

УДК 004.94; 532.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4343
Шифр специальности ВАК: 1.1.9

Численное моделирование нестационарного режима работы установки погружного горения

В.А. Демин¹, А.В. Костыря²✉

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, г. Пермь

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉ avkostyrja@pstu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью выпаривания больших количеств рассолов на предприятиях калийной промышленности. Выпаривание рассолов в поверхностных выпарных аппаратах затруднено вследствие инкрустации теплообменных поверхностей осадками солей. Поэтому такое выпаривание целесообразнее всего осуществлять в аппаратах погружного горения, так как они не содержат теплопередающих поверхностей. Однако и в этом типе аппаратов возможно возникновение неисправностей из-за неуправляемого осаждения твёрдой фазы. В настоящий момент динамика твёрдой фазы в аппаратах погружного горения слабо изучена. Данное исследование является частью научной программы, направленной на всестороннее рассмотрение закономерностей движения твёрдых частиц в аппаратах с погружным горением. *Цель:* изучить гидродинамические процессы в установке погружного горения в промежутки времени, соответствующий началу её работы; описать закономерности движения твёрдой фазы в зависимости от времени. *Объект:* лабораторная установка погружного горения. Проанализирована упрощенная модель теплового режима работы без последующего перехода жидкой фазы в пар. *Методы:* численный эксперимент. При моделировании применялся гибридный метод конечных объёмов в сочетании с технологией метода конечных элементов. Многофазная система рассматривалась как две сосуществующих подсистемы: газ–жидкость и жидкость–твёрдые частицы. *Результаты.* Рассмотрен конечный временной интервал работы установки. Обнаружено, что за рассматриваемое время достигается стационарный режим осаждения твёрдых частиц. Обнаружены осцилляции скорости потока жидкости, приводящие к колебаниям массового расхода твёрдых частиц на дне установки. Обнаружено, что схожую форму колебаний имеют скорость на кончике струи дымовых газов, вырывающейся из сопла горелки, а также давление на срезе сопла. Обоснована гипотеза об определяющем влиянии неустойчивости струйного движения дымовых газов на осцилляционное поведение всей гидродинамической системы.

Ключевые слова: погружное горение, численное моделирование, нестационарный режим, трёхфазный поток, газ–жидкость–твёрдые частицы, осаждение

Для цитирования: Демин В.А., Костыря А.В. Численное моделирование нестационарного режима работы установки погружного горения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 7. – С. 174–184. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4343

UDC 004.94; 532.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4343

Numerical simulation of non-stationary regime of a submerged combustion setup operation

V.A. Demin¹, A.V. Kostyrya²✉

¹ Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ AVKostyrja@pstu.ru

Abstract. Relevance. The need to evaporate large quantities of brines at potash industry enterprises. Evaporation of brines in surface evaporators is difficult due to the encrustation of heat exchange surfaces by salt deposits. Therefore, such evaporation is most expedient to be carried out in submerged combustion apparatuses, since they do not contain heat-transmitting surfaces. However, in this type of apparatus, malfunctions may occur due to uncontrolled solid phase deposition. At the moment, the dynamics of the solid phase in submerged combustion devices is poorly studied. This study is part of a scientific program aimed at a comprehensive review of the laws of motion of solid particles in submerged combustion apparatuses. **Aim.** To study the hydrodynamic processes in the submerged combustion setup in the time interval corresponding to the beginning of its operation; describe the patterns of solid phase motion as a function of time. **Object.** Laboratory setup of submerged combustion. A simplified model of the thermal mode of operation without the subsequent transition of the liquid phase to steam is analyzed. **Methods.** The study was conducted by numerical experiment. The hybrid finite volume method was used in simulation in combination with the technology of the finite element method. The multiphase system was considered as two coexisting subsystems: gas–liquid and liquid–solid. **Results.** The paper considers the final time interval of the setup operation. It is found that during the time under consideration, a stationary mode of solid particle deposition is achieved. The authors have detected liquid flow velocity oscillations, leading to fluctuations in the mass flow rate of solid particles at the bottom of the setup. It was found that the velocity at the tip of the flue gas jet escaping from the burner nozzle, as well as the pressure at the nozzle section, have a similar form of oscillation. The authors substantiated the hypothesis about the determining influence of the instability of the jet movement of flue gases on the oscillatory behavior of the entire hydrodynamic system.

Keywords: submerged combustion, numerical modeling, unsteady mode, three-phase flow, gas–liquid–solid, sedimentation

For citation: Demin V.A., Kostyrya A.V. Numerical simulation of non-stationary regime of a submerged combustion setup operation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 174–184. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4343

Введение

Аппараты погружного горения (АПГ) представляют собой теплотехнические устройства для прямого нагрева и выпаривания растворов. Нагрев раствора происходит при его непосредственном контакте со струей горячих дымовых газов, образующейся в камере сгорания. Преимуществом такого способа нагрева является отсутствие теплопередающих поверхностей, на которых выпадают осадки солей [1]. При работе АПГ струя дымовых газов, контактируя с жидкостью, разбивается на пузырьки, которые барботируют через слой жидкости и отдают ей своё тепло. После выхода из барботажного слоя дымовые газы инвертируются в сплошную фазу и покидают аппарат через выхлопную трубу. Нагретая жидкая фаза переливается через порог, попадает в приёмную ёмкость и смешивается с новыми порциями жидкости, поступающими в АПГ. Жидкая фаза из приёмной ёмкости принудительно с помощью насоса подаётся в выпарную ёмкость, где происходит её нагрев и последующее выпаривание.

АПГ, как правило, используются для выпаривания загрязнённых жидкостей или концентрированных растворов солей, образующих в ходе технологического процесса осадок [1, 2]. Конкретными примерами применения могут служить выпаривание солевых шламов и выпаривание щелоков с получением товарной соли на предприятии «Уралкалий». При этом в аппарате неминуемо возникает твёрдая фаза, представленная мелкодисперсными частицами. Неуправляемое движение твёрдых частиц приводит к частым засорениям аппарата и, как следствие, к длительным простоям для его очистки.

Эта проблема может быть решена за счёт организации управляемого движения твёрдой фазы в аппарате [3]. Однако разработка мероприятий по организации движения частиц требует предварительного изучения закономерностей их осаждения в АПГ. Известны исследования осаждения твёрдых частиц в жидкости, однако они выполнены либо для двухфазных потоков [4, 5], либо для сред со специфическими свойствами [6, 7].

Для изучения погружного горения по заказу филиала ВНИИ Галургии (г. Санкт-Петербург) на предприятии «ТеплоЭнергоПром» (Пермский край, п.г.т. Полазна) была создана лабораторная установка, имитирующая АПГ. Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 1. Как и полноразмерный аппарат, установка снабжена погружной горелкой, создающей струю горячих дымовых газов. Под горелкой установлено отбойное устройство. Также присутствует вертикальная перегородка, разделяющая рабочий объём на две области. Причём перегородка допускает перетекание жидкости через неё, также как жидкость переливалась бы через порог в АПГ.

