Для цитирования: Родионов В.П., Уколов А.И. Закономерности кавитационной эрозии конструкционных материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (3):39-47. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47

For citation: Rodionov V.P., Ukolov A.I. The laws of cavitation erosion of construction materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (3):39-47 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 532.5, 620.16

ББК 22.251, 30.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Родионов В.П.², Уколов А.И.¹

¹Керченский государственный морской технологический университет,
298309, г. Керчь, Республика Крым, ул. Орджоникидзе, 82, Россия,

²Армавирский механико-технологический институт (филиал),

²Кубанский государственный технологический университет,

²352905, ул. Кирова, 127, Армавир, Россия,

²350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия,

¹e-mail:ukolov_aleksei@mail.ru, ²e-mail:vik-rodio@yandex.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является поиск путей использования кавитационных эффектов в создании новых технологий и способов применения уникальных возможностей, возникающих в условиях развитой пузырьковой кавитации. В данной работе экспериментально исследовано эрозионное разрушение бетона, вызванное затопленной кавитационной струей, с целью выявления закономерностей глубины повреждения при различных режимах истечения. **Метод.** Испытания проведены на специально изготовленном экспериментальном стенде, содержащем приемный бак, из которого вода поступала в плунжерный насос с электродвигателем, и нагнеталась через шланг высокого давления в кавитатор. Критериями оценки интенсивности воздействия кавитации были выбраны зависимость глубины эрозионной зоны от времени испытаний и относительного расстояния до среза кавитатора ϵ при различных значениях входного давления P_0 . **Результат.** Представлены экспериментальные зависимости и аналитическая функция, полученные методом регрессионного анализа, скорости проникновения эрозии от времени и относительного расстояния между образцом и срезом кавитатора. Для выбранных параметров струйного истечения оптимальное расстояние от разрушаемой поверхности до кавитатора находится в диапазоне (10-40) ϵ и достигает максимального эффекта в интервале давлений 2,5-12,5 МПа в среднем за 30 с. Соотношения значений глубины и скорости проникновения эрозии при заданных параметрах давления P_0 , противодавления P_k , расстояния от среза кавитатора до поверхности, диаметра кавитатора, соответствуют максимальному эрозионному воздействию кавитации. **Вывод.** Исследование кавитационной эрозии открывает широкие возможности для оценки срока эксплуатации гидротехнических объектов, находящихся под активным воздействием затопленных кавитационных струй. Изменяя параметры струйного истечения можно получить различную интенсивность эрозионного разрушения материала для применения этого явления при очистке и измельчении бетона.

Ключевые слова: кавитация, эрозия, затопленная струя, глубина разрушения, бетон

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE MECHANICS

THE LAWS OF CAVITATION EROSION OF CONSTRUCTION MATERIALS

Victor P. Rodionov², Alexey I. Ukolov¹

¹Kerch State Marine Technological University,

¹82 Ordzhonikidze Str., Kerch 298309, Russia,

²Armavir Institute of Mechanics and Technology (Affiliated Branch)

of Kuban State Technological University,

²127 Kirova Str., Armavir 352905, Russia,

²2 Moskovskaya Str., Krasnodar 350072, Russia,

¹e-mail:ukolov_aleksei@mail.ru, ²e-mail:vik-rodio@yandex.ru

Abstract Objectives. The aim of the research is to find ways to use cavitation effects in the creation of new technologies and means of applying unique opportunities arising under conditions of developed bubble cavitation. Erosive destruction of concrete caused by a submerged cavitation jet is experimentally investigated in the present work in order to reveal the regularities of the extent of damage under different flow regimes. **Methods.** The tests were carried out using an specially constructed experimental bench, containing a receiving tank from which water was supplied to the plunger pump with an electric motor and pumped through a high-pressure hose into the cavitator. The criteria for assessing the intensity of cavitation impact were the dependence of the erosion zone depth on the test time and the relative distance to the cavitator's cut-off ε for different values of the inlet pressure P_0 . **Results.** Experimental dependences and the analytical function of erosion penetration rate over time, as well as the relative distance between the sample and the cavitator's cut-off, obtained using the regression analysis method, are presented. For the selected parameters of jet flow, the optimum distance from the surface to be destroyed to the cavitator lies across the range of (10-40) ε and reaches maximum effect across the pressure interval of 2.5-12.5 MPa on the average for 30 seconds. The relationship between the depth and the erosion penetration rate for given pressure parameters P_0 , the back pressure P_{10} , the distance from the cavitator's cut-off to the surface, as well as the cavitator's diameter, correspond to the maximum erosive effect of cavitation. **Conclusion.** The study of cavitation erosion opens up wide possibilities for estimating the service life of hydrotechnical facilities under the active influence of submerged cavitation jets. By varying the parameters of jet flow, it is possible to obtain a different intensity of erosive destruction of material for the application of this phenomenon in the purification and crushing of concrete.

