

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1076-1084

## PROVIDING A CAVITATION-FREE REGIME WHEN FLUSHING SHIP PIPELINES WITH A TWO-PHASE MIXTURE

**E. G. Lebedeva**

Northern Arctic Federal University, Severodvinsk, Russian Federation

*It is noted that during the flushing of ship systems and their elements, the mixed flow of water and air has proven itself well as a flushing medium. It has been experimentally established that there is a significant acceleration of the washing process and an increase in the number of flushed-out dirt particles. At the same time, the two-phase flushing method currently has a number of unsolved theoretical and practical problems. One of such tasks is to ensure a cavitation-free flushing regime. The issue of ensuring a cavitation-free regime when flushing ship pipelines with a two-phase mixture during the passage of narrownesses stream is considered in the paper. It is known that the cavitation occurrence depends on a number of factors. The degree of each factor influence on the probability of cavitation occurrence is investigated. In this paper, an attempt to theoretically assess the development of cavitation in narrow technological jumpers is made. The main theoretical dependence of the maximum permissible diameter of the jumper on the main parameters of the mixed flow, as well as on the initial pressure of the flushing flow is determined. The main parameters of the mixed flow are the mass flow rate of the flushing water, the densities of the mixture phases, the mass content of air in the flow, the initial diameter of the pipeline and the compression ratio of the jet in a narrow section. A homogeneous mixture model is used in the theoretical study of cavitation phenomena in a two-phase flow. The main design dependencies for determining the maximum allowable diameter of the jumper depending on the main factors of the two-phase flow are defined in the paper. The influence of various factors on the development of cavitation phenomena is evaluated. Particular attention is paid to the choice of the flow diameter of the technological jumper depending on the mass flow rate of the flushing stream, the air content and the initial pressure.*

*Keywords: cavitation, provision of a cavitation-free regime, two-phase flow, air content, flushing of ship pipelines.*

### **For citation:**

Lebedeva, Elena G. "Providing a cavitation-free regime when flushing ship pipelines with a two-phase mixture." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1076–1084. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1076-1084.

**УДК 629.5**

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСКАВИТАЦИОННОГО РЕЖИМА ПРИ ПРОМЫВКЕ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСЬЮ

**Е. Г. Лебедева**

Северный Арктический Федеральный Университет,  
г. Северодвинск, Российская Федерация

*Известно, что при проведении промывки судовых систем и их элементов хорошо зарекомендовал себя в качестве промывочной среды перемешанный поток воды и воздуха. Опытным путем установлено, что происходит значительное ускорение процесса промывки и увеличение количества вымываемых частиц загрязнений. При этом двухфазный метод промывки на данный момент имеет ряд нерешенных теоретических и практических задач, одной из которых является обеспечение бескавитационного режима промывки. В статье рассмотрен вопрос обеспечения бескавитационного режима при промывке судовых трубопроводов двухфазной смесью при прохождении потока узкостей. Известно, что возникновение кавитации*

зависит от ряда факторов. Исследована степень влияния каждого фактора на вероятность возникновения кавитации. В данной работе выполнена попытка теоретической оценки развития кавитации в узких технологических перемычках. Определена основная теоретическая зависимость предельно допустимого диаметра перемычки от основных параметров смешанного потока: массового расхода промывочной воды, плотностей фаз смеси, массового содержания воздуха в потоке, исходного диаметра трубопровода и коэффициента поджатия струи в узком сечении, а также от исходного давления промывочного потока. При теоретическом исследовании кавитационных явлений в двухфазном потоке использована гомогенная модель смеси. В статье определены основные расчетные зависимости для определения предельно допустимого диаметра перемычки в зависимости от основных факторов двухфазного потока. Выполнена оценка влияния различных факторов на развитие кавитационных явлений. Особое внимание обращается на выбор проходного диаметра технологической перемычки в зависимости от массового расхода промывочного потока, содержания воздуха и исходного давления.