Кроме того, в месте смыкания перегородки с нижним днищем установки предусмотрено окно для протока жидкости. Математическое моделирование полноразмерного аппарата требует использования значительных вычислительных ресурсов, поэтому для отладки модели была выбрана именно лабораторная установка. Установка имеет сравнительно небольшие линейные размеры (2,2:1,4:1 м), что делает её моделирование методом конечных объёмов более экономичным, чем моделирование полноразмерного АПГ.

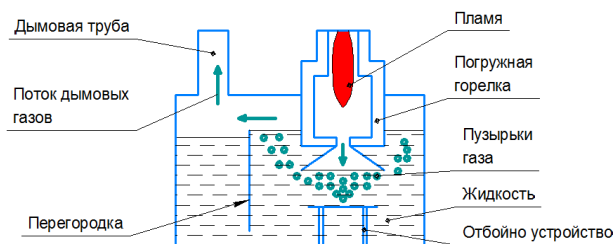


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки
Fig. 1. Schematic diagram of a laboratory setup

Известны работы по исследованию межфазного тепло- и массообмена твердых частиц и несущей жидкости [8, 9], однако они не затрагивают трёхфазных систем. Кроме того, стоит отметить работы по изучению конвективных течений жидкости в замкнутых объёмах [10–12] с учетом сопряженного теплообмена с окружающей средой. Расчетная геометрия схожа по постановке с рассматриваемой в настоящем исследовании, однако отмеченные задачи являются в определенном смысле модельными, тогда как нами рассматривается реальная техническая система. Взаимодействие турбулентных потоков с твердыми препятствиями при градиентах скоростей близких к тем, что имеют место в реальном АПГ, численно рассматривается в [13, 14].

Ранее нами были исследованы законы движения (трехмерная структура и параметры) трёхфазного потока газ–жидкость–твёрдые частицы на примере лабораторной установки с погружным горением [3]. Также было проведено детальное изучение динамики твёрдой фазы [15]. Настоящая работа является продолжением указанной серии исследований и направлена на изучение нестационарного режима работы установки с переменным уровнем жидкости. Такой режим имеет место при глубоком упаривании растворов с удалением 60–70 % воды (по массе).

Постановка задачи и метод решения

В рассматриваемой многофазной системе несущей фазой является жидкость. Это обусловлено тем, что, во-первых, жидкость является сплошной средой, а во-вторых, её объёмная доля является наибольшей. В расчётной модели жидкость представлена водой. Дымовые газы диспергированы в жидкости в виде пузырьков. Так как применительно к АПГ вопрос о размерах пузырьков дымовых газов исследован недостаточно, принят их фиксированный диаметр 3 мм, по примеру работы [16] в соответствии с экспериментальными данными. Для целей моделирования дымовые газы были заменены на воздух, так как теплофизические свойства дымовых газов, полученных при сжигании природного газа с коэффициентом избытка воздуха, равным 1,65, близки к свойствам чистого воздуха.

Твёрдая фаза представлена частицами хлорида калия диаметром 0,24 мм. Такой размер частиц соответствует среднему диаметру флотационного продукта на втором и третьем Березниковских калийных производственных рудоуправлениях предприятия «Уралкалий».

Адекватная физико-математическая модель была построена в ходе исследования [3] и учитывает взаимодействия жидкость–газ и жидкость–твёрдые частицы отдельно. Так как эффекты флотации не являются определяющими при работе АПГ, пренебрежение взаимодействием газ–твёрдые частицы считаем оправданным. Взаимодействие газовой и жидкой фаз моделировалось с помощью подхода «Эйлер-Эйлер» (Eulerian-Eulerian multiphase model) [16, 17], движение твёрдых частиц – с помощью подхода «Эйлер-Лагранж» (Lagrangian particle tracking model) [18]. Преимуществом «Эйлер-Лагранж» подхода является возможность построить траектории частиц от момента зарождения до момента их осаждения на поверхность или вынужденного самоуничтожения по причине ограниченности вычислительных ресурсов в отношении допустимой длины траектории частиц. Также в модель были заложены уравнения турбулентного движения, так как струя горячих дымовых газов в момент выхода из сопла горелки имеет скорость порядка 100 м/с и может вызывать значительные турбулентные пульсации в зоне контакта с жидкостью. В то же время в зонах, удалённых от горелки, особенно за вертикальной перегородкой, течение потока может оставаться ламинарным. Таким образом, для корректного моделирования течений необходима модель турбулентности, обеспечивающая надёжные результаты как при высоких, так и при низких числах Рейнольдса. Этому требованию отвечает модель RNG k-ε (с ренормализованными группами) [16].

Описанная модель дала предварительные результаты, хорошо согласующиеся как с ранее известными данными по структуре потоков в АПГ, так и с опытными данными, полученными на лабораторной установке [3]. Модель построена на основе исследования по обратному псевдооживленному слою, индуцированному пузырьками [16], который представляет собой близкий к АПГ расчётный случай. В указанном исследовании авторы, сравнив численные и опытные данные, пришли к заключению о хорошем согласии физико-математической модели и эксперимента.

На рис. 2 представлена расчётная схема, использованная в настоящем исследовании. Так как процесс горения топлива не является предметом рассмотрения, горелка, как отдельный элемент, в схеме отсутствует. Собственно говоря, интерес представляет лишь поток дымовых газов.

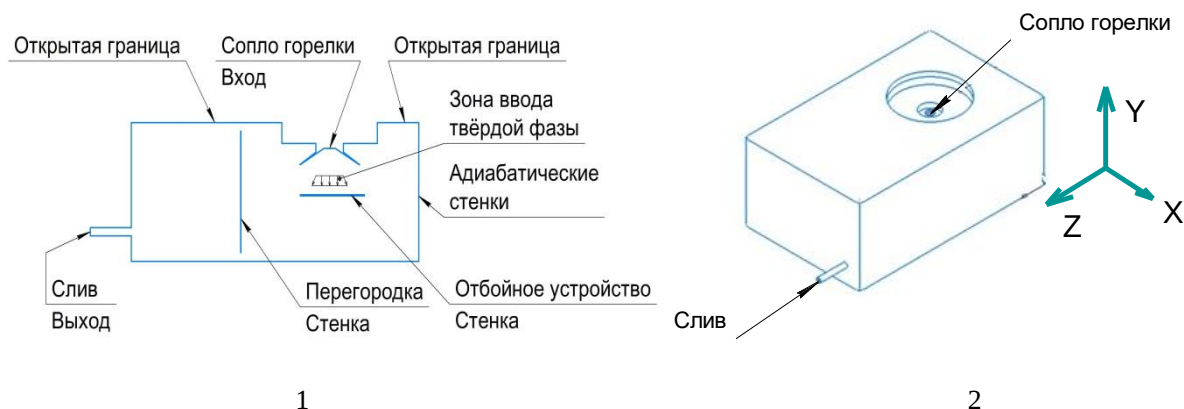


Рис. 2. Расчётная схема лабораторной установки: 1) разрез; 2) аксонометрия
Fig. 2. Settlement scheme of laboratory setup: 1) section; 2) axonometry

В то же время модель инверсии сплошного газового потока в отдельные пузырьки при контакте с вязкой жидкостью не разработана. В соответствии с этими соображениями мы ограничились заданием потока пузырьков газа на срезе сопла горелки в качестве граничного условия. Также было принято допущение о равномерном распределении по сечению параметров потока.

