

УДК 62-531.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ГАЗ–ПАР ВНУТРИ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЯ ПРИ РАБОТЕ ОСЕВОГО КЛАПАНА

А.Б. КАПРАНОВА¹, А.Е. ЛЕБЕДЕВ¹, А.М. МЕЛЬЦЕР², С.В. НЕКЛЮДОВ²¹ ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Российская Федерация² ЗАО НПО «Регулятор», г. Ярославль, Российская Федерация

E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Энергетическая промышленная отрасль нуждается в надежной, экологически безопасной регулирующей арматуре, к которой относится категория регулирующих клапанов. Создание условий снижения интенсивности кавитационных эффектов еще на начальных этапах ее развития определяет основную цель исследования для предотвращения возможных негативных последствий развитой кавитации, к числу которых можно отнести эрозию проточных поверхностей элементов указанного оборудования и вибрации, выходящие за рамки эксплуатационных норм. Одним из возможных направлений решения проблемы является применение процесса дросселирования потоков жидкости в рабочем объеме регулирующего устройства. При этом особый интерес вызывает математическое описание механизма образования кавитационных пузырей с позиции системы газ–пар.

Материалы и методы. Для получения аналитических результатов описания поведения системы газ–пар макросистемы кавитационных пузырей использована авторская стохастическая модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части осевого клапана, построенная на основе энергетического метода в рамках равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы.

Результаты. Указанным способом выполнен анализ зависимости случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря от коэффициента проходной способности клапана и условного диаметра его проходного сечения при различных соотношениях содержания газа и пара внутри образующихся пузырей.

Выводы. Реализация процесса дросселирования потоков жидкости в регулирующем клапане в случае предложенной схемы конструкторского решения узла «сепаратор–внешняя запирающая обечайка» позволяет обеспечить снижение значений случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря с ростом коэффициента проходной способности клапана на различных стадиях открытия сепаратора.

Ключевые слова: осевой клапан, гидравлическая кавитация, кавитационный пузырь, момент импульса, стохастическая энергия, пропускная способность

THE BEHAVIOR OF A GAS–VAPOR SYSTEM INSIDE A CAVITATION BUBBLE DURING AXIAL VALVE OPERATION

A.B. KAPRANOVA¹, A.E. LEBEDEV¹, A.M. MELZER², S.V. NEKLYUDOV²¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation² JSC «Regulator», Yaroslavl, Russian Federation

E-mail: kapranova_anna@mail.ru; lae4444@mail.ru; meltzer.a@mail.ru; neklydov.s@nporeg.ru

Abstract

Background. The energy industry needs reliable, environmentally friendly control valves, which include the category of control valves. The creation of conditions for reducing the intensity of cavitation effects at the initial stages of its development determines the main purpose of the study which aims to prevent possible negative consequences of developed cavitation, which in their turn include erosion of the flowing surfaces of the elements of the specified equipment and vibrations that go beyond operating standards. One of the possible ways to solve the problem is to use the process of throttling fluid flows in the working volume of the control device. The particular interest is paid to the mathematical description of the mechanism of formation of cavitation bubbles in terms of gas–vapor system.

Materials and methods. To obtain analytical results for describing the behavior of the gas–vapor system of the macro-system of cavitation bubbles, we used the authoring stochastic model of the cavitation bubbles

formation process in the flow part of the axial valve. The model was constructed on the basis of the energy method in the framework of the equilibrium representation of states of an energetically closed macro-system.

Results. The dependence of the random component of the angular momentum of the cavitation bubble on the flow coefficient of the valve and the conditional diameter of its flow cross section for various ratios of gas and vapor concentration inside the bubbles has been analysed.

Conclusions. The implementation of the process of throttling fluid flows in the control valve using the proposed design solution to the separator–external locking shell allows reducing the random component of the angular momentum of the cavitation bubble and increasing the valve throughput coefficient at various stages of the separator opening.

Key words: axial valve, hydraulic cavitation, cavitation bubble, angular momentum, stochastic energy, throughput

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.058-064

Состояние вопроса. Безопасность и эффективность работы регулирующей арматуры являются основными требованиями, которые предъявляются к инженерным методикам при проектировании оборудования специального назначения [1–3]. Учет множества факторов, влияющих на движение транспортируемой жидкости в проточной части регулирующего клапана, как правило, зависит от режима течения среды [4]. Появление кавитационных эффектов относится в данном трубопроводном оборудовании к негативным факторам, связанным с эрозией внутренних поверхностей арматуры и агрессивным шумовым фоном вне санитарных норм ее эксплуатации.

