

Научная статья  
УДК 629.5  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-33-38>  
EDN XYDSDC

## Определение потерь давления при промывке трубопроводов двухфазным потоком

---

*Елена Геннадьевна Лебедева*

*Филиал Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова,  
Северодвинск, Россия, [eg.lebedeva@narfu.ru](mailto:eg.lebedeva@narfu.ru)*

---

**Аннотация.** При промывке судовых систем и их элементов используется поток воды. Для повышения эффективности процесса может использоваться двухфазный пульсирующий поток. Данный способ интенсификации промывки приносит ощутимые результаты, но имеет на данный момент ряд нерешенных задач. К одной из таких задач относится вопрос, связанный с определением энергетических затрат на транспортировку двухфазной смеси. Энергетические затраты на транспорт потока зависят от величины потерь давления на трение и от ориентации участков трубопровода в пространстве. Осуществлена попытка оценки потерь давления при транспортировке по промываемому трубопроводу смеси воды и воздуха. Определены основные теоретические зависимости: плотности смеси, скоростей различных фаз потока, объемного и массового расходов, расхода смеси от объемного и массового воздухоудержания. Приводится теоретическое обоснование определения потерь давления при движении двухфазной промывочной среды в зависимости от концентрации в смеси газовой (воздушной) фазы. При определении потерь давления использована гомогенная модель двухфазной смеси как наиболее подходящая к промывочному режиму двухфазным пульсирующим потоком. Определены основные расчетные зависимости для вычисления потерь давления на транспорт двухфазной смеси на горизонтальных и вертикальных участках трубопроводов постоянного внутреннего диаметра. Установлена зависимость потерь давления от газосодержания на горизонтальных и вертикальных участках трубопроводов. Проведена оценка потери давления при промывке двухфазным потоком на различно ориентированных участках судовых трубопроводов с целью определения дальнейшей эффективности данного способа промывки.

**Ключевые слова:** потери давления на трение, двухфазный поток, промывка судовых трубопроводов, структура двухфазного потока, трубопровод

**Для цитирования:** *Лебедева Е. Г.* Определение потерь давления при промывке трубопроводов двухфазным потоком // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.* 2023. № 3. С. 33–38. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-33-38>. EDN XYDSDC.

Original article

## Determining pressure losses in flushing pipelines by two-phase flow

---

*Elena G. Lebedeva*

*Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, branch,  
Severodvinsk, Russia, [eg.lebedeva@narfu.ru](mailto:eg.lebedeva@narfu.ru)*

---

**Abstract.** A stream of water is used in flushing ship systems and their elements. To increase the efficiency of the process, a two-phase pulsating flow can be used. This method of flushing intensification brings tangible results, but currently has a number of unsolved problems. One of these problems is the question related to the determination of energy costs for the transportation of a two-phase mixture. The energy costs for transporting the flow depend on the magnitude of pressure losses due to friction and on the orientation of the pipeline sections in space. An attempt was made to estimate the pressure loss during transportation of a mixture of water and air through a flushed pipeline. The main theoretical dependencies are determined: mixture density, velocities of various phases of the flow, volumetric and mass flow rates, mixture flow rate on volumetric and mass water-air content. A theoretical substantiation is given for determining the pressure loss during the movement of a two-phase flushing medium depending on the concentration of the gas (air) phase in the mixture. When determining pressure losses, a homogeneous model of a two-phase mixture was used as the most suitable for the flushing mode with a two-phase pulsating flow. The main calculated dependenc-

es for calculating the pressure losses for the transport of a two-phase mixture in horizontal and vertical sections of pipelines of constant internal diameter are determined. The dependence of pressure losses on gas content in horizontal and vertical sections of pipelines has been established. An assessment of the pressure loss during flushing with a two-phase flow in differently oriented sections of ship pipelines was carried out in order to determine the further effectiveness of this flushing method.

**Keywords:** friction pressure loss, two-phase flow, flushing of ship pipelines, two-phase flow structure, pipeline

**For citation:** Lebedeva E. G. Determining pressure losses in flushing pipelines by two-phase flow. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2023;3:33-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-33-38>. EDN XYDSDC.