Верхняя граница расчётной области является открытой, то есть допускает движение сред как наружу, так и вовнутрь области. При этом задаются параметры среды, находящейся за границей. В нашем случае была задана атмосфера производственного помещения. Для моделирования убыли жидкости был введён слив с фиксированным расходом. Ввод твёрдой фазы осуществляется в пространстве между соплом горелки и отбойным устройством. Эта зона является местом максимальной теплонпряжённости, а значит, в реальном процессе именно здесь будет происходить испарение жидкости и, как следствие, выпадение в осадок кристалликов соли. Прочие границы расчётной области являются адиабатическими стенками. Дополнительно для нижнего днища и верхней поверхности отбойного устройства введено условие полной абсорбции твёрдой фазы. С помощью данного приёма имитируется прилипание соли к указанным поверхностям. Предусмотрены две серии экспериментов с массовыми расходами на сливе 0,1 и 1 кг/с при прочих равных условиях. Рассматривался нестационарный режим работы установки с $\theta_1=4$ с, $\theta_2=120$ с.

Уравнения физико-математической модели решались с помощью коммерческого пакета ANSYS CFX 2020R2. Пакет ANSYS CFX представляет собой программное обеспечение для моделирования задач гидродинамики. Вычислительным пакетом реализуется гибридная технология, основанная на методе конечных объемов с использованием метода конечных элементов. Метод выбран в силу его

хорошей разработанности применительно к задачам с особыми требованиями к консервативности численной схемы. Кроме того, данный метод дискретизации является оптимальным на произвольных неструктурированных сетках с ячейками произвольной формы [19].

Описание математической модели

Основой системы уравнений является модель «Эйлер-Эйлер» с добавлением некоторых уравнений подхода «Эйлер-Лагранж». Таким образом, имеем следующие уравнения неразрывности и переноса импульса с учетом RNG k-ε модели турбулентности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \otimes \vec{v}_i) = \\ = -\alpha_i \nabla p + \nabla \overline{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \vec{F}_{\text{drag},ij}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i k_i)}{\partial t} + \nabla(\alpha_i \rho_i k_i \vec{v}_i) = \\ = \nabla \left(\alpha_i \left[\frac{\theta_k \mu + \mu_{\text{tur}}}{\sigma_k} \right] \nabla k \right) + \alpha_i G_{k,b} - \alpha_i \rho_i \epsilon_i + \Pi_k, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \epsilon_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \epsilon_i \vec{v}_i) = \\ = \nabla \left(\alpha_i \left[\frac{\theta_{1,\epsilon} \mu + \mu_{\text{tur}}}{\sigma_\epsilon} \right] \nabla \epsilon \right) + \\ + \alpha_i \frac{\epsilon_i}{k_i} (C_{1\epsilon} \theta_{2,\epsilon} G_{k,b} - C_{2\epsilon} \theta_{3,\epsilon} \rho_i \epsilon_i) + \\ + C_{3,\epsilon} \alpha_i \rho_i \Pi_k - \alpha_i R_\epsilon, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i H_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i H_i) = \alpha_i \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{\tau}_i : \nabla \vec{v}_i + \nabla(\lambda_i \nabla T_i) + Q_{ij}, \quad (5)$$

$$Q_{gl} = -Q_{gl} = h_{gl}(T_g - T_l), \quad H_i = \int c_{p,i} dT_i, \quad m_s \frac{d\vec{v}_s}{dt} = \vec{F}_{drag,ls} + \vec{F}_{grav}, \quad (6)$$

$$\vec{F}_{drag,lg} = \frac{3}{4} \rho_l C_D \frac{\alpha_l \alpha_g}{d_g} |\vec{v}_l - \vec{v}_g| (\vec{v}_l - \vec{v}_g),$$

$$\vec{F}_{drag,ls} = \frac{\pi d_s^2}{8} \rho_l C_D |\vec{v}_l - \vec{v}_s| (\vec{v}_l - \vec{v}_s), \quad \vec{F}_{grav} = m_s \vec{g}.$$

Здесь α – объёмная доля; ρ – плотность (кг/м³); $\mathbf{v}$ – скорость (м/с); t – время (с); p – давление (Па); μ и μ_{tur} – динамическая и турбулентная вязкость (Па·с); H – удельная энтальпия (Дж/кг); λ – теплопроводность (Вт/м·К); T – температура (К); Q – количество тепла, поступившее из фазы j (Дж/м³); c_p – теплоёмкость при постоянном давлении (Дж/кг·К); d – диаметр (м); m – масса (кг). Векторы $\mathbf{g}$, $\mathbf{F}_{drag,ij}$ и $\mathbf{F}_{grav}$ представляют ускорение свободного падения (м/с²), удельную силу межфазного взаимодействия (Н/м³) и силу тяжести (Н); k и ε – энергия турбулентных пульсаций и скорость её рассеивания, $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений. Индексы i, j указывают на произвольные фазы, индексы g, l, s отвечают газовой, жидкой и твёрдой фазам, соответственно. Константы модели RNG k - ε приведены в таблице.

На базовые уравнения (1)–(6) были наложены граничные условия:

- сопло горелки

$$(\rho_g v_{gn})|_{\text{сопл}} = 0,123 \text{ кг/с}, \quad T_g|_{\text{сопл}} = 1573 \text{ К},$$

$$\alpha_g|_{\text{сопл}} = 1, \quad \rho_g|_{\text{сопл}} = 0,225 \text{ кг/м}^3;$$

- открытая граница

$$p|_{\text{ог}} = 101325 \text{ Па}, \quad T|_{\text{ог}} = 298 \text{ К}, \quad \alpha_g|_{\text{ог}} = 1;$$

(указанные условия справедливы, строго говоря, за открытой границей);

- слив

$$\rho_l v_{ln}|_{\text{слив}} = -0,1; \quad -1 \text{ кг/с};$$

- адиабатические стенки, перегородка и отбойное устройство

$$\vec{v}|_{\text{ст}} = 0, \quad q|_{\text{ст}} = 0.$$

Индекс n означает направление по нормали, обращённой внутрь расчётной области. Схематично граничные условия проиллюстрированы на рис. 2.

Массовый расход твёрдой фазы принят 0,05 кг/с. Ввод осуществлялся равномерными порциями на каждом временном шаге по конусу с центральным углом 50° и радиусом основания 0,2 м. Конус соосен с соплом горелки, основание конуса находится на расстоянии 0,55 м от нижней границы расчётной области. Направление ввода – от вершины к основанию, основание обращено к отбойному устройству (вниз). Начальная скорость частиц 0,01 м/с, что несколько меньше скорости их осаждения. Начальные скорости жидкости и дымовых газов приняты нулевыми. Начальная температура во всей расчётной области 298 К. В начальный момент времени вся расчётная область заполнена водой.

