



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЛЬСАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

А.И. Хайбуллина, В.Ильин<sup>1</sup> Н.Х. Зиннатуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань, Россия  
haybullina.87@mail.ru

**Резюме:** На сегодняшний день загрязнение теплообменного оборудования приводит к серьезным экономическим убыткам в многих отраслях промышленности, поэтому поиски метода для снижения скорости или предотвращения загрязнения остается актуальной задачей. В данной работе предложено практическое решение для реализации пульсационного метода очистки на примере маслоохладителей. Проведено численное исследование влияния пульсационного потока на эффекты способствующие уменьшению загрязнений на внешней поверхности пучков труб. Численное исследование проводилось с использованием ПО Ansys Fluent. Течение жидкости описывалось уравнением Навье-Стокса, движение частиц и их взаимодействие описывалось методом дискретных элементов (DEM). При исследовании был рассмотрен шахматный пучок труб. Частота пульсаций соответствовала 0,3125 Гц, амплитуда отнесенная к диаметру трубки пучка 35, число Рейнольдса 100, скважность пульсаций соответствовала 0,25. В качестве рабочей среды было выбрано масло. Оценка пульсационной методики очистки осуществлялась на основе анализа механика соударения частиц о поверхность центрального цилиндра в пучке, при стационарном и пульсационном потоке. Установлено, что пульсационный поток способствует уменьшению загрязнений в передней области цилиндра и не эффективен в задней. Анализ механики соударения частиц о поверхность теплообмена показал, что данный режим пульсаций эффективней для удаления пластичных отложений.

**Ключевые слова:** маслоохладитель, скорость эрозии, очистка теплообменников, низкочастотные несимметричные пульсации, метод дискретных элементов, шахматный пучок труб, математическое моделирование, пульсационная очистка, пульсирующие течения, загрязнения теплообменной поверхности.

**Благодарности:** Статья выполнена в рамках научного проекта 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса».

**Для цитирования:** Хайбуллина АИ., Зиннатуллин НХ., Ильин ВК. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020.Т. 22. № 1. С. 49-57. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-49-57.

## IMPROVING HEAT EXCHANGER EFFICIENCY USING THE PULSED METHOD OF CLEANING

AI Haibullina<sup>1</sup>, VK Ilyin<sup>1</sup>, NX Zinnatullin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia  
haybullina.87@mail.ru

**Abstract:** The fouling of heat exchange equipment leads to serious economic losses in many industries, therefore to find a method to reduce deposits on heat transfer surfaces remains an actual task. In this paper, a practical solution is proposed for the implementation of a pulsating cleaning method of oil coolers as an example. The influence of pulsations on cleaning of the external surface of the heat exchanger is studied by computer modeling with Ansys Fluent. The fluid flow was described by the Navier-Stokes equation, particle motion and their interaction was described by the discrete element method (DEM). In the study, a staggered tube bundle was considered. The pulse frequency 0,3125 Hz, the amplitude referred to the diameter of tube is 35, the Reynolds number 100, the duty cycle of the pulsations 0,25. Oil was chosen as the medium. Evaluation of the pulsating cleaning method was carried out on the basis of the analysis of the mechanics of particle collisions on the surface of the central cylinder in the beam, with stationary and pulsating flow. It was found that the pulsating flow helps to reduce deposits in the front of the cylinder and is not effective in the back. An analysis of the mechanics of particle impact on the heat exchange surface showed that this pulsation mode is more effective for removing plastic deposits.

**Keywords:** oil cooler, erosion rate, heat exchanger cleaning, low-frequency asymmetrical impulses, discrete element method, staggered tube bundle, mathematical modeling, pulsating cleaning, pulsating flow, surface contamination.

**Acknowledgments:** The article is executed within the framework of the scientific project 18-79-10136 «Theoretical methods for modeling and developing energy-efficient import-substituting cleaners and deep processing of hydrocarbon raw materials at enterprises of the fuel and energy complex».