### **Введение**

Проведение промывочных работ с целью очистки судовых трубопроводов свидетельствует о том, что мелкие частицы загрязнений вымываются крайне сложно и длительно [1], поэтому процесс промывки могут прекратить в связи с продолжительностью цикла промывочных работ даже в случае, когда не достигнута требуемая чистота. Мелкие частицы загрязнений могут оставаться внутри полостей трубопроводов и оказывать влияние на дальнейшую надежность работы системы. Эффективность и качество промывки судовых систем резко возрастает при проведении интенсификационных мероприятий. Особенно эффективным является метод принудительного азирования промывочного потока. Данный способ промывки был достаточно исследован в [2]. Использование двухфазной промывки продемонстрировало хорошие результаты на практике [3]. Тем не менее в [2] не были рассмотрены некоторые аспекты, например вопрос, связанный с возникновением потерь давления при транспортировке двухфазного потока, что является одной из задач, относящихся к транспортировке потока по трубопроводу.

При течении двухфазного потока в трубопроводах потери на трение определяются в зависимости от многих действующих факторов. Наличие пузырьков воздуха в воде, как и присутствие частиц технологических загрязнений, может определять изменение затрат энергии на транспортировку двухфазной смеси. При этом основополагающим фактором является структура двухфазной смеси и ее поведение. Исследование структуры двухфазного потока проводилось экспериментально и устанавливает разницу в горизонтально и вертикально ориентированных трубах [4]. При этом наблюдается существенная разница при различных видах течений в потоках двухфазных смесей. Установлены виды двухфазных потоков жидкостей (по свойствам, соответствующим воде) с распределенными в них газами, примерно равными плотности воздуха, характерные для горизонтальных участков: расслоенный, волновой, пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсно-кольцевой. В восходящем вертикальном канале двухфазный

поток имеет свои особенности структуры: пузырьковый; снарядный; эмульсионный; дисперсно-кольцевой. Тот или иной режим течения двухфазного потока зависит от соотношения жидкостной и газовой фаз.

С точки зрения эффективности промывочных работ в судовых трубопроводах необходимо достичь определенного устойчивого режима без слияния пузырей и последующего расслоения.

Согласно исследованиям [3], для соблюдения необходимых условий промывки требуется создание пузырьков, пенного или эмульсионного режимов, при котором объемное воздуходоержание составляет примерно 0,075–0,077 при внутреннем избыточном давлении в трубопроводе 5 атмосфер. При малой величине  $k$  для создания облегченной модели транспортировки предположим, что в двухфазной смеси в канале отсутствует скольжение фаз относительно друг друга. Таким образом, считаем, что скорости движения фаз незначительно отличаются друг от друга, что можно считать справедливым для гомогенной модели двухфазного потока. Средние скорости при обычной однофазной гидродинамической промывке являются достаточно большими, достигают 3,5 м/с и еще более возрастают по мере вдувания в поток промывочной воды воздуха. Следовательно, для определения потерь давления при транспортировке двухфазной смеси с малым воздуходоержанием будем исходить из предположения, что скорости водной и воздушной фазы равны друг другу, количество воздушной фазы мало, т. е. воспользуемся гомогенной моделью.

### **Основные теоретические аспекты определения потерь давления при движении двухфазной смеси**

Исследования движения двухфазных потоков в основном производились для смеси воды и пара [4]. Проведем аналогию для случая потока воды и воздуха в части движения двухфазной среды по трубопроводам с целью определения потерь давления.

Обозначим объемное воздуходоержание  $\varphi$ , его можно определить по формуле

$$\varphi = Q'' / Q_{\text{см}},$$

где  $Q''$  – осредненное по времени значение объемного расхода воздуха;  $Q_{см}$  – осредненное по времени значение объемного расхода смеси.

Режим течения, при котором воздушная фаза распределена по всему сечению канала, характерен для небольшого значения объемного воздухоподдержания  $\phi$ . Как оговорено ранее, к такому состоянию смеси можно отнести пузырьковый, пенный или эмульсионный режимы.