Keywords: cavitation, erosion, submerged jet, depth of destruction, concrete

Введение. В настоящее время изучению кавитационной эрозии конструкционных материалов уделяется недостаточно внимания. Бетонные конструкции, естественные скальные породы, а также керамика, которая применяется в гидравлических устройствах, часто подвергаются воздействию кавитации [1-4]. Многим специалистам еще неизвестны материалы, способные противостоять воздействию кавитации, поэтому предпринимаются попытки прогнозирования кавитационного разрушения и увеличения их кавитационной стойкости [1,2, 5-11].

Другим важным аспектом исследования эрозийного разрушения конструкционных материалов является рециркуляция и повторное использование отходов строительного сноса [12]. Основные затраты при переработке бетона связаны с механическим измельчением для освобождения отдельных агрегатных частиц. Наиболее распространенные способы измельчения – роlikовое или ударное дробление. Однако рассматривается и возможность немеханического воздействия за счет звуковых импульсов, генерируемых под водой [13], или ударных волн [14].

Кавитационная затопленная струя является эффективным инструментом разрушения. Даже кратковременного кавитационного воздействия (5-10 с) достаточно для заметного повре-

ждения бетона [1,15]. Влияние кавитации на материал связано с генерацией ударных волн из-за симметричной имплозии пузырьков, образованием микроструй вследствие несимметричной имплозии, образованием микроструй из-за ударно-индуцированного разрушения пузырьков. Возможна суперпозиция нескольких отдельных механизмов, в результате которой давление, создаваемое во время имплозии и коллапса кавитационных пузырьков, составляет порядка 10^2 МПа [12].

Постановка задачи. Долгое время исследования были направлены на борьбу с кавитацией, так как эффекты, связанные с ней, крайне нежелательны в технике. Разрушение деталей насосов, двигателей, гидротурбин, корабельных винтов, вибрация оборудования, износ трубопроводов и гидроарматуры и многое другое заставляло принимать кавитацию как неуправляемое и опасное явление. Однако в последнее время интерес к этому явлению вызван поиском путей использования кавитационных эффектов в создании новых технологий, способов применения уникальных возможностей, возникающих в условиях развитой пузырьковой кавитации [16-21].

В данной работе экспериментально исследовано эрозийное разрушение бетона, вызванное затопленной кавитационной струей, с целью выявления закономерностей глубины повреждения при различных режимах истечения.

Методы исследования. Для испытаний на стойкость к кавитационному воздействию конструкционных материалов был спроектирован и изготовлен специальный экспериментальный стенд.

Вода из водопроводной сети заполняла приемный бак и поступала в плунжерный насос с электродвигателем, из которого нагнеталась через шланг высокого давления в кавитатор.

Рабочий участок установки представлял собой металлический бак размерами $2 \times 1,5 \times 1,2$ м. На его дне было смонтировано специальное устройство для закрепления испытываемых образцов.

В опытах использовались кавитаторы с наименьшим внутренним диаметром проходного сечения, равным: $d_0 = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ мм.

Набор кавитаторов позволял насосной установке обеспечивать стабильное давление струйного истечения от 2,5 до 12,5 МПа. Относительное расстояние ϵ между кавитатором и поверхностью испытываемого образца к диаметру проходного отверстия кавитатора изменялось в диапазоне от 10 до 200. Избыточное давление в зоне расположения конструкционных материалов поддерживалось постоянным в пределах $P_k = 0,01$ МПа.

