

*Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 106-114.
ISSN 1998-8443 (print)*

*Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023. Issue 2 (142). P. 106-114.
ISSN 1998-8443 (print)*

Научная статья

УДК 544.452

doi: 10.17122/ntj-oil-2023-2-106-114

EDN: BRMHMM

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА С УЧЕТОМ НЕПОЛНОГО ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ

Артур Ильдарович Валиахметов¹, Максим Владимирович Столповский²

^{1,2}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

¹val_art.2003@icloud.com

²s_maxim.pmm@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Максим Владимирович Столповский,
s_maxim.pmm@mail.ru

Аннотация. В рассматриваемой работе представлена математическая модель процесса горения образца газового гидрата с учетом неравновесности процесса его диссоциации. Система основных уравнений строится на основе законов сохранения масс (для всей системы и каждого ее компонента), энергии и импульса, а также дополняется условиями на подвижной границе фазового перехода.

На основе численного решения, основанного на методе крупных частиц, построены поля температуры системы и концентраций компонент газовой смеси. Установлено, что с уменьшением доли воды, превращающейся в пар, происходит увеличение температуры на фронте горения, а также скорости движения фронта горения.

Ключевые слова: газовые гидраты, кластеры, горение, транспортировка и хранение, фазовые переходы, теплопроводность

© Валиахметов А. И., Столповский М. В., 2023

Для цитирования: Валиахметов А. И., Столповский М. В. Исследование процесса горения гидрата метана с учетом неполного испарения воды // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 106-114. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-106-114>.

Original article

INVESTIGATION OF METHANE HYDRATE COMBUSTION PROCESS WITH ACCOUNT FOR INCOMPLETE WATER EVAPORATION

Artur I. Valiakhmetov¹, Maxim V. Stolpovskiy²

^{1,2}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹val_art.2003@icloud.com

²s_maxim.pmm@mail.ru

Corresponding author: **Maxim V. Stolpovskiy**, s_maxim.pmm@mail.ru

Abstract. In this paper, a mathematical model of the combustion process of a gas hydrate sample taking into account the non-equilibrium of its dissociation process is presented. The system of basic equations is built on the laws of conservation of mass (for the entire system and each of its components), energy and momentum, and is supplemented by conditions at the moving boundary of the phase transition.

On the basis of a numerical solution based on the method of large particles, the fields of system temperature and gas mixture components concentrations are constructed. It has been established that with a decrease in the proportion of water turning into steam, there is an increase in temperature at the combustion front, as well as the speed of combustion front movement.

Keywords: main pipeline, regulatory document, technical state assessment, stress-strain state, bending stresses, defect hazard assessment

For citation: Valiakhmetov A. I., Stolpovskiy M. V. Issledovanie protsessa goreniya gidrata metana s uchetom nepolnogo ispareniya vody [Investigation of Methane Hydrate Combustion Process with Account for Incomplete Water Evaporation]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2023, Issue 2 (142), pp. 106-114. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-106-114>.

Газовые гидраты, или клатраты, представляют собой кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях и содержащие в своем составе газ и воду. Изначально практический интерес к изучению газовых гидратов возник в начале XX в. и был связан с их формированием в системах транспортировки нефти и газа. Существует несколько потенциальных последствий гидратообразования различной степени тяжести, которые могут включать: снижение расхода в трубопроводах и их перекрытие; загрязнение оборудования и т.д. При этом газогидраты могут являться источником природного газа. Так, запасы углеводородного сырья (в основном метана) в газогидратном состоянии оцениваются в $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$ [1], что заметно превышает все известные до сих пор известные запасы газа, нефти и угля вместе взятые. Кроме того, рядом исследователей предполагается подземная консервация промышленных и парниковых газов в форме газовых гидратов [2, 3].

В настоящее время актуальной становится проблема, связанная с горением гидратов. Интерес к их сжиганию в основном обусловлен следующими причинами: повышенным термическим коэффициентом полезного действия для применения в энергетике, большей стабильностью гидрата и возможностью сжигания на месте. По мнению некоторых ученых, сжигание гидратов на месте добычи позволит использовать полученное тепло для дальнейшего разложения. Следует также отметить, что горение газогидрата является уникальным с точки зрения большого содержания негорючей жидкости в зоне горения - массовое содержание воды в гидрате составляет 87,1%. Экспериментальные доказательства горения газогидратов представлены в [4, 5]. В работе [5] указано, что тепло от пламени приводит к диссоциации гидрата с образованием метана и воды, и выделившийся метан подается в пламя для продолжения горения. В настоящей работе, в отличие от [6, 7], представлена математическая модель процесса горения образца газового гидрата, учтывающая неравновесность

процесса его диссоциации на основе численного решения температуры системы и концентраций компонент газовой смеси.