**For citation:** Haibullina AI, Zinnatullin NX, Ilyin VK. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):49-57. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-49-57.

## Введение

Загрязнение теплообменников остается на сегодняшний день одной из основных нерешенных проблем в области теплоэнергетики, а нахождение лучшего метода для предотвращения или снижения скорости загрязнения продолжает быть актуальной задачей. Эффективность систем маслоснабжения насосных установок и турбоприводов зависит от стабильной и бесперебойной работы маслоохладителей. Стабильная работа маслоохладителей характеризуется постоянной теплопроизводительностью и гидравлическим сопротивлением. Температура масла на выходе из маслоохладителя может увеличиться ввиду ряда причин. Например, в связи увеличением температуры охлаждающей воды или с загрязнением поверхности теплообмена, что введет к увеличению расхода охлаждающей воды [1].

При эксплуатации маслоохладителя его теплопроизводительность  $Q$  может снизиться в результате ряда причин:

- попадание воздуха в корпус маслоохладителя;
- засорение трубных досок;
- загрязнение поверхности теплообмена;
- увеличение температуры охлаждающей воды связанные с пиковыми нагрузками;
- засорение водяных фильтров и как следствие уменьшение охлаждающей воды.

Основной причиной снижения  $Q$  является загрязнения поверхности теплообмена. В этом случае для восстановления  $Q$  необходимо очистка маслоохладителя. Очистка может производиться, как механически, путем разбора маслоохладителя с дальнейшей промывкой поверхности теплообмен, так и без разбора (реагенты, гидродинамическая очистка). Очистка с водяной стороны проще по сравнению очистки со стороны масла, в силу того, что масло находится в межтрубном пространстве (здесь загрязненная поверхность теплообмена является более трудно доступной).

Традиционный химический метод очистки теплообменников требует утилизации химических реагентов после очистки, а также остановки работы агрегата на время удаления загрязнений. В этом свете пульсационные методы интенсификации теплообменных процессов представляются перспективным способом очистки, т.к. они не требуют разборки агрегатов, а также остановки их работы. Импульсный поток создает высокие периодические

ускорения жидкости, которые могут вызывать более быстрое разрушение слоя отложений из-за увеличения напряжения сдвига, действующего на поверхность. Данный метод может решить проблему очистки внешней поверхности труб в пучке, наиболее труднодоступной части для очистки в теплообменном аппарате.

Периодический нестационарный поток хорошо зарекомендовал себя в качестве метода интенсификации теплообмена. В работах [2,3] исследовалось влияние наложенных пульсаций на поток теплоносителя в теплообменнике типа в трубе. В результате экспериментальных исследований обнаружено, что с увеличением интенсивности пульсаций происходит рост теплоотдачи. В работах [4,5] исследуется теплообмен при поперечном обтекании цилиндра в условиях наложенных пульсаций потока. В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена как при ламинарном [4], так и при турбулентном течении [5]. В работах [6,7], также обнаружено увеличение теплоотдачи одиночного цилиндра при вынужденных пульсациях потока. Интенсификация теплообмена наблюдается при принудительных пульсациях потока в трубе [8], при обтекании полуцилиндра [9,10], и других препятствий [11,12]. Не смотря на имеющиеся положительные результаты в применении пульсирующих потоков для интенсификации теплообмена в пучках труб для потоков воздуха [13], воды [14] и масла [15], экспериментальных и теоретических исследований их влияния на очистку внешней поверхности труб в пучке в настоящее время недостаточно [16-18]. Поэтому в данной работы было исследование влияния пульсационного потока на эффекты, способствующие удалению отложений на внешней поверхности пучков труб, а также предложено практическое решение для реализации пульсационного метода очистки маслоохладителей.

