroms der Flüssigkeit in den Kanälen der fließenden hydrodynamischen statischen Kavitatoren**

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der Forschungen der hydrodynamischen und kavitierenden Charakteristiken des Stroms der Flüssigkeit bei der Strömung in den Kanälen des hydrodynamischen Kavitors beschrieben. Die Forschungen wurden mit Hilfe der Computermodellierung im System ANSYS und am experimentalen Stand durchgeführt. Infolge der Forschungen ist es bestimmt, dass die parientalen Effekte und die Wirbelung bei der Strömung des Stroms der Flüssigkeit im Kanal seine Kavitationscharakteristiken ändern können.

---

### **Caractéristiques du courant du liquide dans les canaux des cavitateurs hydrodynamiques statiques à dégorgeement**

**Résumé:** Sont décrits les résultats des études des caractéristiques hydrodynamiques et celles de cavitation du courant du liquide lors de l'écoulement dans les canaux du cavitateur hydrodynamique. Les études ont été effectuées à l'aide du modélage d'ordinateur dans le système ANSYS et sur le stand expérimental. A l'issue des études on a établi que les effets près du paroi et la formation de vortex peuvent changer les caractéristiques de cavitation lors de l'écoulement du liquide dans le canal.

---

**Авторы:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Степанов Андрей Юрьевич* – ассистент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Алешин Андрей Владимирович* – магистрант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---