Постановка задачи

Пусть слой гидрата ($0 < x < a_0$) толщины a_0 находится в цилиндрическом объеме длины H . При этом остальной участок цилиндрического объема ($a_0 < x < H$) заполнен газовой смесью, включающей в себя кислород. В области толщины h ($a_0 < x < a_0 + h$), непосредственно граничащей с газогидратом, находится смесь воздуха и метана, содержание которого достаточно для воспламенения горючей газовой смеси. Участок ($a_0 + h < x < H$) содержит воздух. Вся газовая смесь в исходном состоянии находится при температуре T_0 и давлении p_0 . Начальное состояние газогидрата соответствует условию его стабильного существования, т.е. $T_{h0} \leq T_S(p_0)$ [8], где $T_S(p_0)$ - равновесная температура фазовых переходов, соответствующая давлению p_0 .

Пусть в момент времени $t = 0$ происходит зажигание и мгновенное сгорание метановоздушной смеси в области ($a_0 < x < a_0 + h$) с образованием диоксида углерода и воды согласно следующей схеме химической реакции:



где Q - теплота реакции.

Далее начинается тепловое взаимодействие горячей газовой смеси с газогидратным слоем. За счет этого происходит разложение гидрата на метан и воду. Будем полагать, что только некоторая часть воды превращается в пар.

Система основных уравнений, описывающих динамику горения газовой смеси, и состоящая из уравнений сохранения масс (для смеси и компонентов), импульса и энергии, имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho C_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_i u) = D \frac{\partial^2(\rho C_i)}{\partial x^2} + n_i \left(\frac{\mu_i}{\mu_1} \right) J,$$

($i = 1, 2, \dots, 5$),

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p T u)}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + L J. \quad (1)$$

Здесь t - время;

x - пространственная координата;

$\rho = \sum_i \rho_i$ и ρ_i - плотность газовой смеси и парциальная плотность ее i -ого компонента соответственно;

$C_i = r_i / r$ - массовая концентрация i -ого компонента газовой смеси;

u - скорость движения смеси;

μ , D и λ - соответственно коэффициенты динамической вязкости, диффузии и теплопроводности;

T - температура;

J - скорость горения;

L - удельная теплота сгорания метана;

n_i - стехиометрические коэффициенты:

$n_1 = -1, n_2 = -2, n_3 = 1, n_4 = 2, n_5 = 0$.

Удельную теплоемкость c_p газовой смеси представим в виде

$$c_p = \sum_i c_{pi} \cdot C_i,$$

где c_{pi} - удельная теплоемкость при постоянном давлении i -ого компонента.

Здесь и далее нижние индексы i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) соответствуют метану, кислороду, углекислому газу, водяному пару, азоту.

Давление смеси в соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона и законом Дальтона представим в виде:

$$p = \sum_i \frac{\rho_i}{\mu_i} RT, \quad (2)$$

где p - давление газовой смеси;

R - универсальная газовая постоянная;

μ_i - молярные массы компонентов смеси.

В данной работе в рамках одномерной постановки задачи для упрощенного анализа теплопередачи в установившемся процессе горения коэффициенты ν и D принимаются постоянными. При этом значение коэффициента теплопроводности λ газовой смеси в каждой ее точке рассчитывается через коэффициент температуропроводности κ , значение которого, как и значения ν и D , принимается постоянным [6, 7]:

$$\lambda = \kappa \cdot \rho c_p.$$

Скорость горения определяется уравнением Аррениуса [9]:

$$J = \frac{\rho \mu_{mix} C_1}{\mu_1} \frac{\rho \mu_{mix} C_2}{\mu_2} k_r \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3)$$

где μ_1 и μ_2 - молярные массы горючего (метана) и окислителя (кислорода);

$\mu_{mix} = \left(\sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\mu_i} \right)^{-1}$ - молярная масса смеси;

k_r - константа реакции;

E_a - энергия активации.