#### Постановка задачи исследования

На рис. 1 предложена модернизированная схема системы охлаждения подшипников насосно-силового агрегата для перекачки нефтепродуктов оснащенная пульсационной установкой рис. 1. Предложенное схемное решение было использовано [1,19] для восстановления теплопроизводительности маслоохладителя при загрязнении теплообменной поверхности. Увеличение теплопроизводительности осуществлялось за счет интенсификации теплообмена в межтрубном пространстве маслоохладителя пульсирующим потоком. Данное практическое решение также может использоваться для реализации пульсационного метода очистки маслоохладителей.

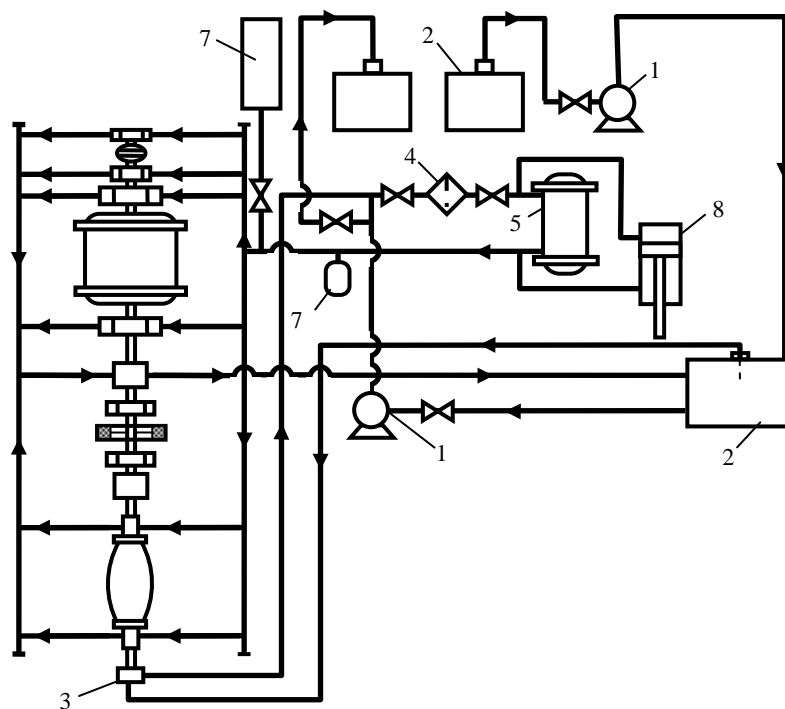


Рис. 1. Модернизированная схема насосно-силового агрегата:

1 – шестеренчатый насос; 2 – бак; 3 – насосно-силовой агрегат; 4 – фильтр; 5 – маслоохладитель;  
6 – аккумулярующий бак; 7 – гидropневмобак; 8 – пульсационная установка

На рис. 2 показана схема ПУ. Насос 1 всасывает рабочую жидкость (масло) из бака 9 и подает в гидроцилиндр (ГЦ) 8 через гидрораспределитель 7, обратно в бак масло возвращается через радиатор 6 и фильтр 5. Гидрораспределитель служит для изменения направления движения поршня ГЦ 11 и поршня пульсатора 12, поскольку поршень ГЦ связан общим штоком с поршнем пульсатора. Полость пульсатора 13 связана с входным штуцером маслоохладителя (по потоку масла) (рис. 2), полость пульсатора 14 с выходным штуцером маслоохладителя. Поэтому при уменьшении объема в полости 13 пульсатора (прямой ход поршня) происходит увеличение давления на выходе из маслоохладителя и уменьшению на входе в связи с расширением полости 14 пульсатора, что приводит к остановке и смене направления движения потока масла в маслоохладителе. При изменении направления движения (обратный ход) поршня пульсатора происходит увеличение давления на входе в маслоохладитель и уменьшение на выходе соответственно, что приводит к повторному развороту потока масла и ускорению его течения.