Для замыкания системы уравнений введены дополнительные соотношения. Условие нормировки для объёмных долей фаз: $\alpha_l + \alpha_g = 1$; выражения для тензоров вязких напряжений и деформаций:

$$\vec{\tau}_i = -\alpha_i \mu_i (\nabla \vec{v}_i + \nabla \vec{v}_i^T) - \alpha_i \frac{2}{3} \mu_i (\nabla \vec{v}_i) \delta_{ij},$$

$$\vec{S}_i = \frac{1}{2} (\nabla \vec{v}_i + \nabla \vec{v}_i^T).$$

Кроме того, введены соотношения для уравнений модели турбулентности [3, 16]:

$$G_b = \frac{\mu_{tur}}{\text{Pr}_{tur}} \beta_i \vec{g} \nabla T_i, \quad G_k = \mu_{tur} \left(\frac{\partial \vec{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \vec{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial x_j},$$

$$R_\varepsilon = \frac{\rho C_\mu \eta^3}{1 + \beta \eta^3} \left(\frac{1 - \eta}{\eta_0} \right) \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad \mu_{tur} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$\eta = S \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad S = \left(2 \vec{S}_i \vec{S}_i \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Коэффициент сопротивления, используемый для вычисления силы межфазного взаимодействия, определяется корреляцией Шиллера–Науманна [16]:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_{g,s}} (1 + 0,15 \cdot \text{Re}_{g,s}^{0,687}).$$

Коэффициент теплоотдачи определяется согласно формуле:

$$h_{gl} = 6 \lambda_l \alpha_l \alpha_g \text{Nu} / d_g.$$

Эффективная теплопроводность дополняется турбулентным слагаемым согласно работе [17]

$$\lambda_l = \lambda_{lam,l} + \lambda_{tur,l}, \quad \lambda_{tur,l} = c_{p,l} \mu_{tur} / \text{Pr}_{tur},$$

где Pr_{tur} – турбулентное число Прандтля (принято 0,9). Индексы lam и tur отвечают ламинарному и турбулентному режимам соответственно.

Введены следующие обозначения для безразмерных комплексов: это два критерия Рейнольдса для пузырьков воздуха и твёрдых частиц, а также числа Прандтля и Нуссельта, соответственно [16, 17]:

$$Re_g = \frac{\rho_l d_g |\vec{v}_g - \vec{v}_l|}{\mu_l}, \quad Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l},$$

$$Pr = \frac{c_{p,l} \mu_l}{\lambda_l}, \quad Nu = 2 + 0,6 \cdot \sqrt{Re} \cdot Pr^{1/3}.$$

Последнее соотношение представляет собой корреляцию Ранца-Маршалла.

Таблица. Параметры модели RNG k-ε

Table. RNG k-ε model parameters

Параметр Parameter	Значение Value	Ссылка Link	Параметр Parameter	Значение Value	Ссылка Link
σ_k	$1,39^{-1}$	[20]	η_0	4,38	[20]
σ_ε	$1,39^{-1}$	[20]	β	0,012	[20]
θ_k	1	[16]	$C_{1,\varepsilon} C_{2,\varepsilon}$	1,42; 1,68	[20]
$\theta_{1,\varepsilon}$	1	[16]	C_μ	0,085	[17]
$\theta_{2,\varepsilon}$	1	[16]	$C_{3,\varepsilon}$	0	[16]
$\theta_{3,\varepsilon}$	1	[16]	P_k	0	[16]

Были приняты следующие размеры расчётной области: длина 2,106 м; ширина 1,306 м; высота 0,856 м. Эти параметры соответствуют габаритам лабораторной установки. Высота уменьшена по сравнению с оригиналом, так как свободная граница проведена ниже верхнего днища установки.

Для дискретизации расчётной области была построена неравномерная конечно-объёмная сетка. В выпарной области сторона ячейки составляет 0,01 м, в остальной области – 0,033 м. Общее количество элементов сетки составило 12069799 при количестве узлов 2238943.

Обсуждение результатов

В результате проведения двух серий численных экспериментов были получены данные об интенсивности осаждения твёрдой фазы, её накоплению на дне и в толще жидкости. Данные численных экспериментов представлены на рис. 3–7.

Как видно из рис. 3, расход частиц, осевших на дне установки, резко возрастает в первые 20 секунд численного эксперимента. Затем расход колеблется возле значения 0,04 кг/с. На рис. 4 показано накопление твёрдой фазы на дне установки, что по сути является результатом интегрирования по времени массового расхода.

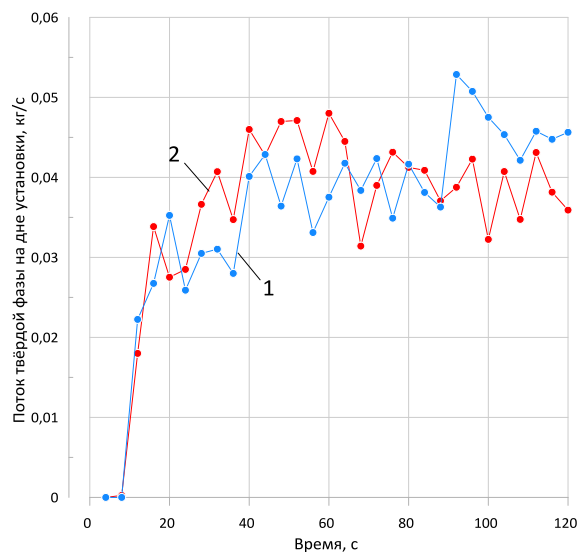


Рис. 3. Массовый расход твёрдой фазы на дне установки: 1 – сток 0,1 кг/с; 2 – сток 1 кг/с

Fig. 3. Solid phase mass flow rate at the bottom of the setup: 1 – outflow rate 0,1 kg/s; 2 – outflow rate 1 kg/s

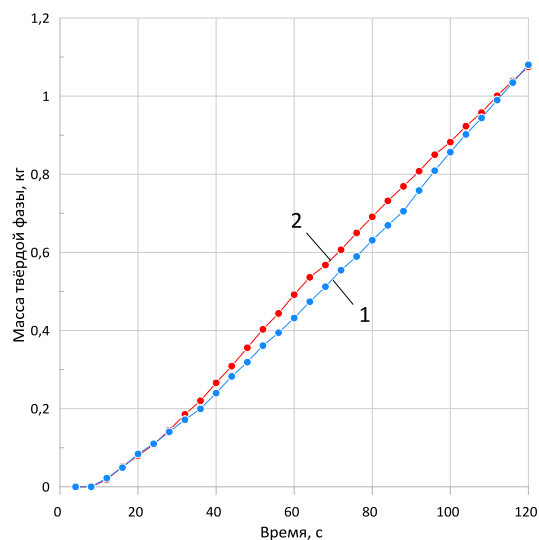


Рис. 4. Количество твёрдой фазы на дне установки: 1 – сток 0,1 кг/с; 2 – сток 1 кг/с

Fig. 4. Solid phase amount at the bottom of the setup: 1 – outflow rate 0,1 kg/s; 2 – outflow rate 1 kg/s

Для обоих случаев графики являются практически прямыми наклонными линиями, что соответствует дрейфу расхода возле постоянного значения. Накопление в толще жидкости распределённой твёрдой фазы также происходит стадийно. Из рис. 5 видно, что до момента времени $\theta=44$ с объём твёрдых частиц демонстрирует замедляющийся рост, а после указанного момента наблюдается выход на плато в области значений $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$. Причём описанная картина наблюдается для обоих расчётных случаев.