Уравнение теплопроводности в области газогидратного слоя имеет вид:

$$\rho_h c_h \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_h \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где ρ_h - плотность;

c_h - теплоемкость;

λ_h - теплопроводность газового гидрата.

Представленную систему уравнений (1)-(4) необходимо дополнить условиями, следующими из условий баланса масс на подвижной границе фазового перехода $x = x_{(s)}$, разделяющей между собой области, содержащие газогидрат и газовую смесь, и на которой происходит процесс разложения газогидрата.

Условие баланса массы газа примет вид:

$$\rho_{(s)} \left(u_{(s)} - \dot{x}_{(s)} \right) = -\rho_h \dot{x}_{(s)}, \quad (5)$$

где $\dot{x}_{(s)} = dx/dt$ - скорость движения границы фазового перехода $x = x_{(s)}$.

Здесь и далее нижний индекс s , заключенный в скобки, соответствует значениям параметров величин на фронте фазового перехода.

Аналогично, с учетом (5) условия баланса массы для каждого компонента газовой смеси можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \rho_{(s)} D \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= \rho_h (G - C_{1(s)}) \dot{x}_{(s)}, \\ \rho_{(s)} D \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= -\rho_h C_{2(s)} \dot{x}_{(s)}, \\ \rho_{(s)} D \frac{\partial C_3}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= -\rho_h C_{3(s)} \dot{x}_{(s)}, \\ \rho_{(s)} D \frac{\partial C_4}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= \rho_h \left((1-G) - C_{4(s)} \right) \dot{x}_{(s)}, \quad (6) \\ \rho_{(s)} D \frac{\partial C_5}{\partial x} \Big|_{x=x_{(s)}} &= -\rho_h C_{5(s)} \dot{x}_{(s)}. \end{aligned}$$

Здесь G - массовая доля газа (метана) в гидрате.

Уравнение баланса тепла на границе $x = x_{(s)}$ с учетом излучения представим в виде:

$$\begin{aligned} -\lambda_h \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=x_{(s)}}^- + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=x_{(s)}}^+ &= \\ &= \left(\rho_h L_h + (1-G) \rho_w L_w \right) \dot{x}_{(s)} + \sigma \epsilon_{ef} \left(T_{g(m)}^4 - T_{(s)}^4 \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где ρ_w - плотность воды;

L_h - теплота разложения газового гидрата;

L_w - удельная теплота испарения;

σ - постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

ϵ_{ef} - коэффициент излучения, $\epsilon_{ef} = 0,4$;

$T_{g(m)}$ - максимальная температура газа;

$T_{(s)}$ - температура поверхности гидрата;

знак «-» соответствует границе $x_{(s)}$ со стороны гидрата, знак «+» - границе со стороны газа.

В отличие от традиционных задач Стефана, будем полагать, что температура $T_{(s)}$ на фронтальной границе фазовых переходов является неизвестным переменным параметром.

По аналогии с известной теорией Герца-Кнудсена при неравновесном испарении жидкостей для интенсивности разложения, отнесенной на единицу площади фронта фазовых переходов, можем записать:

$$j = -\rho_h \dot{x}_{(s)} = -k_h \left(T_{(s)} - T_e(p) \right). \quad (8)$$

Здесь $T_e(p)$ - равновесная температура фазовых переходов, соответствующая давлению p и определяемая из выражения:

$$T_e(p) = T_{e0} + T_{h*} \ln \left(\frac{p}{p_{e0}} \right).$$

При этом T_{e0} - равновесная температура гидрата, соответствующая давлению p_{e0} ;

T_{h*} - эмпирический параметр.

Зависимость коэффициента пропорциональности k_h от температуры примем согласно закону Аррениуса:

$$k_h = k_{h0} \exp\left(-\frac{E_h}{RT_e}\right). \quad (9)$$

Приведенную теплоту разложения \dot{L}_h примем с учетом перегретости гидрата на фронте разложения по отношению к равновесной температуре фазовых переходов для значения давления p :

$$\dot{L}_h = L_h - c_h (T_{(s)} - T_e(p)), \quad (10)$$

где L_h – удельная теплота разложения, соответствующая равновесному режиму при значении давления p .

