

УДК 536.24; 535.23; 536.25; 536.37

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ ГОРЕЛКИ С АКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ

А. Д. Морошкина<sup>1</sup>, А. А. Пономарева<sup>2,3</sup>, В. В. Миславский<sup>1</sup>,  
Е. В. Серещенко<sup>1</sup>, В. В. Губернов<sup>1</sup>,  
С. С. Минаев<sup>1</sup>, С. Н. Цхай<sup>1</sup>

*В работе экспериментально исследованы спектральные и мощностные характеристики теплового излучения горелки в виде цилиндрического пористого слоя с фильтрационным горением газа. Особенностью горелки является стабилизация волны фильтрационного горения газа в аксиальном потоке горючей смеси внутри пористой среды и выходом излучения через непроницаемые для газа стенки. Экспериментально измерена мощность, спектральные и угловые характеристики плотности потока излучения с внешней стороны горелки с фильтрами из кварцевого стекла и германия. Обсуждаются перспективы использования такой горелки в качестве эффективного ИК-излучателя для различных приложений.*

**Ключевые слова:** фильтрационное горение, радиационный излучатель, пористая горелка, спектр теплового излучения, плотность мощности теплового излучения.

*Введение.* В настоящее время создание прямых преобразователей тепла от сгорания топлива в тепловое ИК-излучение является актуальной задачей, поскольку позволяет осуществлять бесконтактный нагрев материалов с возможностью контроля мощности излучения, и применять прямые методы преобразования излучения в электроэнергию, например, на основе термофотовольтаического (TRV) преобразования [1]. Поскольку излучение от газообразных продуктов горения невелико, для создания радиационных

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: s\_evgeniy@yahoo.com.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101 Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49.

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

излучателей используют фильтрационное горение газа в пористой среде, которая при нагреве создает интенсивный поток излучения.

Фильтрационное горение газа в инертной пористой среде обладает рядом преимуществ, обеспечивающих широкие возможности для практического применения: высокая удельная мощность, низкий уровень выбросов, широкий диапазон мощности, стабильность горения в широком диапазоне коэффициента избытка топлива и высокий тепловой КПД [2–6]. Тепловая инерционность пористой среды обуславливает благоприятные условия горения и стабилизации пламени, предоставляя широкие возможности для управления процессом горения, изменяя скорость потока, состав горючей смеси или структуру пористой среды [5–8]. Основное внимание в данной работе уделено исследованиям характеристик теплового излучения от новой конструкции цилиндрической пористой горелки, предложенной в теоретической работе [9]. Особенностью этой горелки является аксиальная подача горючей смеси в кольцевую пористую матрицу, внутри которой стабилизирована волна фильтрационного горения. Преимуществом такой конфигурации по сравнению с традиционными цилиндрическими горелками с радиальным потоком горючей смеси, является возможность вывода излучения через коаксиальные кварцевые трубки, в которые помещается пористая среда. Такая конфигурация позволяет избежать контакт преобразователя тепла или обрабатываемого материала с продуктами горения и выводить тепловое излучение как внутрь горелки, так и наружу через кварцевые трубки. В данной работе впервые получены экспериментальные данные об особенностях горения и данные о потоках излучения из такой горелки.

*Экспериментальная установка.* Схематическое изображение и фотография исследуемой пористой горелки показаны на рис. 1. Горелка представляет собой две коаксиально расположенные кварцевые трубки (марка стекла КУ) с внешними диаметрами 50 мм и 86 мм, соответственно, и толщиной стенок 3 мм. Пространство между трубками заполнено шариками из оксида циркония (ООО Сапфир, чистота не менее 95%) диаметром 2 мм так, что засыпка формирует пористый слой толщиной 15 мм и высотой 220 мм, через который снизу подается топливная пропановоздушная смесь. В качестве топлива использовался технический пропан, соответствующий ГОСТу 20448-90, массовая доля которого была не менее 75%. Воздух накачивался компрессором из атмосферы и осушался осушителем KRAFTMANN KHD 20. Расход и состав топливной смеси регулируется поплавковыми ротаметрами (LZM, Yuyao Kingtai Instrument Co. Ltd). Измерения температуры проводились с помощью микротермопары К-типа и высокоскоростного тепловизора (Optris PI 1M). Калибровка тепловизора проводилась