Эрозийное разрушение вызывалось струями воды при кавитационных режимах, истекающих из генераторов кавитации перпендикулярно поверхности образцов, число которых на один параметр измерения варьировалось от 6 до 10. Время воздействия струи изменялось от 10 до 600 с. Этот диапазон времени испытаний позволял получить максимальную глубину проникновения эрозионного разрушения в образцах конструкционного материала, выполненного из цементно-песчаного раствора марки цемента 500 до их разрушения.

Образцы бетона, состоящие из цемента с песком, гальки или щебня имеют неоднородную структуру с различным размером гранул и испытанию не подвергались ввиду невозможности определения закономерностей разрушения. Глубина эрозии у партии образцов после испытаний измерялась микрометром.

Критериями оценки интенсивности воздействия кавитации были выбраны зависимость глубины эрозионной зоны от времени испытаний и относительного расстояния до среза кавитатора ϵ при различных значениях входного давления P_0 .

Результаты и их обсуждение. Результаты экспериментальных исследований, а также графики зависимости изменения глубины зоны эрозии h от времени воздействия кавитации на образец для различных значений величины входного давления P_0 представлены на рис. 1. С увеличением продолжительности воздействия струи на образец глубина зоны эрозии h экспоненциально возрастает до максимального значения (рис.1), величина которого зависит от давления P_0 . С увеличением P_0 максимально достигаемая глубина h очага эрозии для каждого ϵ увеличивается.

В диапазоне изменения времени воздействие струи на образец от 10 до 60 с зависимость $h = f(\tau)$ изменяется с достаточным приближением к линейному закону. С увеличением P_0 тангенс угла наклона линейных зависимостей возрастает.

При $\tau > 60$ с изменение h отклоняется от линейного закона. При этом темп изменения h с увеличением τ уменьшается.

Рис.1. Глубина эрозии при $\varepsilon=40$: 1. $P_0=2,5$ МПа; 2. $P_0=5,0$ МПа; 3. $P_0=7,5$ МПа; 4. $P_0=10$ МПа; 5. $P_0=12,5$ МПа

Fig.1. Depth of erosion at $\varepsilon = 40$: 1. $P_0=2,5$ МПа; 2. $P_0=5,0$ МПа; 3. $P_0=7,5$ МПа; 4. $P_0=10$ МПа; 5. $P_0=12,5$ МПа

Графическое дифференцирование зависимостей $h = f(\tau)$, представленных на рис.1, позволяет получить численные значения скорости проникновения эрозии при фиксированных значениях времени воздействия струи на образец $\left(h' = \frac{dh}{d\tau}\right)$. Вычисленные зависимости $h' = f(\tau)$ отмечены точками на рис.2.

Рис.2. Скорость проникновения эрозии $h' = f(\tau)$: 1. $P_0=2,5$ МПа; 2. $P_0=5,0$ МПа; 3. $P_0=7,5$ МПа; 4. $P_0=10,0$ МПа; 5. $P_0=12,5$ МПа

Fig. 2. Rate of penetration of erosion $h' = f(\tau)$: 1. $P_0=2,5$ МПа; 2. $P_0=5,0$ МПа; 3. $P_0=7,5$ МПа; 4. $P_0=10,0$ МПа; 5. $P_0=12,5$ МПа

Определим аналитическую функцию $h'=f(\tau)$ методом регрессионного анализа. Зависимости на рис. 2 могут быть представлены выражением:

$$h' = Ae^{-(C\tau-B)^2}. \quad (1)$$

Построение уравнения регрессии сводится к оценке ее параметров.

Прологарифмируем (1):

$$\ln h' = \ln A + C^2\tau^2 + 2BC\tau - B^2. \quad (2)$$

Введем замену в уравнении (2)

$$\ln h' = \bar{h}, \ln A - B^2 = a_0, 2BC = a_1, -C^2 = a_2$$

и представим его в виде полинома второй степени

$$\bar{h} = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2. \quad (3)$$

Нахождение неизвестных в (3) связано с решением системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} y_0 &= x_{00}a_0 + x_{01}a_1 + x_{02}a_2 \\ y_1 &= x_{10}a_0 + x_{11}a_1 + x_{12}a_2 \\ y_2 &= x_{20}a_0 + x_{21}a_1 + x_{22}a_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты системы (4) соответственно находятся как:

$$\begin{aligned} x_{00} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^0 = m & x_{01} &= \sum_{k=1}^m \tau_k & x_{02} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^2 & y_0 &= \sum_{k=1}^m \bar{h}_k \\ x_{10} &= \sum_{k=1}^m \tau_k & x_{11} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^2 & x_{12} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^3 & y_1 &= \sum_{k=1}^m \tau_k \bar{h}_k \\ x_{20} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^2 & x_{21} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^3 & x_{22} &= \sum_{k=1}^m \tau_k^4 & y_2 &= \sum_{k=1}^m \tau_k^2 \bar{h}_k \end{aligned} \quad (5)$$

где, m – число экспериментальных измерений.