В случае, когда мойка внутренних поверхностей трубопроводов производится двухфазной средой, состоящей из смеси воды и воздуха, полный перепад давления в направлении оси канала для одномерного двухфазного потока, согласно с исследованиями [5], можно определить в общем виде:

$$-\frac{dp_{см}}{dx} = \frac{G_{см}}{S} \frac{d(v''k + v'(1-k))}{dx} + \frac{4\tau_{см}}{d_{вн}} + \rho_{\phi} g_x, \quad (1)$$

где  $G_{см}$  – расход смеси воды и воздуха, кг/с;  $\tau_{см}$  – касательное напряжение на стенке канала при течении смеси воды и воздуха, Па;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр канала, м;  $v'$  – скорость движения жидкой (водяной) фазы, м/с;  $v''$  – скорость движения газовой (воздушной) фазы, м/с;  $k$  – массовое расходное воздухоподдержание, которое можно определить как отношение расхода воздуха к общему расходу смеси:

$$k = G'' / G_{см}. \quad (2)$$

Значение массового расхода смеси  $G_{см} = G'' + G'$  можно выразить через секундные массы газовой и жидкостной фазы:  $G'' = \rho Q''$  и  $G' = \rho Q'$ .

Плотность смеси  $\rho_{\phi}$ , кг/м<sup>3</sup>, можно определить, зная исходные плотности газовой (воздушной) и жидкой (водяной) фазы  $\rho''$  и  $\rho'$ , по формуле

$$\rho_{\phi} = \rho''\phi + \rho'(1 - \phi). \quad (3)$$

Проекция ускорения свободного падения  $g_x$  на ось  $x$  для горизонтально расположенных труб – 0, для вертикальных – 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Таким образом, получаем уравнение, в котором каждое слагаемое отвечает за вклад определенных значений в двухфазном потоке на потери давления при движении смеси по каналу. При этом первое слагаемое правой части уравнения (1) отражает потери давления, возникающие за счет ускорения потока, зависящего от воздухоподдержания  $k$ , либо с изменением площади поперечного сечения канала  $S$ . При отсутствии теплообмена в канале постоянного сечения этим слагаемым уравнения (1) можно пренебречь.

Второе и третье слагаемое в правой части уравнения (1) выражают потери давления на трение и на работу, совершаемую потоком воздуховодной смеси против массовых сил. Последнее слага-

емое, определяемое работой смеси против массовых сил, в большей степени зависит от ориентации участка трубопровода в пространстве (горизонтальный или вертикальный).

При скоростях, обычных для промывки трубопроводных систем, основной вклад в гидравлическое сопротивление вносят потери на трение, обусловленные касательными напряжениями на стенке трубопровода  $\tau_{см}$ .

Для определения и расчета касательных напряжений  $\tau_{см}$  в случае движения по трубопроводу наиболее простой и понятный результат расчета касательных напряжений  $\tau_{см}$  дает применение гомогенной модели, при которой не существует разности между скоростями движения фаз. Предположим, что скорости движения жидкой и воздушной фаз одинаковы, а скорость движения смеси может быть определена как равная им:  $v'' = v' = v_{см}$ . Двухфазный смешанный поток воздуха и воды будем рассматривать как однородный поток жидкости плотностью  $\rho_{\phi}$  и средней скоростью течения  $v_{см}$ .

Определим взаимосвязь объемного  $\phi = Q'' / Q_{см}$  и массового  $k = G'' / G_{см}$  содержания воздуха [5]:

$$\phi = \frac{k}{k + \frac{\rho''}{\rho'}(1-k)}. \quad (4)$$

Для проведения расчета установим значение массового воздухоподдержания  $k$  в зависимости от  $\phi$ . Для расчета применялись значения: плотность газовой фазы  $\rho'' = 6,67$  кг/м<sup>3</sup> ( $p_{абс.см} = 6 \cdot 10^5$  Па,  $t = 40$  °С). Согласно (4) интересующее значение  $k = (G'' / G_{см}) \times 100$  % находится в диапазоне 0,054–0,056 % при  $\phi = Q'' / Q_{см} = 0,075$ –0,077 соответственно.

Для определения значения касательных напряжений  $\tau_{см}$  воспользуемся условием равновесия объема смеси в прямолинейном участке круглой трубы между сечениями 1-1 и 2-2:

$$\Delta p_{тр.см} = p_1 - p_2,$$

где  $\Delta p_{тр.см}$  – разница давлений в первом и последующем сечениях на расстоянии  $L$  друг от друга, равная потери давления за счет присутствия сил трения, следовательно, касательных напряжений  $\tau_{см}$ , Па.

