Научная статья УДК 536, 532, 620 DOI: 10.14529/power230111

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ МНОГОФРАКЦИОННОЙ ПАРОКАПЕЛЬНОЙ СМЕСИ МЕТАНА В ТРУБЕ С УЧЕТОМ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

H.A. Тукмакова¹, nadejdatukmakova@yandex.ru **Д.А. Тукмаков**², tukmakovda@imm.knc.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

Аннотация. Предметом работы является численное исследование термогидродинамических процессов в потоке метановой парокапельной смеси в одном из элементов устройства подогрева смесей газов и жидкостей. Темой исследования является изучение физических процессов, протекающих в аппаратах регазификации сжиженного природного газа. Цель работы – выявление закономерностей динамики полидисперсной парокапельной смеси в трубе с нагретыми стенками. Динамика несущей среды описывается системой уравнений Навье -Стокса для сжимаемой теплопроводной среды с учетом обмена массой, импульсом и энергией с дисперсной фазой. Дисперсная фаза включала в себя несколько фракций, отличающихся размерами. Каждая фракция описывается системой уравнений, состоящей из уравнения неразрывности для средней плотности, уравнений сохранения составляющих импульса и уравнения сохранения тепловой энергии с учетом взаимодействия многофракционной дисперсной фазы с несущей средой. Математическая модель учитывала закрутку потока посредством учета тангенциальных составляющих векторов скоростей несущей фазы и фракций дисперсной фазы. Системы уравнений движения несущей среды и фракций дисперсной фазы решаются явным конечноразностным методом Мак-Кормака второго порядка. Для преодоления численных осцилляций используется схема нелинейной коррекции сеточной функции. На каждом временном шаге основная часть вычислительного алгоритма дополняется моделью испарения капель с последующей коррекцией гидро- и термодинамических параметров смеси. В результате расчетов выявлено существенное отличие в интенсивности испарения фракций жидкой метановой фазы смеси, имеющих различные размеры дисперсных включений, также было определено, что в процессе движения испаряющейся смеси наибольшее давление паровой фазы наблюдается вблизи отверстия втекания метановой смеси в трубу с подогретыми стенками. Выявленные закономерности возможно применить в устройствах, работающих с газожидкостными средами.

Ключевые слова: сжиженный метан, парокапельная смесь, многофракционная дисперсная фаза, испарение, уравнения Навье – Стокса, метод конечных разностей

Благодарности. Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук».

Для цитирования: Тукмакова Н.А., Тукмаков Д.А. Численное моделирование динамики испаряющейся многофракционной парокапельной смеси метана в трубе с учетом закрутки потока // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 106–118. DOI: 10.14529/power230111

[©] Тукмакова Н.А., Тукмаков Д.А., 2023

Original article DOI: 10.14529/power230111

THE NUMERICAL SIMULATION OF AN EVAPORATING MULTIFRACTION VAPOR-DROPLET MIXTURE OF METHANE IN A PIPE TAKING INTO ACCOUNT THE SWIRLING FLOW

N.A. Tukmakova¹, nadejdatukmakova@yandex.ru **D.A. Tukmakov**², tukmakovda@imm.knc.ru

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia
² Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Kazan. Russia

Abstract. This work is a numerical study of the thermo-hydrodynamics in the flow of a methane vapor-droplet mixture in a device for heating mixtures of gases and liquids. The subject of the research are the physical processes occurring in liquefied natural gas regasification apparatuses. The purpose of the work is to reveal the regularities of the dynamics of a polydisperse vapor-droplet mixture in a pipe with heated walls. The dynamics of the carrier medium are described by Navier-Stokes equations for a compressible heat-conducting medium, taking into account the exchange of mass, momentum, and energy with the dispersed phase. The dispersed phase included several fractions of different sizes. Each fraction is described by equations consisting of the continuity equation for the average density, the conservation equations for the momentum components, and the thermal energy conservation equation, taking into account the interaction of the multi-fraction dispersed phase with the carrier medium. The mathematical model takes into account the swirl of the flow using the tangential components of the velocity vectors of the carrier phase and fractions of the dispersed phase. The equations of the motion of the carrier medium and the fractions of the dispersed phase are solved by the McCormack explicit finite-difference method of the second order. To overcome numerical oscillations, a scheme of nonlinear corrections of the grid function is used. At each time step, the main part of the computational algorithm is supplemented by a droplet evaporation model with a subsequent correction of the hydro- and thermodynamic parameters of the mixture. The results showed a significant difference in the intensity of evaporation of the fractions of the liquid methane phase of the mixture, which have different sizes of dispersed inclusions, it was also determined that during the movement of the evaporating mixture, the highest pressure of the vapor phase is observed near the inflow of the methane mixture into the pipe with heated walls. These regularities can be applied in devices working with gas-liquid media.

Keywords: liquefied methane, vapor-drop mixture, multi-fraction dispersed phase, evaporation, Navier–Stokes equations, finite difference method

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state task of the Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences".