Подставляя численные данные, полученные в результате графического дифференцирования зависимости $h=f(\tau)$ (рис.1) в соотношения (5)

$$\begin{aligned} -28,65 &= 10a_0 + 1125a_1 + 178125a_2 \\ -3491,4 &= 1125a_0 + 178125a_1 + 31640625a_2 \\ -576987,64 &= 178125a_0 + 31640625a_1 + 5989453125a_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Решив систему уравнений (6), получим коэффициенты для квадратичной аппроксимации (3)

$$\bar{h} = -2,51 + 0,00167\tau - 3,05 \cdot 10^{-5}\tau^2. \quad (7)$$

С учетом замены, зависимость скорости проникновения эрозии может быть представлена в виде:

$$h' = 0,0837e^{-(0,0055\tau-0,151)^2}. \quad (8)$$

Величина максимальной скорости эрозии и время до наибольшего эффекта кавитационной эрозии бетона линейно зависят от входного давления P_0 .

Подставив эти зависимости в предэкспоненциальный множитель и степень экспоненты окончательно получаем функцию $h'=f(\tau)$

$$h' = (0,043P_0 - 0,025)e^{-(0,008\tau+0,0042P_0-0,163)^2}, \quad (9)$$

где, τ – время, с; P_0 – давление, МПа.

Полученные кривые, согласно (9), изображены на рис. 2 сплошными линиями. Из их анализа следует, что весь процесс образования очагов эрозии на исследуемой поверхности можно разделить по времени на три периода.

В первый период, исчисляемый несколькими секундами, с увеличением τ скорость изменения глубины h' возрастает. Во втором периоде, соответствующем стабилизированному

процессу, скорость изменения глубины зоны эрозии остается постоянной, а в третьем периоде с увеличением τ она уменьшается до нулевого значения, когда активное воздействие струи на образец прекращается.

На рис.3 точками указаны результаты экспериментального исследования скорости проникновения эрозии от относительного расстояния ε до образца при различных значениях P_0 .

Рис.3. Скорость проникновения эрозии $h'=f(\varepsilon)$: 1. $P_0=2,5\text{МПа}$; 2. $P_0=5,0\text{МПа}$; 3. $P_0=7,5\text{МПа}$; 4. $P_0=10,0\text{МПа}$; 5. $P_0=12,5\text{МПа}$

Fig.3. Rate of penetration of erosion $h' = f(\varepsilon)$: 1. $P_0=2,5\text{МПа}$; 2. $P_0=5,0\text{МПа}$; 3. $P_0=7,5\text{МПа}$; 4. $P_0=10,0\text{МПа}$; 5. $P_0=12,5\text{МПа}$

Обработка опытных данных в исследованном диапазоне изменения параметров струйной кавитации, проведенная методом регрессивного анализа по формулам (1)–(5), позволила найти обобщенную зависимость для определения скорости проникновения эрозии (сплошные линии на рис.3), имеющую вид:

$$h' = (0,117P_0 - 0,383)e^{-(0,017\varepsilon + 0,0264P_0 - 0,436)^2}, \quad (10)$$

где, $\varepsilon=l/d_0$ – относительное расстояние; P_0 – давление, МПа.

Как видно (рис. 3) при $\varepsilon < 20$ величина h' практически остается неизменной.

При значениях $\varepsilon > 20$ происходит уменьшение скорости проникновения эрозии. Чем выше давление P_0 , тем быстрее темп снижения h' . При увеличении P_0 эрозионная способность струи увеличивается.

Сопоставление зависимостей $h'=f(\varepsilon)$, полученных по экспериментальным данным для кавитаторов с различным диаметром проходного сечения, позволяет заключить, что увеличение его диаметра сопровождается рост h' . Из сравнения опытных данных для конических сопел и кавитаторов вытекает, что применение последних при прочих равных условиях приводит к увеличению скорости проникновения эрозии h' .