*Ключевые слова:* кавитация, обеспечение бескавитационного режима, двухфазный поток, воздуходо-содержание, промывка судовых трубопроводов.

**Для цитирования:**

Лебедева Е. Г. Обеспечение бескавитационного режима при промывке судовых трубопроводов двухфазной смесью / Е. Г. Лебедева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1076–1084. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1076-1084.

### **Введение (Introduction)**

Повышение функциональной надежности элементов судовой энергетической установки, судового оборудования и обслуживающих систем в процессе эксплуатации зависят от степени чистоты рабочих жидкостей, которая в свою очередь зависит от чистоты внутренних полостей судовых трубопроводов, оборудования, механизмов и устройств. Перед заполнением систем рабочими жидкостями проводят комплекс мероприятий по обеспечению чистоты судовых систем, одним которых является процесс технологической промывки внутренних полостей трубопроводов, исключающих судовое оборудование при помощи специально установленных перемычек.

Для промывки судовых трубопроводов могут применяться как стационарные устройства систем, так и переносные стенды [1]. С целью повышения качества и скорости проведения промывочных работ разветвленных судовых трубопроводов и оборудования предлагаются различные способы усовершенствования [2]. Одним из рассматриваемых случаев интенсификации является применение двухфазного потока. В процессе проведения опытных промывочных работ при помощи двухфазного потока на специально созданном испытательном стенде были получены хорошие результаты [3]. При наличии сведений о высокой результативности данного способа промывки путем создания стабильного двухфазного потока возникает ряд не рассмотренных ранее задач [4]. Сложность применения двухфазного потока на протяженных разветвленных трубопроводах состоит в неустойчивой структуре газожидкостной смеси. Существует опасность возникновения кавитационных явлений, оказывающих негативное влияние на стабильность потока и целостность элементов систем [5]. В двухфазных потоках происходит значительное уменьшение скорости распространения звука [6], что делает возможным появление других негативных процессов. Таким образом, одной из основных задач данного исследования является *обеспечение бескавитационного процесса*.

Технологическая промывка разветвленных трубопроводных систем выполняется с отключением участков, содержащих энергооборудование, устройства и т. д. Отключение данных участков производится при помощи технологических перемычек (переходников) путем перенаправления потока, минуя участки с оборудованием. По производственным причинам технологические перемычки могут иметь диаметры, отличные от диаметров промываемого трубопровода. Опасным моментом при использовании в качестве промываемой среды двухфазного потока является прохождение смеси воды и воздуха по участкам перемычек меньшего диаметра из-за значительного падения давления в узком участке и вероятного развития кавитационных явлений. На возникновение кавитационных процессов могут оказывать влияние скорость потока, содержание воздуха, давление и т. д. [7].

Следовательно, для предупреждения нежелательных явлений необходимо предотвратить развитие кавитации в узких перемычках.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Развитие кавитационных явлений зависит от многих факторов, в том числе от скорости потока смеси, содержания воздуха в промывочной смеси, исходного давления при промывке. Необходимо установить теоретическую зависимость момента наступления кавитации от данных факторов. Для этого примем соответствующую физическую модель двухфазного потока. Исследователи выделяют существование различных режимов двухфазных потоков [8]. При малом содержании воздуха в потоке воды при их движении по трубопроводам воспользуемся *гомогенной моделью* [9]. Благодаря данному предположению будем исходить из того, что скорости водной и воздушной фазы равны друг другу, т. е. пузырьки газа равномерно распределены по сечению канала. Схема движения потока смеси в технологической перемычке приведена на рис. 1.

