

УДК 532.595.7, 519.63

Алена Дмитриевна Липагина

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», магистрант кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, e-mail: konovalovaad@mail.ru

Айгуль Ильгизаровна Хайбуллина

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Алексей Александрович Синявин

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий учебной лабораторией кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, телефон (843) 519-43-21, e-mail: alex_sinjawin@mail.ru

Владимир Кузьмич Ильин

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-06, e-mail: ilinvk@mail.ru

Эффективность очистки пучка труб низкочастотным пульсационным потоком с твердыми включениями¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Отложения на поверхности труб в межтрубном пространстве кожухотрубных теплообменников снижают их эффективность. Поиск эффективного безразборного метода очистки остается актуальной задачей. Очистка трубных пучков низкочастотным несимметричным пульсационным потоком на данный момент мало изучена. Целью работы является численный анализ влияния подобных пульсаций на основные очищающие факторы (касательное напряжение на стенке, скорость эрозии).

Материалы и методы. Для численного эксперимента использован симметричный элемент шахматного пучка труб при поперечном обтекании турбинным маслом T22 ($Re = 100$; $Pr = 273$) с кварцевым песком в качестве очищающего агента. Модель движения несжимаемой жидкости включает уравнения Навье-Стокса, неразрывности, модели турбулентности Spalart-Allmaras. Движение дисперсий рассчитано методом дискретных элементов, а эрозия – методом Campos-Amezua. Численное исследование выполнено в Ansys Fluent с временным шагом 0,001 с. Пульсации генерированы на входном граничном условии. Для оценки эффективности пульсаций проведено сравнение касательного напряжения и скорости эрозии на стенке центральной трубки пучка при одинаковых средних по времени расходах в стационарном и нестационарном потоках.

Результаты. Установлено, что несимметричные пульсации потока (скважность 0,25) приводят к увеличению касательного напряжения во всех исследуемых режимах (амплитуда $25 \leq A/d \leq 35$, частота $0,3125 \leq f \leq 0,5$ Гц), а скорость эрозии увеличивается при максимальной частоте; изменение амплитуды приводит к изменению локализации усиливающего эффекта пульсаций на поверхности труб. Установлено, что наложение пульсаций усиливает касательное напряжение сдвига и скорость эрозии в лобовой и кормовой частях труб пучка, которые наиболее подвержены отложениям.

Выводы. Проведенный анализ подтверждает существенное влияние несимметричных пульсаций на очищающие факторы и перспективность их применения для интенсификации очистки пучков труб. Обнаруженные эффекты могут послужить основой для разработки новых технологий очистки межтрубного пространства теплообменников.

Ключевые слова: очистка теплообменников, пульсирующее течение, шахматный пучок труб, вычислительная гидродинамика, модель дискретных элементов, эрозия

Alyona Dmitrievna Lipagina

Kazan State Power University, Master degree student of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, e-mail: konovalovaad@mail.ru

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-10136).

Aigul' Il'gizarovna Khaibullina

Kazan State Power University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Aleksei Aleksandrovich Sinyavin

Kazan State Power University, Chief of the university laboratory of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-43-21, e-mail: alex_sinjavin@mail.ru

Vladimir Kuz'mich Il'in

Kazan State Power University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-06, e-mail: ilyinvk@mail.ru

Efficiency of tube bundle cleaning by low-frequency flow pulsations with solid particles

Abstract

Background. Scale buildup on the tube surface in the intertubular space of the shell-and-tube heat exchangers reduce their efficiency. The topical issue is the search for clean-in-place methods. The tube bundle cleaning by low-frequency nonsymmetrical pulsations is understudied. The aim of the paper is numerical analysis of the influence of pulsations on the key cleaning factors (wall shear stress, erosion rate).

Materials and methods. For the numerical experiment the symmetrical element of a staggered tube bundle with a crossflow of turbine oil (T22) ($Re = 100$; $Pr = 273$) and the quartz sand as a cleaning agent is used. The model of incompressible fluid flow comprises the system of Navier-Stokes and continuity equations, the turbulent model Spallart-Allmaras. The motion of solid particles is calculated by the discrete element method, and the erosion rate is calculated by the Campos-Amezcuca method. In unsteady conditions with time step 0,001 sec, numerical simulations are performed in Ansys Fluent. Pulsations are generated on entry boundary condition. To estimate the flow pulsation efficiency, the wall shear stresses on the central tube of bundle and erosion rates are compared under the same average rate in steady and nonsteady flow.

Results. It is found that asymmetrical flow pulsations (duty cycle 0,25) increase of wall shear stress in all the modes under consideration (amplitude $25 \leq A/d \leq 35$, frequency $0,3125 \leq f \leq 0,5$ Гц), but an increase in erosion rate takes place only at maximal frequency. The amplitude variation displaces the localization of the reinforcing effect of flow pulsations on the tube surface. However, it is found that flow pulsations increase the wall shear stress and erosion rate in the front and rear sides of the tubes that are most susceptible to scale buildup.

Conclusions. The conducted analysis confirms the significant influence of asymmetrical pulsations on cleaning factors and the perspective of their application for intensification of tube bundle cleaning. The detected effects can be the base to develop new technologies of cleaning intertubular space of heat exchangers.

Key words: heat exchanger cleaning, pulsation flow, staggered tube bundle, CFD modeling, DEM model, erosion

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.014-025

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. Основным негативным последствием загрязнения является потеря теплопередачи. На сегодняшний день большинство отраслей промышленности терпит серьезные экономические убытки, вызванные загрязнением теплообменников.

Очистка теплообменного оборудования может производиться разборными и

неразборными методами. Ввиду трудоемкости процесса разборки агрегатов, использование неразборных методов предпочтительнее. 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, так как они не требуют разборки агрегатов и остановки их работы. Импульсный поток создает высокие периодические ускорения жидкости, которые могут вызы-

вать 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. Так, например, в [1] показано, что амплитуда колебаний скорости сильно увеличивает теплопередачу, особенно когда амплитуда превышает определенное значение. Наиболее важным механизмом усиления теплообмена, по мнению авторов, является большая скорость и реверсирование потока в течение периода пульсации.