Вывод. Исследование кавитационной эрозии открывает возможности для оценки срока эксплуатации гидротехнических объектов, находящихся под активным воздействием затопленных кавитационных струй. С другой стороны, способствует расширению области применения кавитации при очистке и вторичной переработке конструкционных материалов.

Из анализа полученных данных вытекает, что для выбранных параметров струйного истечения оптимальное расстояние от разрушаемой поверхности до кавитатора находится в диапазоне (10-40) ε и достигает максимального эффекта в интервале давлений 2,5-12,5 МПа в среднем за 30 с. Соотношения значений глубины и скорости проникновения эрозии при заданных параметрах давления P_0 , противодавления P_k , расстояния от среза кавитатора до поверхно-

сти, диаметра кавитатора, вычисленные по формулам (9) и (10), соответствуют максимальному эрозионному воздействию кавитации. Изменяя параметры струйного кавитационного истечения, можно получить различную интенсивность эрозионного разрушения материала и сделать процесс управляемым, тем самым, контролировать скорость и величину эрозионного разрушения.

Данные результаты свидетельствуют об эффективном применении новейших струйно-кавитационных технологий в производстве аппаратов для очистки и измельчения бетонных конструкций.

Библиографический список:

1. Родионов В.П. Струйная суперкавитационная эрозия / В. П. Родионов. – Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2005. – 223 с.
2. Родионов В. П. Использование гидравлических струй при эксплуатации и обслуживании объектов добычи нефти / В. П. Родионов, А. А. Ладенко. – Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2014. – 163 с.
3. Pavlović, M. Non destructive monitoring of cavitation erosion of cordierite based coatings / M. Pavlović, M. Dojčinović, S. Martinović, M. Vlahović, Z. Stević, H. T. Volkov // Composites Part B. – 2016. – Vol.97. – №15. – P.84-91. doi:10.1016/j.compositesb.2016.04.073.
4. Pedzich Z., Jasionowski R., Ziabka M. Cavitation wear of structural oxide ceramics and selected composite materials. Journal of the European Ceramic Society. 2014; 34:3351–3356. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.04.022.
5. Лунач Э.Д. Отечественный метод прогнозирования кавитационной эрозии лопастных насосов с применением легко разрушающихся от кавитации материалов и характеристик их относительной стойкости // Инженерный вестник. 2015. – №8. – С. 53-65. URL: <http://engsi.ru/doc/799918.html>.
6. Прис К. Эрозия / К.Прис. – М.:Мир, 1982. – 465 с.
7. Шестоперов В.Ю. Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости / В.Ю. Шестоперов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – Т.102. – № 5. – С. 79-83. URL: <http://www.nntu.ru/trudy/2013/05/079-083.pdf>.
8. Martinovic S., Vlahovic M., Boljanac T., Dojcinovic M., Volkov-Husovic T. Cavitation resistance of refractory concrete: Influence of sintering temperature. Journal of the European Ceramic Society. 2013; 33(1):7–14. doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.08.004.
9. Martinovic S., Dojcinovic M., Dimitrijevic M., Devacerski A., Matovic B., Volkov-Husovic T. Implementation of image analysis on thermal shock and cavitation resistance testing of refractory concrete. Journal of the European Ceramic Society 2010; 30(16):3303–3309. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.07.041.
10. Bourne N.K., Field J.E. A high-speed photographic study of cavitation damage. Journal of Applied Physics. 1995;78(7):4423–4427. <http://dx.doi.org/10.1063/1.359850>.
11. Hutli E.F., Nedeljkovic S.M., Radovic N.A. Mechanics of submerged jet cavitating action: material properties, exposure time and temperature effects on erosion. Archive of Applied Mechanics. 2008;78(5):329–341. doi:10.1007/s00419-007-0163-8.
12. Momber A.W. Aggregate liberation from concrete by flow cavitation. International Journal of Mineral Processing. 2004;74(1–4):177–187. doi:10.1016/j.minpro.2003.10.004.
13. Linß E., Muller A. High performance sonic impulses – a new method for crushing of concrete. International Journal of Mineral Processing. 2004;74(10):199–208. doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.016.
14. Zange R., Hoyer B., Wollenberg G., Scheibe H.P. Shock waves for liberation comminution of mineral materials. Proc. 9th Europ. Symp. on Comminution. Europ. Fed. of Chem. Engng. Albi, 1998. P. 185– 192.
15. Momber A.W. Short-time cavitation erosion of concrete. 2000; 241(1):47–52. doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00348-3.
16. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 861–869. URL: <http://www.tstu.ru/structure/inst/pdf/mo/pma2.pdf>
17. Ладенко А. А. Супергидрокавитационная технология очистки систем водоотведения / А. А. Ладенко В.П. Родионов, Н. В. Ладенко // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». – 2016. – Т. 103. – №5. – С. 77-79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27265667>.
18. Гимранов Ф.М. Перспективы использования кавитационной эрозии в получении водных суспензий металлов / А. Н. Беляев, И. В. Флегентов, Е. В. Куц // Вестник казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 23. – С. 65-67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22671002>.
19. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности: Ч. 2 / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. – Киев: АО «ОКО», 2000. – 898 с.
20. Gogate P.R. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology / P. R. Gogate, A. M. Kabadi // Biochemical Engineering Journal. – 2009. – Vol. 44. – № 1. – P.60–72. doi:10.1016/j.bej.2008.10.006.