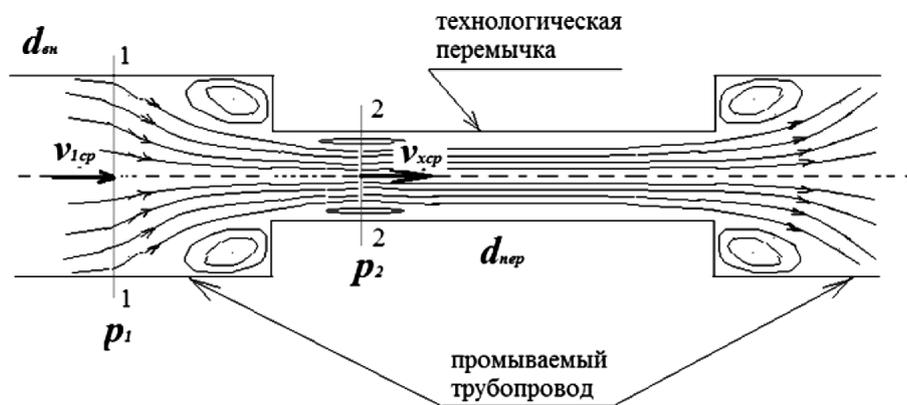


Рис. 1. Схема движения потока смеси в технологической перемычке:  
 $d_{пер}$  — внутренний диаметр перемычки;  $d_{вн}$  — внутренний диаметр промываемого трубопровода;  
 $v_{1cp}, p_1$  — соответственно средняя скорость и давление смеси в сечении 1–1;  
 $v_{хср}, p_2$  — средняя скорость и давление смеси в сечении 2–2

В сечении 1–1 поток смеси обладает скоростью  $v_{1cp}$  и давлением  $p_1$ . Течение двухфазной смеси в технологической перемычке сопровождается поджатием потока в сечении 2–2, увеличением скорости смеси до  $v_{хср}$  и падением давления до значения  $p_2$ . Значение диаметра технологической перемычки  $d_{пер}$  определяется из условия обеспечения антикавитационных условий в сечении 2–2. При падении давления в узком сечении 2–2 до давления насыщенных паров  $p$  произойдет развитие кавитации, что является нежелательным.

Для теоретического исследования процесса составим уравнение Бернулли для двух сечений: 1–1 и 2–2 (см. рис. 1):

$$\frac{p_1}{\rho_{см}} + \frac{v_{1cp}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_{см}} + \frac{v_{хср}^2}{2} + g\Delta h_{1-2}, \quad (1)$$

где  $g\Delta h_{1-2}$  — потери энергии на внезапное сужение, имеющее размерность  $m^2/c^2$ .

Давление в сечении 2–2 должно оставаться выше  $p_{нп}$ , т. е.  $p_2 > p_{нп}$ . В сечении 2–2 поток суживается на величину, пропорциональную коэффициенту сжатия  $\epsilon = \left(\frac{d_x}{d_{пер}}\right)^2$ , т. е. скорость смеси

увеличивается по отношению к  $v_{2cp}$  — теоретической скорости смеси в перемычке  $d_{пер}$ .

Следовательно, скорость с учетом поджатия в сечении 2–2 определяется в виде

$$v_{хср} = \frac{v_{2cp}}{\epsilon}.$$

Величину  $\mu$  принимают по справочникам гидравлических сопротивлений в зависимости от режима течения и остроты входных кромок.

Определим взаимосвязь скоростей потока смеси в сечениях 1-1 и 2-2 с массовым расходом  $G_{см}$ :

$$G_{см} = \rho_{см} v_{2cp} \frac{\Pi d_{пер}^2}{4} = \rho_{см} \varepsilon v_{хсп} \frac{\Pi d_{пер}^2}{4};$$

$$G_{см} = G'' + G' = \rho'' Q'' + \rho' Q' = \rho_{см} v_{1cp} \frac{\Pi d_{вн}^2}{4}.$$

В данных формулах массовый расход смеси определяется с учетом подачи воды и воздуха, образующего смесь:

$$G_{см} = G'' + G' = \rho'' Q'' + \rho' Q',$$

где  $G'$  и  $G''$  — массовые расходы воды и воздуха в кг/с;

$G_{см}$  — массовый расход смеси в кг/с;