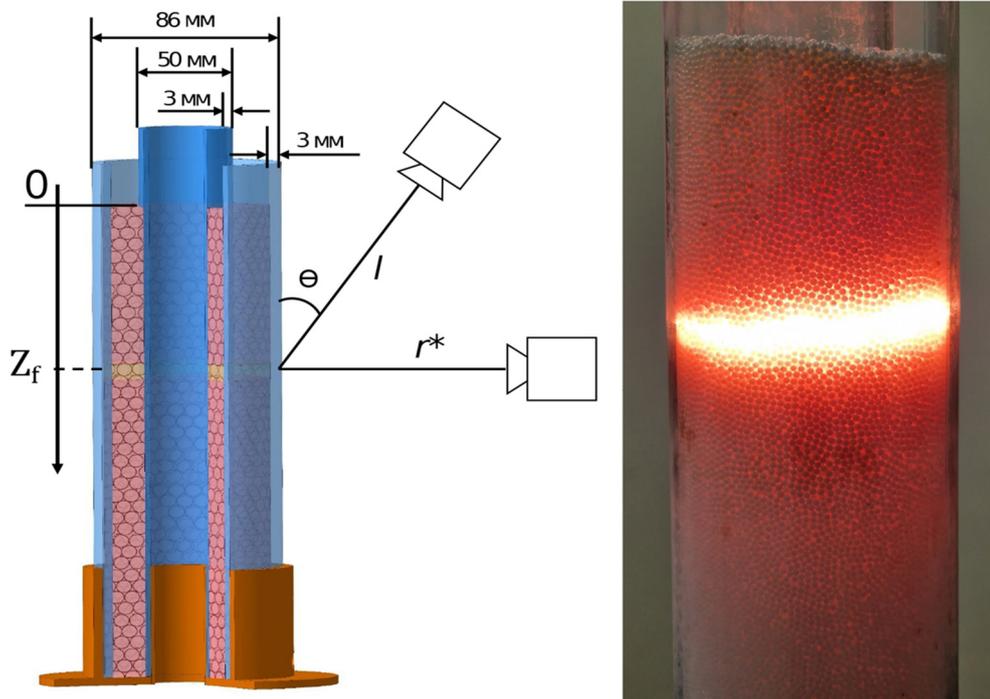


Рис. 1: Схема пористой горелки и экспериментальная фотография стационарного режима горения.

следующим образом: шарик оксида циркония разогревался внешней факельной горелкой до определенной температуры, которая контролировалась с помощью термопары, одновременно производилась съемка на тепловизор и его параметры корректировались таким образом, чтобы разброс термопарных и тепловизионных измерений составлял не более 50 К в широком диапазоне исследуемых температур. Для измерения спектральных характеристик излучения горелки с помощью оптической схемы проводилась пространственная фильтрация ее изображения, которое затем подавалось на входную щель монохроматора/спектрометра. Оптическая схема позволяла передвигать изображение горелки по высоте и получать излучение от локального участка поверхности. Регистрация спектров излучения в диапазоне длин волн до 2.5 мкм производилась с помощью спектрометра (Ocean Optics NIRQuest512-2.5), а в длинноволновом диапазоне – с помощью монохроматора Solar ТП MS2004 с InGaS (Thorlabs PDA10PT) детектором, установленным на выходной щели. Для калибровки спектрометров использовалось черное тело (OMEGA BB703). Плотность мощности излучения горелки измерялась с помощью широкополосного теплового датчика (Ophir 10A-BB-16).