21. Petkovsek M. Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment / M. Petkovsek, M. Zupanc, M. Dular et al. // Separation and Purification Technology. – 2013. – Vol. 118. – №3 – P. 415–423. doi:10.1016/j.seppur.2013.07.029.

References:

1. Rodionov V.P. Struinaya superkavitatsionnaya eroziya. Krasnodar: KubSTU; 2005. 223 s. [Rodionov V.P. Supercavitational jet erosion. Krasnodar: KubGTU; 2005. 223 p. (In Russ.)]
2. Rodionov V.P., Ladenko A.A. Ispol'zovanie gidravlicheskih strui pri ekspluatatsii i obsluzhivanii ob"ektov dobychi nefiti. Krasnodar: KubGTU; 2014. 163 s. [Rodionov V.P., Ladenko A.A. Use of hydraulic jets during operation and maintenance of oil production facilities. Krasnodar: KubSTU; 2014. 163 p. (In Russ.)]
3. Pavlović M., Dojčinović M., Martinović S., Vlahović M., Stević Z., Volkov H.T. Non destructive monitoring of cavitation erosion of cordierite based coatings. Composites Part B. 2016;97(15):84-91. doi:10.1016/j.compositesb.2016.04.073.
4. Pedzich Z., Jasionowski R., Ziabka M. Cavitation wear of structural oxide ceramics and selected composite materials. Journal of the European Ceramic Society 2014;34:3351–3356. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.04.022.
5. Lunatsi E. D. Otechestvennyi metod prognozirovaniya kavitatsionnoi erozii lopastnykh nasosov s primeneniem legko razrushayushchikhsya ot kavitatsii materialov i kharakteristik ikh otnositel'noi stoikosti. Inzhenernyi vestnik. 2015;8:53-65. URL: <http://engsi.ru/doc/799918.html> (data obrashcheniya: 04.05.2017. [Lunatsi E. D. National method for predicting the cavitation erosion of vane pumps made of easily destroyed by cavitation and the characteristics of their relative durability. Engineering Bulletin. 2015; 8:53-65. URL: <http://engsi.ru/doc/799918.html> (access date: 04.05.2017 (In Russ.)]
6. Pris K. Eroziya. M.: Mir; 1982. 465 s. [Pris K. Erosion. M.: Mir; 1982. 465 p. (In Russ.)]
7. Shestoperov V.Yu. Kavitatsionnoe razrushenie materialov i kriterii otsenki ikh erozionnoi stoikosti. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva. 2013; 102(5):79-83. URL: <http://www.nntu.ru/trudy/2013/05/079-083.pdf> (data obrashcheniya: 15.04.17. [Shestoperov V.Yu. Cavitation destruction of materials and criteria for assessing their erosion resistance. Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University. 2013;102(5):79-83. URL: <http://www.nntu.ru/trudy/2013/05/079-083.pdf> (access date: 15.04.17. (In Russ.)]
8. Martinovic S., Vlahovic M., Boljanac T., Dojcinovic M., Volkov-Husovic T. Cavitation resistance of refractory concrete: Influence of sintering temperature. Journal of the European Ceramic Society. 2013; 33(1):7–14. doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.08.004.
9. Martinovic S., Dojcinovic M., Dimitrijevic M., Devecerski A., Matovic B., Volkov-Husovic T. Implementation of image analysis on thermal shock and cavitation resistance testing of refractory concrete. Journal of the European Ceramic Society. 2010;30(16):3303–3309. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.07.041.
10. Bourne N.K., Field J.E. A high-speed photographic study of cavitation damage. Journal of Applied Physics. 1995;78(7):4423-4427. <http://dx.doi.org/10.1063/1.359850>.
11. Hutli E.F., Nedeljkovic S.M., Radovic N.A. Mechanics of submerged jet cavitating action: material properties, exposure time and temperature effects on erosion. Archive of Applied Mechanics. 2008; 78(5):329-341. doi:10.1007/s00419-007-0163-8.
12. Momber A.W. Aggregate liberation from concrete by flow cavitation. International Journal of Mineral Processing. 2004; 74(1–4):177-187. doi:10.1016/j.minpro.2003.10.004.