For citation: Tukmakova N.A., Tukmakov D.A. The numerical simulation of an evaporating multifraction vapordroplet mixture of methane in a pipe taking into account the swirling flow. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):106–118. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230111

Введение

Различные процессы в промышленной энергетике связаны с течениями газов и жидкостей. В связи с этим задачи экспериментального, теоретического и численного исследования гидродинамических процессов имеют актуальность для конструирования и оптимизации технологий промышленной энергетики. Для многих задач классической гидродинамики получены точные решения, которые возможно использовать в практических приложениях. Но в ряде случаев возникает необходимость моделирования течений сред в отличие от классической гидродинамики, не являющихся однородными и включающих в себя две и более компоненты. Неоднородные среды могут содержать компоненты с различными агрегатными состояниями, в этом случае такие среды именуются

многофазными [1-3]. Одним из видов многофазных сред являются аэрозоли – смесь газа и жидких капель или твердых частиц [2]. В этом случае кроме механических эффектов в течениях могут протекать термодинамические процессы – например, испарение капель. В данной работе рассматривается динамика парокапельной среды с испаряющимися каплями. Течения парокапельных смесей с испарением дисперсной фазы протекают в аппаратах, предназначенных для подогрева газожидкостных смесей [4] в технологиях промышленной энергетики, работающих со сжиженным природным газом. В работе [5] с помощью численных методов моделировалось течение газа с дисперсными частицами. Необходимость исследования связана с проблемами течения запыленных сред в проточных элементах газотурбинных двигателей

Теплотехника Heat engineering

летательных аппаратов. Движение двухфазной смеси описывалось в плоском нестационарном случае с учетом вязкости несущей среды и взаимодействия несущей среды и дисперсной фазы. В публикации [6] описан численный алгоритм, предназначенный для расчетов течений смеси, в рамках односкоростного подхода, на криволинейных сетках, проведен анализ уравнений математической модели. Исследование [7] посвящено разработке математической модели двухфазного течения, учитывающей эффекты дробления и испарения капель жидкости в потоке газокапельной среды. В работе разработана математическая модель и проведены численные расчеты процессов испарения и механического разрушения капель жидкости как в дозвуковых, так и в сверхзвуковых потоках. В публикации [8] в автомодельной постановке получено решение для процесса диффузионного перемешивания аэрозоля с газом при одномерной геометрии моделируемого процесса. Особенностью модели является учет фазовых переходов. Исследованы температурные и концентрационные поля при моделировании различных первоначальных температур газа и дисперсной фазы. Также рассмотрены различные парциальные плотности пара в газе. Анализировались типы перемешивания аэрозоля с газом, имеющим различные температуры, а также моделировалось перемешивание с перегретым паром. В работе [9] численно моделировался процесс распространения дисперсной примеси и теплообмен в закрученном газокапельном потоке, движущемся за расширением трубы. Газовая фаза описана трехмерной системой уравнений Навье – Стокса, осредненной по Рейнольдсу, с учетом обратного влияния частиц на динамику несущей фазы. Эйлерово и лагранжево описания дают качественно близкие результаты для мелкодисперсных капель (*d* ≤ 30 мкм), при этом для самых крупных, исследованных в данной работе частиц (d = 100 мкм), отличие в результатах расчетов является существенным. В работе [10] представлена численная модель и результаты расчетов межфазного тепломассообмена в двухфазном потоке, создаваемом при форсуночном распыливании жидкости в газ. В качестве основы предлагаемой математической модели использованы нестационарные дифференциальные уравнения течения сжимаемой среды, дополненные уравнениями тепло- и массопередачи от капель к газу. Для интегрирования уравнений динамики двухфазной среды использована явная схема Лакса -Вендроффа. В публикации [11] с помощью анализа экспериментальных данных по газификации кислорода на стационарной установке газификации выполнена идентификация дифференциальной параметрической модели теплообмена в газификаторах закрытого типа. Разработаны методики оптимизации работы газификатора по достижению заданного диапазона выходной температуры в ста-

ционарном и нестационарном режимах работы. В статье [12] рассматривается процесс газификации угольной пыли в потоке дутья с высоким содержанием кислорода. С помощью математической модели в одномерном стационарном приближении исследуется изменение характеристик процесса при добавлении к кислородному дутью диоксида углерода и смеси диоксида углерода и водяного пара. Расчеты показывают, что добавление диоксида углерода позволяет снизить удельные затраты кислорода на газификацию и повысить полноту конверсии топлива. В публикации [13] численно моделируется деформация границы раздела «газ – жидкость» на ранних стадиях разрушения столба вязкой жидкости, для математического описания процесса численно интегрируется совокупность из двух систем уравнений Навье - Стокса для моделирования двухкомпонентной смеси. В работе [14] проведены исследования гидродинамических и тепловых эффектов в турбулентных течениях однородной воды, однородного этиленгликоля и водно-этиленгликолевой смеси с твердыми частицами оксида алюминия. Было проанализировано влияние различных жидкостей - несущих сред и различных объемных долей твердых частиц для течений с числами Рейнольдса в диапазоне от 5000 до 50 000. Поля потока жидкости и температуры были смоделированы с использованием коммерческого программного обеспечения CFD FLUENT.

