

## Исследование процесса фильтрации морской воды насыпными фильтрами с применением вибрации

Александра И. Крикун<sup>1</sup> aleksa13@list.ru  
Сергей Д. Руднев<sup>2</sup> sdrudnev@yandex.ru

<sup>1</sup> Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, ул. Луговая, 52Б, г. Владивосток, 690087, Россия

<sup>2</sup> Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия

**Реферат.** Для очистки технологической воды от примесей на рыбоперерабатывающих предприятиях в настоящее время используется большое количество фильтрующих устройств, отличающихся своими конструктивными параметрами (сетчатые, тканые, дисковые и др.). Однако на практике, данные фильтрующие устройства, в основном применяются в качестве первой ступени водоочистки, поскольку не способны обеспечить достаточного качества фильтрата. Наиболее результативными, как показывают многочисленные исследования ученых нашей страны и мира, являются насыпные зернистые фильтры. К их основным достоинствам перед другими устройствами аналогичного назначения относятся: имеют простую и надежную конструкцию; устойчивы к агрессивным условиям эксплуатации; способны эффективно очищать морскую воду от механических примесей при относительно небольшом давлении; наиболее экономичны; имеют фильтрующую загрузку способную длительное время работать без регенерации (ориентировочный срок эксплуатации одной зернистой загрузки составляет от 3 до 5 лет) и др. В данной статье было исследовано влияние вибрационных воздействий на процесс фильтрации морской воды в спроектированной и изготовленной фильтровальной установке с насыпными зернистыми материалами природного и искусственного происхождения, конструкция которой защищена двумя патентами на полезную модель. Представлены результаты исследования, выявляющие степень влияния интенсивности вибрации перфорированной разделительной перегородки на состояние насыпных зернистых материалов, расположенных на ней (сегрегация по крупности, послойная виброукладка, уплотнение или разрыхление слоя сыпучей среды). Экспериментально установлены зависимости пропускной способности фильтрующей установки от амплитуды, частоты и коэффициента интенсивности вибрации, позволившие установить рациональные параметры вибрации перфорированной перегородки, при которых происходит уплотнение фильтрующего слоя, сокращается порозность загрузки, не происходит срыв осадка в фильтрат.

**Ключевые слова:** исследование, морская вода, технологические нужды, фильтрация, насыпные фильтры, вибрация, интенсивность, рациональные параметры

## Research of process of filtration of salt water by bulk filters with the use of vibration

Aleksandra I. Krikun<sup>1</sup> aleksa13@list.ru  
Sergei D. Rudnev<sup>2</sup> sdrudnev@yandex.ru

<sup>1</sup> Far eastern state technical fishery university, Lugovaya str., 52B, Vladivostok, 690087, Russia

<sup>2</sup> Kemerovo state university, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia

**Summary.** For the purification of process water from impurities at fish processing plants, a large number of filtering devices are currently used, differing in their design parameters (mesh, woven, disco, etc.). However, in practice, these filtering devices are mainly used as the first stage of water treatment, since they can not provide sufficient quality of the filtrate. The most effective, as numerous studies of scientists of our country and the world show, are bulk granular filters. Their main advantages over other devices of similar designation are: they have a simple and reliable design; resistant to aggressive operating conditions; they are capable of effectively purifying seawater from mechanical impurities at relatively low pressure; most economical; have a filtering load capable of a long time to work without regeneration (the approximate service life of a grain-loading is 3 to 5 years) etc. In this article, the influence of vibration effects on the filtration of sea water in a designed and fabricated filter unit with bulk granular materials of natural and artificial origin, the design of which is protected by two patents for the utility model. The results of the study are presented, revealing the degree of influence of the intensity of vibration of the perforated partitioning wall on the state of bulk granular materials located on it (segregation by size, stratified vibro-packing, compacting or loosening of a layer of granular material). The dependences of the capacity of the filtration unit on the amplitude, frequency and the vibration intensity factor have been experimentally established, which made it possible to establish rational vibration parameters of the perforated septum, under which the filtering layer becomes denser, the porosity of the loading decreases, and the precipitate does not break into the filtrate.