13. Linß E., Muller A. High performance sonic impulses – a new method for crushing of concrete. International Journal of Mineral Processing. 2004;74(10):199-208. doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.016.
14. Zange R., Hoyer B., Wollenberg G., Scheibe H.P. Shock waves for liberation comminution of mineral materials. Proc. 9th Europ. Symp. on Comminution. Europ. Fed. of Chem. Engng. Albi, 1998. P. 185– 192.
15. Momber A.W. Short-time cavitation erosion of concrete. 2000; 241(1):47–52. doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00348-3.
16. Promtov M.A. Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnologii dlya intensivatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov. Vestnik TGTU. 2008; 14(4):861–869. URL: <http://www.tstu.ru/structure/inst/pdf/mo/pma2.pdf> [Promtov M.A. Prospects for the use of cavitation technologies for the intensification of chemical-technological processes. Transactions of TSTU 2008; 14(4):861–869. URL: <http://www.tstu.ru/structure/inst/pdf/mo/pma2.pdf> (In Russ.)]
17. Ladenko A.A., Rodionov V.P., Ladenko N.V. Superkavitatsionnaya tekhnologiya ochistki sistem vodootvedeniya. Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2016; 103(5):77-79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27265667>. [Ladenko A.A., Rodionov V.P., Ladenko N.V. Supercavitation technology for cleaning sewage systems. Energy and Water. 2016;103(5):77-79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27265667>. (In Russ.)]
18. Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Kuts E.V. Perspektivy ispol'zovaniya kavitatsionnoi erozii v poluchenii vodnykh suspenzii metallov. Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014;17(23):65-67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22671002>. [Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Kuts E.V. Prospects for the use of cavitation erosion in the preparation of aqueous metal suspensions. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014; 17(23):65-67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22671002>. (In Russ.)]

19. Fedotkin I.M., Gulyi I.S. Kavitatsiya, kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya, ikh ispol'zovanie v promyshlennosti: Ch. 2. Kiev: AO «ОКО»; 2000. 898 s. [Fedotkin I.M., Gulyi I.S. Cavitation, cavitation technology and technology, their use in industry: Part 2. Kiev: AO «ОКО»; 2000. 898 p. (In Russ.)]
20. Gogate P.R., Kabadi A.M. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. Biochemical Engineering Journal. 2009; 44(1):60–72. doi:10.1016/j.bej.2008.10.006.
21. Petkovsek M., Zupanc M., Dular M. et al. Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. Separation and Purification Technology. 2013; 118(3):415–423. doi:10.1016/j.seppur.2013.07.029.

Сведения об авторах:

Родионов Виктор Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра машин и оборудования нефтяных и газовых промыслов.

Уколов Алексей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математики, физики, информатики.

Information about the authors:

Victor P. Rodionov – Dr. Sci.(Technical), Assoc.Prof., Department Machines and equipment of oil and gas industry.

Alexey I. Ukolov – Cand. Sci.(Physics and Mathematical), Assoc.Prof., Department Machines and equipment of oil and gas industry.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.07.2017.

Принята в печать 20.08.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.07.2017.

Accepted for publication 20.08.2017.