Периодические колебания потока усиливают конвективное перемешивание и, соответственно, увеличивают локальное число Нуссельта. Исследования [2] показали, что усредненное по времени число Нуссельта может стать на 55 % больше, чем в случае с постоянным потоком.

В [3] исследовано влияние частоты и амплитуды пульсаций, а также числа Рейнольдса на коэффициент теплоотдачи. Результаты показали, что увеличение относительного среднего числа Нуссельта до 10 раз было получено при более высоких амплитудах и более высоких частотах пульсаций.

Эффективность в теплообменнике типа труба в трубе повышалась с 15 до 35 % в экспериментах авторов [4] при наложении пульсаций на поток. Значительное улучшение производительности происходило при условии использования высоких частот и относительно низких чисел Рейнольдса.

В [5] изучено повышение теплоотдачи с помощью наложения несимметричных пульсаций в диапазоне чисел Рейнольдса $100 \leq Re \leq 1000$, частот $0,2 \leq f \leq 0,5$ Гц, отношений амплитуд пульсаций к диаметру трубок пучка $15 \leq \beta \leq 35$. Во всем исследуемом диапазоне наблюдалось повышение теплоотдачи при наложении пульсаций, коэффициент теплопередачи повышался с увеличением значений амплитуды и частоты. В [5] также замечено, что при минимальных значениях Re прирост теплоотдачи был наибольшим.

Интенсификация теплообмена не единственный эффект от наложения пуль-

саций на поток. Как уже было сказано, импульсные потоки могут способствовать процессам очистки. Эксперименты [6] показывают, что наложение синусоидальных пульсаций на поток приводит к сокращению времени очистки до 50 %. Требуемое время уменьшается примерно с 25 до 10 мин.

Исследование влияния импульсного потока на стадии очистки [7] в диапазоне чисел Рейнольдса $580 \leq Re \leq 9120$, частот пульсаций $0,2 \leq f \leq 2$ Гц, амплитуд пульсаций $0,52 \leq A \leq 0,84$ показало, что пульсирующий поток имел незначительный эффект при очистке во время начальной фазы набухания отложений, но оказывал значительное влияние на однородную стадию, где скорость очистки относительно постоянна, и стадию распада, когда очистка включает в себя эрозию «островков» остаточного осадка. В целом ускорение процесса очистки контролируется комбинацией амплитуды и частоты импульсного потока. В [6] также выявлено, что пульсации эффективнее при более низких числах Re .

В [8] моделировался поток в условиях турбулентного режима ($Re > 25000$) внутри трубы со сгибом под прямым углом. Очистка отложений на внутренней стенке после изгиба при импульсном режиме оказалась более эффективной, так как наиболее сильный обратный поток возникает именно в этой области. В [8] также отмечено, что использование импульсного потока результативнее для более сложных геометрий, чем для прямых труб.

В [9] численным методом проведено сравнение стационарного решения без наложения пульсаций в условиях турбулентного потока ($Re > 25\ 000$) и нестационарного решения с наложением синусоидальных колебаний. При переключении модели на импульсный поток скорость удаления отложений повысилась. В качестве действующей силы предложено касательное напряжение на стенке. На основе сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования отмечено, что время очистки, полученное из эксперимента, и касательное напряжение на стенке, полученное моделированием, коррелируют и обратно пропорциональны.

Помимо этого, существуют исследования, например [10], показывающие, что иногда примеси, такие как песок или другие взвешенные частицы в потоках текущей среды, могут иметь очищающее дей-

ствии, которое уменьшает или удаляет отложения.

Несмотря на имеющиеся положительные результаты в применении пульсирующих потоков, экспериментальных и теоретических исследований их влияния на очистку внешней поверхности труб в пучке в настоящее время недостаточно. Более того, исследований совместного влияния пульсаций и эрозионных эффектов твердых частиц на степень очистки не проводилось. В связи с этим проведено исследование [5] влияния низкочастотных несимметричных пульсаций, которые показали свою эффективность в интенсификации теплообмена в присутствии твердых включений, на эффекты, способствующие удалению отложений на внешней поверхности пучков труб, такие как касательное напряжение на стенке и эрозия отложений.

Физическая постановка задачи. Для изучения влияния пульсаций на очистные эффекты был выбран кожухотрубный маслоохладитель с шахматным расположением труб, ввиду распространенности его использования, а также актуальности поиска наиболее эффективного способа очистки, так как из-за относительно небольших значений чисел Рейнольдса ($Re \approx 500$) такие теплообменники сильно подвержены загрязнению.

Для анализа физических явлений в плотном пучке межтрубного пространства теплообменников допустимо рассмотреть процессы в глубинном элементарном объеме пучка [5]. В соответствии с этим, геометрия численного эксперимента представляет элементарный объем межтрубного пространства в виде половинок труб, расположенных в шахматном порядке

(геометрические параметры приведены на рис. 1 и в табл. 1), снизу и сверху ограниченных заданным граничным условием «симметрия». Центральная половинка трубы была разделена на 3 равных части (по 60°) для более локального изучения влияния пульсаций.

В качестве жидкой фазы использовано турбинное масло Т22 при температуре 58°C , а в качестве очищающего агента кварцевый песок. Режим течения масла ламинарно-турбулентный (с учетом пульсаций): $Re = 100$.

Таблица 1. Геометрические параметры

Название параметра	Обозначение, ед. измерения	Значение
Диаметр трубы	$d_{\text{трубы}}$, м	0,01
Шаг	S , м	0,013
Длина	м	0,06
Высота	м	0,0065

Математическая модель. Модель включает в себя уравнение Навье-Стокса, осредненное по методу Рейнольдса для моделирования гидродинамики и уравнение непрерывности [11]:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{\rho v_i v_j}}{\partial x_j}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

где u_i – осредненная во времени скорость, м/с; $\overline{v_i}$ – пульсационная составляющая скорости u_i , м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость, Па·с.