**Keywords:** research, sea water, technological needs, filtration, bulk filters, vibration, intensity, rational parameters

### Введение

Функционирование береговых рыбоперерабатывающих предприятий невозможно без использования морской воды в технологических операциях при мойке и разделке рыбы. Целесообразность применения воды, взятой из естественной среды обитания объектов переработки, обоснована не только экономическими соображениями, но и с позиций сохранения

естественного вкуса продукции. Любая водоподготовка начинается с процесса очистки от механических загрязнений – фильтрации. Количество воды, используемой для технологических целей по оценкам [3] составляет от 6,7 до 14,5 м<sup>3</sup>/т. Такие объемы использования представляют проблему совершенствования процесса фильтрации морской воды актуальной.

Для цитирования

Крикун А.И., Руднев С.Д. Исследование процесса фильтрации морской воды насыпными фильтрами с применением вибрации // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 50–54. doi:10.20914/2310-1202-2018-1-50-54

For citation

Krikun A.I., Rudnev S.D. Research of process of filtration of salt water by bulk filters with the use of vibration. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 50–54. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-1-50-54

Литературный обзор по гидродинамическим процессам показал, что вибрационные воздействия ускоряют и улучшают технологические свойства технических систем. Это подтверждено исследованиями ведущих ученых в области вибрации в технике, таких как И.И. Блехман, Л.И. Блехман, А.Б. Лисицын, И.Ф. Гончаревичи др. [4–8].

В частности, при вибрации сосуда с жидкостью, в которой размещен сыпучий материал, более плотный, чем жидкость, наблюдаются своеобразные нелинейные эффекты, такие, как засасывание пузырьков газа вглубь сосуда и наоборот, всплывание тел более тяжёлых, чем жидкость [8–11]. Проявляется «аномальное» поведение полидисперсной сыпучей среды в жидкости: она эволюционирует к состояниям, соответствующим максимальным или близким к ним значениям потенциальной энергии. При определенных значениях интенсивности вибрации происходит сегрегация частиц по размерам. Тяжелые крупные частицы перемещаются в верхние слои, тогда как «мелочь» формирует уплотненный слой в нижней части. Эти и подобные явления рассматривались во многих публикациях, принадлежащих, в том числе, выдающимся учёным [4–20]. Настоящая работа развивает и дополняет эти исследования.

Условия всплывания частиц, более плотных, чем жидкость были определены И.И. Блехманом [21]. Если столб жидкости равномерно насыщен пузырьками воздуха, то условием всплывания частицы, лежащей на дне сосуда, является неравенство (1):

$$\frac{1}{2} \frac{\omega^2 \kappa}{\omega^2 + k_1^2} \cdot \frac{A\omega}{c} \cdot \frac{A\omega^2}{g} \operatorname{tg} \frac{H\omega}{c} < -1 \quad (1)$$

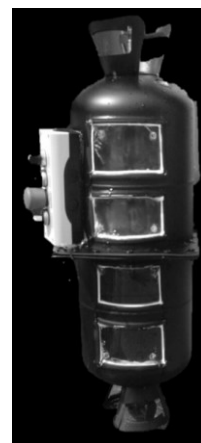
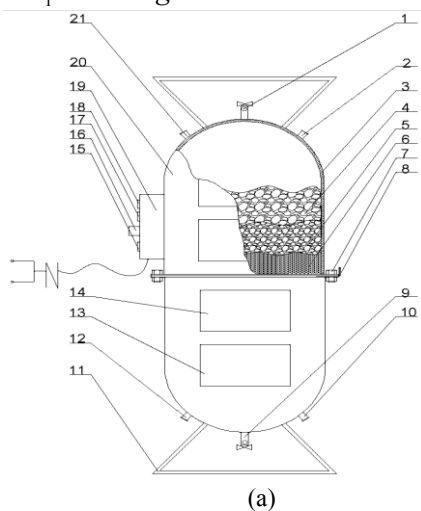


Рисунок 1. Фильтрующая установка: (а) принципиальная схема; 1, 9 – патрубки подвода и отвода морской воды; 2, 21 – симметричные патрубки отвода промывной воды; 3 – цилиндрический корпус; 4, 5, 6 – слои зернистых материалов; 7 – эксцентриковые вибромоторы; 8 – уплотнитель; 10, 12 – симметричные патрубки подвода промывной воды; 11 – подставка; 13, 20 – нижний и верхний резервуары; 14 – смотровые окна; 15, 16 – кнопки пуска и остановки; 17 – потенциометр; 18 – кнопка включения освещения; 19 – пульт управления; (б) общий вид