Парциальное давление водяного пара $p_{4(s)}$ на границе $x = x_{(s)}$ определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса:

$$p_{4(s)} = p_* \exp\left(-\frac{T_*}{T_{(s)}}\right). \quad (11)$$

Здесь p_* , T_* – эмпирические параметры.

Условия на внешних границах цилиндрического объема ($x = 0$ и $x = h$) представим в виде:

$$\begin{aligned} t > 0: \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} = 0, \\ \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=h} &= 0, \quad \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=h} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} t = 0: T &= T_{h0} \quad (0 \leq x \leq a_0); \\ p &= p_0, \quad T = T_0, \\ C_i &= C_{i0} \quad (a_0 < x \leq h). \end{aligned} \quad (13)$$

В (12) и (13) $i = 1, 2, \dots, 5$.

Система уравнений (1)-(11) с начальными граничными условиями (12) и (13) является замкнутой. Для ее решения используется метод крупных частиц.

Для параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0,016 \text{ кг/моль}, \\ \mu_2 &= 0,032 \text{ кг/моль}, \\ \mu_3 &= 0,044 \text{ кг/моль}, \\ \mu_4 &= 0,018 \text{ кг/моль}, \\ \mu_5 &= 0,028 \text{ кг/моль}, \\ c_{p1} &= 2483 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_{p2} &= 913 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_{p3} &= 837 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_{p4} &= 2020 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ c_{p5} &= 1051 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ \lambda_h &= 0,45 \text{ Вт/(м·К)}, \\ \lambda &= 1,0 \text{ Вт/(м·К)}, \\ L &= 5 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}, \\ L_h &= 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}, \\ L_w &= 2,38 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \\ E_a &= 1,7 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}, \\ k_r &= 2 \cdot 10^5 \text{ м}^3/(\text{кг·с}), \\ E_h &= 3 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}, \\ k_h &= 1,2 \cdot 10^4 \text{ кг/(м}^2\text{·с·К)}, \\ R &= 8,31 \text{ Дж/(моль·К)}, \\ G &= 0,12, \\ T_{h0} &= 300 \text{ К}, \\ T_{h*} &= 10 \text{ К}, \\ p_{s0} &= 5,5 \text{ МПа}, \\ T_0 &= 300 \text{ К}, \\ p_0 &= 5 \text{ МПа}, \\ h &= 0,02 \text{ м}, \\ a_0 &= 0,2 \text{ м}, \\ H &= 1,2 \text{ м}. \end{aligned}$$

Для коэффициентов переноса приняты значения $\kappa = \nu = D = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ [6].

На рисунке 1 для момента времени $t = 5 \text{ с}$ представлена зависимость температуры газа от координаты. Максимальное значе-

ние температуры соответствует фронту горения.

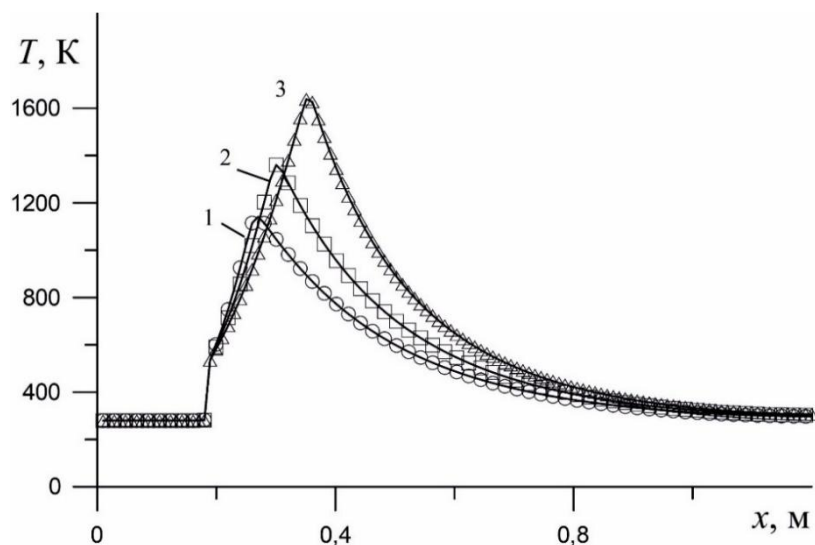
Движение фронта горения происходит по закону, определяемому параболической кривой, что свидетельствует об ускоренном движении.