Описание процесса образования кавитационных пузырей в проточной части клапана может составить теоретическую базу при его проектировании [5]. При этом отметим, что в последнее время превалируют модели с численными результатами, требующие трудоемкой операции валидации [6–8], однако развитие методов получения аналитических зависимостей для основных показателей изучаемого процесса кавитации остается одним из приоритетных направлений моделирования, удобных как при анализе результатов, так и при прогнозировании поведения системы кавитационных пузырей. Основными этапами первых стадий эволюции гидродинамической кавитации являются следующие [4, 9]: образование полостей при критической скорости течения жидкости в условиях резкого падения давления; формирование сферической формы этих полостей при внешнем давлении жидкости; заполнение образованных сфер ее паром; просачивание газа внутрь пузыря. При этом наблюдается не только перемещение пузыря в общем потоке жидкости, но и смещения системы газ-пар

внутри кавитационной полости, которые носят случайный характер. Особый интерес исследователей в данной области обращен к развитию стохастических методов моделирования кавитационных эффектов [9–13], несмотря на существующий детерминированный подход [14–16]. Для решения поставленных задач предлагается использовать энергетический метод в рамках равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы [17]. Выполненное стохастическое моделирование процесса образования кавитационных пузырей [18, 19] на платформе киберфизической системы [20] предлагается применить для случая течения жидкостной среды в осевом клапане с неподвижной частью затвора в форме цилиндрического сепаратора и с подвижной глухой обечайкой [21].

Материалы и методы. За основную характеристику, отражающую динамику системы газ–пар внутри кавитационного пузыря, выбрана случайная составляющая момента импульса образовавшейся сферической полости M_{ran} по аналогии с описанием капли жидкости в ударных процессах [22]. Пусть α_g и α_s – объемные доли газа и пара для внутренней области пузыря; ρ_g и ρ_s – плотности их веществ; l – осевой момент инерции сферической полости с минимальным значением радиуса r_{min} .

Используя адиабатическое приближение с показателем адиабаты k для отношения давления насыщенного пара P_s (в момент времени, когда формируется кавитационная полость) и максимального значения давления в центральной области пузыря P_{max} (при стремлении радиуса пузыря к минимальному значению r_{min}) [23]

$$\left(\frac{P_{max}}{P_s}\right)^3 = \left(\frac{r_s}{r_{min}}\right)^{1/k}, \quad (1)$$

получим уравнение относительно искомой величины случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря M_{ran}

$$N \left(\frac{P_{max}}{P_s} \right)^{1/k} = \frac{A_n v_L}{r_b} \int_0^1 \xi d\xi \int_0^1 \exp[-E(\xi, \eta) / E_0] d\eta, \quad (2)$$

где A_n – нормировочная константа; N – число образовавшихся кавитационных пузырей, которое определяется выражением [18, 19]

$$N = A_n r_b v_L \int_0^1 d\xi \int_0^1 \exp[-E(\xi, \eta) / E_0] d\eta. \quad (3)$$

Здесь $E(\xi, \eta)$ – энергия стохастического движения одиночного пузыря в зависимости от условного радиуса ξ и условной скорости η его центра масс:

$$\xi = r / r_b, \quad \eta = v / v_L \quad (4)$$

при течении со скоростью v_L жидкости плотностью ρ_L . Согласно формализму Орнштейна–Уленбека [17, 22], имеем:

$$E(\xi, \eta) = v_L^2 \eta^2 \frac{k_1 r_b^4 \xi^4 + k_2}{r_b \xi} + \quad (5)$$

$$+ \frac{5}{8} k_1 \frac{M_{ran}^2}{r_b^5 \xi^5} + k_3 r_b^2 \xi^2 + k_4 r_b^3 \xi^3.$$

Здесь

$$k_1 \equiv \frac{2}{3} \pi (\alpha_g \rho_g + \alpha_s \rho_s); \quad (6)$$

$$k_2 \equiv \frac{k_\zeta}{4} (\zeta_1 + \zeta_2) \rho_L; \quad (7)$$

$$k_3 \equiv 4\pi\sigma; \quad (8)$$

$$k_4 \equiv \frac{8}{3} \pi P_s, \quad (9)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; k_ζ – коэффициент пропорциональности; ζ_1 и ζ_2 – составляющие коэффициента гидравлического сопротивления при кавитационном режиме течения жидкости [24–26].