Таким образом, поток масла в маслоохладителе совершает возвратно-поступательное движение с заданной частотой  $f$  амплитудой  $A/d$  и скважностью  $\psi$  пульсаций. Необходимая  $f$  и  $\psi$  задается путем установки времени срабатывания электромагнитных клапанов гидрораспределителя,  $A/d$  длиной рабочего хода поршня пульсатора.

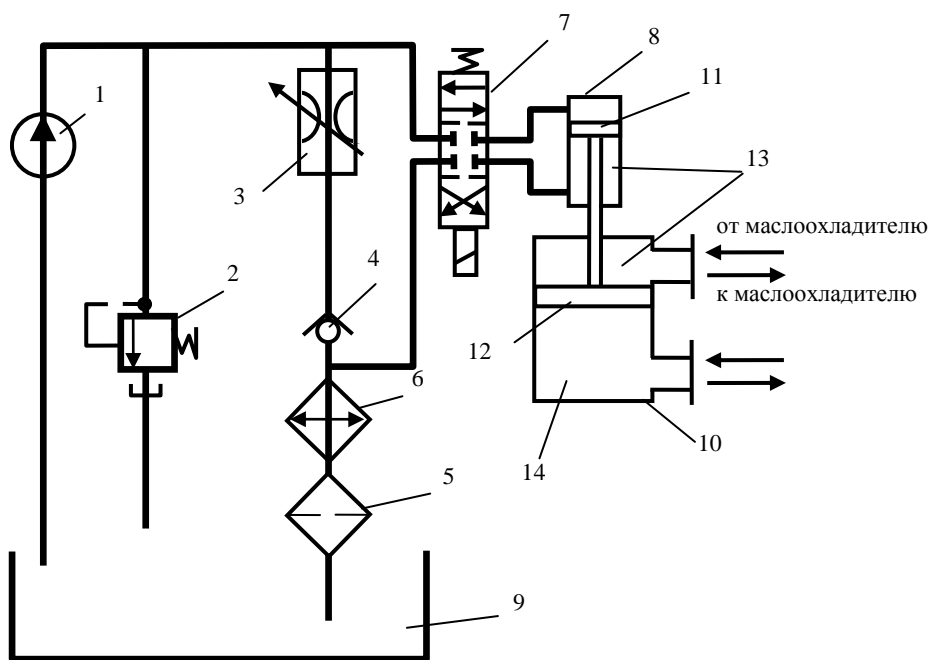


Рис. 2. Схема ПУ:

1 – насос; 2 – клапан предохранительный; 3 – дроссель; 4 – клапан обратный; 5 – фильтр; 6 – радиатор; 7 – гидрораспределитель; 8 – ГЦ; 9 – бак; 10 – пульсатор; 11 – поршень ГЦ; 12 – поршень пульсатора; 13, 14 – полости пульсатора

Для оценки влияния режимов пульсирующего потока на условия способствующие очистке было проведено численное исследование.

Течение масло в пучке труб описывалось уравнением Навье-Стокса, с применением модели турбулентности Спаларта-Аллармаса SA. Расчетная область математической модели представляла собой двухмерный пучок труб с расположенными в нем половинками трубок в шахматном порядке рис. 3. На входе в канал задавались параметры пульсирующего потока.