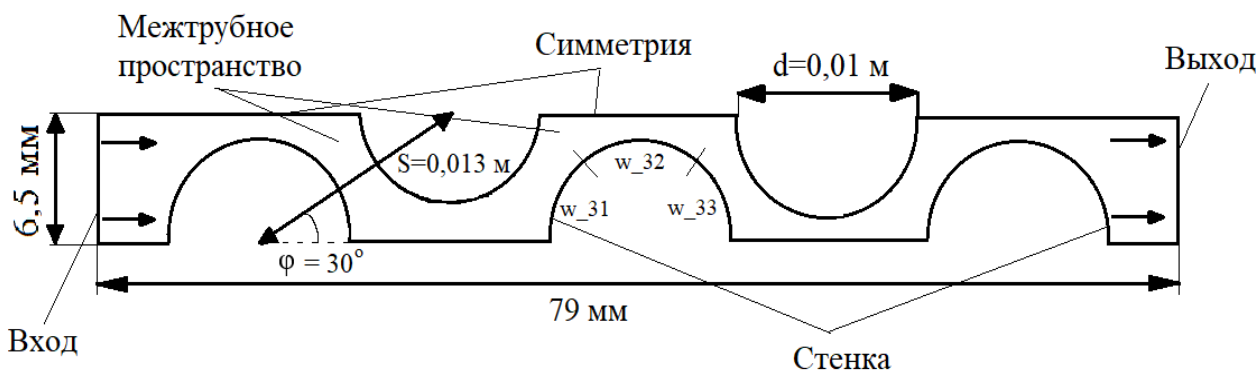


Рис. 1. Геометрия численного эксперимента: лобовая часть трубы (w_{31}), боковая (w_{32}) и кормовая (w_{33})

В качестве модели турбулентности выбрана модель Spalart–Allmaras (SA):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \times \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_i} \right)^2 \right] - \varepsilon_v, \quad (3)$$

где G_v – производство турбулентной вязкости; ε_v – диссипация турбулентной вязкости, которая происходит в пристеночной области из-за стенок и вязкого затухания; $\sigma_{\tilde{v}}$ и C_{b2} – постоянные; v – кинематическая вязкость [12].

Модель SA выбрана в связи с тем, что она показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными при нестационарном теплообмене в пучке труб с числами $Re < 1000$ [5].

Для моделирования движения твердых включений использована модель дискретных элементов (DEM), которая учитывает взаимодействие частиц между собой. Данный метод успешно применяется в различных областях, показывая достаточно согласованные с экспериментами результаты. Авторы [13] считают модель надежной в воспроизведении гидродинамики твердых частиц, хотя, по их мнению, для большей точности расчетов модели необходимо лучше учитывать физические характеристики частиц, в частности их форму. В моделировании потоков частиц и жидкости со свободно движущимися крупными объектами сложной формы модель DEM также показала хорошо согласованные с экспериментом результаты [14], [15].

Движение частиц рассчитывается по второму закону Ньютона с учетом сил, возникающих в результате столкновения частиц. При упругом соударении сила, действующая на частицу, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_1 = \delta K \vec{e}_{12}; \quad (4)$$

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1, \quad (5)$$

где $\delta = \|x_2 - x_1\| - (r_1 + r_2)$; x – координата соответствующей частицы, м; r – радиус частицы, м; K – коэффициент упругости, Н/м.

Тангенциальная составляющая силы находится следующим образом:

$$F_{friction} = \mu F_{normal}, \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения; F_{normal} – сила нормальной реакции на опору, Н.

Направление силы трения противоположно относительному тангенциальному движению и может препятствовать относительному тангенциальному движению. Коэффициент трения является функцией относительной величины тангенциальной скорости v_{rt} :

$$\mu(v_{rt}) = \mu_{stick} + (\mu_{stick} - \mu_{glide}) \times \left(\frac{v_{rt}}{v_{glide}} - 2 \right) \left(\frac{v_{rt}}{v_{glide}} \right), \quad (7)$$

где μ_{stick} – коэффициент трения прилипания; μ_{glide} – коэффициент трения скольжения; v_{glide} – скорость проскальзывания, м/с [12].

Эрозионный износ отложений определяется как материальный ущерб, вызванный воздействием частиц, увлеченных жидкой системой, воздействующей на поверхность с высокой скоростью. Воздействующие твердые или жидкие частицы, переносимые в газе или жидкости, постепенно удаляют отложения с поверхности посредством повторного контакта с ней.

Модель эрозии Campos-Amezcuа, как и другие модели [16], позволяет учитывать определяющие факторы и предназначена для использования совместно с моделью дискретных элементов:

$$E = \sum_{p=1}^{N_{particle}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}}, \quad (8)$$

где \dot{m}_p – массовый расход потока частиц, соударившихся со стенкой, кг/с; $C(d_p)$ – функция диаметра частицы; $f(\alpha)$ – функция угла удара частицы о стенку; v – скорость удара частицы, м/с; $b(v)$ – функция скорости частицы; A_{face} – площадь стенки в ячейке сетки, м².

Для сравнительного анализа интенсивности эрозии были приняты следующие значения параметров: $b(v) = 1$, $C(d_p) = 1$, $f(\alpha) = 1$, скорость эрозии рассчитывалась следующим образом:

$$E = \sum_{p=1}^{N_{particle}} \frac{\dot{m}_p v}{A_{face}}. \quad (9)$$

В табл. 2–5 указаны значения параметров, используемых при моделировании.