*Результаты.* В данной работе обе боковые цилиндрические поверхности горелки были открыты для того, чтобы иметь доступ к их инструментальной диагностике. После инициирования процесса горения над верхней поверхностью пористой среды устанавливался фронт горения, который постепенно прогревал слои засыпки и заходил внутрь пористой среды. В результате формировался фронт горения в виде кольцевого слоя, динамика которого зависела от параметров эксперимента. Было проведено детальное параметрическое исследование режимов распространения волны горения в пористой засыпке горелки, которое показало, что в зависимости от расхода и состава топливно-воздушной смеси фронт пламени распространяется либо вниз навстречу потоку, либо вверх по потоку реагирующего газа. Наиболее примечательным является то, что при определенных значениях параметров расхода смеси  $Q$  [м<sup>3</sup>/час] и коэффициента избытка топлива  $\phi$  фронт горения стабилизируется и становится стационарным. В случае, когда расход воздуха  $Q_{\text{air}}$  равнялся 3.04 м<sup>3</sup>/ч, было обнаружено, что для бедной смеси режим горения, близкий к стационарному, наблюдается при расходе топлива  $Q_{\text{gas}} = 0.072$  м<sup>3</sup>/ч, что соответствует  $\phi = 0.565$ , а для богатой смеси – при  $Q_{\text{gas}} = 0.144$  м<sup>3</sup>/ч, что соответствует  $\phi = 1.132$ . В данной работе основное внимание уделено исследованию режимов горения, близких к стационарным, поскольку их наличие открывает возможность использования подобной системы в качестве реактора или ИК-излучателя.

Пример квазистационарного режима горения приведен на рис. 2, где построена зависимость температуры засыпки на внешней боковой поверхности горелки от продольной координаты  $z$ . При этом за начало координат берется верхний выходной торец пористой среды, а ось  $z$  направлена вниз, навстречу потоку газа (см. рис. 1). Расходы воздуха и пропана составляли  $Q_{\text{air}} = 3.04$  м<sup>3</sup>/ч и  $Q_{\text{gas}} = 0.144$  м<sup>3</sup>/ч ( $\phi = 1.132$ ). Все дальнейшие измерения представлены для данных расходов. Перемещение фронта горения в таком режиме не превышает 16 мм в час. Сплошной линией показана температура, полученная с помощью тепловизора ( $T_{\text{solid}}$ ). Время экспозиции при съемке было равно 1/32 сек. Кадры обрабатывались так, что температура усреднялась в направлении, перпендикулярном оси  $z$  и параллельном фронту волны горения на отрезке  $\pm 6.5$  мм от оси симметрии горелки. Температура внешней кварцевой стенки измерялась с помощью термопары и показана на рис. 2 пунктирной линией ( $T_{\text{wall}}$ ). В целом видно, что она на 400–500 К ниже температуры засыпки и в результате во внешней стенке могут возникать значительные локальные градиенты температуры. Помимо тепловизионных и термопарных измерений температуры, была проведена оценка температуры по спектру

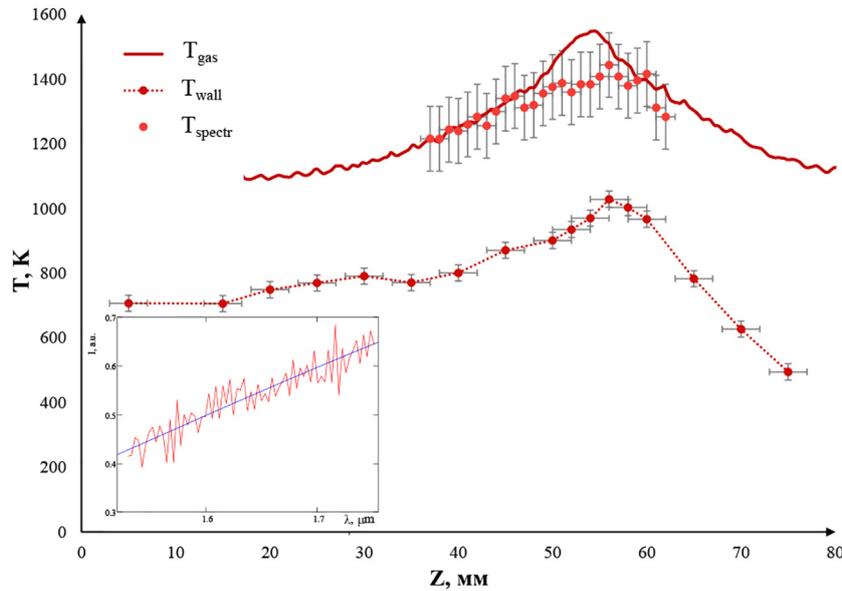


Рис. 2: Температурные профили, измеренные тепловизором ( $T_{\text{solid}}$ ), термопарой ( $T_{\text{wall}}$ ) и по обработке спектра излучения ( $T_{\text{spectr}}$ ).