В публикации [15] с помощью проведения ряда физических экспериментов изучены теплогидродинамические процессы в устройствах охлаждения микросхем вычислительной техники. В статье [16] изучались магнитогидродинамические эффекты на нестационарное вращательное течение несжимаемой жидкости. Уравнения математической модели описывали нестационарное течение несжимаемой жидкости с частицами, движущимися под действием термофореза. С помощью пакета МАТLАВ уравнения математической модели интегрируются численным методом конечных элементов. В публикации [17] получена двухмерная численная модель детонации в неоднородной среде, основанная на методе Эйлера – Лагранжа и учитывающая дробление капель. Модель учитывала межфазный обмен массой, импульсом и межфазный теплообмен. Было обнаружено существенное влияние межфазного взаимодействия на процесс детонации. Без применения полного гидродинамического подхода, используя уравнения акустики, в исследовании [18] численно моделировалась конденсация атмосферного аэрозоля, образующегося в результате эксплуатации объектов промышленной энергетики, рассмотрены различные механизмы конденсации капель аэрозоля. В приведенных выше исследованиях объектом исследования являются различные виды течений в неоднородных средах. Это могут быть запыленные

среды без фазовых переходов либо же дисперсные среды, в которых происходит дробление или же испарение дисперсной фазы, что обусловлено практическими приложениями, связанными с различными промышленными технологиями. Новизна работы заключается в том, что динамика полидисперсной парокапельной среды в осесимметричной постановке исследована с учетом межфазного обмена импульсом и теплом, а также азимутальной составляющей скорости обоих фаз смеси. Целью работы было исследование течения парокапельной среды с различными размерами дисперсных включений в трубе с нагретой стенкой. Выявлены отличия в распределении концентрации дисперсной компоненты с различными размерами капель при учете их испарения.

Постановка задачи

Парокапельная смесь состоит из дисперсной фазы, включающей в себя четыре капельных фракции жидкого метана и паров метана. Фракция мелкодисперсных включений состоит из капель с диаметром d=2 мкм. Фракция крупнодисперсных капель образована каплями с диаметром d=100 мкм. Также присутствуют капли с промежуточным размером d = 20 мкм и d = 40 мкм. Скорость звука в парах метана составляет $c = (\gamma RT)^{1/2} \approx 297$ м/с, где $\gamma = 1,31$ – постоянная адиабаты, R = 518 Дж/(кг·К) – газовая постоянная метана. При величине радиальной координаты $y = L_v$ фиксировалась температура нагретой стенки. В численных расчетах количество узлов в осевом направлении – N_{x_2} в радиальном направлении – N_{y_2} расчетная сетка задавалась равномерной по всем пространственным направлениям с количеством узлов $N_x \times N_y = 200 \times 100$. На входной границе x = 0 задавалось однородное граничное условие Неймана для всех газодинамических функций. На оси симметрии при y = 0 и на стенках (y = h) для азимутальных составлющих скоростей компонент смеси задавались однородные граничные условия Дирехле. На твердой поверхности для всех составляющих векторов скоростей паровой фазы и дисперсных фракций задаются однородные граничные условия Дирихле. Для давления, плотности, энергии пара и температуры на выходе из трубы ставились однородные граничные условия Неймана. В численных расчетах задавались следующие значения скоростей паровой фазы и фракций жидкой компоненты смеси: $u(t = 0, x, y) = 0.05c_0$, $v(t=0, x, y) = 0, w(t=0, x, y) = 0, 1c_0, u_i(t=0, x, y) = 0,05 c_0, v_i(t=0, x, y) = 0, w_i(t=0, x, y) = 0.$ Начальная температура фракций дисперсной фазы – $T_i = 108$ К, начальное объемное содержание фракций – $\alpha_i = 0,00025$. Физическая плотность дисперсной фазы – $\rho_{\rm w} = 416$ кг/м³, начальные температура и плотность пара – $T_0 = 130$ К, $\rho_0 = 1,29$ кг/м³. Температура стенки трубы составляла $T_w = 200$ К.

Теоретическая часть

Течение парокапельной среды моделировалось системой уравнений динамики многоскоростной и многотемпературной газовзвеси [19, 20] с вязкой несущей средой [21], включающей в себя несколько фракций. Моделируемое течение имеет осевую симметрию [20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &+ \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = -\frac{\rho v}{y} + j, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u^2 + p - \tau_{xx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho u v - \tau_{xy} \right) = -\frac{\rho u v - \tau_{xy}}{y} - \sum_{i=1,n} F_{xi} + \alpha \frac{\partial p}{\partial x} + j \cdot u, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u v - \tau_{xy} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v^2 + p - \tau_{yy} \right) = -\frac{\rho v^2 + p - \tau_{yy}}{y} - \sum_{i=1,n} F_{yi} + \alpha \frac{\partial p}{\partial y} + j \cdot v, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} &+ \frac{\partial (\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v w)}{\partial y} = -\frac{\rho v w}{y} - \sum_{i=1,n} F_{zi}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\left[e + p - \tau_{xx} \right] u - \tau_{xy} v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left[e + p - \tau_{yy} \right] v - \tau_{xy} u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \end{aligned}$$

$$= -\frac{\left[e + p - \tau_{yy} \right] v - \tau_{xy} u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y}}{y} - \sum_{i=1,n} Q_i - \sum_{i=1,n} \left(|F_{xi}| (u - u_i) + |F_{yi}| (v - v_i) \right) + \end{aligned}$$

$$+ \alpha \left(\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} \right) + j \cdot L, \ e = I + \rho (u^2 + v^2)/2, \ \alpha = \sum_{i=1,n} \alpha_i, \end{aligned}$$