Выражение (5) содержит энергетическую характеристику E_0 , которая определяется физико-механическими, конструктивными и режимными параметрами процесса образования кавитационных пузырей в рабочем объеме клапана. При формировании вида функции $E(\xi, \eta)$ учитывались перечисленные выше основные этапы первых стадий эволюции гидродинамической кавитации [18, 19].

Результаты. В качестве примера выполнен расчет искомой величины M_{ran} с

учетом (6)–(9) для случая течения жидкостной среды в осевом клапане с неподвижной частью затвора в форме цилиндрического сепаратора и с подвижной глухой обечайкой (рис. 1, 2).

Согласно полученным результатам, при соотношении долей содержания газа и пара $\alpha_g : \alpha_s = 4:1$ значения случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря изменяются в пределах $M_{ran} = (8,2-18,6) \cdot 10^{-12}$ кг·м²/с (рис. 1, поверхность 1); при $\alpha_g : \alpha_s = 1:1$ – $M_{ran} = (5,8-16,3) \cdot 10^{-12}$ кг·м²/с (рис. 1, поверхность 2); при $\alpha_g : \alpha_s = 1:4$ – $M_{ran} = (3,8-10,6) \cdot 10^{-12}$ кг·м²/с (рис. 1, поверхность 3), т.е. с понижением содержания газа уменьшается значение M_{ran} .

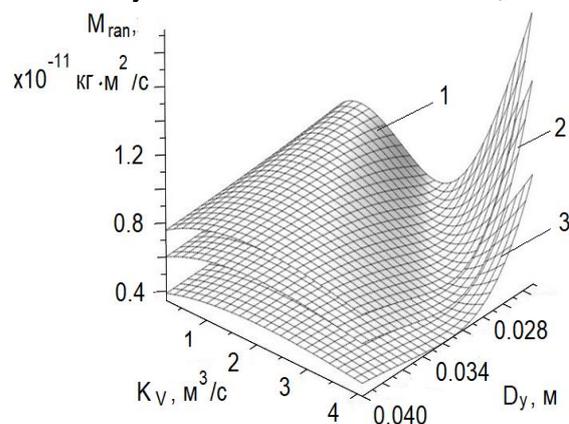


Рис. 1. Зависимость случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря $M_{ran}(K_v, D_y)$ от коэффициента проходной способности клапана K_v и условного диаметра его проходного сечения D_y : $k = 1,3$; $P_s = 10^{-3}$ Па; $P_{max} = 1,3 \cdot 10^8$ Па; $\sigma = 7,284 \cdot 10^{-4}$ Н/м; $r_b = r_{min} = 10^{-3}$ м; $\rho_g = 1,205$ кг/м³; $\rho_s = 1,44 \cdot 10^{-2}$ кг/м³; $\rho_L = 10^3$ кг/м³; 1 – $\alpha_g = 0,8$; $\alpha_s = 0,2$; 2 – $\alpha_g = \alpha_s = 0,5$; 3 – $\alpha_g = 0,2$; $\alpha_s = 0,8$

Проиллюстрировать зависимость случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря M_{ran} от степени открытия клапана можно с помощью семейств графиков, показанных на рис. 2. Здесь отмечено однозначное соответствие значений коэффициента пропускной способности $K_v(D_{yi})$, $i = \overline{1,4}$, условному диаметру проходного сечения D_{yi} при различных степенях открытия клапана: 20 % ($i = 1$); 50 % ($i = 2$); 80 % ($i = 3$); 100 % ($i = 4$). Получено, что с увеличением пропускной способности клапана снижаются значения M_{ran} . Например, в случае $\alpha_g : \alpha_s = 4:1$ при открытии клапана с 20 до 50 % значение M_{ran} падает в 1,05 раза (рис. 2, графики 1 и 2); при открытии

клапана до 80 % – в 1,27 раза (рис. 2, графики 1 и 3), а при открытии клапана до 100 % – в 1,29 раза (рис. 2, графики 1 и 4). Аналогичная картина наблюдается для соотношений $\alpha_g:\alpha_s = 1:1$ (рис. 2, графики 1'–4') и $\alpha_g:\alpha_s = 1:4$ (рис. 2, графики 1''–4'').