Сила,  $N$ , возникающая со стороны смеси жидкости и газа в трубе, определяется как  $\Delta p_{тр.см} \Pi d_{вн}^2 / 4$ . Данная сила уравнивается со стороны стенок канала распределенными касательными напряжениями на участке трубы длиной  $L$ :  $\tau_{см} \Pi dL$ .

Из равенства сил определим:  $\Delta p_{тр.см} \Pi d_{вн}^2 / 4 = \tau_{см} \Pi dL$ ;

$$\tau_{см} = (\Delta p_{тр} / 4)(d_{вн} / L). \quad (5)$$

Используем известную из курса гидравлики общепринятую формулу

$$\Delta p_{\text{тр.см}} = (\lambda_{\text{см}} L / d_{\text{вн}}) \rho_{\text{ф}} (v_{\text{см}}^2 / 2), \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{см}}$  – коэффициент гидравлического трения смеси, который может быть определен для различных двухфазных режимов (пузырьковый, снарядный и т. д.).

Подставив (6) в (5), получим с учетом гомогенности модели смеси (поток воды с воздухом рассматривается как одно целое) плотностью  $\rho_{\text{ф}}$  и скоростью  $v_{\text{см}}$ :

$$\tau_{\text{см}} = (\lambda_{\text{см}} / 4) (\rho_{\text{ф}} v_{\text{см}}^2 / 2). \quad (7)$$

Используя выражение для  $\rho_{\text{ф}}$ , перепишем выражение (7) в следующем виде:

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\lambda_{\text{см}}}{4} \frac{\rho'}{\left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)k + 1} \frac{v_{\text{см}}^2}{2}. \quad (8)$$

Обозначим через  $v_0$  скорость движения потока, которая могла бы быть развита в случае, если бы ее массовый расход был бы равен расходу смеси  $G_{\text{см}}$ , а площадь сечения канала определяется через  $S$ , при плотности потока в канале  $\rho'$ , т. е.

$$v_0 = G_{\text{см}} / \rho' S.$$

Тогда  $v_0$  можно выразить через коэффициент  $\phi$  со скоростью  $v_{\text{см}}$ :

$$v_0 = \frac{\rho_{\text{ф}}}{\rho'} v_{\text{см}} = \frac{\frac{\rho'}{\left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)k + 1}}{\rho'} v_{\text{см}} = \frac{1}{\left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)k + 1} v_{\text{см}},$$

откуда выразим скорость  $v_{\text{см}}$ :

$$v_{\text{см}} = ((\rho' / \rho'' - 1)k + 1)v_0. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (8) с учетом выражения (9) для скорости  $v_{\text{см}}$ :

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\lambda_{\text{см}}}{4} \rho' \frac{v_0^2 \left( \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) k + 1 \right)}{2}.$$

Для определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{\text{см}}$  при различных режимах течения можно пользоваться такими же формулами, как и для однофазного потока. Коэффициент гидравлического трения зависит от числа Рейнольдса, и его можно приближенно определить по скорости  $v_0$ :

$$\text{Re}_{\text{см}} = \rho' v_0 d_{\text{вн}} / \mu'.$$

При турбулентном течении и средней скорости жидкости, характерных для промывочного потока, коэффициент гидравлического трения будет опре-

деляться по формулам для переходных труб, т. е. по формуле Альтшуля [6] с учетом шероховатости  $\Delta_{\text{ш}}$ :

$$\lambda_{\text{см}} = 0,11 \left( (\Delta_{\text{ш}} / d_{\text{вн}}) + (68 / \text{Re}_{\text{см}}) \right)^{0,25}.$$

Преобразуем формулу (1) с учетом вышеизложенного:

$$-dp_{\text{см}} = (4\tau_{\text{см}} / d_{\text{вн}}) dx + \rho_{\text{ф}} g_x dx.$$

Таким образом, получаем формулу для определения потерь давления, связывающую воздухосодержание, плотности воды и воздуха, характеристики канала, промываемого двухфазным потоком:

$$\Delta p_{\text{см}} = \frac{0,11 \left( \frac{\Delta_{\text{ш}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{68}{\text{Re}_{\text{см}}} \right)^{0,25}}{d_{\text{вн}}} \times \times \rho' \frac{v_0^2 \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) k + 1}{2} L + \rho_{\text{ф}} g_x L. \quad (10)$$

Первое слагаемое формулы (10) зависит от потерь давления на трение, а второе – от ориентации трубы в пространстве при движении двухфазного потока.