излучения в ИК диапазоне ( $T_{\text{spectr}}$ ). С этой целью производилась регистрация спектра излучения с локальной области поверхности горелки в диапазоне длин волн от 1.5 до 2 мкм, где используемое в измерениях оптическое волокно не имело линий поглощения. Пример полученного в процессе калибровки спектра излучения отдельного шарика приведен на вкладке к рис. 2. Далее спектр излучения отдельного шарика аппроксимировался спектром излучения абсолютно черного тела, что позволило с помощью метода наименьших квадратов получить оценку температуры (1150 К). Сравнение температуры, измеренной таким образом, с температурой, полученной термопарным методом, позволило оценить точность спектрального метода в 100 К. Подобная процедура позволила получить распределение температуры по высоте, которое также показано на рис. 2 красными кружками. Таким образом мы видим неплохое согласие различных методов измерения температуры излучающей пористой матрицы. Следует отметить, что прямое измерение температуры пористой среды контактными методами затруднительно из-за наличия кварцевых стенок горелки.

Для оценки излучательных характеристик горелки с помощью пирометрического датчика были проведены измерения плотности потока мощности  $J$  в зависимости от угла  $\theta$ , измеряемого относительно оси горелки с вершиной в центре волны горения при фиксированном расстоянии от нее  $l$ , а также от расстояния от центра фронта горения

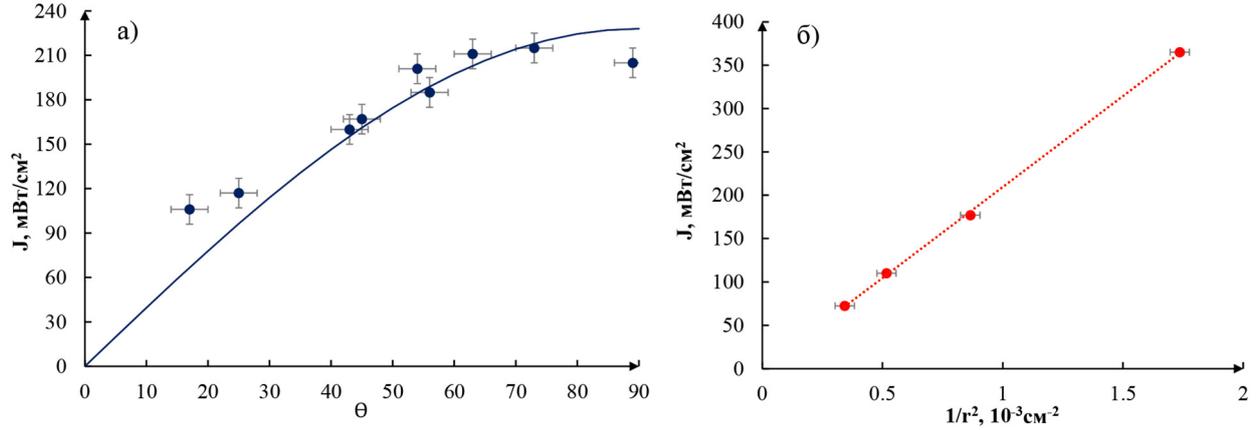


Рис. 3: Зависимость  $J$  от угла  $\theta$  на расстоянии 30 см от стенки горелки (а) и от расстояния  $r$  от центра горелки при  $\theta = 90$  (б).

по нормали к оси горелки  $r^*$  (см. рис. 1). Результаты представлены на рис. 3(а) и 3(б), соответственно. Угловая зависимость плотности мощности на фиксированном расстоянии от фронта горения, составляющем  $l = 30$  см, хорошо описывается законом  $\sin \theta$  и может быть интерполирована функцией  $228 \sin \theta$  [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ], изображенной на рис. 3(а) сплошной синей кривой. Следует отметить, что поскольку основное излучение исходило из относительно узкой кольцевой области вблизи максимальной температуры пористой среды, датчик диафрагмировался так, чтобы его угловая апертура составляла примерно 1:5. В этом случае, в датчик попадает излучение из области с наибольшей светимостью шириной  $\pm 3$  см от пика температуры по высоте (см. рис. 2). Зависимость плотности потока излучения от расстояния до центра горелки  $r = r^* + r_0$  (где  $r_0 = 4$  см – внутренний радиус внешней трубки), представленная на рис. 3(б), показывает, что она следует закону  $1/r^2$ . Это позволяет оценить плотность потока излучения вблизи поверхности горелки ( $r = r_0$ ), как  $J \sim 13 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