$\rho_{см}$  — объемная плотность смеси кг/м<sup>3</sup>, которую можно определить, зная исходные плотности газовой (воздушной) и жидкой (водяной) фазы  $\rho''$  и  $\rho'$ , соответственно, по формуле [9]:

$$\rho_{см} = (\rho'' \varphi + \rho'(1 - \varphi)).$$

Здесь  $\varphi$  — объемное воздухосодержание, устанавливаемое через объемные расходы воды  $Q'$  и воздуха  $Q''$ , по формуле

$$\varphi = \frac{Q''}{Q_{см}} = \frac{Q''}{Q' + Q''}.$$

Получим выражения для скоростей смеси в обоих сечениях соответственно:

$$v_{1cp} = \frac{4G_{см}}{\rho_{см} \Pi d_{вн}^2}; \quad (2)$$

$$v_{хсп} = \frac{4G_{см}}{\varepsilon \rho_{см} \Pi d_{пер}^2}. \quad (3)$$

Потери энергии  $g\Delta h_{1-2}$  затрачиваются на внезапное сужение потока и определяются по известной справочной формуле [10] для потока воды расходом  $G_{см}$ :

$$g\Delta h_{1-2} = \frac{0,5}{\varepsilon^2} \left( 1 - \frac{d_{пер}^2}{d_{вн}^2} \right) \frac{v_{2cp}^2}{2}. \quad (4)$$

При этом скорость  $v_{2cp}$  определяется для смеси с учетом поджатия  $\varepsilon$ :

$$v_{2cp} = \frac{4G_{см}}{\rho' \Pi d_{пер}^2}. \quad (5)$$

Подставив полученные выражения в уравнение Бернулли (1), получим с учетом скоростей, определенных по (2), (3), (5) и потерь энергии (4):

$$2 \left( \frac{p_1}{\rho_{см}} - \frac{p_2}{\rho_{см}} \right) = \left( \frac{4G_{см}}{\varepsilon \rho_{см} \Pi d_{пер}^2} \right)^2 - \left( \frac{4G_{см}}{\rho_{см} \Pi d_{вн}^2} \right)^2 + \frac{0,5}{\varepsilon^2} \left( 1 - \frac{d_{пер}^2}{d_{вн}^2} \right) \left( \frac{4G_{см}}{\rho_{см} \Pi d_{пер}^2} \right)^2.$$

После преобразования получим

$$2(p_1 - p_2)\rho_{\text{см}} = \left( \frac{4G_{\text{см}}}{\epsilon \Pi d_{\text{пер}}^2} \right)^2 - \left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2 + \frac{0,5}{\epsilon^2} \left( 1 - \frac{d_{\text{пер}}^2}{d_{\text{вн}}^2} \right) \left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{пер}}^2} \right)^2.$$

Установим зависимость  $d_{\text{пер}}$  от содержания воздуха в смеси воды и воздуха. Для этого введем обозначение

$$x = \left( \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{пер}}} \right)^2.$$

Получим квадратное уравнение относительно  $x$ :

$$1,5x^2 + (-0,5)x - \epsilon^2 \left( 2\rho_{\text{см}} \frac{p_1 - p_2}{\left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right) = 0;$$

$$x^2 + \left( -\frac{1}{3} \right)x - \frac{\epsilon^2}{1,5} \left( 2\rho_{\text{см}} \frac{(p_1 - p_2)}{\left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right) = 0.$$

В данном уравнении введем следующие обозначения:

$$a = 1; \quad b = -\frac{1}{3}; \quad c = -\frac{\epsilon^2}{1,5} \left( 2 \frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right).$$

При решении квадратного уравнения необходимо вычислить дискриминант:

$$D = b^2 - 4ac = \frac{1}{9} + 4 \frac{\epsilon^2}{1,5} \left( 2 \frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right).$$

Квадратное уравнение будет иметь решения при положительном значении дискриминанта  $D$ . В результате получим два корня, один из которых отрицательный, поэтому не является решением задачи, в отличие от второго — положительного:

$$E = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{1}{9} + 4 \frac{\epsilon^2}{1,5} \left( 2 \frac{\rho_{\text{см}}(p_1 - p_2)}{\left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right)}}{2}.$$