Figure 1. Filtration unit: (a) a schematic diagram; 1, 9 – pipes for supply and removal of sea water; 2, 21 – symmetric branch pipes of the rinse water outlet; 3 – cylindrical body; 4, 5, 6 – layers of granular materials; 7 – eccentric vibration motors; 8 – the sealant; 10, 12 – symmetrical connections of the wash water supply; 11 – stand; 13, 20 – lower and upper tanks; 14 – observation windows; 15, 16 – start and stop buttons; 17 – potentiometer; 18 – light switch; 19 – control panel; (b) main view

$$k_1 = k / (\rho + \frac{1}{2} \rho_0) v, \quad \kappa = (\rho - \rho_0) / (\rho + \frac{1}{2} \rho_0) \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота колебаний системы;  $A$  – амплитуда колебаний;  $v$  – объём частицы,  $\rho$  – плотность частицы;  $\rho_0$  – плотность среды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H$  – высота столба жидкости.

Теоретическое обоснование «всплывания» твердых тел в жидкости под действием вибрации подвигло на решение задачи исследования влияния вибрационных воздействий на процесс фильтрования морской воды насыпными фильтрами.

### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступает спроектированная и изготовленная фильтровальная установка, принципиальная схема и общий вид которой представлены на рисунке 1. Перфорированная разделительная перегородка приводится в вибрационное состояние посредством эксцентрикового вибровозбудителя. Его применение обусловлено необходимостью обеспечения постоянной амплитуды колебаний, не зависящих от технологического сопротивления. На решетку засыпались следующие зернистые материалы: биокерамика  $(10,0 \div 12,5) \times 10^{-3}$  м, цеолиты  $(18,0 \div 20,0) \times 10^{-3}$  м и морской песок  $(0,7 \div 1,0) \times 10^{-3}$  м. Перфорированной разделительной перегородке передавалась вибрация с регулируемой амплитудой – от 1 до 5,5 мм, и частотой – от 25 до 55 Гц. Регулирование частоты вибрации перфорированной перегородки эксцентриковым виброприводом обеспечивалась потенциометром, встроенным в пульт управления.

Состояние слоя сыпучей среды наблюдалось визуально. При малых значениях интенсивности вибрации происходила сегрегация по крупности и послойная виброукладка зернистого материала по размерным фракциям (крупные – сверху, мелкие – снизу) [3]. Затем интенсивность вибрации снижали, происходило уплотнение слоя сыпучей среды. Далее проводили фильтрацию морской воды через полученный слой.

В соответствии с действующими стандартами [22–25] амплитуда и частота колебаний разделительной перфорированной перегородки определялись при помощи портативного виброметра с памятью PCE-VT 2800 и прибором Вибротест-МГ4.01.

### Результаты и их обсуждение

На рисунках 2–4 представлены зависимости пропускной способности фильтрующего устройства от амплитуды ( $A$ , м), частоты вибрации ( $f$ , Гц) и коэффициента интенсивности вибрации ( $\lambda$ ).

Анализ кривых, а также данных, полученные при эксплуатации фильтрующей установки [3], позволили установить параметры вибрации перфорированной перегородки, при которых происходит уплотнение фильтрующего слоя, сокращается порозность загрузки, не происходит срыв осадка в фильтрат (на графиках отмечен – I); амплитуда колебаний –  $A = (1 \div 2,5) \times 10^{-3}$  м, частота колебаний –  $f = 25 \div 35$  Гц. При амплитуде колебаний –  $A \geq 3,1 \times 10^{-3}$  м, частоте колебаний –  $f \geq 39$  Гц происходит разрыхление фильтрующего слоя и срыв осадка в фильтрат (критические показатели выделены – III, пороговые – II) [3].