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \ \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right), \ \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \ D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{v}{y}, \end{aligned}$$

Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 106–118 ISSN 1990-8512 (Print) ISSN 2409-1057 (Online)

$$\begin{split} F_{xi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho \sqrt{\left(u - u_i\right)^2 + \left(v - v_i\right)^2 + \left(w - w_i\right)^2} \left(u - u_i\right) + \\ &+ \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) + 0.5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y}\right), \\ F_{yi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho \sqrt{\left(u - u_i\right)^2 + \left(v - v_i\right)^2 + \left(w - w_i\right)^2} \left(v - v_i\right) + \\ &+ \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) + 0.5 \alpha_i \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y}\right), \\ F_{zi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho \sqrt{\left(u - u_i\right)^2 + \left(v - v_i\right)^2 + \left(w - w_i\right)^2} \left(w - w_i\right), \\ C_{di} &= C_{di}^0 \psi (M_{i0}) \varphi (\alpha_i), \quad C_{di}^0 &= \left(\frac{24}{\text{Re}_{i0}} + \frac{4}{\text{Re}_{i0}^{0.5}} + 0.4\right) \left(1 + 0.25W e_i^{0.1} / L p_i^{0.04}\right), \\ \psi \left(M_{i0}\right) &= 1 + \exp\left(-\frac{0.427}{M_{i0}^{0.63}}\right), \quad \varphi (\alpha_i) &= (1 - \alpha_i)^{-2.5}, \quad \text{Re}_{i0} &= \rho \left|\overline{V} - \overline{V_i}\right| d_i / \mu, \\ M_{i0} &= \left|\overline{V} - \overline{V_i}\right| / c, \quad \text{We}_i &= \rho \left|\overline{V} - \overline{V_i}\right|^2 d_i / \sigma, \quad L p_i &= \rho \sigma d_i / \mu^2, \quad j = \sum_{i=1,n} j_i. \end{split}$$

В записи формул применяются обозначения: u, v, w, u_i, v_i, w_i – пространственные компоненты векторов скорости несущей среды и фракций дисперсной фазы; $\rho, e, \sigma, \lambda, \mu, d_i$ – плотность несущей среды, удельная полная энергия, коэффициент поверхностного натяжения несущей фазы, коэффициент теплопроводности и коэффициент вязкости несущей фазы, диаметр капли *i*-й фракции; j_i – интенсивность массообмена между *i*-й фракцией дисперсной фазы и несущей средой. Объемное содержание жидкой фазы парокапельной среды является суммой объемных содержаний фракций: $\alpha = \sum_{i=1,n} \alpha_i$. Коэффициент аэродинамического сопро-

тивления капель C_{di} описывается с учетом сжимаемости несущей фазы $\psi(M_{i0})$ и большого объемного содержания дисперсных включений $\phi(\alpha_i)$ [2]. При описании динамики несущей фазы смеси учитывалось уравнение для азимутальной составляющей импульса, записанное в предположении об азимутальной симметрии потока при его вращении и без учета составляющих вязкого трения [22]. Пространственные компоненты вектора обмена импульсом между несущей фазой и *i*-й фракцией – F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} [1–3, 22]. Здесь $I = \rho RT/(\gamma - 1)$ – внутренняя энергия газа; R, γ – газовая постоянная и постоянная адиабаты несущей среды соответственно. Температура несущей среды определяется как $T = (\gamma - 1)(e/\rho - 0,5(u^2 + v^2))/R$; $Q_i = 6\alpha_i \operatorname{Nu}_i \lambda (T - T_i)/(2r_i)^2$ – тепловой поток [1, 2, 13], возникающий вследствие теплообмена между несущей средой и каплями *i*-й фракции, где $\operatorname{Nu}_i = 2r_i\alpha_p/\lambda$ – число Нуссельта, r_i – радиус капель *i*-й фракции. Число Нуссельта определяется при помощи известного из литературы приближения [1, 2]. Дисперсная фаза парокапельной смеси имеет многофракционный состав – фракции отличаются размером капель. Для каждой фракции дисперсной фазы решается полная гидродинамическая система уравнений с учетом обмена массой, импульсом и тепловой энергией между фракциями дисперсной фазы и несущей средой [20]:

$$\frac{\partial \rho_{i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{i}u_{i})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_{i}v_{i})}{\partial y} = -\frac{\rho_{i}v_{i}}{y} - j_{i},$$

$$\frac{\partial (\rho_{i}u_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{i}u_{i}^{2}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{i}u_{i}v_{i}) = -\frac{\rho_{i}u_{i}v_{i}}{y} + F_{xi} - \alpha_{i}\frac{\partial p}{\partial x} - j_{i} \cdot u_{i},$$

$$\frac{\partial (\rho_{i}v_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{i}u_{i}v_{i}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_{i}^{2}) = -\frac{\rho v_{i}^{2}}{y} + F_{yi} - \alpha_{i}\frac{\partial p}{\partial y} - j_{i} \cdot v_{i},$$

$$\frac{\partial (\rho_{i}w_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{i}u_{i}w_{i}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_{i}w_{i}) = -\frac{\rho v_{i}w_{i}}{y} + F_{zi},$$

$$\frac{\partial e_{i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (e_{i}u_{i}) + \frac{\partial}{\partial y} (e_{i}v_{i}) = -\frac{e_{i}v_{i}}{y} + \operatorname{Nu}_{i}\frac{6\alpha_{i}}{(2r_{i})^{2}}\lambda(T - T_{i}) - j_{i} \cdot L,$$

$$\rho_{i} = \alpha_{i}\rho_{i0}, \ e_{i} = \rho_{i}C_{pi}T_{i}, \ j = \sum_{i=l,n} j_{i}.$$
(2)