После преобразований получим для диаметра перемычки:

$$d_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{2}d_{\text{вн}}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{1}{9} + 4 \frac{\varepsilon^2}{1,5} \left( 2 \frac{\rho_{\text{см}} (p_1 - p_2)}{\left( \frac{4G_{\text{см}}}{\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right)}}}$$

Последнюю формулу для удобства расчетов можно представить в зависимости от содержания воздуха  $k$ , используя выражение для массового содержания воздуха, приведенное в статье [11]:

$$k = \frac{G''}{G_{\text{см}}}$$

Массовый расход смеси  $G_{\text{см}}$  можно выразить через массовый расход промывочной воды:

$$G_{\text{см}} = \frac{G'}{(1-k)}$$

Тогда выражение для  $d_{\text{пер}}$  можно переписать в виде

$$d_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{2}d_{\text{вн}}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{1}{9} + 4 \frac{\varepsilon^2}{1,5} \left( 2 \frac{\rho_{\text{см}} (p_1 - p_2)}{\left( \frac{4G'}{(1-k)\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right)}}}$$

Значение давления  $p_2$  в сечении 2–2 может снизиться до критического значения, которое станет равным давлению насыщенного пара при заданной температуре  $p_2 = p_{\text{НП}}$ :

$$d_{\text{пер.кр}} = \frac{\sqrt{2}d_{\text{вн}}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \sqrt{\frac{1}{9} + 4 \frac{\varepsilon^2}{1,5} \left( 2 \frac{\rho_{\text{см}} (p_1 - p_{\text{НП}})}{\left( \frac{4G'}{(1-k)\Pi d_{\text{вн}}^2} \right)^2} + 1 \right)}}}$$

Таким образом, вероятность возникновения кавитационных явлений при протекании потока смеси в технологических перемычках определяется в зависимости от массового содержания воздуха  $k$  в потоке двухфазной смеси, массового расхода воды  $G'$ , давления насыщенных паров  $p_{\text{НП}}$ , давления потока при промывке  $p_1$  и исходного внутреннего диаметра промываемого трубопровода  $d_{\text{вн}}$ .

### Результаты (Results)

Давление насыщенных паров, согласно справочным данным [12], при технологической промывке систем, выполняемой при температуре 40 °С, составляет  $p_2 = p_{\text{НП}} = 7,37$  кПа. Для исходного диаметра трубопровода  $d_{\text{вн}}$  и определенного содержания воздуха  $k$  минимальный критический диаметр переходника  $d_{\text{пер.кр}}$  определен в табл. 1 и 2 для различных диаметров промываемого трубопровода  $d_{\text{вн}}$ , исходного давления  $p_1$  и воздухо содержания  $k$ .

Расчеты, представленные в табл. 1, выполнены для значения  $p_1 = 0,5$  МПа и различных массовых расходах промывочной воды  $G'$ . В зависимости от исходного давления  $p_1$  определялось значение плотности воздушной фазы  $\rho'' = 6,42$  кг/м<sup>3</sup>. Минимальное значение коэффициента по справочнику [9]  $\varepsilon = 0,53$ .

Таблица 1

Значения минимально допустимого диаметра переходника  $d_{пер}$  из условия обеспечения антикавитационной работы в зависимости от содержания воздуха  $k$