Таблица 2. Физические свойства твердых включений, подаваемых на вход расчетной области

Название	Обозначение, ед. измерения	Значение
Диаметр частицы	$d_{\text{частицы}}$, м	0,001
Плотность	$\rho_{\text{частицы}}$, кг/м ³	2000
Массовая концентрация частиц, подающихся на вход	$C_{\text{частиц}}$, %	1

Таблица 3. Физические свойства среды в расчетной области при температуре 58 °С

Среда	Свойства среды	Значение
Масло	Плотность, кг/м ³	854
	Вязкость, Па·с	0,014

Таблица 4. Граничные условия

Расчетная область	Обозначение, ед. измерения	Значение
Вход	$v_{\text{ж}}$, м/с	0,0456 ($Re = 100$)
Выход	P , Па	101325

Таблица 5. Параметры столкновений частиц между собой и со стенкой в модели DEM

Название параметра	Обозначение, ед. измерения	Значение
Константа упругого удара	K , Н/м	1000
Коэффициент трения прилипания	μ_{stick}	0,5
Коэффициент трения скольжения	μ_{glide}	0,2
Скорость проскальзывания	v_{glide} , м/с	1

Методика численного эксперимента. Задача решена в нестационарной постановке с шагом по времени 0,001 с как для расчета потока жидкости, так и для расчета потока частиц. Для решения дифференциальных уравнений в частных производных применен метод конечных объемов. Для применения этого метода вся расчетная область поделена на 4220 ячеек. Для более точного моделирования столкновений частиц со стенкой в пристеночной области сетка сгущалась десятью

слоями с фактором расширения 1,2. Максимальный размер ячейки составлял 0,00025 м, соответственно, размер первой ячейки на сетке был равен примерно $4,04 \cdot 10^{-5}$ м. Моделирование проведено в ПО Ansys Fluent [12].

Изучено влияние амплитуды и частоты пульсаций на факторы, влияющие на очистные эффекты, такие как касательное напряжение сдвига на стенке и скорость эрозии отложений. Импульсный поток задавался аналогично [5]. При стационарном потоке на вход задавалась постоянная скорость потока. При пульсационном движении на входе скорость менялась периодически во времени (рис. 2). При этом скважность была постоянной: $\psi = T_1/T = 0,25$, где T_1 – время полупериода импульса, с; T – период колебаний, с. Частота пульсаций и относительная амплитуда определялись следующим образом:

$$f = \frac{1}{T}; \quad (10)$$

$$\beta = A/d, \quad (11)$$

где d – диаметр трубы, м; A – смещение частицы назад в самом узком сечении межтрубного пространства, м.

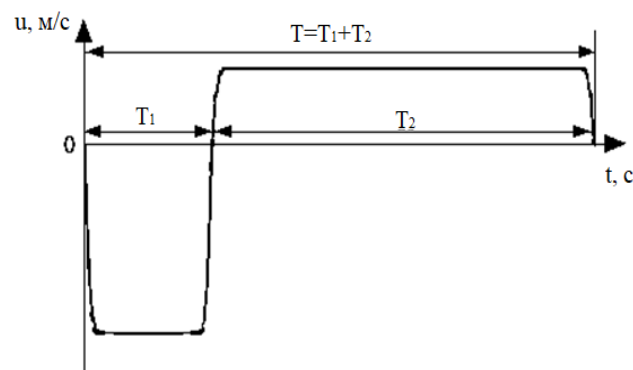


Рис. 2. Форма импульса, подаваемого на вход расчетной области

Соответственно, пульсации имели возвратно-поступательный характер. Осредненная за период пульсации скорость при импульсном потоке была равна скорости при стационарном потоке.

В численном эксперименте значения относительной амплитуды были в диапазоне $25 \leq A/d \leq 35$, частоты $0,3125 \leq f \leq 0,5$ Гц, значение числа $Re = 100$ во всех численных экспериментах оставалось постоянным.

В табл. 6 указаны параметры накладываемых пульсаций.

Таблица 6. Значения параметров импульсных режимов

Режим	Значение Re	Значение относительной амплитуды A/d	Значение частоты, Гц
Постоянный поток	100	–	–
Импульсный режим № 1	100	35	0,3
Импульсный режим № 2	100	25	0,5
Импульсный режим № 3	100	35	0,5

Результаты и обсуждение численного эксперимента. В [9], как уже было сказано, очистка теплообменного аппарата с помощью наложения пульсаций оценивалась сравнением касательных напряжений на стенке, такой метод показал удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Поэтому в нашей работе оценка напряжением сдвига на стенке также была произведена.

Касательное напряжение на стенке, осредненное по поверхности части центрального цилиндра, находилось следующим образом:

$$\langle \tau_\varphi \rangle = \frac{3}{\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \tau d\varphi, \quad (12)$$

где τ – мгновенное локальное значение касательного напряжения; φ_i – угловая отметка сектора.

Из-за того, что значения искомым величин при импульсном режиме меняются во времени, они усредняются за период пульсации:

$$\bar{\tau} \equiv \langle \tau_{\varphi,t} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \langle \tau_\varphi \rangle (t) dt, \quad (13)$$

где T – период пульсации.

На рис. 3–5 показано относительное касательное напряжение, представляющее собой отношение средних напряжений сдвига для импульсного и стационарного режимов:

$$\delta_\tau = \frac{\langle \tau_\varphi \rangle_{\text{имп.}}}{\langle \tau_\varphi \rangle_{\text{стац.}}} \quad (14)$$

Анализ полученных данных (рис. 3) показывает, что напряжение сдвига возросло для всех частей стенки (значения выше 1). Можно предположить, что флуктуации в начале периода связаны с изменением количества соударений частиц о стенку, т.е. с поворотом потока в противоположную сторону частицы сначала останавливаются, затем меняют направление своего движения (значения времени примерно в диапазоне от 0,1 до 0,25), разгоняются и ударяются о стенку, повышая напряжение сдвига на стенке.