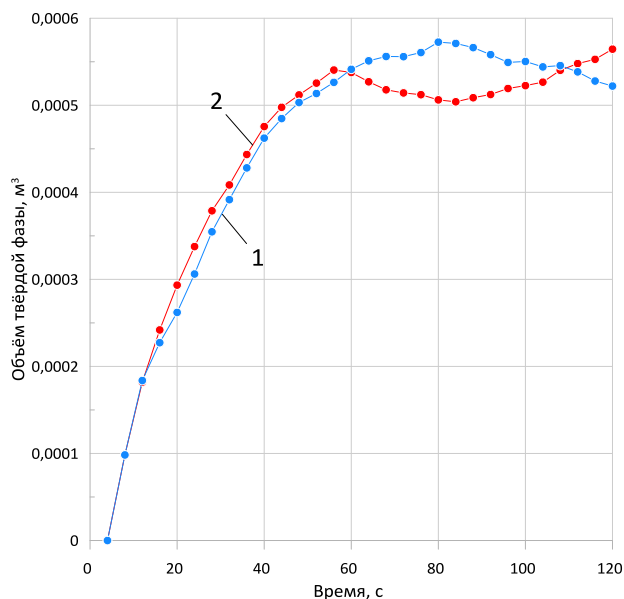


Рис. 5. Объём твёрдой фазы, распределённой в жидкости: 1 – сток 0,1 кг/с; 2 – сток 1 кг/с
Fig. 5. Volume of the solid phase distributed in liquid: 1 – outflow rate 0,1 kg/s; 2 – outflow rate 1 kg/s

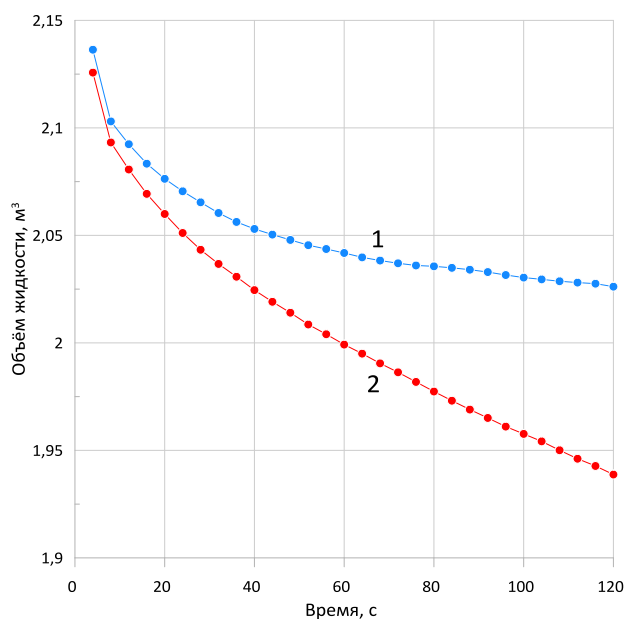


Рис. 6. Объём жидкости: 1 – сток 0,1 кг/с; 2 – сток 1 кг/с
Fig. 6. Liquid volume: 1 – outflow rate 0,1 kg/s; 2 – outflow rate 1 kg/s

Снижение объёма жидкости в установке, как видно из рис. 6, является сначала нелинейным с последующим выходом на линейный участок. Первоначальная нелинейность процесса объясняется методикой численного эксперимента. В соответствии с начальными условиями в момент времени $\theta=0$ вся расчётная область заполнена водой. Далее

начинается нагнетание в установку горячих дымовых газов, которые вытесняют часть жидкости через открытую границу. Это происходит до тех пор, пока дымовые газы не займут объём, соответствующий развитому барботажному слою. После этого изменение уровня определяется только интенсивностью стока.

Также в ходе численного эксперимента были получены поля температур, скоростей и объёмных долей жидкости (рис. 7–9). На нижеследующих рисунках показаны поля, соответствующие установившемуся режиму. На изображениях показана область наибольшего интереса – пространство возле погружной горелки.

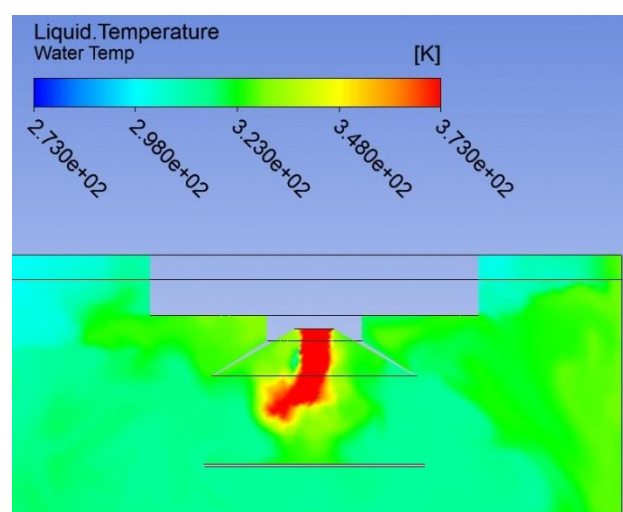


Рис. 7. Температура жидкости в области возле погружной горелки ($\theta=120$ с)
Fig. 7. Liquid temperature in the area near the submerged burner ($\theta=120$ s)

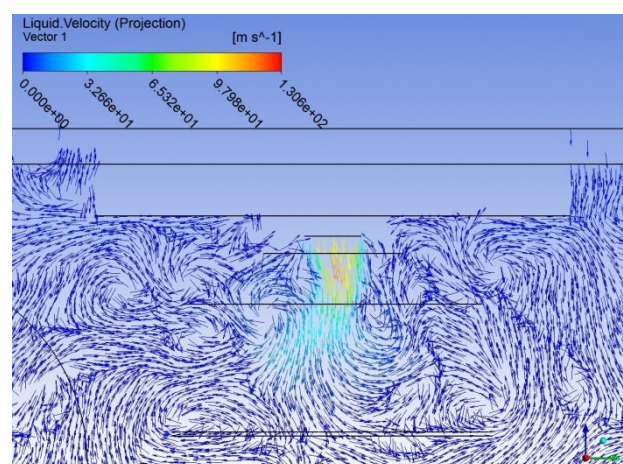


Рис. 8. Скорость жидкости в области возле погружной горелки ($\theta=120$ с)
Fig. 8. Liquid velocity in the area near the submerged burner ($\theta=120$ s)