Массовое содержание воздуха $k = \frac{G''}{G_{см}}$	0	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008
Объемное содержание воздуха $\varphi = \frac{Q''}{Q_{см}}$	0	0,015	0,030	0,045	0,059	0,072	0,085	0,098	0,111
Внутренний диаметр трубы $d_{вн} = 75$ мм									
Критический диаметр переходника $d_{пер.кр}$ , мм	$G' = 13,5$ кг/с	35	35	35	35	36	36	36	36
	$G' = 23$ кг/с	45	45	46	48	50	52	53	55
Внутренний диаметр трубы $d_{вн} = 100$ мм									
Критический диаметр переходника $d_{пер.кр}$ , мм	$G' = 20$ кг/с	43	43	43	43	43	44	44	44
	$G' = 25$ кг/с	48	48	48	48	48	49	49	49
Внутренний диаметр трубы $d_{вн} = 125$ мм									
Критический диаметр переходника $d_{пер.кр}$ , мм	$G' = 23$ кг/с	46	46	46	46	47	47	47	47
	$G' = 27$ кг/с	50	50	50	50	50	51	51	51
	$G' = 37$ кг/с	58	58	58	59	59	59	59	60

Анализ данных табл. 1 показывает, что минимально допустимый диаметр переходника в основном зависит от массового расхода воды (средней скорости воды), массового содержания воздуха и давления  $p_1$ . Интерес представляет также зависимость минимально допустимого диаметра переходника от давления  $p_1$ . Промывка систем может выполняться при различных давлениях исходя из технологических возможностей, поэтому проанализируем изменение  $d_{пер.кр}$  от давления  $p_1$ .

Таблица 2

Значения минимально допустимого диаметра переходника  $d_{пер}$  из условия обеспечения антикавитационной работы в зависимости от давления в промывочном потоке  $p_1$

Содержание воздуха $k = 0,0002$							
Давление $p_1$ , кПа	200	250	300	350	400	450	500
Внутренний диаметр трубы $d_{вн} = 100$ мм							
Критический диаметр переходника, $d_{пер.кр}$ , мм	58	55	52	50	49	47	46

Таким образом, чем меньше исходное рабочее давление промывки  $p_1$  непосредственно перед перемычкой, тем больше требуется диаметр перемычки, определяемый из условия антикавитационной работы  $p_2 > p_{нп}$ .

### Обсуждение (Discussion)

В работе представлен способ теоретического определения бескавитационного режима работы смешанного двухфазного потока в узких технологических перемычках при проведении промывки судовых систем. Полученная теоретическая зависимость позволяет выполнять проверочные расчеты применительно к различным производственным условиям, возникающим в цеховых и доковых условиях при промывке систем двухфазным и однофазным потоком.

Возможность теоретического расчета различных режимов промывки может осуществляться при варьировании имеющихся данных, исходя из «внешних» задач: расхода воды, содержания воздуха, исходного давления в трубопроводах разного диаметра. Это позволяет применять данную формулу в качестве расчетной для определения ограничивающих факторов при проведении очистки внутренних полостей трубопроводов с использованием как однофазной, так и двухфазной промывки.

### Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе предложена теоретическая зависимость, определяющая предельно допустимые диаметры технологических перемычек, применяющихся в процессе промывки судовых разветвленных трубопроводных систем, из условия их бескавитационной работы.

2. Данная теоретическая зависимость может применяться в различных промывочных режимах: расходах воды, содержании воздуха, напоре промывочного насоса.

3. Рассмотренная теоретическая зависимость также может использоваться для обеспечения бескавитационного режима при традиционной гидродинамической промывке систем однофазным потоком воды.

4. Исследуемая теоретическая зависимость может применяться в производственных условиях применительно к промывке различных систем, имеющих переменные сечения трубопроводов.