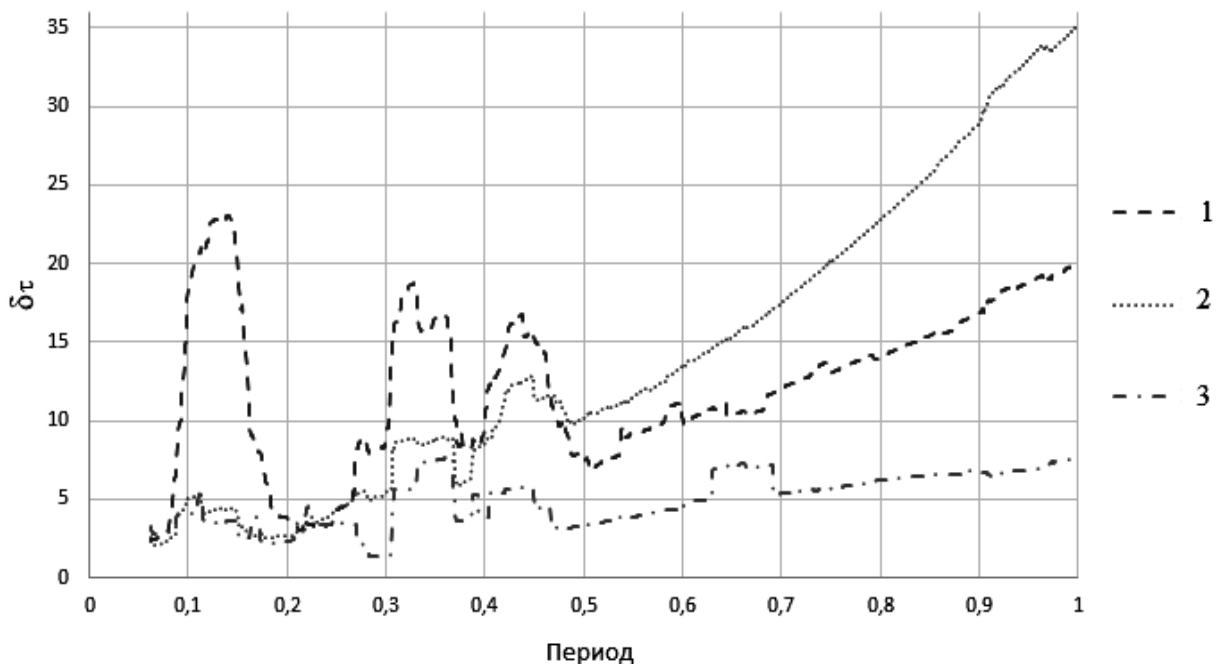


Рис. 3. Относительное напряжение сдвига на стенке для режима №1 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – боковая часть; 3 – кормовая часть

Затем направление движения опять изменяется, частицы опять разгоняются в направлении потока, но к частицам, подающимся с поверхности входа, добавляются частицы, унесенные обратным ходом, т.е. количество частиц увеличивается и, соответственно, повышается их влияние на значение напряжения сдвига на стенке (значения времени в диапазоне от 0,25 до 0,5). После поток частиц становится более равномерным, его влияние на напряжение сдвига снижается.

Режим пульсаций №2 (рис. 4) оказывает максимальное влияние на значения напряжения сдвига на кормовой части. При наложении пульсаций с частотой $f = 0,5$ Гц и амплитудой $A/d = 35$ (режим №3) касательное напряжение сдвига при импульсном потоке заметно возрастает для всех частей стенки (рис. 5).

Для количественного определения влияния пульсаций на значения касательного напряжения на стенке в табл. 7 приведены отношения усредненных за период пульсации значений напряжения на стенке при импульсном потоке и средних значений напряжения на стенке в постоянном потоке для каждой части полутрубы:

$$\delta_{\tau,t} = \frac{\bar{\tau}_{\text{имп}}}{\bar{\tau}_{\text{стац}}} \quad (15)$$

В целом при всех режимах пульсаций наблюдается увеличение напряжения сдвига на стенке, но на значения напряжения сдвига в лобовой части больше всего

повлиял режим №1 (см. табл. 6), а в кормовой части – режим №2, т.е. при более высокой амплитуде и низкой частоте может повыситься эффект очистки в лобовой части, а при меньшей амплитуде и большей частоте – в кормовой.

Таблица 7. Отношение усредненных за период касательных напряжений ($\delta_{\tau,t}$)

Режим импульсного потока	Лобовая часть	Боковая часть	Кормовая часть
1	10,3	15,3	4,5
2	4,5	6,6	6,2
3	7,8	7,3	5,4

Как уже было сказано, в качестве критерия оценки также использовано значение скорости эрозии отложений. Скорость эрозии оценивалась только для лобовой и кормовой частей, так как они наиболее подвержены загрязнению.

Скорость эрозии, осредненная по поверхности части центрального цилиндра, находилась следующим образом:

$$\langle E_{\varphi} \rangle = \frac{3}{\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} E d\varphi, \quad (16)$$

где E – мгновенное локальное значение скорости эрозии; φ_i – угловая отметка сектора.

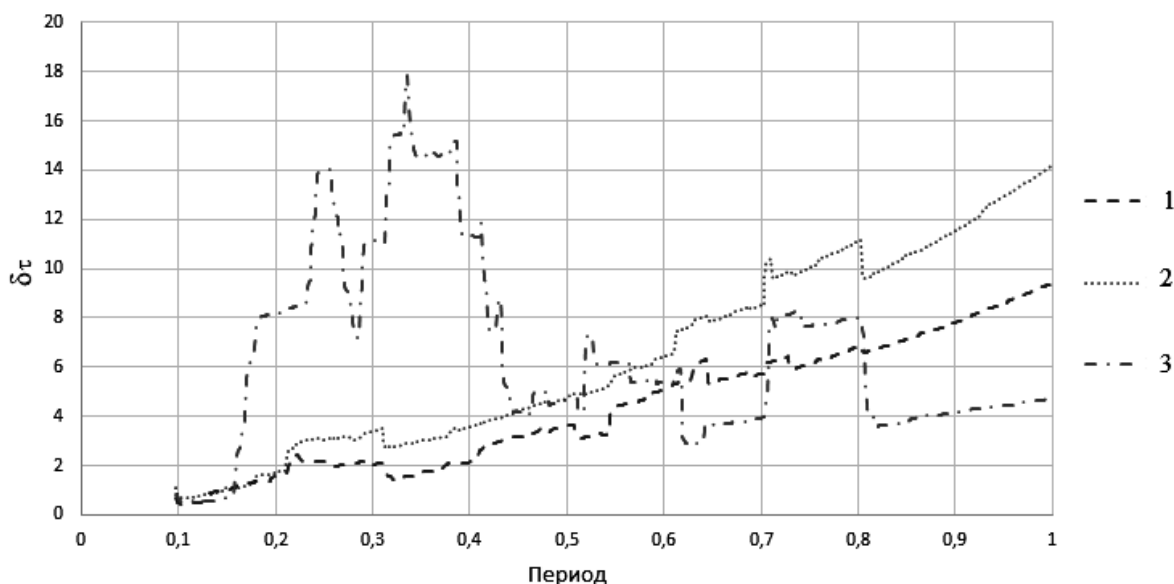


Рис. 4. Относительное напряжение сдвига на стенке для режима №2 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – боковая часть; 3 – кормовая часть