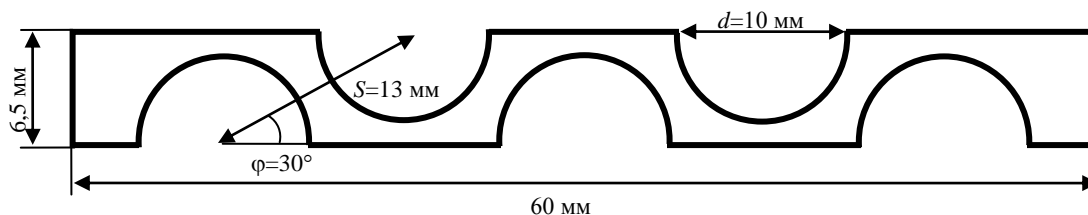


Рис. 3. Геометрия численного эксперимента

Наибольшее влияние на скорость эрозии оказывают скорость падения частиц, а также их угол удара, поэтому в этой работе мы учитывали воздействие именно этих факторов. Диаметр и массовый расход были постоянными для идентичных условий, соответственно эти факторы одинаково влияют на скорость эрозии в стационарном и в импульсном режиме, поэтому эти факторы мы не учитывали. Влиянием шероховатости стенки и вязкости жидкости на эрозию мы пренебрегли. Подробное описание деталей численного эксперимента приведено в работе [20].

#### Обсуждение результатов

Моделирование было проведено в ПО *Ansys Fluent* методом конечных объемов для этого расчетная область была поделена на 4220 ячеек. ПО *Ansys Fluent* [21] позволяет узнать значения координат и скоростей всех частиц в любой момент времени.

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -ой частицы,  $x_0, y_0$  – координаты центра окружности. Считаем частицу ударившейся в стенку, если  $r_i \leq R_{\text{трубы}} + r_{\text{частицы}}$ .

Из координат частицы, ударившейся в стенку, мы также нашли тангенс угла наклона прямой, перпендикулярной касательной к поверхности стенки в месте удара:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \rightarrow \varphi_i = \arctg \left( \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad (2)$$

В исследовании нам нужны были только те частицы, которые летели к стенке. Поэтому для упрощения расчетов вектор скорости частицы был переведен из системы координат  $O_{xy}$  в систему  $O_{ba}$ , где ось  $O_b$  – касательная к поверхности стенки в месте соударения, а  $O_a$  – перпендикуляр к касательной, проходящий через точку соударения и центр окружности полутрубы (рис. 4). С помощью матрицы поворота системы координат переводим скорость частицы в новых координатах:

$$v_{bi} = v_{xi} \cos \gamma \mp v_{yi} \sin \gamma \quad (3)$$

$$v_{ai} = v_{yi} \cos \gamma \pm v_{xi} \sin \gamma, \quad (4)$$

где  $v_{xi}, v_{yi}$  – значение скорости  $i$ -ой частицы в координатах  $O_{xy}$ ,  $v_{bi}, v_{ai}$  – в координатах  $O_{ba}$ ,  $\gamma$  – угол поворота новой системы координат относительно старой, верхний знак указан для положительного направление вращения против часовой стрелки, нижний – по часовой стрелке  $\left( \gamma = \begin{cases} 90^\circ - \varphi, & \text{при } \varphi < 90^\circ \\ \varphi - 90^\circ, & \text{при } \varphi > 90^\circ \end{cases} \right)$ .

Соответственно, если  $v_{ai} < 0$ , то частица летит к стенке, и мы учитываем ее в наших расчетах. За угол падения частицы принимаем острый угол между вектором скорости и осью  $O_b$ , находим его следующим образом:

$$\beta_i = 90^\circ - |\alpha_i|, \quad \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{v_{bi}}{v_{ai}}. \quad (5)$$

Модуль скорости  $i$ -ой частицы в момент удара равен:

$$v_i = \sqrt{v_{ai}^2 + v_{bi}^2} \quad (6)$$

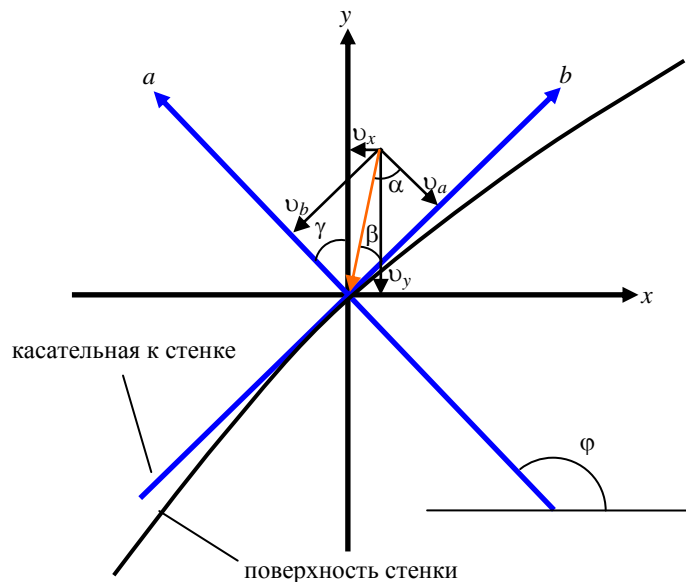


Рис. 4. Иллюстрация направления вектора скорости:  
 стрелка оранжевого цвета – направление вектора скорости, угол  $\varphi$  – угол наклона прямой, перпендикулярной касательной к поверхности, угол  $\gamma$  – угол поворота системы координат, угол  $\beta$  – угол удара частицы

На рис. 5 представлено количество частиц, угол падения которых входит в диапазон  $15 \leq \beta \leq 25$  и  $75 \leq \beta \leq 90$  и  $75 \leq \beta \leq 90$ . Средняя скорость частиц в момент удара на рис. 6. Результаты приведены для лобовой и кормовой части центральной трубки в пучке (рис. 3).

Приведенные диапазоны углов были выбраны для исследования исходя из того, что для хрупких материалов на скорость эрозии наибольшее влияние оказывают углы ударов наиболее близкие к  $90^\circ$ , а для пластичных – максимум эрозии достигается при углах равных  $20^\circ$ .

Время также было отложено в относительных значениях, где 0 – начало периода, а 1 соответствует длине периода  $T$ . Режим пульсаций соответствовал значениям амплитуды  $A/d = 35$ , частоты  $f = 0,3125$  Гц, скважности  $\psi = 0,25$  и числу Рейнольдса  $Re = 100$ . Плотность масла соответствовала  $\rho = 854 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu = 0,014 \text{ Па}$ . Количество частиц, ударившихся в лобовой части возросло (рис. 5) как для углов в диапазоне  $15 \leq \beta \leq 25$ , так и при углах  $75 \leq \beta \leq 90$  (значения  $>1$ ), средняя скорость частиц также возросла (рис. 6), по сравнению со значениями для стационарного потока. Таким образом, можно сделать вывод, что эрозия лобовой части возросла как для хрупких загрязнений, так и для пластичных. Скорость эрозии в кормовой части трубки снизилась, т.к. снизилась скорость удара частиц.

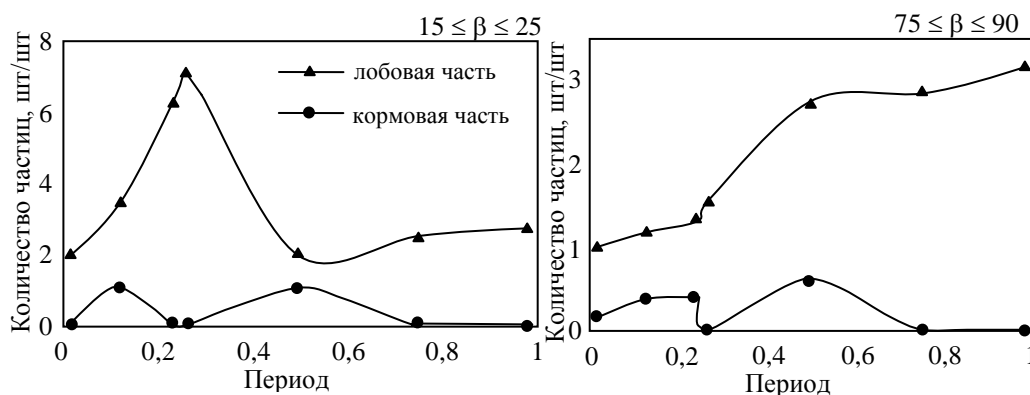


Рис. 5. Количество частиц в относительных единицах, ударившихся под углом в диапазоне  $15 \leq \beta \leq 25$  (слева) и  $75 \leq \beta \leq 90$  (справа)