В результате были получены следующие данные:

при  $A = (1 \div 2,5) \times 10^{-3}$  м,  $f = 25 \div 35$  Гц:  $a = 62,5 \times 10^{-2} \div 3,06$  м/с<sup>2</sup>,  $\lambda = (6,37 \div 31,2) \times 10^{-2}$ ;

при  $A = (2,6 \div 3,0) \times 10^{-3}$  м,  $f = 36 \div 38$  Гц:  $a = 3,37 \div 4,33$  м/с<sup>2</sup>,  $\lambda = (34,35 \div 44,16) \times 10^{-2}$ ;

при  $A = (3,1 \div 5,1) \times 10^{-3}$  м,  $f = 39 \div 50$  Гц:  $a = 4,72 \div 12,75$ ;  $\lambda = 48,06 \times 10^{-2} \div 1,3$ .

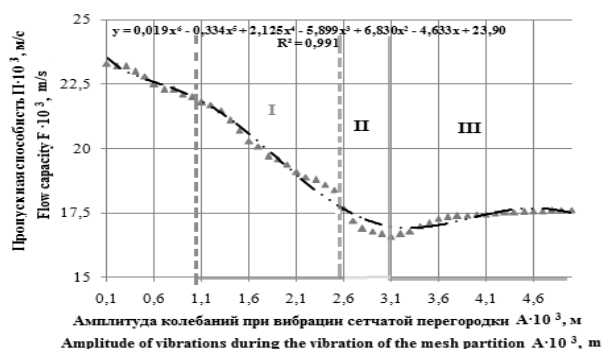


Рисунок 2. Зависимость пропускной способности от амплитуды колебаний

Figure 2. Dependence of throughput on the amplitude of oscillations

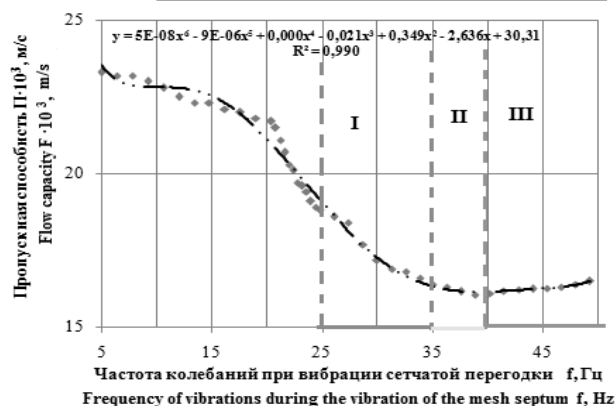


Рисунок 3. Зависимость пропускной способности от частоты колебаний

Figure 3. Dependence of throughput on frequency of oscillations

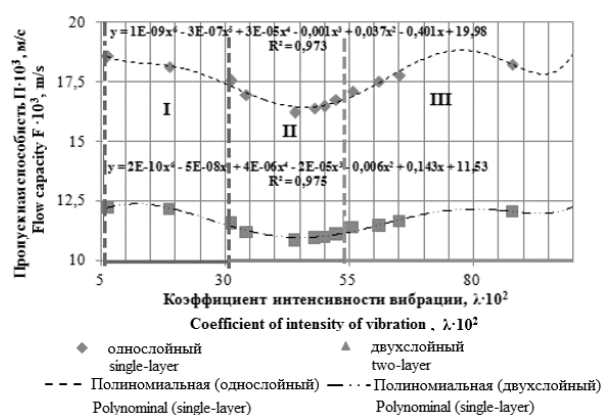


Рисунок 4. Зависимость пропускной способности от коэффициента интенсивности вибрации