Из рисунка 1 видно, что с уменьшением доли воды, превращающейся в пар, происходит увеличение температуры на фронте горения. Так, для случаев 100 %-ого, 75 %-ого, 50 %-ого превращения в пар диссоциированной воды температура газа на фронте имеет значения ≈ 1100 К, ≈ 1400 К, ≈ 1600 К соответственно. Кроме этого, следует, что с уменьшением доли воды, превращенной в пар, происходит увеличение скорости движения фронта горения. Так, при 100 %-ном переходе воды в пар координата фронта пламени находится на 0,3 м, а при 50 %-ном - ко-

ордината фронта пламени расположена на 0,4 м.

На рисунке 2 представлены концентрации компонентов газа при горении гидрата в момент времени 5 с для случая полного (100 %-ого) перехода всей воды, выделившейся при диссоциации, в пар. Фронт горения в этот момент находится в точке с координатой $x \approx 0,25$ м. Из рисунка 2 видно, что основную долю смеси составляет азот (кривая C_5). Следующими по порядку убывания концентрации идут продукты горения - водяной пар (кривая C_4) и углекислый газ (кривая C_3).

Максимум концентрации водяного пара соответствует границе гидрата, так как основной причиной появления пара является испарение воды, выделившейся при разложении газогидрата.

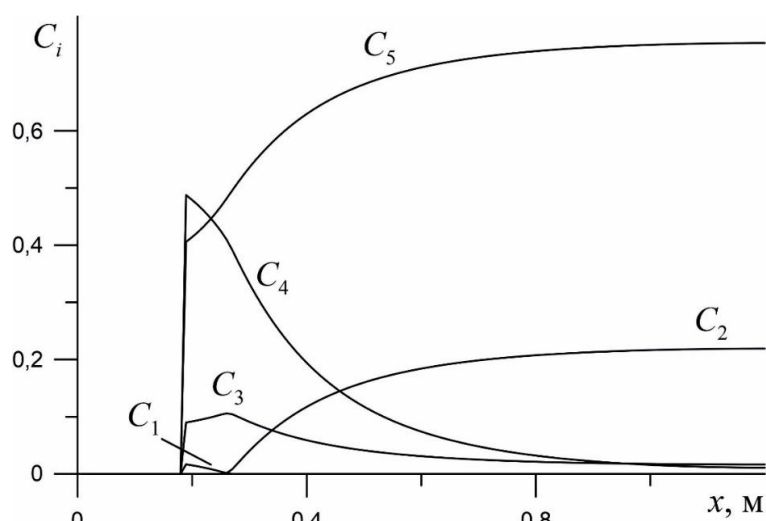


линии 1, 2, 3 соответствуют 100 %-ому, 75 %-ому, 50 %-ому превращению в пар выделившейся воды при диссоциации гидрата

lines 1, 2, 3 correspond to 100 %, 75 %, 50 % conversion of released water turning into steam during hydrate dissociation

Рисунок 1. Распределение температуры газа по координате x

Figure 1. Gas temperature distribution along the x coordinate



C_1 - метан; C_2 - кислород; C_3 - углекислый газ; C_4 - водяной пар; C_5 - азот

C_1 - methane; C_2 - oxygen; C_3 - carbon dioxide; C_4 - water vapor; C_5 - nitrogen

Рисунок 2. Распределение концентрации компонент по координате x

Figure 2. Component concentration distribution along the x coordinate

Максимум концентрации углекислого газа соответствует фронту горения. На фронте горения концентрации метана (кривая C_1) и кислорода (кривая C_2) принимают нулевое значение. Максимум концентрации метана находится на границе газогидрата, где происходит его выделение.

Таким образом, наблюдается диффузионный режим горения, в котором доставка горючего и окислителя в зону реакции реализуется в результате диффузии газов с противоположных сторон.

Вывод

В работе представлена математическая модель процесса горения образца газового гидрата с учетом неравновесности процесса его диссоциации. На основе численного решения исследованы основные параметры газовой смеси. В частности, показано, что при уменьшении доли воды, превращающейся в пар, происходит увеличение температуры на фронте горения, а также скорости движения фронта горения.