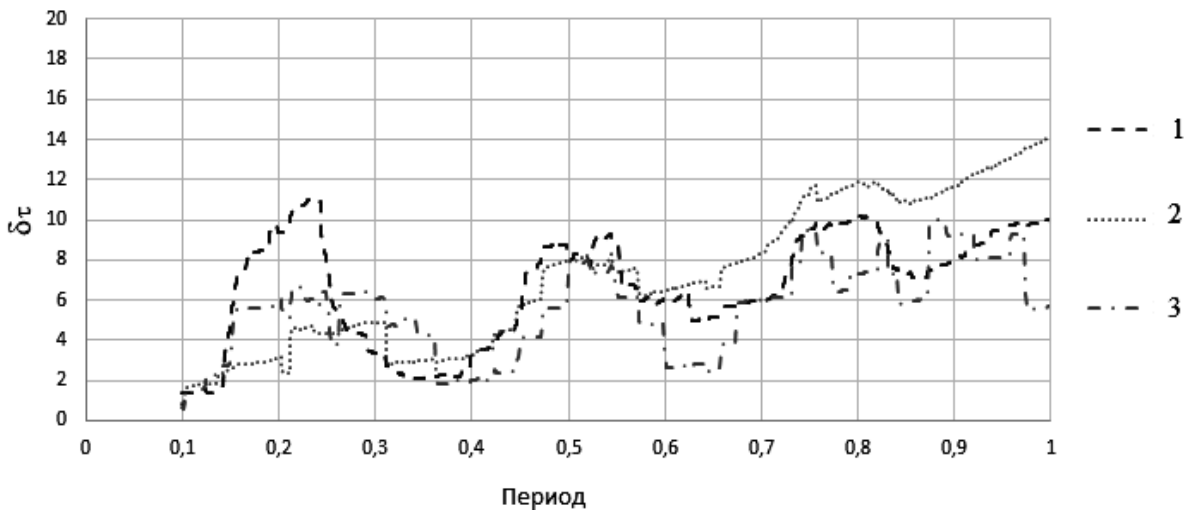


Рис. 5. Относительное напряжение сдвига на стенке для режима №3 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – боковая часть; 3 – кормовая часть

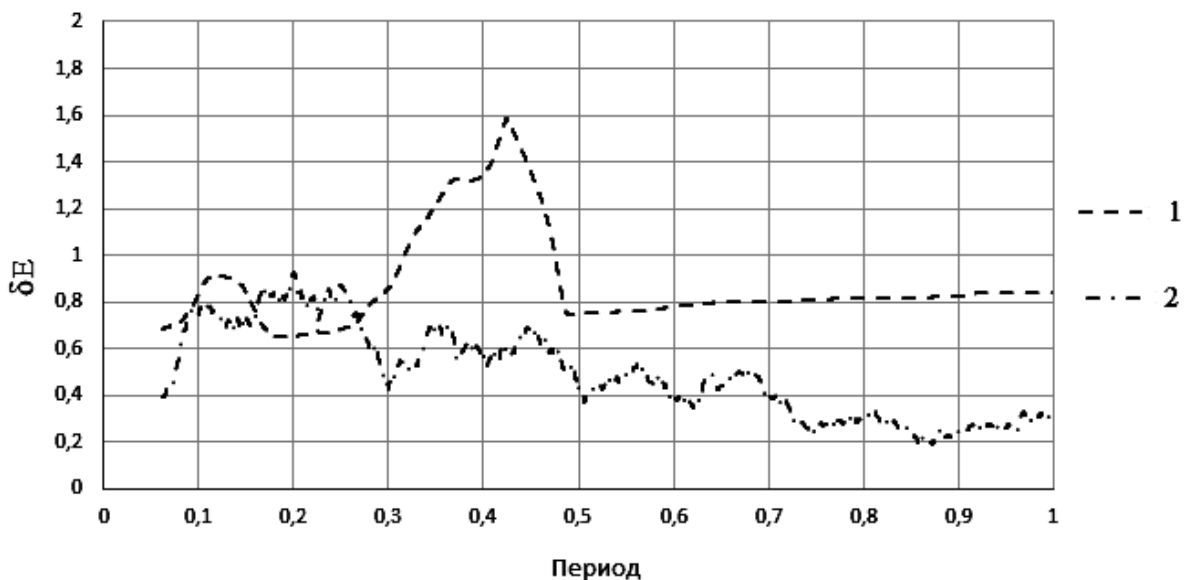


Рис. 6. Относительная скорость эрозии для режима №1 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – кормовая часть

Значения скорости эрозии, усредненные за период пульсации, определяются как

$$\bar{E} \equiv \langle E_{\varphi,t} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \langle E_{\varphi} \rangle (t) dt. \quad (17)$$

На рис. 6–8 показана относительная скорость эрозии, представляющая собой отношение средних скоростей эрозии для импульсного и стационарного режимов:

$$\delta_E = \frac{\langle E_{\varphi} \rangle_{\text{имп.}}}{\langle E_{\varphi} \rangle_{\text{стац.}}} \quad (18)$$

Импульсный режим №1, как показало моделирование, не увеличил скорость эрозии ни для одной части полутрубы (рис. 6). С другой стороны, режим №2 существенно увеличил скорость эрозии в кормовой части,

которая обычно является наиболее загрязненной, но снизил в лобовой части (рис. 7). Режим №3 также интенсифицировал процесс эрозии для кормовой части, но в меньшей степени, по сравнению с режимом №2. Тем не менее при этом режиме скорость эрозии повысилась как в лобовой, так и в кормовой части трубы (рис. 8).