Давление паровой фазы смеси определяется следующим уравнением

$$p = \rho RT / \left(1 - \frac{\rho_{*}}{\rho_{*}^{0}} \right), \tag{3}$$

где *T*, *R*, ρ – температура пара, газовая постоянная и плотность пара; ρ_{π} – суммарная средняя плотность капель по всем фракциям. Здесь ρ_{π}^{0} – истинная плотность дисперсной фазы; $\rho_{\pi}/\rho_{\pi}^{0}$ – объемная доля смеси, занимаемая дисперсной фазой. Испарение мелкодисперсных капель описывается математической моделью [8, 20]. Математическая модель предполагала, что при поглощении теплоты парообразования происходит уменьшение температуры пара.

Для крупных дисперсных включений жидкой фазы использовалась математическая модель изменения температуры и массы капель [7, 20]. Температура движущейся в потоке крупнодисперсной капли описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{6\alpha_{pi}}{d_i C_{p\pi} \rho_{\pi}} \left[T_p \left(1 + M_{\text{отн}}^2 \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) / \left(1 + M^2 \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) - T \right],\tag{4}$$

где M_{orth} – относительное число Маха, $M_{orth} = |\mathbf{V}-\mathbf{V}_i|/c$; C_{px} , ρ_x – удельные теплоемкость и плотность жидкости; T – температура несущей среды. Здесь $\alpha_{pi} = \text{Nu}\cdot\lambda/d_i$ – коэффициент поверхностного теплообмена между несущей средой и поверхностью капли *i*-й фракции. Процесс испарения капли описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \frac{\pi d_i^2 \alpha_{pi}}{L(T_p)} \left[T \left(1 + M_{\text{OTH}}^2 \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) / \left(1 + M^2 \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) - T_s(p) \right].$$
(5)

В формуле (5) при температуре T_p $L(T_p)$ – теплота парообразования жидкости; для давления p $T_s(p)$ – температура насыщения; m_i – масса капли *i*-й фракции. Решение дифференциальных уравнений (4), (5) осуществляется численным методом Эйлера [23]:

$$T_p(t+\Delta t) \approx T_p(t) + \frac{\partial T_p(t)}{\partial t} \Delta t,$$
(6)

$$m_i(t + \Delta t) \approx m_i(t) + \frac{\partial m_i(t)}{\partial t} \Delta t,$$
(7)

Система уравнений математической модели динамики двухфазной полидисперсной парокапельной смеси интегрировалась явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [24] с оператором расщепления по пространственным направлениям [25]. Для подавления численных осцилляций применялась схема нелинейной коррекции сеточной функции [26]. Термодинамические параметры жидкой и паровой компонент парокапельной метановой смеси определялись известными из литературы аппроксимациями [27, 28].

Практическая часть

В конструкцию устройства технологического нагревателя газожидкостных смесей входят коаксиально расположенные цилиндрические трубы с нагреваемыми боковыми стенками (рис. 1) [4].



На рис. 2а схематически изображена расчетная обаласть – цилиндрическая труба. Длина моделируемой трубы составляет $L_x = 1$ м, радиус трубы – $L_y = 0,1$ м; неоднородная среда втекает в трубу при x = 0 и вытекает из трубы при x = 1 м (рис. 2b).



Рис. 2. Схематичное изображение моделируемой области (а), векторное поле скоростей паровой фазы, момент времени *t* =1,5 c (b) Fig. 2. A schematic representation of the simulated area (a), vector field of vapor phase velocities,

time $t = 1.5 \, s$ (b)

На рис. За-d представлены результаты расчетов азимутальной и продольной составляющих скорости для несущей фазы и фракции мелкодисперсных капель с диаметром d = 2 мкм. Составляющие скоростей мелкодисперсных капель и несущей среды согласуются между собой. При задании равномерного граничного условия на входе в трубу для продольной составляющей вектора скорости наблюдается формирование из изначально равномерного распределения скорости «параболического» профиля, характерного для течения вязкой среды [21]. Азимутальная составляющая скорости значительно убывает по сравнению со значением, заданным на входном отверстии, при прохождении трубы, что согласуется с теоретическими выкладками [22]. В поперечном направлении



Рис. 3. Пространственное распределение продольной и азимутальной составляющих скорости несущей среды (a, b) и фракции дисперсной компоненты с размером капель *d* = 2 мкм (c, d)

Fig. 3. The spatial distribution of the longitudinal and azimuthal components of the velocity of the carrier medium (a, b) and the fraction of the dispersed component with a droplet size $d = 2 \mu m$ (c, d)

наибольшее значение азимутальной и продольной составляющих векторов скорости достигается между осью симметрии трубы и поверхностью стенки (рис. 3b, d).