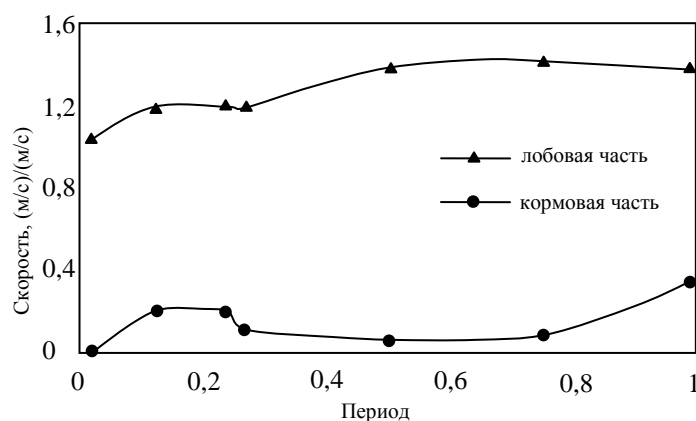


Рис. 6. Средняя скорость частиц в момент в относительных единицах

### Выводы

Для лобовой части рубки количество частиц в относительных единицах ударившихся под углом в диапазоне  $15 \leq \beta \leq 25$  больше частиц ударившихся под углом  $75 \leq \beta \leq 90$ , что говорит о большем потенциале применения пульсаций для очистки загрязнений из пластичных отложений.

Для кормовой части трубы рубки количество частиц ударившихся под углом в диапазоне  $15 \leq \beta \leq 25$  и  $75 \leq \beta \leq 90$  меньше стационарного течения (значения  $<1$ ). Для улучшения условий способствующих очистке в кормовой зоне необходимы дополнительные исследования при других параметрах пульсаций.

### Литература

1. Хайбуллина А.И. Повышение эффективности теплообменных аппаратов наложением на поток в межтрубном пространстве низкочастотных пульсаций: дисс. ... канд. техн. наук: А.И. Хайбуллина. 2017. С. 229.
2. Zohir A.E. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows // New York Science Journal. 2011. V. 4. №6. pp. 61-71.
3. Zohir A.E. Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. // J. Am. Sci. 2012. V. 8. pp. 241-250.
4. Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, et al. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows // Heat Transfer Engineering. 2016. V. 37. № 6. pp. 535-544.
5. Li G., Zheng Y., Xu Y., et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement from a heated circular cylinder with constant heat input power in turbulent pulsating crossflows // Heat and Mass Transfer. 2014. V. 50. № 6. pp. 1417-1427.
6. Molochnikov V.M., Mikheev N.I., Mikheev A.N., et al. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. V. 24. №4. С.569-575.
7. Mikheev N. I., Molochnikov V. M., Mikheev A. N., Dushina O. A. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V.109. pp. 254-265.
8. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. V. 47. pp. 3957-3970.
9. Bhalla N., Dhiman A.K. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017. V. 39. № 8. pp. 3019-3037.
10. Srivastava A., Dhiman A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder // The European Physical Journal Plus. 2019. 134(4). pp. 1-17.
11. E. Martin, A. Velazquez & A. Valeije (2018) Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications V. 74. № 12. pp. 1747-1769.
12. Velazquez A., Arias J.R., Mendez B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. V. 51. pp. 2075-2089.
13. Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Goltsman A.E., Paereliy A.A., Aslaev A.K. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow // Journal of Physics: Conference Series 2018. pp. 012-024.