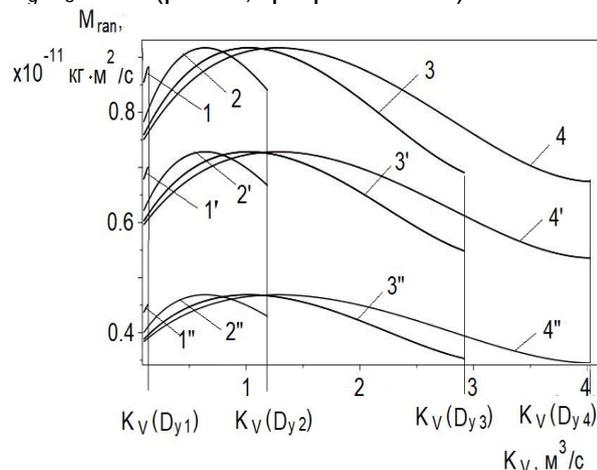


Рис. 2. Зависимость случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря $M_{ran}(K_V)$ от коэффициента проходной способности клапана K_V при различных значениях условного диаметра его проходного сечения D_j ; $k = 1,3$; $P_s = 10^{-3}$ Па; $P_{max} = 1,3 \cdot 10^8$ Па; $\sigma = 7,284 \cdot 10^{-4}$ Н/м; $r_b = r_{min} = 10^{-3}$ м; $\rho_g = 1,205$ кг/м³; $\rho_s = 1,44 \cdot 10^{-2}$ кг/м³; $\rho_L = 10^3$ кг/м³; 1, 2, 3, 4 – $\alpha_g = 0,8$; $\alpha_s = 0,2$; $D_{j1} = 1,40 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{j2} = 2,21 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{j3} = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{j4} = 3,13 \cdot 10^{-2}$ м; 1', 2', 3', 4' – $\alpha_g = \alpha_s = 0,5$; 1'', 2'', 3'', 4'' – $\alpha_g = 0,2$; $\alpha_s = 0,8$; 1, 1', 1'' – $K_V(D_{j1}) = 1,375 \cdot 10^{-1}$ м³/с; 2, 2', 2'' – $K_V(D_{j2}) = 1,189 \cdot 10^{-1}$ м³/с; 3, 3', 3'' – $K_V(D_{j3}) = 2,921 \cdot 10^{-1}$ м³/с; 4, 4', 4'' – $K_V(D_{j4}) = 4,032 \cdot 10^{-1}$ м³/с

Выводы. На базе стохастической модели процесса образования кавитационных пузырей в проточной части осевого клапана [18, 19], построенной на основе энергетического метода [17] в рамках равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы в формализме Орнштейна–Уленбека [17, 22], получены аналитические результаты описания поведения системы газ–пар макросистемы кавитационных пузырей. В частности, выполнен анализ зависимости случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря от коэффициента проходной способности клапана и условного диаметра его проходного сечения при различных соотношениях содержания газа и пара внутри образующихся пузырей. При этом выявлено, что реализация процесса дросселирования потоков жидкости в регулирующем клапане [21] в случае предло-

женной схемы конструкторского решения узла «сепаратор–внешняя запирающая обечайка» [5] позволяет обеспечить снижение значений случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря [27] с ростом коэффициента проходной способности клапана на различных стадиях открытия сепаратора.

Список литературы

1. Ионайтис Р.Р., Чеков М.Е. Интенсификация дросселирования проточной части регуляторов расхода среды // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, вып. 5. – С. 263–269.
2. Арзуманов Е.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Благов Е.Е. Дроссельные и регулирующие клапаны тепловых электростанций и атомных электростанций // Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. Кнепп Р., Дейли, Дж., Хеммит, Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
5. Engineering Method for Calculating of an Axial Valve Separator With an External Location of the Locking Part / A.B. Kapranova, A.E. Lebedev, S.V. Neklyudov, A.M. Melzer // Process and Energy Systems. – March 2020. – Vol. 8. – P. 1–17. doi.org/10.3389/fenrg.2020.00032.
6. Pressure Drop and Cavitation Analysis on Sleeve Regulating Valve / C. Qiu, Ch.-H. Jiang, H. Zhang, et. al. // Processes. – 2019. – Vol. 7(11). – P. 829. doi.org/10.3390/pr7110829.
7. Parametric analysis on throttling components of multi-stage high pressure reducing valve / C.-W. Hou, J. Qian, F. Chen, et. al. // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 128. – P. 1238–1248. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.081.
8. Cavitation optimization of a throttle orifice plate based on three-dimensional genetic algorithm and topology optimization / T.F. Tang, L. Gao, B. Li, et. al. // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2019. – Vol. 60(2). doi.org/10.1007/s00158-019-02249-z.
9. Fundamentals of Cavitation / S. Xu, Y. Qiao, X. Liu, et. al. // Cavitation in Biomedicine. – Springer, Dordrecht, 2015. doi.org/10.1007/978-94-017-7255-6_1.
10. Frenkel J. Kinetic Theory of Liquids. International Series of Monographs on Physics / Oxford University Press. – London, 1946. – 332 с.
11. Kedrinskii V.K. Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models (Shock Wave and High Pressure Phenomena), Chapter 7. – Springer, Berlin, 2005. – P. 307–344.
12. Seung S., Kwak H.Y. Shock wave propagation in bubbly liquids at small gas volume fractions // Journal of Mechanical Science and Technol-