Список источников

1. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. история изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5-21. EDN: MSYDRP.
2. Anshits A., Kirik N., Shibistov B. Possibilities of SO₂ Storage in Geological Strata of Permafrost Terrain // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. 2006. Vol. 65. P. 93-102. DOI: 10.1007/1-4020-4471-2_09.
3. Espinoza D.N., Santamarina J.C. P-wave

References

1. Makogon Yu.F. Gazogidraty. istoriya izucheniya i perspektivy osvoeniya [Gas Hydrates. History of Study and Development Prospects]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana - Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 2010, No. 2, pp. 5-21. EDN: MSYDRP. [in Russian].
2. Anshits A., Kirik N., Shibistov B. Possibilities of SO₂ Storage in Geological Strata of Permafrost Terrain. *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, 2006, Vol. 65, pp. 93-102. DOI: 10.1007/1-

Monitoring of Hydrate-Bearing Sand during CH₄-CO₂ Replacement // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2011. Vol. 5. P. 1031-1038. DOI: 10.1016/J.IJGGC.2011.02.006.

4. Roshandell M., Glassman J., Khalil M., Taborek P., Dunn-Rankin D. Burning Ice-Direct Combustion of Fuel Clathrates // *Proceedings of the 7th US National Combustion Meeting*. Atlanta, USA. 2011.

5. Kaneko H., Okui T., Kagami H. The Combustion of Methane Hydrate // *Proceedings of the 35th Symposium (Japanese) on Combustion*. 1997. P. 462-464.

6. Гималтдинов И.К., Баянов И.М., Столповский М.В., Чиглинтцева А.С. О горении гидрата в замкнутом объеме // *Инженерно-физический журнал*. 2022. Т. 95, № 3. С. 605-613.

7. Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K., Bayanov I.M., Stolpovsky M.V. Modeling of the Combustion Process of Methane Hydrate Taking into Account the Kinetics of the Decomposition Process // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2094. Article No. 022053. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022053.

8. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. Т. 1. 235 с. EDN: YSOMOR.

9. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Legros J.C. Ignition and Combustion of Turbulized Dust-air Mixtures // *Combustion and Flame*. 2000. Vol. 123 (1-2). P. 46-67. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00147-4. EDN: LFXDCF.

4020-4471-2_09.

3. Espinoza D.N., Santamarina J.C. P-wave Monitoring of Hydrate-Bearing Sand during CH₄-CO₂ Replacement. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, Vol. 5, pp. 1031-1038. DOI: 10.1016/J.IJGGC.2011.02.006.

4. Roshandell M., Glassman J., Khalil M., Taborek P., Dunn-Rankin D. Burning Ice-Direct Combustion of Fuel Clathrates. *Proceedings of the 7th US National Combustion Meeting*. Atlanta, USA. 2011.

5. Kaneko H., Okui T., Kagami H. The Combustion of Methane Hydrate. *Proceedings of the 35th Symposium (Japanese) on Combustion*. 1997, pp. 462-464.

6. Gimaltdinov I.K., Bayanov I.M., Stolpovskii M.V., Chiglintseva A.S. О горении гидрата в замкнутом объеме [On the Combustion of Hydrate in a Closed Volume]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2022, Vol. 95, No. 3, pp. 605-613. [in Russian].

7. Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K., Bayanov I.M., Stolpovsky M.V. Modeling of the Combustion Process of Methane Hydrate Taking into Account the Kinetics of the Decomposition Process. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2094, Article No. 022053. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022053.

8. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Natural Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. Vol. 1. 235 p. EDN: YSOMOR. [in Russian].

9. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Legros J.C. Ignition and Combustion of Turbulized Dust-air Mixtures. *Combustion and Flame*, 2000, Vol. 123 (1-2), pp. 46-67. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00147-4. EDN: LFXDCF.

Информация об авторе

• Валиахметов Артур Ильдарович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Студент кафедры «Сооружение и ремонт
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: val_art.2003@icloud.com

• Столповский Максим Владимирович,
кандидат физико-математических наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

Information about the author

• Valiakhmetov Artur I.
Ufa State Petroleum Technological University
Student of Construction and Repair of Gas
and Oil Pipelines and Storage Facilities Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: val_art.2003@icloud.com

• Stolpovskiy Maxim V., Candidate of Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.02.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 15.03.2023.

The article was submitted 14.02.2023; approved after reviewing 28.02.2023; accepted for publication 15.03.2023.