Расчет проведем для участка трубопровода длиной  $L = 1$  м,  $d_{\text{вн}} = 0,125$  м, коэффициентом шероховатости стенок трубы  $\Delta_{\text{ш}} = 0,1$  мм [6], коэффициентом динамической вязкости жидкостной фазы  $\mu' = 1,03 \cdot 10^{-3}$  Па·с [7], плотностью жидкостной фазы  $\rho' = 992,21$  кг/м<sup>3</sup>, плотностью газовой (воздушной) фазы  $\rho'' = 6,674$  кг/м<sup>3</sup> (абсолютное давление в промывочной смеси –  $6 \cdot 10^5$  Па). При проведении расчета массовый расход воды примем  $G' = 42,595$  кг/с.

Массовый расход смеси определим по формуле  $G_{\text{см}} = G' + G''$ . Так как  $G_{\text{см}}$  зависит от воздухосодержания  $k$ , согласно (2) получаем:

$$G'' = kG' / 1 - k = \rho' k Q' / 1 - k.$$

Плотность смеси, определяемая по (3), зависит не только от воздухосодержания  $k$ , но и от плотности воздушной фазы в потоке смеси.

Для получения упрощенной формулы определения удельных потерь давления на трение в круглой трубе в двухфазном потоке в зависимости от воздухосодержания и скорости движения потока перепишем формулу (10) без учета последнего слагаемого:

$$\Delta p_{\text{тр.см}} / L = K_{\text{сопр.см}} v_0^2 [(\rho' / \rho'' - 1)k + 1]. \quad (11)$$

В формуле (11) общий коэффициент сопротивления смеси жидкости и газа  $K_{\text{сопр.см}} = (0,11 ((\Delta_{\text{ш}} / d_{\text{вн}}) + (68 / \text{Re}_{\text{см}}))^{0,25}) / 2d_{\text{вн}}\rho'$  определяется в зависимости от режима течения (числа Re), внутреннего

диаметра трубопровода, плотности жидкости (воды). Анализ формулы (11) подтверждает, что потери давления линейно возрастают в зависимости от воздухо содержания и квадратично зависят от скорости потока в трубопроводе. Кроме того, потери давления на трение будут уменьшаться по мере возрастания плотности воздушной фазы в смеси.

Расчет по рекомендации [5] для двухфазного потока проводится для средней скорости смеси  $v_0$  и определяется по формуле  $v_0 = G_{см} / \rho'S$ . Понятно, что расчетная скорость будет зависеть от воздухо-

содержания  $k$ . Проведены расчеты по формуле (10) для определения потерь давления для участков трубопроводов длиной  $L = 1$  м, различно ориентированных в пространстве.

### Результаты теоретического исследования определения потерь давления при движении двухфазной смеси в трубопроводе

Этапы определения потерь давления представлены в таблице.