Из данных, приведенных на рис. 3(а), можно оценить полную мощность излучения горелки. Интегрируя интерполяционную функцию для плотности мощности излучения по полному телесному углу в сферических координатах

$$P = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} 228 \sin \theta r^2 \sin \theta d\theta, \quad (1)$$

получим при  $r^* = 30$  см мощность  $P = 2$  кВт. Интегрирование методом трапеций по дискретному набору экспериментальных данных позволяет получить несколько большую

оценку мощности излучения  $P = 2.12$  кВт. Полную мощность излучения можно также оценить из предположения, что пористая среда излучает как черное тело по закону Стефана–Больцмана с плотность излучения  $J = \sigma T^4$ . Интегрируя плотность излучения пористой среды по площади внешней цилиндрической поверхности горелки с учетом распределения температуры вдоль оси горелки и вычитая излучение окружающей среды, получим что  $P = 2.4$  кВт. С учетом того, что полная химическая мощность сгораемого топлива при данном расходе составляет 3.2 кВт, все эти оценки свидетельствует о том, что более  $\sim 60\%$  мощности от сгорания топлива преобразуется в поток излучения. При этом чуть более 1 кВт мощности рассеивается в виде теплопотерь, основную часть которых составляет энергия, уносимая с горячими продуктами горения. Исходя из того, что температура верхнего торца пористой засыпки 1000 К, то их величину можно оценить как  $Q_{\text{mix}} \rho^{\text{prod}} c_p^{\text{prod}} \Delta T = 650$  Вт, где  $Q_{\text{mix}}$  – расход смеси,  $\rho^{\text{prod}}$ ,  $c_p^{\text{prod}}$  – плотность и удельная теплоемкость продуктов горения. В свою очередь поток излучения с торца пористой среды площадью  $S_{\text{out}}$  оценивается как  $\sigma T^4 S_{\text{out}} = 200$  Вт. Оставшаяся часть – это конвективные теплопотери с внутренней и внешней цилиндрических поверхностей горелки. Их вклад можно оценить как 150 Вт, считая что коэффициент конвективных теплопотерь составляет 10 Вт/(м<sup>2</sup>К).

Из сказанного выше следует, что исследуемая система может быть использована, как эффективный ИК-излучатель. Во многих современных приложениях таких, как фотовольтаика или лазерная генерация, подобные источники крайне востребованы. Однако они должны иметь лимитированный по длинам волн диапазон ИК-излучения. На рис. 4 показано, что подобные характеристики можно получить в исследуемой системе путем использования простых фильтров из кварцевого стекла (КУ толщина 3 мм) и германия (толщина 4 мм). Спектральные характеристики излучения горелки после последовательного применения кварцевого и составного кварцево-германиевого фильтров изображены с помощью синей и красной линий, соответственно. Кварцевое стекло работает как длинноволновый фильтр с пороговой длиной волны 4.5 мкм, а германий – как коротковолновый фильтр с пороговой длиной волны 1.9 мкм. Получаемый в итоге спектр состоит из двух полос с центрами около 2.2 и 3.2 мкм, разделенных полосой поглощения кварцевого стекла 2.5–2.9 мкм. Интегральная плотность мощности на этих двух спектральных полосах составила порядка  $J \approx 50$  мВт/см<sup>2</sup> на расстоянии  $r^* = 30$  см от поверхности горелки. Используя найденную ранее зависимость  $J \sim r^{-2}$ , можно оценить плотность мощности вблизи поверхности горелки, как  $J \sim 3.6$  Вт/см<sup>2</sup>.