ogy (J Mech Sci Technol). – 2017. – Vol. 31. – P. 1223–1231. doi.org/10.1007/s12206-017-0221-2.

13. **Time-resolved** measurements of shock induced cavitation bubbles in liquids / S. Koch, W. Garen, F. Hegedűs, et. al // Appl. Phys. – 2012. – Vol. 108. – P. 345–351.

14. **Besant W.H.** Hydrostatics and hydrodynamics. – London: Cambridge University Press, 1859. – Art. 158.

15. **Baron Rayleigh J.W.S.** Scientific papers (Vol. 6: 1911–1919). Cambridge University Press, 1899–1920.

16. **Plesset M.S., Chapman R.B.** Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary // J. Fluid Mech. – 1971. – Vol. 47(2). – P. 283–290. doi.org/10.1017/S0022112071001058.

17. **Климонтович Ю.Л.** Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.

18. **Стохастическая** модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части регулирующего клапана / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 4. – С. 24–29. doi.org/10.17588/2072-2672.2016.4.024-029.

19. **The ensemble-averaged** characteristics of the bubble system during cavitation in the separator // E3s Web of Conference (E3S Web Conf. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering: EECE-2019). – 2019. – Vol. 140. – 06005. doi.org/10.1051/e3sconf/201914006005.

20. **About** Formation of Elements of a Cyber-Physical System for Efficient Throttling of Fluid in an Axial Valve / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов // Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – Vol. 259 (Springer, Cham). – P. 109–119. doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_9.

21. **Пат.** 175776 Российская Федерация, МПК F16K 1/12, F16K 47/14, F16K 3/24. Клапан прямого действия / А.Е. Лебедев, А.А. Капранова, А.М. Мельцер, С.А. Солопов, Д.В. Воронин, С.В. Неклюдов; опубл. май, 2018 г.

22. **Зайцев А.И., Бытев Д.О.** Ударные процессы в дисперсионно-пленочных системах. – М.: Химия, 1994. – 176 с.

23. **Исследование** вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах / Е.П. Запорожец, Л.П. Холпанов, Г.К. Зиберт, А.В. Артемов // Теор. осн. хим. технол. – 2004. – Т. 38, № 3. – С. 243–252.

24. **Альтшуль А.Д.** Гидравлическое сопротивление. – М.: Недра, 1970. – 216 с.

25. **Арзуманов Е.С.** Расчет и выбор органов управления автоматических систем. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.

26. **Арзуманов Е.С.** Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 304 с.

27. **Описание** поведения парогазовой системы внутри кавитационного пузырька при работе осевого клапана / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов // Математические методы в технике и технологии (ММТТ-32): сб. тр. XXXII Междунар. науч. конф. в 12 т. / под ред. А.А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехника. Университет, 2019. – Вып. 2. – С. 3–6.

References

1. Ionaytis, R.R., Chekov, M.E. Intensifikatsiya drosselirovaniya protochnoy chasti regulyatorov raskhoda sredy [Throttling Intensification of the flow part in the flow rate controllers]. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 112, issue 5, pp. 263–269.

2. Arzumanov, E.S. *Gidravlicheskie reguliruyushchie organy sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Hydraulic regulatory bodies of automated control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 256 p.

3. Blagov, E.E. Drossel'nye i reguliruyushchie klapany teplovykh elektrostantsiy i atomnykh elektrostantsiy [Throttle and control valves of thermal power plants and nuclear power plants]. *Drossel'no-reguliruyushchaya armatura TES i AES* [Throttle control valves of TPPs and NPPs]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 288 p.