14. Хайбуллина АИ., Хайруллин АР., Синявин АА., и др. Исследование теплоотдачи в коридорном пучке труб при наложении на поток противоточных несимметричных низкочастотных пульсаций // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. Т 12. № 1. С. 312-315.
15. Ilyin V.K., Sabitov L.S., Haibullina A.I., et al. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016". 2017. V. 240, № 1. pp. 1-10.
16. Bode K., Hooper R.J., Paterson W.R., et al. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling // Heat Transfer Engineering. 2007. V. 2. № 3. pp. 202-209.
17. Scholer M., Fuchs T., Augustin W., et al. Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures / Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. 2009. pp. 455-463.
18. Augustina W., Fuchs T., Föste H., et al. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing // Food and Bioproducts Processing. 2010. V. 8. pp. 384-391.
19. Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., et al. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler // OP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412. 2018. pp. 1-6.
20. Липагина А.Д. Использование пульсаций для очистки теплообменных аппаратов. Дис. ... магистр. 2019. С. 75.

### Авторы публикации

**Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет. E-mail: haybullina.87@mail.ru.

**Зиннатуллин Назиф Хатмулович** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

**Ильин Владимир Кузьмич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), проректор по непрерывному образованию, Казанский государственный энергетический университет. E-mail: ilyinvk@mail.ru.

### References

1. Khaibullina A.I. *Improving the efficiency of heat exchangers by imposing on the flow in the annular space of low-frequency pulsations*. dissertation. Kazan State Power Engineering University, Kazan. 2017. P. 229.
2. Zohir A.E. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows. *New York Science Journal*. 2011;4(6):61-71.
3. Zohir A.E. Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. *Journal. Am. Sci*. 2012;8:241-250.
4. Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, et al. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows. *Heat Transfer Engineering*. 2016;37(6):535-544.
5. Li G, Zheng Y, Xu Y, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement from a heated circular cylinder with constant heat input power in turbulent pulsating crossflows. *Heat and Mass Transfer*. 2014;50(6):1417-1427.
6. Molochnikov V.M., Mikheev N.I., Mikheev A.N., et al. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017;24(4):569-575.
7. Mikheev N.I., Molochnikov V.M., Mikheev A.N., et al. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;109:254-265.
8. Wang X, Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005;47:3957-3970.
9. Bhalla N, Dhiman A.K. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017;39(8):3019-3037.
10. Srivastava A, Dhiman A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder. *The European Physical Journal Plus*. 2019;34(4):1-17.



11. Martin E, Velazquez A.& Valeije A. (2018) Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2018;74(12):1747-1769.
12. Velazquez A, Arias JR, Mendez B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51:2075-2089.
13. Molochnikov VM, Mikheev AN, Goltsman A.E., et al. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. pp. 012-024.
14. Haibullina AI, Hayrullin AR, Sinyavin AA, et al. Issledovaniye teplootdachi v koridornom puchke trub pri nalozhenii na potok protivotochnykh nesimmetrichnykh nizkochastotnykh pul'satsiy. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologi*. 2013;12(1)312-315.
15. Ilyin VK, Sabitov LS, Haibullina AI, et al. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. "International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016". 2017;240(1):1-10.
16. Bode K. Hooper R. J., Paterson W. R., Wilson D. I., et al. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling. *Heat Transfer Engineering*. 2007;28(30):202-209.
17. Scholer M, Fuchs T, Augustin W, et al. Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures. *Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. 2009. pp. 455-463.
18. Augustina W, Fuchs T, Föste H, et al. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. *Food and Bioproducts Processing*. 2010;8:384-391.
19. Haibullina AI, Sabitov LS, Hayrullin AR, et al. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;412:1-6.
20. Lipagina AD. *The use of pulsations for cleaning heat exchangers: master.[dissertation]* 2019. P.75.

#### Authors of the publication

**Aigul I. Haibullina** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Nazif X. Zinnatullin** – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

**Vladimir K. Ilyin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Поступила в редакцию*

*19 ноября 2019г.*