5. Диаметры технологических переходников, применяемые в качестве перемычек, соединяющих различные участки систем и исключающих оборудование, во избежание развития кавитационных процессов, следует выбирать с увеличением с учетом запаса на поджатие потока в сечении  $2-2$  и входного давления  $p_1$  и устанавливать в диапазоне  $d_{\text{пер.кр}} < d_{\text{пер}} < d_{\text{вн}}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Н. В. Испытания и промывка систем гидравлики с применением переносных стендов / Н. В. Петров, Н. В. Розов // Судостроение. — 2018. — № 4 (837). — С. 39–41.
2. Соловьев Б. В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений / Б. В. Соловьев. — Л.: Судостроение, 1977. — 75 с.
3. Канаев Д. Н. Новые средства технологического оснащения для промывки судовых водяных систем и оборудования / Д. Н. Канаев, П. Л. Лямин, Е. Г. Лебедева, Н. И. Александров // Международный научно-исследовательский журнал. — 2014. — № 2-1 (21). — С. 93–95.
4. Лебедева Е. Г. Интенсификация технологии промывки судовых систем пульсирующим двухфазным потоком: дис. ... канд. техн. наук / Е. Г. Лебедева. — СПб.: ГУВК, 2012. — 169 с.
5. Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрьгин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 705–717. 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
6. Вилка Чаича М. Б. О скорости звука в двухфазной и двухкомпонентной среде / М. Б. Вилка Чаича, С. Юнусова, Г. Н. Шикин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. — 2011. — № 2. — С. 161–164.
7. Перник А. Д. Проблемы кавитации / А. Д. Перник. — Л.: Судостроение, 1966. — 439 с.
8. Дейч М. Е. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 327 с.
9. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллес. — М: Мир, 1972. — 440 с.

10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
11. Лебедева Е. Г. Определение средней скорости двухфазной смеси, обеспечивающей промывку судовых систем, в зависимости от содержания воздуха в потоке / Е. Г. Лебедева // Судостроение. — 2023. — № 3 (868). — С. 39–42.
12. Бабичев А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев [и др.]; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

## REFERENCES

1. Petrov, N. V., and N. V. Rozov. “Tests and flushing of hydraulic systems with the use of portable stands.” *Shipbuilding* 4(837) (2018): 39–41.
2. Solov'ev, B. V. *Ochistka sudovykh sistem ot tekhnologicheskikh zagryaznenii*. L.: Sudostroenie, 1977.
3. Kanaev, D. N., P. L. Lyamin, E. G. Lebedeva, and N. I. Alexandrov. “New technological facilities for flushing of ship-borne water systems and equipment.” *International Research Journal* 2–1(21) (2014): 93–95.
4. Lebedeva, E. G. *Intensifikatsiya tekhnologii promyvki sudovykh sistem pul'siruyushchim dvukhfaznym potokom*. PhD diss. SPb., 2012.
5. Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. “Studying the cavitation process and the possibility of reducing erosive wear.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
6. Wilka Chaicha, M.B., S. Yunusova, and G. N. Shikin. “On sound velocity in two-phase and two-component medium.” *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science* 2 (2011): 161–164.
7. Pernik, A. D. *Problemy kavitatsii*. L.: Sudostroenie, 1966.
8. Deich, M. E., and G. A. Filippov. *Dvukhfaznye techeniya v elementakh teploenergeticheskogo oborudovaniya*. M.: Energoatomizdat, 1987.
9. Wallis, Graham B. *One-Dimensional Two-Phase Flow*. First Edition. McGraw-Hill, 1969.
10. Idel'chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. M.: Mashinostroenie, 1992.
11. Lebedeva, E. G. “Defining average speed of two-phase mixture for flushing the shipboard systems depending on air content in the flow.” *Shipbuilding* 3(868) (2023): 39–42.
12. Babichev, A. P., N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskii, et al. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* Edited by I. S. Grigor'ev, and E. Z. Meilikhov. M.: Energoatomizdat, 1991.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Лебедева Елена Геннадьевна** —  
кандидат технических наук, доцент  
Северный Арктический федеральный университет  
164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,  
ул. Капитана Воронина, 6  
e-mail: [eg.lebedeva@narfu.ru](mailto:eg.lebedeva@narfu.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Lebedeva, Elena G.** —  
PhD, associate professor  
Northern Arctic Federal University  
6 Kapitan Voronin Str., Severodvinsk, 164500,  
Russian Federation  
e-mail: [eg.lebedeva@narfu.ru](mailto:eg.lebedeva@narfu.ru)

*Статья поступила в редакцию 10 октября 2023 г.  
Received: October 10, 2023.*