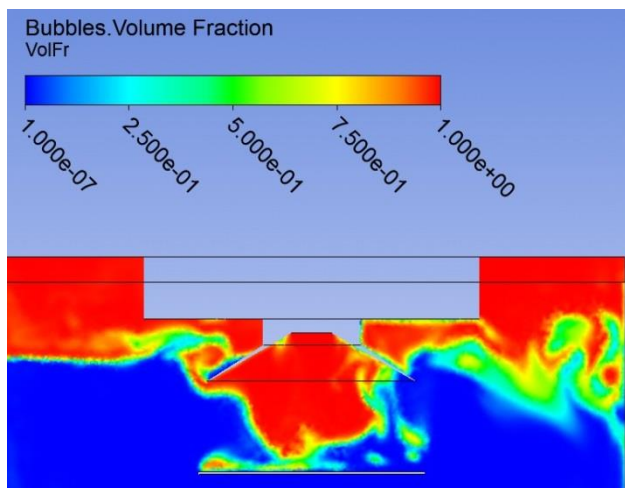


Рис. 9. Объёмная доля дымовых газов в области возле погружной горелки ($\theta=120$ с)

Fig. 9. Bubbles volume fraction in the area near the submerged burner ($\theta=120$ s)

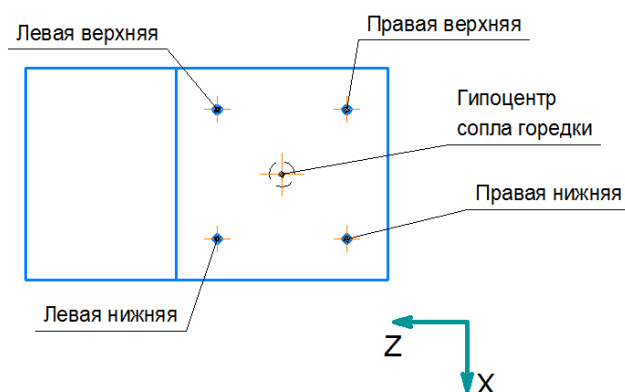


Рис. 10. Схема расположения точек (горизонтальный разрез)

Fig. 10. Layout of the points (horizontal section)

Так как в ходе численных экспериментов обнаружилось осцилляции массового расхода твёрдой фазы, достигающие 25 % от эффективного значения, было принято решение о проведении дополнительных исследований с целью установления природы осцилляций. Для этого были рассмотрены векторы скорости жидкости в четырёх точках вблизи дна установки, векторы скоростей дымовых газов на кончике струи, вырывающейся из сопла горелки, а также давление на срезе сопла. Расположение точек и их условные обозначения показаны на рис. 10. Так как динамика процессов для расчётных случаев 0,1 и 1 кг/с схожи, для дальнейшего анализа использовались только данные численного эксперимента со стоком 1 кг/с. Дополнительные данные представлены на рис. 11–15.

Анализируя значения проекций векторов скорости жидкости вблизи дна (рис. 11–13), можно уви-

деть, что в каждой из точек вектор скорости направлен к гипоцентру сопла горелки, как показано на рис. 16. Это совпадает с данными о наличии в установке осесимметричных вихрей, полученными при исследовании стационарного режима [3]. Наибольший интерес представляют вертикальные компоненты скорости (ось Y), так как именно они в наибольшей степени влияют на осаждение. Как видно на графике рис. 12, вертикальные составляющие колеблются возле нулевого значения с хаотичной сменой знака. Это может служить объяснением осцилляций массового расхода на дне установки. Однако возникает вопрос о том, что является первопричиной осцилляционных процессов в системе. Причины колебаний определяются нетурбулентными пульсациями, как предполагалось ранее, потому что область сколько-нибудь значимых пульсаций занимает лишь малый объём расчётной области [3].

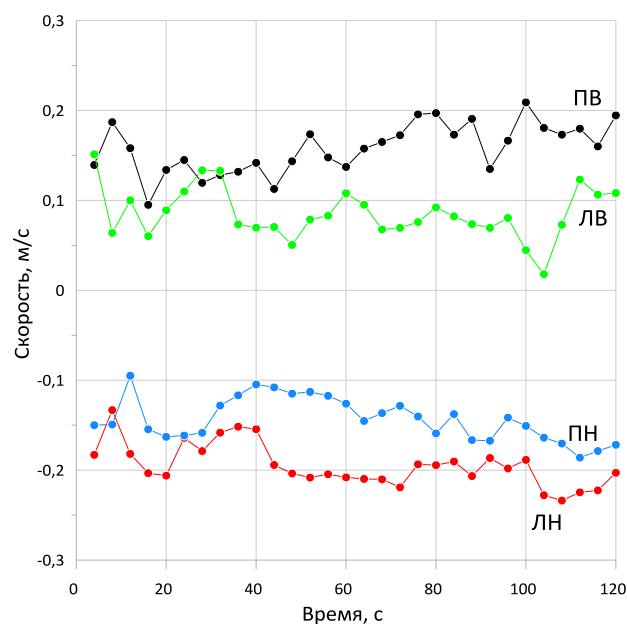


Рис. 11. Проекция скоростей жидкости на ось X: ПН – правая нижняя точка; ЛН – левая нижняя точка; ЛВ – левая верхняя точка; ПВ – правая верхняя точка

Fig. 11. Projections of liquid velocities on the X-axis: ПН – lower right point; ЛН – lower left point; ЛВ – upper left point; ПВ – upper right point

На рис. 14 можно увидеть осцилляции компонент вектора скорости по форме аналогичные осцилляциям скоростей в точках возле дна. Такую же форму осцилляции имеют давления на срезе сопла (рис. 15). Это даёт основание предположить, что источником пульсаций скорости потока является именно неустойчивость струйного движения дымовых газов на сопле.

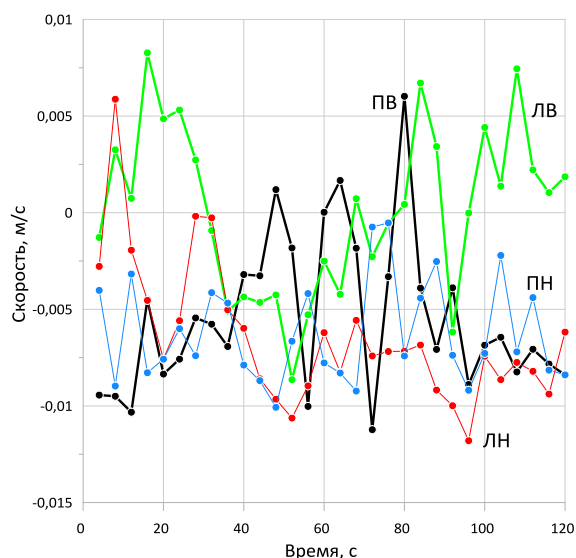


Рис. 12. Проекция скоростей жидкости на ось Y: ПН – правая нижняя точка; ЛН – левая нижняя точка; ЛВ – левая верхняя точка; ПВ – правая верхняя точка

Fig. 12. Projections of liquid velocities on the Y-axis: ПН – lower right point; ЛН – lower left point; ЛВ – upper left point; ПВ – upper right point