В табл. 8 приведены отношения усредненных за период пульсации значений скорости эрозии при импульсном потоке и средних значений в постоянном потоке для каждой части полутрубы:

$$\delta_{E,t} = \frac{\bar{E}_{\text{имп.}}}{\bar{E}_{\text{стац.}}} \quad (19)$$

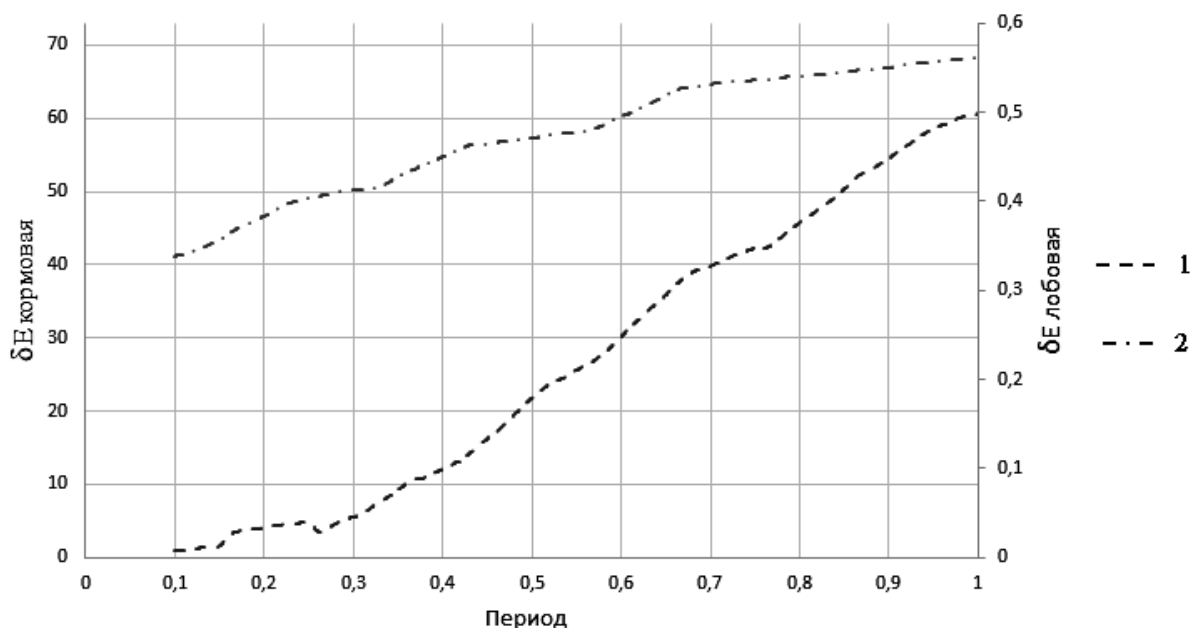


Рис. 7. Относительная скорость эрозии для режима №2 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – кормовая часть

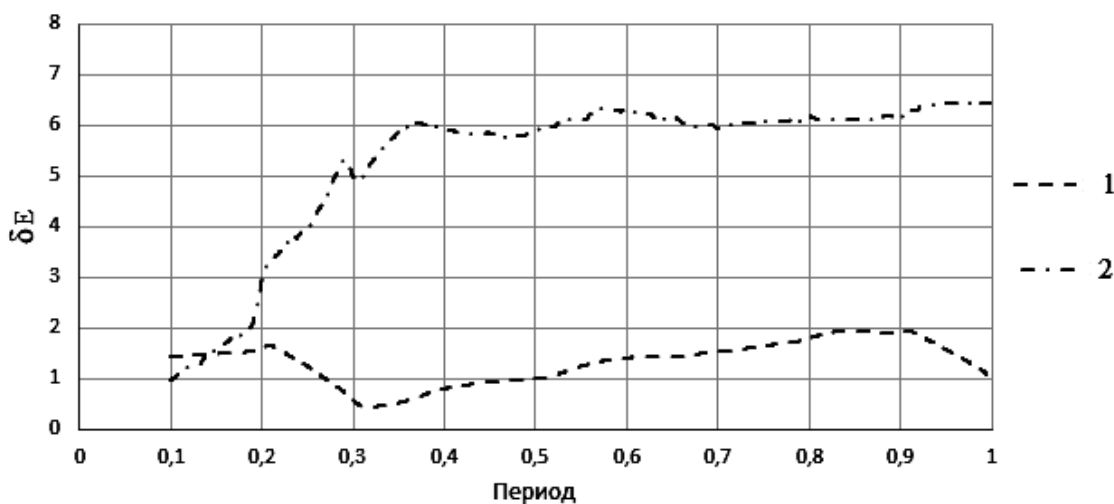


Рис. 8. Относительная скорость эрозии для режима №3 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – кормовая часть

Таблица 8. Отношение усредненных за период скоростей эрозии ($\delta_{E,t}$)

Режим импульсного потока	Лобовая часть	Кормовая часть
1	0,9	0,48
2	0,23	57,6
3	1,3	5,2

Согласно результатам численного эксперимента, увеличение частоты повышает скорость эрозии и, следовательно, возможно, ускорит очистку теплообменного аппарата. Также можно сказать, что увели-

чение амплитуды пульсаций интенсифицировало процесс эрозии и в лобовой, и в кормовой части, при этом более низкая амплитуда пульсаций снижает эрозию в лобовой части, но существенно усиливает в кормовой, а это наиболее традиционно загрязняемая часть трубы в пучке труб теплообменных аппаратов.