4. Knepp, R., Deyli, Dzh., Khemmit, F. *Kavitatsiya* [Cavitation]. Moscow: Mir, 1974. 668 p.

5. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Neklyudov, S.V., Melzer, A.M. Engineering Method for Calculating of an Axial Valve Separator With an External Location of the Locking Part. *Process and Energy Systems*, March 2020, vol. 8, article 32, pp. 1–17. doi.org/10.3389/fenrg.2020.00032.

6. Qiu, C., Jiang, Ch.-H., Zhang, H., Wu, J.-Y., Jin, Z. Pressure Drop and Cavitation Analysis on Sleeve Regulating Valve. *Processes*, 2019, vol. 7(11), pp. 829. doi.org/10.3390/pr7110829.

7. Hou, C.-W., Qian, J., Chen, F., Jiang, W., Jin, Z. Parametric analysis on throttling components of multi-stage high pressure reducing valve. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 128, pp. 1238–1248. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.081.

8. Tang, T.F., Gao, L., Li, B., Liao, L., Xi, Y., Yang, G. Cavitation optimization of a throttle orifice plate based on three-dimensional genetic algorithm and topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, vol. 60(2). doi.org/10.1007/s00158-019-02249-z.

9. Xu, S., Qiao, Y., Liu, X., Church, C.C., Wan, M. Fundamentals of Cavitation. Cavitation in Biomedicine. Springer, Dordrecht. 2015. doi.org/10.1007/978-94-017-7255-6_1.

10. Frenkel, J. Kinetic Theory of Liquids. International Series of Monographs on Physics. London: Oxford University Press, 1946. 332 p.
11. Kedrinskii, V.K. Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models (Shock Wave and High Pressure Phenomena), Chapter 7. Springer, Berlin, 2005, pp. 307–344.
12. Seung, S., Kwak, H.Y. Shock wave propagation in bubbly liquids at small gas volume fractions. *Journal of Mechanical Science and Technology (J Mech Sci Technol)*. 2017, vol. 31, pp. 1223–1231. doi.org/10.1007/s12206-017-0221-2.
13. Koch, S., Garen, W., Hegedüs, F., Neu, W., Reuter, R., Teubner, U. Time-resolved measurements of shock induced cavitation bubbles in liquids. *Appl. Phys.*, 2012, vol. 108, pp. 345–351.
14. Besant, W.H. Hydrostatics and hydrodynamics. London: Cambridge University Press, 1859. Art. 158.
15. Baron Rayleigh, J.W.S. (1911–1919) Scientific papers (Vol. 6: 1911–1919). Cambridge University Press, 1899–1920, reissued by the publisher 2011.
16. Plesset, M.S., Chapman, R.B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. *J. Fluid Mech.*, 1971, vol. 47(2), pp. 283–290. doi.org/10.1017/S0022112071001058
17. Klimontovich, Y.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa: Novyy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh sistem* [Turbulent Motion and Chaos Structure: A New Approach to the Statistical Theory of Open Systems]. Moscow: LENAND, 2014. 328 p.
18. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Meltser, A.M., Neklyudov, S.V. Stokhasticheskaya model' protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyrey v protochnoy chasti reguliruyushchego klapana [A stochastic model of the process of formation of cavitation bubbles in the flow part of a control valve]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 4, pp. 24–29. doi.org/10.17588/2072-2672.2016.4.024-029.
19. Kapranova, A., Lebedev, A., Meltser, A., Neklyudov, S. The ensemble-averaged characteristics of the bubble system during cavitation in the separator. E3s Web of Conference (E3S Web Conf. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering: EECE-2019), 2019, vol. 140, 06005. Published online 18 December 2019. doi.org/10.1051/e3sconf/201914006005.
20. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Meltser, A.M., Neklyudov, S.V. About Formation of Elements of a Cyber-Physical System for Efficient Throttling of Fluid in an Axial Valve. *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 259 (Springer, Cham), pp. 109–119. doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_9.
21. Lebedev, A.E., Kapranova, A.B., Meltser, A.M., Solopov, S.A., Voronin, D.V., Neklyudov, S.V. *Klapan pryamogo deystviya* [Direct-acting control valve]. Patent RF, no. 175776, 2018.
22. Zaytsev, A.I., Bytev, D.O. *Udamnye protsessy v dispersionno-plenochnykh sistemakh* [Impact processes in dispersion-film systems]. Moscow: Khimiya, 1994. 176 p.
23. Zaporozhets, E.P., Kholpanov, L.P., Zibert, G.K., Artemov, A.V. Issledovanie vikhrevykh i kavitatsionnykh potokov v gidravlicheskikh sistemakh [The study of vortex and cavitation flows in hydraulic systems]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskikh tekhnologiy*, 2004, vol. 38, no. 3, pp. 243–252.
24. Al'tshul', A.D. *Gidravlichesкое soprotivlenie* [Hydraulic resistance]. Moscow: Nedra, 1970. 216 p.
25. Arzumanov, E.S. *Raschet i vybor organov upravleniya avtomaticheskikh sistem* [Calculation and selection of the regulatory bodies of automatic systems]. Moscow: Energiya, 1971. 112 p.
26. Arzumanov, E.S. *Kavitatsiya v mestnykh gidravlicheskikh soprotivleniyakh* [Cavitation in local hydraulic resistances]. Moscow: Energiya, 1978. 304 p.
27. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Meltser, A.M., Neklyudov, S.V. Opisanie povedeniya parogazovoy sistemy vntri kavitatsionnogo puzyr'ka pri rabote oseвого klapana [Description of the behavior of the gas–vapor system inside a cavitation bubble during axial valve operation]. *Sbornik trudov XXXII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologii» (MMTT-32) v 12 t.* [Proceedings of the 32nd International scientific conf. «Mathematical Methods in Engineering and Technology» (MMTT-32) in 12 vol.]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnik. Universitet, 2019, issue 2, pp. 3–6.