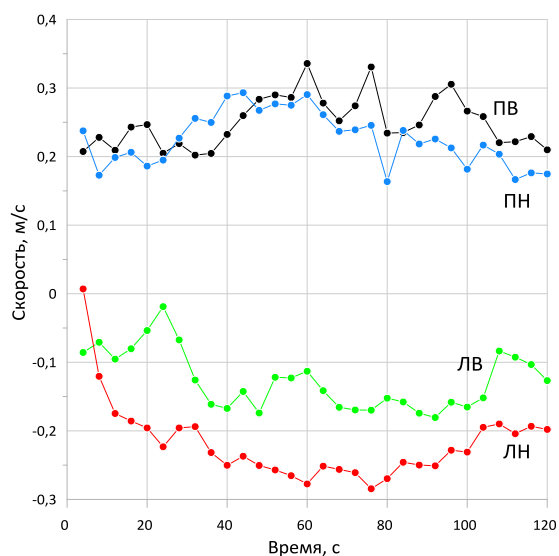


Рис. 13. Проекция скоростей жидкости на ось Z: ПН – правая нижняя точка; ЛН – левая нижняя точка; ЛВ – левая верхняя точка; ПВ – правая верхняя точка

Fig. 13. Projections of liquid velocities on the Z-axis: ПН – lower right point; ЛН – lower left point; ЛВ – upper left point; ПВ – upper right point

В качестве фактора, оказывающего заметное влияние на гидродинамическую картину в установке, в первую очередь, выступает струя горячих дымовых газов. Именно поэтому для дополнительного анализа авторами была выбрана точка на кончике струи и срез сопла.

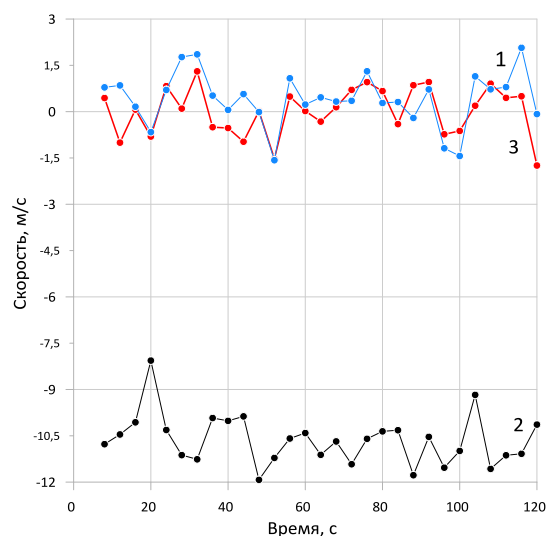


Рис. 14. Скорость газа на кончике струи: 1–3 – X, Y и Z-компоненты, соответственно

Fig. 14. Gas velocity at the jet tip: 1–3 are the X, Y and Z components, respectively

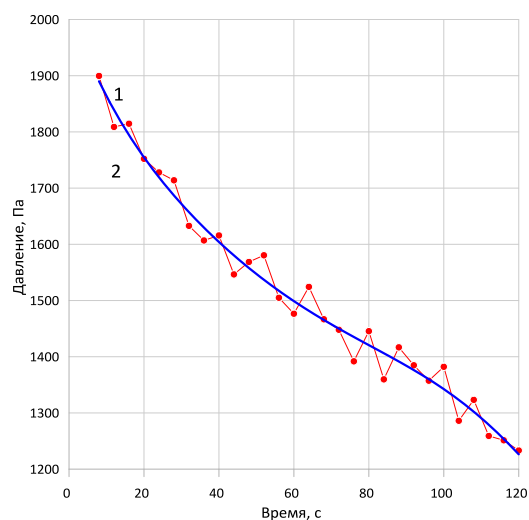


Рис. 15. Давление на срезе сопла: 1 – численные данные; 2 – линейная аппроксимация

Fig. 15. Nozzle cut-off pressure: 1 – numerical data; 2 – approximation

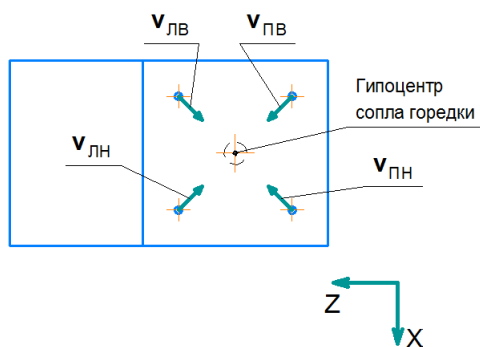


Рис. 16. Направления векторов скорости

Fig. 16. Directions of velocity vectors

Заключение

В настоящем исследовании рассмотрен нестационарный трехмерный режим работы установки погружного горения. По причине ограниченности вычислительных ресурсов рассматривался начальный период работы установки порядка 120 с. Обнаружено, что за это время осаждение твердой фазы успевает выйти на установившийся режим. Вместе с тем обнаружены осцилляции скорости потока в установке по всем трём ортогональным компонентам. Эти осцилляции, в свою очередь, приводят к колебаниям массового расхода твердых частиц на дне установки. Обнаружено, что

схожую форму колебаний имеют скорость на кончике струи дымовых газов, вырывающейся из сопла горелки, а также давление на срезе сопла. Выдвинута гипотеза о том, что источником осцилляций являются колебания струи дымовых газов.