#### Этапы определения потерь давления

#### Stages of determining pressure losses

Параметры	Значения		
Объемное воздухо содержание $\phi$	0	0,035	0,077
Воздухо содержание $k = G'' / G_{см}$	0	0,000244	0,000561
Массовый расход воды $G'$ , кг/с	42,595	42,595	42,595
Массовый расход воздуха $G''$ , кг/с	0	0,010	0,024
Массовый расход смеси воды и воздуха $G_{см} = G'' + G'$ , кг/с	42,595	42,606	42,619
Плотность воды $\rho'$ (при $t = 40$ °C), кг/м <sup>3</sup>	992,210		
Плотность воздуха $\rho''$ ( $p_{абс} = 6 \cdot 10^5$ Па при $t = 40$ °C), кг/м <sup>3</sup>	6,674		
Расходная плотность смеси $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	992,21	957,72	916,32
Скорость движения потока $v_0 = G_{см} / (\rho'S)$ , м/с	3,5	3,501	3,502
Число Re смеси $Re_{см} = \rho'v_0d_{вн} / \mu'$	421 448	421 551	421 685
Коэффициент гидравлического трения смеси $\lambda_{см}$	0,019	0,019	0,019
<i>Потери давления, приходящиеся на 1 м длины</i>			
Горизонтальные участки трубы $\Delta p_{см} / L$ , Па/м	942	976	1 021
Вертикальные участки трубы с восходящим потоком $\Delta p_{см} / L$ , Па/м	10 675	10 371	10 010
<i>Относительное значение увеличения/уменьшения потерь на транспортировку двухфазного потока по сравнению с аналогичным однофазным (эквивалентный массовый расход)</i>			
Горизонтальные участки трубы $(\Delta p_{см} - \Delta p_{в} / \Delta p_{в})100\%$	–	3,6	8,4
Вертикальные участки трубы с восходящим потоком $(\Delta p_{см} - \Delta p_{в} / \Delta p_{в})100\%$	–	–2,8	–6,2

#### Заключение

Таким образом, при полном отсутствии воздуха  $\phi = 0$  в промывочном потоке потери минимальны и составляют на горизонтальном участке 942 Па/м. С ростом содержания воздуха в промывочном потоке воды потери давления на трение линейно возрастают. Согласно гомогенной модели потери давления на трение в двухфазном потоке с увеличени-

ем воздухо содержания растут линейно, что объясняется увеличивающимся внутренним трением в двухфазном потоке, связанным с необходимостью переноса потоком жидкости воздушной фазы. Потери давления на вертикальных участках, наоборот, незначительно уменьшаются, что объясняется падением плотности смеси.

#### Список источников

1. Соловьев Б. В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений. Л.: Судостроение, 1977. 75 с.
2. Лебедева Е. Г. Интенсификация технологии промывки судовых систем пульсирующим двухфазным потоком: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 169 с.
3. Канаев Д. Н., Лямин П. Л., Лебедева Е. Г., Александров Н. И. Новые средства технологического оснащения для промывки судовых водяных систем и оборудования // Междунар. науч.-исслед. журн. 2014. № 2-1 (21). С. 93–95.
4. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1987. 327 с.
5. Кордон М. Я., Симакин В. И., Горешник И. Д. Гидравлика: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2005. 192 с.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
7. Физические величины: справ. / под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

### References

1. Solov'ev B. V. *Ochistka sudovykh sistem ot tekhnologicheskikh zagriaznenii* [Purification of ship systems from technological pollution]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 75 p.
2. Lebedeva E. G. *Intensifikatsiia tekhnologii promyivki sudovykh sistem pul'siruiushchim dvukhfaznym potokom: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Intensification of technology of flushing ship systems with pulsating two-phase flow: Diss. ... Cand. Tech. Sci.]. Saint-Petersburg, 2012. 169 p.
3. Kanaev D. N., Liamin P. L., Lebedeva E. G., Aleksandrov N. I. *Novye sredstva tekhnologicheskogo osnashcheniia dlia promyivki sudovykh vodianykh sistem i oborudovaniia* [New means of technological equipment for washing ship water systems and equipment]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2014, no. 2-1 (21), pp. 93-95.
4. Deich M. E., Filippov G. A. *Dvukhfaznye techeniia v elementakh teploenergeticheskogo oborudovaniia* [Two-phase flows in elements of heat power equipment]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 327 p.
5. Kordon M. Ia., Simakin V. I., Goreshnik I. D. *Gidravlika: uchebnoe posobie* [Hydraulics: textbook]. Penza, Izd-vo PGU, 2005. 192 p.
6. Idel'chik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam* [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p.
7. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical quantities: reference book]. Pod redaktsiei I. S. Grigor'eva, E. Z. Meilikhova. M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 p.

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 15.06.2023; принята к публикации 04.08.2023  
The article was submitted 04.05.2023; approved after reviewing 15.06.2023; accepted for publication 04.08.2023

### Информация об авторе / Information about the author

**Елена Геннадьевна Лебедева** — кандидат технических наук; доцент кафедры кораблестроения; Филиал Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова; eg.lebedeva@narfu.ru

**Elena G. Lebedeva** — Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding; Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, branch; eg.lebedeva@narfu.ru