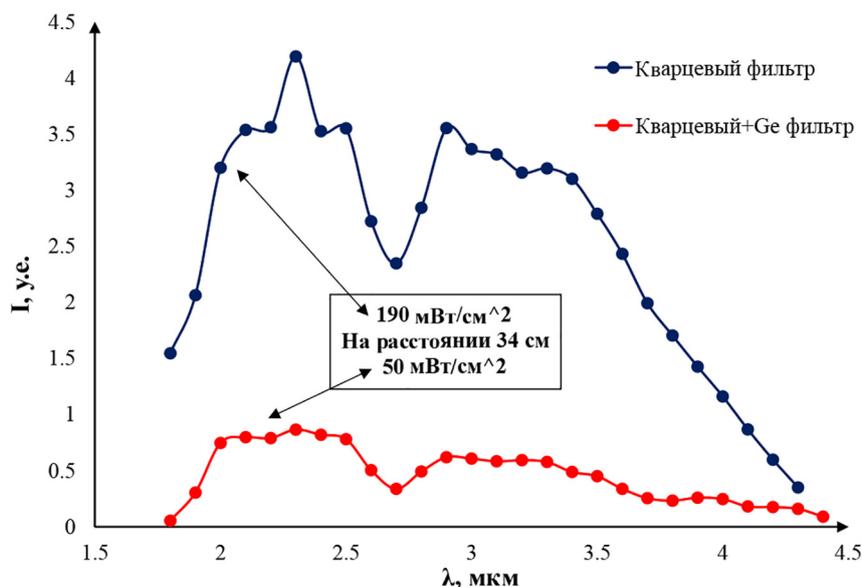


Рис. 4: Спектры излучения, нормированные на излучение черного тела, в условных единицах, полученные при использовании кварцевого и составного кварцево-германиевого фильтров.

*Заключение.* В данной работе исследовались излучательные характеристики пористой горелки в виде цилиндрического слоя. Внешняя и внутренняя поверхности горелки были открыты, при этом большая часть излучения во внутренней полости поглощалась пористой средой, создавая условия, близкие к адиабатическим, а внешняя граница свободно излучала. Было установлено, что в подобной системе возможно создание стационарных фронтов горения, которые остаются неизменными в течение многих часов работы устройства. При этом более 60% химической энергии горючего газа удастся перевести в широкополосное тепловое излучение с плотностью потока порядка  $13 \text{ Вт/см}^2$  у поверхности горелки. Использование составного кварц-германиевого фильтра позволило вывести из горелки излучение с двухполосным спектром от 1.9 до 2.5 мкм и от 2.9 до 4.5 мкм с основной мощностью излучения на длинах волн около 2.2 и 3.2 мкм. Интегральная плотность излучения при этом может составлять у поверхности горелки порядка  $3.6 \text{ Вт/см}^2$ , а часть излучения, не прошедшая через фильтр, возвращается обратно в горелку, реализуя эффект рекуперации.

В случае, если внешняя стенка горелки будет теплоизолирована, то можно использовать только излучение, локализованное во внутренней полости устройства. Данное решение совместно с реализацией эффекта рекуперации за счет фильтрации излуче-

ния, а также переход к более мощным тепловым режимам работы горелки позволят увеличить плотности потока энергии на десятки процентов. Подобное устройство может быть использовано как эффективный ИК-излучатель в диапазоне длин волн от 2 до 4 мкм для каскадных фотовольтаических устройств, в качестве реактора для проведения фотохимических реакций и бесконтактного нагрева, для накачки активных сред в задачах лазерной люминесценции и генерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2020-806).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] K. Qiu, A. Hayden, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **91**, 588 (2007).
- [2] J. Howell, M. Hall, J. Ellzey, *Progress in Energy and Combustion Science* **22**, 121 (1996).
- [3] D. Trimis, F. Durst, *Combustion Science and Technology* **121**, 153 (1996).
- [4] L. A. Kennedy, A. V. Saveliev, *International Journal of Fluid Mechanics Research* **22**, (1995).
- [5] V. Babkin, *Pure and Applied Chemistry* **65**, 335 (1993).
- [6] M. Bidabadi, J. Fereidooni, R. Tavakoli, M. Mafi, *Korean Journal of Chemical Engineering* **28**, 461 (2011).
- [7] Н. А. Какуткина, А. А. Коржавин, Е. В. Манжос и др., *Интерэкспо Гео-Сибирь* **5**, 189 (2013).
- [8] V. Babkin, V. Drobyshevich, Y. M. Laevskii, S. Potytnyakov, *Combustion, Explosion and Shock Waves* **19**, 147 (1983).
- [9] E. Dats, S. Minaev, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **195**, 123141 (2022).

Поступила в редакцию 18 сентября 2023 г.

После доработки 15 октября 2022 г.

Принята к публикации 17 октября 2023 г.