Обнаруженные в системе колебательные процессы следует учитывать при рассмотрении образования и роста частиц твердой фазы растворенного вещества. Пульсации скорости также оказывают влияние на налипание осадка на внутренние поверхности установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удыма П.Г. Аппараты с погружными горелками. – М.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
2. Алабовский А.Н., Удыма П.Г. Аппараты погружного горения. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 256 с.
3. Демин В.А., Костыря А.В. Динамика трёхфазного потока газ-жидкость-твёрдые частицы в установке погружного горения // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2022. – № 63 (89). – С. 78–83. DOI: 10.36807/1998-9849-2022-63-89-78-83.
4. Динамика процесса осаждения твердых частиц в жидкости / В.А. Архипов, А.С. Усанина, Н.Н. Золоторев, Е.А. Маслов // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам. – Алушта: Изд-во МАИ-Принт, 2017. – С. 612–613.
5. Экспериментальное исследование коэффициента гидродинамического сопротивления охлажденной твердой сферы при малых числах Рейнольдса / В.А. Архипов, С.А. Басалаев, К.Г. Перфильева, С.Н. Поленчук, А.С. Усанина // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – № 7. – С. 46–48. DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50800.18592.
6. Glukhov A.F., Demin V.A., Popov E.A. Thermal magnetic nanosuspension convection in narrow channels // Fluid Dynamics. – 2013. – Vol. 48. – № 1. – P. 36–45.
7. Shliomis M.I., Smorodin B.L. Onset of convection in colloids stratified by gravity // Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. – 2005. – Vol. 71. – № 3. – P. 036312. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.036312.
8. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Mathematical modeling of heat transfer in a droplet of coal-water fuel leading to its fragmentation // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 212. – P. 118628. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118628.
9. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 12–19. DOI: 10.15372/FGV20150402.
10. Лэ Суан Хоанг Кхоа, Шеремет М.А. Естественная конвекция в замкнутой полости с реберной структурой при наличии неравномерного температурного профиля на вертикальной стенке // Вестник Пермского университета. Физика – 2021. – № 4. – С. 30–38. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-4-30-38.
11. Астанина М.С., Шеремет М.А. Моделирование смешанной конвекции жидкости с переменной вязкостью в частично пористом горизонтальном канале с источником тепловыделения // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11. – № 1. – С. 95–107. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-1-95-107.
12. Лоечко Д.С., Шеремет М.А. Конвективный теплоперенос степенной жидкости в полости с источником энергии нестационарного объемного тепловыделения // Вестник пермского университета. Физика. – 2019. – № 4. – С. 44–50. DOI: 10.17072/1994-3598-2019-4-44-50.
13. Кудрявцев Н.А. Численный расчет обтекания диска турбулентным потоком несжимаемой жидкости // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 44. – № 1. – С. 145–146.
14. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. – СПб: Судостроение, 2005. – 392 с.
15. Демин В.А., Костыря А.В. Численное моделирование движения твердых частиц в установке погружного горения // Математическое моделирование в естественных науках. – 2022. – Т. 1. – С. 82–84.
16. Experimental and numerical studies on a bubble-induced inverse gas-liquid-solids fluidized bed / Yunfeng Liu, Xiliang Sun, Zeneng Sun, Chao Zhang, Jesse Zhu // Advanced Powder Technology. – 2021. – № 32. – С. 4496–4508. DOI: 10.1016/j.appt.2021.10.002.
17. Peng Li, Xuhui Zhang, Xiaobing Lu Three-dimensional Eulerian modeling of gas-liquid-solid flow with gas hydrate dissociation in a vertical pipe // Chemical Engineering Science. – 2019. – № 196. – С. 1456–1465. DOI: 10.1016/j.ces.2018.10.053.
18. Lagrangian particle tracking: model development / M. Mahdavianmash, A.R. Noghrehabadi, M. Behbahaninejad, G. Ahmadi, M. Dehghanian // Life Science Journal. – 2013. – № 10. – P. 34–41.
19. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. – Berlin: Springer, 2001. – 423 p.
20. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique / V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, C.G. Speziale // Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. – 1992. – № 4. – P. 1510–1520. DOI: 10.1063/1.858424.

Информация об авторах

Виталий Анатольевич Демин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. demin@psu.ru

Алексей Валерьевич Костыря, аспирант кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. avkostyrja@pstu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0608-8826>

Поступила в редакцию: 01.08.2023

Поступила после рецензирования: 29.01.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. Udyama P.G. *Apparatuses with submersible burners*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 272 p. (In Russ.)
2. Alaboskiy A.N., Udyama P.G. *Submerged combustion apparatuses*. Moscow, MEI Publ., 1994. 256 p. (In Russ.)
3. Demin V., Kostyrya A. Dynamics of gas-liquid-solid three phase flow in submerged combustion setup. *Bulletin of StPbSIT(TU)*, 2022, no. 63 (89), pp. 78–83. (In Russ.) DOI: 10.36807/1998-9849-2022-63-89-78-83.
4. Arhipov V.A., Usanina A.S., Zolotoryov N.N., Maslov E.A. Dynamics of the deposition of solid particles in a liquid. *Proc. of the XX Anniversary International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Systems*. Alushta, MAI-Print, 2017. pp. 612–613. (In Russ.)
5. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Perfilieva K.G., Polenchuk S.N., Usanina A.S. Experimental study of the hydrodynamic drag coefficient for cooled solid sphere at low Reynolds numbers. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2021, vol. 47, no. 7. pp. 46–48. (In Russ.) DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50800.18592.
6. Glukhov A.F., Demin V.A., Popov E.A. Thermal magnetic nanosuspension convection in narrow channels. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 1, pp. 36–45.
7. Shliomis M.I., Smorodin B.L. Onset of convection in colloids stratified by gravity. *Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, vol. 71, no. 3, pp. 036312. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.036312.
8. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Mathematical modeling of heat transfer in a droplet of coal-water fuel leading to its fragmentation. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 212, pp. 118628. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118628.
9. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Salomatov V.V. Numerical simulation of ignition of particles of a coal–water fuel. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 409–415. (In Russ.) DOI 10.1134/S0010508215040024
10. Le Xuan Hoang Khoa, Sheremet M.A. Natural convection in an enclosure with fins in the presence of non-uniform temperature profile at vertical wall. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 4, pp. 30–38. (In Russ.) DOI: 10.17072/1994-3598-2021-4-30-38.
11. Astanina M.S., Sheremet M.A. Simulation of mixed convection of a variable viscosity fluid in a partially porous horizontal channel with a heat-generating source. *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 95–107. (In Russ.) DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-1-95-107.
12. Loenko D.S., Sheremet M.A. Convective heat transfer of power-law fluid in a cavity with a heat source of time-dependent volumetric heat generation. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4, pp. 44–50. (In Russ.) DOI: 10.17072/1994-3598-2019-4-44-50.
13. Kudryavtsev N.A. Numerical calculation of the disk flow by a turbulent incompressible fluid flow. *Engineering and Physics Journal*, 1983, vol. 44, no. 1, pp. 145–146. (In Russ.)
14. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev N.A., Leontev A.I. *Numerical simulation of vortex intensification of heat transfer in pipe packages*. St Petersburg, Sudostroenie Publ., 2005. 392 p.
15. Demin V.A., Kostyrya A.V. Numerical simulation of solid particle motion in a submerged combustion setup. *Mathematical modeling in natural sciences*, 2022, vol. 1, pp. 82–84. (In Russ.)
16. Yunfeng Liu, Xiliang Sun, Zeneng Sun, Chao Zhang, Jesse Zhu Experimental and numerical studies on a bubble-induced inverse gas-liquid-solids fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 2021, no. 32, pp. 4496–4508. DOI: 10.1016/j.appt.2021.10.002.
17. Peng Li, Xuhui Zhang, Xiaobing Lu. Three-dimensional Eulerian modeling of gas–liquid–solid flow with gas hydrate dissociation in a vertical pipe. *Chemical Engineering Science*, 2019, no. 196, pp. 1456–1465. DOI: 10.1016/j.ces.2018.10.053.
18. Mahdavianmash M., Noghrehabadi A.R., Behbahaninejad M., Ahmadi G., Dehghanian M. Lagrangian particle tracking: model development. *Life Science Journal*, 2013, no. 10, pp. 34–41.
19. Ferziger J.H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin, Springer, 2001. 423 p.
20. Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski, T.B., Speziale C.G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1992, no. 4, pp. 1510–1520. DOI: 10.1063/1.858424.

Information about the authors

Vitaly A. Demin, Dr. Sc., Professor, Head of the Theoretical Physics Department, Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation. demin@psu.ru

Alexey V. Kostyrya, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. AVKostyrja@pstu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0608-8826>

Received: 01.08.2023

Revised: 29.01.2024

Accepted: 14.06.2024

|