На рис. 4а–с представлены пространственные распределения температуры несущей фазы и температуры двух фракций дисперсной фазы с различными размерами капель. Для мелкодисперсных капель (d = 2 мкм) отличие поля температуры от поля температуры несуйщей фазы несущественно, тогда как для фракции капель с диаметром d = 20 мкм распределение температуры лишь на несколько градусов отличается от их начальной температуры. Распределение температуры мелкодисперсных капель (d = 2 мкм) имеет наибольшее значение вблизи стенки, распределение температуры фракции мелкодисперсных капель (d = 20 мкм) равномерное.

На рис. 5а–d для каждой фракции дисперсной фазы представлены двухмерные распределения отношения объемного содержания фракции на входе в трубу и на всём протяжении трубы. Мелкодисперсные фракции испаряются непосредственно вблизи входа в трубу (рис. 5а). Чем больше размер капель, составляющих фракцию дисперсной фазы, тем меньший объем данной фракции испаряется при прохождении трубы с заданной длинной. Для крупнодисперсных капель диаметром d = 100 мкм при прохождении трубы капли не успевают испариться. За счет скоростного скольжения и пристеночной вязкости капли замедляют движение и объемное содержание фракции крупнодисперсных капель выше, чем при входе в трубу.

На рис. 6 представлены двухмерные распределения давления (рис. 6а) и плотности (рис. 6b) паровой фазы смеси. За счет испарения мелкодисперсных капель происходит увеличение плотности паровой фазы, наибольшее значение давления и плотности несущей фазы наблюдается вблизи входного отверстия трубы.

В результате моделирования определено, что закономерности испарения капель различного размера в трубе-нагревателе отличаются. Численные расчеты демонстрируют, что крупнодисперсные капли не только не испаряются. Для мелкодисперсной фракции капель (d = 2 мкм) наблюдается хорошее согласование полей скорости и температуры с несущей фазой. Объемное содержание крупнодисперсной фракции капель в трубе немного выше начального объемного содержания крупнодисперсных капель на входе в трубу. Также численные расчеты показывают, что за счет испарения мелкодисперсных фракций наблюдается возрастание давления паровой фазы смеси вблизи входного отверстия в канал.



Рис. 4. Пространственное распределение температуры компонент смеси: а – несущая среда;
 b – фракция с начальным размером 1 мкм; с – фракция с начальным размером d = 20 мкм
 Fig. 4. The spatial temperature distribution of the mixture components: a – carrier medium;
 b – fraction with an initial size of 1 μm; c – fraction with initial size d = 20 μm



Рис. 5. Пространственное распределение средних плотностей дисперсных фракций: а – фракция с начальным размером 2 мкм; b – фракция с начальным размером 20 мкм; с – фракция с начальным размером 40 мкм; d – фракция с начальным размером 100 мкм







Численное моделирование динамики испаряющейся многофракционной парокапельной смеси метана...

Заключение

В работе проведены численные расчеты динамики пара с многофракционной дисперсной фазой с учетом теплообмена и обмена импульсом между несущей средой и дисперсной компонентой. Математическая модель учитывала азимутальную составляющею скорости капель и их испарение. Численное моделирование демонстрирует, что азимутальная составляющая течения несущей среды существенно уменьшается вдоль трубы. Поперек трубы, между осью симметрии трубы и стенкой, происходит возрастание азимутальной составляющей скорости несущей среды. Скоростная и температурная дифференциация между несущей фазой и фракцией мелкодисперсных капель не имеет существенного значения. По причине малого отличия поля температуры несущей фазы и фракции мелкодисперсных капель мелкодисперсные капли размером d = 2 мкм почти полностью

испаряются на входе в трубу. Также в процессе движения по трубе происходит существенное уменьшение фракций дисперсной фазы с размером капель d = 20 мкм и d = 40 мкм. Крупнодисперсные капли d = 100 мкм из-за своей массы при движении по трубе не успевают испариться и из-за скоростного скольжения накапливаются в трубе, и их объемное содержание несколько выше объемного содержание на входе в трубу. Из-за испарения мелкодисперных капель в трубе, особенно вблизи входного отверстия, наблюдается увеличение плотности и давления паровой фазы. Выявленные закономерности течения испаряющейся парокапельной смеси с полидисперсным составом жидкостной фазой в цилиндрической трубе с нагретыми стенками могут быть использованы при оптимизации работы теплообменных труб, применяемых в устройстве нагревателя газожидкостных смесей [4].

Список литературы

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.

2. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра, 2003. 283 с.

3. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газовзвесях частиц металлов. Новосибирск, 2015. 301 с.

4. Пат. RU 2467260 C2 Российская Федерация. Технологический нагреватель / Б.Ф. Серазетдинов, Ф.Ш. Серазетдинов, В.Г. Тонконог; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Нейт». № 2011100380/06; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.11.2012. 11 с.

5. Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Нестационарные двухфазные течения газа с частицами в решетках профилей // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2020. № 5. С. 33–45. DOI: 10.31857/S0568528120050126

6. Суров В.С. Гиперболическая модель односкоростной теплопроводной смеси с учетом межфракционного теплообмена // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, № 6. С. 975–985. DOI: 10.31857/S004036440003570-1

7. Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В. Моделирование процесса дробления и испарения капель нереагирующей жидкости в высокоэнтальпийных газодинамических потоках // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 5. С. 609–620.