Капранова Анна Борисовна,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов, e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Kapranova Anna Borisovna,

Yaroslavl State Technical University, D.Sc. of Physical and Mathematical Sciences, professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Лебедев Антон Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретических машин и оборудования, e-mail: lae4444@mail.ru
Lebedev Anton Evgenievich,
Yaroslavl State Technical University, D.Sc. of Eng., Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical Machines and Equipment, e-mail: lae4444@mail.ru

Мельцер Александр Михайлович,
ЗАО «НПО Регулятор», генеральный директор, e-mail: meltzer.a@mail.ru
Meltzer Aleksandr Mikhailovich,
JSC «Regulyator», General director, e-mail: meltzer.a@mail.ru

Неклюдов Сергей Владимирович,
ЗАО «НПО Регулятор», главный конструктор, кандидат технических наук, e-mail: neklydov.s@nporeg.ru
Neklyudov Sergey Vladimirovich,
JSC «Regulyator», Chief Designer, Ph.D. of Engineering, e-mail: neklydov.s@nporeg.ru

УДК 621.6.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. ОГУРЦОВ¹, Ю.В. ХОХЛОВА², В.Е. МИЗОНОВ¹, В.А. ОГУРЦОВ²
¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
²ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обогащенный уголь как источник энергии имеет ряд неоспоримых экологических и экономических преимуществ, обладает более высокой теплотворной способностью. Важными характеристиками, оказывающими влияние на технологический процесс флотации угля, являются гранулометрический состав, форма угольных частиц и текстура их поверхности. Ситовой анализ является наиболее распространенным методом для определения гранулометрического состава сыпучих сред. Однако он не является чувствительным к учету формы частиц и характеру их поверхности. При ситовом методе анализа не происходит непосредственного измерения ни одной из осей частицы за исключением случая, когда частица имеет форму шара. В этом случае ее размер совпадает с длиной ребра квадратной ячейки сита. Две частицы совершенно разной формы могут проходить через одно и то же отверстие сита. В связи с этим актуальной является задача разработки простой методики, позволяющей идентифицировать параметры формы и текстуры частиц сыпучего материала.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи используется алгоритм, реализованный в среде MATLAB (пакет Image Processing Toolbox) и концепция фракталов.

Результаты. Предложен метод оценки формы и текстуры частиц сыпучих материалов на основе цифровой обработки изображений. Построены кривые распределения частиц по размерам, полученные методом ситового просеивания и методом обработки изображений. Установлено, что эти кривые хорошо согласуются друг с другом.

Выводы. Таким образом, цифровая обработка изображений является альтернативным вариантом определения важных качественных характеристик сыпучих сред.

Ключевые слова: гранулометрический состав, фрактальная размерность, форма и текстура частиц сыпучего материала, обработка цифровых изображений, ситовой анализ