Figure 4. Dependence of throughput on the vibration intensity factor

Коэффициент интенсивности вибрации  $\lambda < 1$  [4, 5], что подтверждает режим *виброуплотнения*. Установлено, что при коэффициенте интенсивности вибрации,  $\lambda = (6,37 \div 31,2) \times 10^{-2}$  (на графике – I), несмотря на незначительное снижение пропускной способности (на  $5 \div 5,5\%$ ), наблюдалось заметное сокращение примесей в фильтрате (на  $13,3 \div 18,6\%$ ), на это могло повлиять *виброуплотнение* слоя, соответственно сокращение порозности фильтрующего материала (качество фильтрата повышалось); при коэффициенте интенсивности вибрации,  $\lambda = (31,3 \div 44,16) \times 10^{-2}$  (на графике – II), пропускная способность снижалась до  $8,66 \div 12,7\%$ , однако наблюдался срыв зерен в фильтрат до  $3,5\%$ , при  $\lambda = (44,16 \div 48,05) \times 10^{-2}$  – до  $4,7\%$ ; при коэффициенте интенсивности вибрации,  $\lambda \leq 48,06 \times 10^{-2}$  (на графике – III), пропускная способность стала возрастать, срыв зерен в фильтрат увеличился до  $9,5\%$ , что снижает качество фильтрата, на это могло повлиять разрыхление слоя и соответственно увеличение порозности [3].

На рисунке 5 представлена зависимость пропускной способности фильтрующего устройства от содержания механических примесей в фильтрате (без вибрации и при вибрации:  $A = (1 \div 2,5) \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $f = 25 \div 35 \text{ Гц}$ ). При этом использовались идентичные зернистые материалы, при равной толщине слоя.

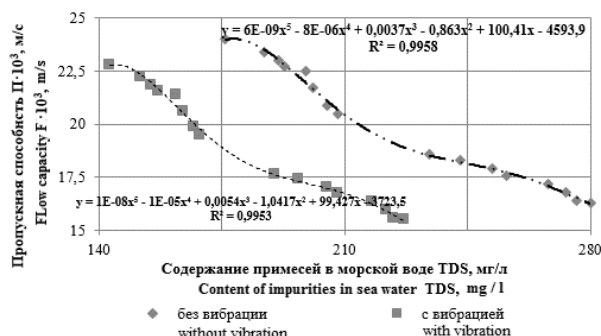


Рисунок 5. График зависимости пропускной способности от содержания примесей (с и без вибрации)

Figure 5. Graph of the dependence of throughput on the content of impurities (with and without vibration)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 142257, RU, U1 B01D 24/00 (2006.01). Устройство для очистки морской воды / А.И. Фёдорова (Крикун), Д.А. Крикун, С.Д. Угрюмова. №2013149736/05, Опубл. 27.06.2014, Бюлл. № 18.
2. Пат. № 155961, RU, U1 C02F 1/00 (2006/01), B01D 24/12 (2006.01). Устройство для очистки морской воды / А.И. Фёдорова (Крикун), Д.А. Крикун, С.Д. Угрюмова. №2015105583/05, Опубл. 20.10.2015, Бюлл. № 29.
3. Крикун А.И. Совершенствование процесса фильтрования воды на рыбоперерабатывающих предприятиях. Владивосток, 2017. 219 с.
4. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.
5. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 412 с.
6. Блехман И.И., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Индейцев Д.А. и др. О влиянии вибрации на течение жидкости по лотку и сопутствующих нелинейных эффектах // Обогащение руд. 2011. № 4. С. 17–22.
7. Гончаревич И.Ф. Вибрация – нестандартный путь: вибрация в природе и технике. М.: Наука, 1986. 209 с.
8. Лисицын А.Б., Решетов И.В. Исследование диффузионных процессов и технологических свойств свинины при вибрационном посоле // Пищевая промышленность. 2011. № 1. С. 24–27.
9. Абиев Р.Ш. Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах. СПб., 2000. 366 с.
10. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Дербенёв А.В., Прохоров Ю.П. Теоретическое и экспериментальное исследование особенностей распространения низкочастотных волн давления в жидкости с пузырьками газа // Труды Калужского научного центра. 2005. № 8 (02). С. 88–104.
11. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics: A General Approach to Solving Nonlinear Problems. In «Mechanical Vibration: Where do we stand?». New York: Springer, 2006. P. 189–247.
12. King L.V. On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres // Proc. Roy. Soc. 1934. V. 147. № 861. P. 212–240.
13. Yosioka K., Kawasima G. Acoustic radiation pressure on compressible spheres // Acustica. 1955. V.5. P. 167–173.