8. Баянов И.М., Хамидуллин И.Р., Шагапов В.Ш. Об эволюции облака аэрозоля при диффузионном перемешивании с газом // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45, № 5. С. 756–762.

9. Пахомов М.А., Терехов В.И. Распределение концентрации частиц в газокапельном ограниченном закрученном потоке. Эйлеров и лагранжев подходы // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 6. С. 896–900. DOI: 10.31857/S0040364420060149

10. Симаков Н.Н. Расчет межфазного тепломассообмена в факеле распыла форсунки с учетом кризиса сопротивления и тепломассообмена // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56, № 3. С. 345–357. DOI: 10.31857/S0040357122030137

11. Моделирование и оптимизация теплообмена в криогенных газификаторах на примере газификационной установки СГУ-7КМ-У / С.В. Бородкин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Ряжских // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21, № 3. С. 24–30. DOI: 10.14529/power210303

12. Донской И.Г. Влияние добавок водяного пара и диоксида углерода на характеристики процесса кислородной газификации пылеугольного топлива // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21, № 1. С. 21–28. DOI: 10.14529/power210102

13. Investigation of interface deformation dynamics during high-Weber number cylindrical droplet breakup / J.W. Kaiser, J.M. Winter, S. Adami, N.A. Adams // International Journal of Multiphase Flow. 2020. Vol. 132. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103409

14. Hydrodynamic and thermal analysis of water, ethylene glycol and water-ethylene glycol as base fluids dispersed by aluminum oxide nano-sized solid particles / Y. Menni, A. Chamkha, N. Massarotti et al. // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2020. Vol. 30, no. 9. P. 4349–4386. DOI: 10.1108/HFF-10-2019-0739

Теплотехника Heat engineering

15. Falsetti C., Magnini M., Thome J. Hydrodynamic and thermal analysis of a micro-pin fin evaporator for on-chip two-phase cooling of high density power micro-electronics // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 130. P. 1425–1439. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.10.117

16. Unsteady magneto-hydrodynamic transport of rotating Maxwell nanofluid flow on a stretching sheet with Cattaneo–Christov double diffusion and activation energy / A. Bagh, N. Yufeng, H. Sajjad et al. // Thermal Science and Engineering Progress. 2020. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100720

17. Numerical analysis of the mean structure of gaseous detonation with dilute water spray / H. Watanabe, A. Matsuo, A. Chinnayya et al. // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 887. DOI: 10.1017/jfm.2019.1018

18. Numerical simulation of condensation of natural fog aerosol under acoustic wave action / C. Liu, Y. Zhao, Z. Tian, H. Zhou // Aerosol air and quality research. 2021. Vol. 21, no. 4. P. 1–21. DOI: 10.4209/aaqr.2020.06.0361

19. Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газовзвеси // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22, № 1. С. 90–102. DOI: 10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102

20. Тукмаков А.Л., Тукмакова Н.А. Динамика полидисперсной парокапельной смеси с учетом дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 3. С. 437–445. DOI: 10.1134/S0040364419030190

21. Тукмаков Д.А. Исследование влияния входных граничных условий при численном моделировании течения вязкого газа в плоском канале // Информационные системы и технологии. 2022. Т. 131, № 3. С. 20–28.

22. Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.

23. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.

24. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 2. 551 с.

25. Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of flow about arbitrary two-dimensional geometries // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 1978. Vol. 16, no. 7. P. 679–686.

26. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование. 1993. Т. 5, № 3. С. 74–83.

27. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справ. в 5 т. Т. 1: Методы расчета / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин, В.А. Худяков. М.: ВИНИТИ, 1971. 267 с.

28. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 496 с.

References

1. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Ch. 1* [Dynamics of multiphase media. Part 1]. Moscow: Nauka; 1987. 464 p. (In Russ.)

2. Kutushev A.G. *Matematicheskoye modelirovaniye volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh* [Mathematical modeling of wave processes in aerodisperse and powder media]. St. Petersburg: Nedra; 2003. 283 p. (In Russ.)

3. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel' T.A. *Volnovyye protsessy v gazovzvesyakh chastits metallov* [Wave processes in gas suspensions of metal particles]. Novosibirsk; 2015. 301 p. (In Russ.)

4. Serazetdinov B.F., Serazetdinov F.Sh., Tonkonog V.G. *Tekhnologicheskiy nagrevatel'* [Process heater]. Patent RU 2467260 C2, no. 2467260; 2012. (In Russ.)