Выводы. Численно исследовано влияние пульсаций, а также их частоты и амплитуды на факторы, оказывающие влияние на интенсивность очистки пучка труб. Установлено, что изменение амплитуды меняет локализацию усиливающих эффектов пульсаций на поверхности трубы, т.е. меньшая амплитуда увеличивает действие

очищающих факторов в кормовой зоне, в то время как большая – в лобовой. Изменение частоты оказывает различное влияние на скорость эрозии и касательное напряжение, уменьшение частоты увеличивает значения касательного напряжения сдвига, но снижает скорость эрозии, увеличение частоты, соответственно, оказывает обратное воздействие.

Окончательно ответить, какой режим более перспективен для очистки, на данный момент трудно, так как для этого требуются дальнейшие исследования влияния чисел Рейнольдса и геометрии, а также не лишним будет провести численное моделирование в большем диапазоне амплитуд и частот.

Список литературы

1. **Wang X., Zhang N.** Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 47. – P. 3957–3970. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.011
2. **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. – Vol. 51. – P. 2075–2089. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.06.009
3. **Zohir A.E.** Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes // *J. Am. Sci.* – 2012. – Vol. 8. – P. 241–250. DOI: 10.7537/marsjas080212.37
4. **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. – Vol. 4, No. 6. – P. 61–71. DOI: 10.7537/marsnys040611.12
5. **Хайбуллина А.И.** Повышение эффективности теплообменных аппаратов наложением на поток в межтрубном пространстве низкочастотных пульсаций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – Казань, 2017. – 229 с.
6. **Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling** / K. Bode, R.J. Hooper, W.R. Paterson, et al. // *Heat Transfer Engineering*. – 2007. – Vol. 28, No. 3. – P. 202–209. DOI: 10.1080/01457630601064611
7. **Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows** / C.R. Gillham, P.J. Fryer, A.P.M. Hasting, D.I. Wilson // *Journal of Food Engineering*. – 2000. – Vol. 46. – P. 199–209. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00083-2
8. **Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures** / M. Scholer, T. Fuchs, W. Augustin, et al. // *Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. –

2009. – P. 455–463. http://heatexchanger-fouling.com/papers/papers2009/64_Schoeler_F.pdf

9. **Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing** / W. Augustina, T. Fuchs, H. Föste, et al. // *Food and Bioproducts Processing*. – 2010. – Vol. 8. – P. 384–391. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.08.007

10. **Gudmundsson J.S.** Particulate fouling: fouling of heat transfer equipment // *Proceedings of the International Conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment*, Hemisphere Publishers, Washington, D.C., 1981. – P. 357–388.

11. **Филиппов А.С.** Турбулентность и ее моделирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibrae.ac.ru/docs/Kafedra/Filippov%20MTT%20март16.pdf>, свободный (дата обращения: 21.03.18)

12. **ANSYS Inc.**, ANSYS FLUENT Theory Guide, 18.2.0, 2017.

13. **Discrete** element method for the prediction of the onset velocity in a spouted bed / F. Marchelli, D. Bove, C. Moliner, et al. // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 321. – P. 119–131. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.08.032

14. **He Y., Bayly A.E., Hassanpou A.** Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid structure interaction in particle-fluid flows // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 325. – P. 620–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.11.045

15. **Liu D., Bu C., Chen X.** Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM // *Computers and Chemical Engineering*. – 2013. – Vol. 58. – P. 260–268. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.07.006

16. **Numerical** investigation of the solid particle erosion rate in a steam turbine nozzle / A. Campos-Amezcuca, A. Gallegos-Munoz, C.A. Romero, et al. // *Applied Therm. Eng.* – 2007. – Vol. 27. – P. 2394–2403. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.010

References

1. Wang, X., Zhang, N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 47, pp. 3957–3970. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.011
2. 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, vol. 51, pp. 2075–2089. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.06.009
3. Zohir, A.E. Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. *J. Am. Sci.*, 2012, vol. 8, pp. 241–250. DOI: 10.7537/marsjas 080212.37
4. 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, vol. 4, no. 6, pp. 61–71.

5. Khaibullina, A.I. *Povyshenie effektivnosti teploobmennyykh apparatov nalozheniem na potok v mezhtrubnom prostranstve nizkochastotnykh pul'satsiy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of heat exchangers by imposing low-frequency pulsations on the flow in the intertubular space. Cand. tech. sci. diss.]. Kazan, 2017. 229 p. (in Russian)

6. Bode, K. Hooper, R.J., Paterson, W.R., Wilson, D.I., Augustin, W., Scholl, S. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling Layers. *Heat Transfer Engineering*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 202–209. DOI: 10.1080/01457630601064611

7. Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M., Wilson, D.I. Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows. *Journal of Food Engineering*, 2000, vol. 46, pp. 199–209. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00083-2

8. Scholer, M., Fuchs, T., Augustin, W., Scholl, S., Majschak, J.P. 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. http://heatexchanger-fouling.com/papers/papers_2009/64_Schoeler_F.pdf

9. Augustina, W. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 2010, vol. 8, pp. 384–391. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.08.007

10. Gudmundsson, J.S. Particulate fouling: fouling of heat transfer equipment. *Proceedings of the International Conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment*, Hemisphere Publishers, Washington, D.C., 1981, pp. 357–388.

11. Filippov, A.S. *Turbulentnost' i ee modelirovaniye* [Turbulence and its modeling]. Available at: <http://www.ibrae.ac.ru/docs/Kafedra/Филиппов%20МТТ%20март16.pdf>

12. ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, 18.2.0, 2017.

13. Marchelli, F. Discrete element method for the prediction of the onset velocity in a spouted bed. *Powder Technology*, 2017, vol. 321, pp. 119–131. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.08.032

14. He, Y. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid structure interaction in particle-fluid flows. *Powder Technology*, 2018, vol. 325, pp. 620–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.11.045

15. Liu, D. Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM. *Computers and Chemical Engineering*, 2013, vol. 58, pp. 260–268. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.07.006

16. Campos-Amezcuca, A. Numerical investigation of the solid particle erosion rate in a steam turbine nozzle. *Applied Therm. Eng.*, 2007, vol. 27, pp. 2394–2403. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.010