#### Заключение

Полученные экспериментальные значения амплитуды и частоты, при которой происходила сегрегация по крупности и послойная виброукладка полидисперсной сыпучей среды в жидкости, соответствуют условию всплывания частицы, лежащей на дне сосуда, представленной формулой [1], что подтверждает теоретическое обоснование, полученное И.И. Блехманом. С практической стороны вопроса анализ экспериментальных данных позволил установить, что при использовании вибрации в формировании насыпного слоя фильтра хоть и наблюдается незначительное уменьшение пропускной способности ( $\approx 5\%$ ), но количество примесей в фильтрате значительно уменьшается ( $\approx 20\%$ ), тем самым повышается качество фильтрата. Кроме того, экспериментально установлено, что использование вибрации позволяет ускорить выход фильтрующей загрузки в рабочее состояние.

14. Bleich H.H. Effect of vibrations on the motion of small gas bubbles in a liquid // Jet propulsion. 1956. V. 26. № 11. P. 958–963.
15. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, Физматлит, 1966. 520 с.
16. Григорян С.С., Якимов Ю.Л., Апштейн Э.З. Поведение пузырьков воздуха в жидкости при вибрации // Fluid dynamic transactions. 1967. V.3. P. 713–719.
17. Бэтчелор Г.К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости // Механика. 1968. Т. 109. № 3. С. 65–84.
18. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Динамика частиц при воздействии вибраций. Киев: Наукова думка, 1975. 168 с.
19. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 359 с.
20. Кубенко В.Д., Лакиза В.Д., Павловский В.С., Пельх Н.А. Динамика упругогазожидкостных систем при вибрационных воздействиях. Киев: Наукова Думка, 1988. 256 с.
21. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б. и др. «Аномальные» явления в жидкости при действии вибрации // Доклады академии наук. Механика. 2008. Т. 422. № 4. С. 470–474.
22. ГОСТ 16819-71. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
23. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 28 с.
24. ГОСТ 24347-80. Вибрация. Обозначения и единицы величин. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. 6 с.
25. ГОСТ Р 52545.2-2012 (ИСО 15242-2:2004). Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 2. Радиальные и радиально-упорные шариковые подшипники. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

#### REFERENCES

1. Fedorova (Krikun) A.I., Krikun D.A., Ugryumova S.D. Ustroistvo dlya ochistki morskoi vody [Device for cleaning sea water] Patent RF, no. 142257, 2014. (in Russian).

2 Fedorova (Krikun) A.I., Krikun D.A., Ugryumova S.D. Ustroistvo dlya ochistki morskoi vody [Device for cleaning sea water] Patent RF, no. 155961, 2015. (in Russian).

3 Krikun A.I. Sovershenstvovanie protsessa fil'trovaniya vody [Perfection of the process of water filtration at fish processing plants] Vladivostok, 2017. 219 p. (in Russian)

4 Blekhman I.I. Vibratsionnaya mekhanika [Vibration mechanics] Moscow, Fizmatlit, 1994. 400 p. (in Russian)

5 Blekhman I.I., Dzhaneldze G.Yu. Vibratsionnoe peremeshcheie [Vibrational movement] Moscow, Nauka, 1964. 412 p. (in Russian)

6 Blekhman I.I., Blekhman L.I., Vasilkov V.B., Indeytsev D.A. et al. On the influence of vibration on the flow of liquid through the tray and the attendant nonlinear effects. *Obogashchenie rud* [Enrichment of Ores] 2011. – no. 4. pp. 17–22. (in Russian)

7 Goncharevich I.F. Vibratsiya – nestandartnyi put' [Vibration is a non-standard way: vibration in nature and technology] Moscow, Nauka, 1986. 209 p. (in Russian)

8 Lisitsyn A.B., Reshetov I.V. Investigation of diffusion processes and technological properties of pork with a vibrating amalgamation. *Pishchevaya promyshlennost'* [The food industry] 2011. no. 1. pp. 24–27. (in Russian)

9 Abiev R.Sh. Rezonansnaya apparatura dlya potsessov [Resonant equipment for processes in liquid-phase systems] Saint-Petersburg, 2000. 366 p. (in Russian)

10 Fedotovskiy V.S., Vereshchagina T.N., Derbenev A.V., Prokhorov Yu.P. Theoretical and experimental study of the propagation of low-frequency pressure waves in liquids with gas bubbles. *Trudy Kaluzhskogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Kaluga Scientific Center] 2005. № 8(02). pp. 88–104. (in Russian)

11 Blekhman I.I. Vibrational Mechanics: A General Approach to Solving Nonlinear Problems. In «Mechanical Vibration: Where do we stand?». New York, Springer, 2006. pp. 189–247.