5. Romanyuk D.A., Tsirkunov Y.M. Unsteady two-phase gas-particle flows in blade cascades. *Fluid Dynamics*. 2020;55(5):609–620. DOI: 10.1134/S0015462820050122

6. Surov V.S. Hyperbolic model of a single speed, heat conductive mixture with interfractional heat transfer. *High temperature*. 2018;56(6):890–899. DOI: 10.1134/S0018151X1806024X

7. Arefev K.Y., Voronetsky A.V. Modelling of the process of fragmentation and vaporization of non-reacting liquid droplets in high-enthalpy gas flows. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015;22(5):585–596. DOI: 10.1134/S0869864315050078

8. Bayanov I.M., Khamidullin I.R., Shagapov V.Sh. The evolution of an aerosol cloud under conditions of diffusion mixing with gas. *High Temperature*. 2007;45(5):688–693. DOI: 10.1134/S0018151X07050173

9. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Particle concentration distribution in a gas-droplet confined swirling flow: Euler and Lagrange approaches. *High Temperature*. 2020;58(6):835–838. DOI: 10.1134/S0018151X20060140

10. Simakov N.N. Calculation of the interphase heat and mass transfer in a nozzle spray cone taking into account the drag crisis and the heat- and mass-transfer crisis. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2022;56(3):339–351. DOI: 10.31857/S0040357122030137

11. Borodkin S.V., Bataronov I.L., Ivanov A.V., Ryazhskikh V.I. Modeling and optimizing heat transfer in cryogenic gasifiers as examplified by gasification plant SGU-7KM-U. *Bulletin of the South Ural State University*. *Ser. Power Engineering*. 2021;21(3):24–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/power210303

12. Donskoy I.G. How water vapor and carbon dioxide additives affect oxygen gasification of pulverized coal fuel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2021;21(1):21–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/power210102

13. Kaiser J.W., Winter J.M., Adami S., Adams N.A. Investigation of interface deformation dynamics during high-Weber number cylindrical droplet breakup. *International Journal of Multiphase Flow*. 2020;132. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103409

14. Menni Y., Chamkha A., Massarotti N., Ameur H., Kaid N., Bensafi M. Hydrodynamic and thermal analysis of water, ethylene glycol and water-ethylene glycol as base fluids dispersed by aluminum oxide nano-sized solid particles. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2020;30(9):4349–4386. DOI: 10.1108/HFF-10-2019-0739

15. Falsetti C., Magnini M., Thome J. Hydrodynamic and thermal analysis of a micro-pin fin evaporator for on-chip two-phase cooling of high density power micro-electronics. *Applied Thermal Engineering*. 2018;130:1425–1439. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.117

16. Bagh A., Yufeng N., Sajjad H., Abdul M., Muhammad S. Unsteady magneto-hydrodynamic transport of rotating Maxwell nanofluid flow on a stretching sheet with Cattaneo–Christov double diffusion and activation energy. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020;20. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100720

17. Watanabe H., Matsuo A., Chinnayya A., Matsuoka K., Kawasaki A., Kasahara J. Numerical analysis of the mean structure of gaseous detonation with dilute water spray. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020;887. DOI: 10.1017/jfm.2019.1018

18. Liu C., Zhao Y., Tian Z., Zhou H. Numerical Simulation of Condensation of Natural Fog Aerosol under Acoustic Wave Action. *Aerosol air and quality research*. 2021;21(4):1–21. DOI: 10.4209/aaqr.2020.06.0361

19. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Numerical study of the influence of the parameters of dispersed particles on the deposition of the solid phase of an electrically charged polydisperse gas suspension. *Izvestiya of Saratov university. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics.* 2022; 22(1):90–102. (In Russ.) DOI: 10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102

20. Tukmakov A.L., Tukmakova N.A. Dynamics of a polydisperse vapor mixture taking into account crushing, coagulation, evaporation of drops, and condensation of vapor. *High Temperature*. 2019;57(3):398–406. DOI: 10.1134/S0018151X19030179

21. Tukmakov D.A. Investigation of the effect of input boundary conditions in numerical simulation of a viscous gas flow in a plane channel. *Informacionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies]. 2022;131(3):20–28 (In Russ.)

22. Samoylovich G.S. *Gidrogazodinamika* [Hydrogasdynamics]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1990. 384 p. (In Russ.)

23. Verzhbitskiy V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 840 p. (In Russ.)

24. Fletcher C.A. *Computation Techniques for Fluid Dynamics*. Berlin: Publishing Springer-Verlang; 1988. 409 p.

25. Steger J.L. Implicit Finite-Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 1978;16(7):679–686.

26. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. [Application of compact difference schemes to the study of unsteady flows of compressible gas]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling]. 1993;5(3):74–83. (In Russ.)

27. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P., Khudyakov V.A. *Termodinamicheskiye i teplofizicheskiye svoystva produktov sgoraniya: sprav. v 5 t. T. 1: Metody rascheta* [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products. Ref. in 5 volumes. Vol. 1: Calculation methods], Moscow: VINITI; 1971. 267 p. (In Russ.)

28. Reid C., Prausnitz J., Sherwood T. *The properties of gases and liquids*. New York: Sherwood; 1977. 710 p.

Информация об авторах

Тукмакова Надежда Алексеевна, канд. техн. наук, доц., кафедра теплотехники и энергетического машиностроения, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия; nadejdatukmakova@yandex.ru.

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, лаборатория механики сплошной среды, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия; tukmakovda@imm.knc.ru.

Information about the authors

Nadezhda A. Tukmakova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia; nadejdatukmakova@yandex.ru.

Dmitry A.Tukmakov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Laboratory of Continuum Mechanics, Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Kazan, Russia; tukmakovda@imm.knc.ru.

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; одобрена после рецензирования 07.11.2022; принята к публикации 07.11.2022.

The article was submitted 12.10.2022; approved after review 07.11.2022; accepted for publication 07.11.2022.