12 King L.V. On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres. *Proc. Roy. Soc.* 1934. vol. 147. no. 861. pp. 212–240.

13 Yosioka K., Kawasima G. Acoustic radiation pressure on the compressible spheres. *Acustica*. 1955. vol. 5. pp. 167–173.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александра И. Крикун** к.т.н., ст. преподаватель, кафедра технологических машин и оборудования, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, ул. Луговая, 52Б, г. Владивосток, 690087, Россия, aleksa13@list.ru

**Сергей Д. Руднев** д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов технологических систем, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, sdrudnev@yandex.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

**Александра И. Крикун** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, написала рукопись, несет ответственность за плагиат

**Сергей Д. Руднев** консультация в ходе исследования, корректировал рукопись до подачи в редакцию

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 13.12.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 16.01.2018

14 Bleich H.H. Effect of vibrations on the motion of small gas bubbles in a liquid. *Jet propulsion*. 1956. vol. 26, no. 11. pp. 958–963.

15 Zarembo L., Krasilnikov V. Vvedenie v nelineinuyu akustiku [Introduction to nonlinear acoustics] Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1966. 520 p. (in Russian)

16 Grigoryan S.S., Yakimov Yu.L., Apshtein E.Z. Behavior of air bubbles in a fluid during vibration. *Fluid dynamics transactions*. 1967. vol. 3. pp. 713–719. (in Russian)

17 Batchelor G.K. Compression waves in a suspension of gas bubbles in a liquid. *Mekhanika* [Mechanics] 1968. vol. 109. no. 3. pp. 65–84. (in Russian)

18 Ganiev R.F., Ukrainskii L.E. Dinamika chastits [Dynamics of particles when exposed to vibrations] Kiev. Naukova Dumka, 1975. 168 p. (in Russian)

19 Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh [Dynamics of multiphase media] Moscow, Nauka, 1987. 359 p. (in Russian)

20 Kubenko V.D., Lakiza V.D., Pavlovsky V.S., Pelykh N.A. Dinamika uprugogazozhidkostnykh sistem [Dynamics of elastic gas and liquid systems under vibrational influences] Kiev, Naukova Dumka, 1988. 256 p. (in Russian)

21 Blekhman I.I., Blekhman L.I., Weisberg L.A., Vasilkov V.B., Yakimova K.S. «Anomalous» phenomena in a fluid under the action of vibration. *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences. Mechanics] 2008. vol. 422. no. 4. pp. 470–474. (in Russian)

22 GOST 16819-71. Pribory vibroizmeritel'nye [State standard 16819-71. Vibration measuring instruments. Terms and Definitions] Moscow, Standartinform, 2010. 8 p. (in Russian).

23 GOST 24346-80. Vibratsiya [State standard 24346-80. Vibration. Terms and Definitions] Moscow, Standartinform, 2010. 28 p. (in Russian)

24 GOST 24347-80. Vibratsiya [State standard 24347-80. Vibration. Notation and units of quantities] Moscow, USSR State Committee for Standards, 1980. 6 p. (in Russian).

25 GOST R 52545.2-2012 (ISO 15242-2: 2004). Podshipniki kacheniya [State standard 52545.2-2012. Rolling bearings. Methods for measuring vibration. Part 2 Radial and angular contact ball bearings] Moscow, Standartinform, 2013. 16 p. (in Russian).

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Aleksandra I. Krikun** Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, technological machines and equipment department, Far eastern state technical fisheries university, Lugovaya Str., 52B, Vladivostok, 690087, Russia, aleksa13@list.ru

**Sergei D. Rudnev** Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatuses of technological systems department, Kemerovo state university, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia, sdrudnev@yandex.ru

#### CONTRIBUTION

**Aleksandra I. Krikun** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, wrote the manuscript, is responsible for plagiarism

**Sergei D. Rudnev** consultation during the study, correct manuscript before filing in editing

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 12.13.2017

ACCEPTED 1.16.2018