Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134). С. 42-51. ISSN 1998-8443 (print)
Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 6 (134). P. 42-51. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 669.162.263.222:519.63

doi: 10.17122/ntj-oil-2021-6-42-51

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МОНОЛИТА ГИДРАТА СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Миляуша Рафаэлевна Давлетшина¹, Ангелина Сергеевна Чиглинцева²

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

¹davletshina@yandex.ru

²changelina@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Ангелина Сергеевна Чиглинцева,
changelina@rambler.ru

Аннотация. В работе представлена математическая модель разрушения монолита гидрата сферической формы. Предполагается, что внутри частицы гидрата имеется полость сферической формы, изначально содержащая лишь метан. Поскольку условия на поверхности частицы соответствуют условиям свободного существования газа и воды, то газогидрат начинает разлагаться.

На основе системы, состоящей из уравнений сохранения массы и тепла, получены распределения температуры в системе «полость - газогидрат», а также проанализировано влияние исходной температуры системы и температуры в полости на динамику разложения гидрата.

Ключевые слова: фазовый переход, монолит гидрата, термобарические условия

Благодарности: Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (Конкурс МД-2020) № МД-2179.2020.1.

© Давлетшина М. Р., Чиглинцева А. С., 2021

Для цитирования: Давлетшина М. Р., Чиглинцева А. С. Численное исследование разрушения монолита гидрата сферической формы // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134), С. 42-51. <http://doi/10.17122/ntj-oil-2021-6-42-51>.

Original article

NUMERICAL STUDY OF THE FAILURE OF A SPHERICAL HYDRATE MONOLITH

Milyausha R. Davletshina¹, Angelina S. Chiglintseva²

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

¹davletshina@yandex.ru

²changelina@rambler.ru

Corresponding author: Angelina S. Chiglintseva, changelina@rambler.ru

Abstract. The paper presents a mathematical model of the destruction of a spherical hydrate monolith. It is assumed that there is a spherical cavity inside the hydrate particle, initially containing only methane. Since the conditions on the surface of the particle correspond to the conditions of the free existence of gas and water, the gas hydrate begins to decompose.

On the basis of the obtained system consisting of the mass and heat conservation equations, the temperature distributions in the «cavity - gas hydrate» system are obtained, and the influence of the initial temperature of the system and the temperature in the cavity on the dynamics of hydrate decomposition is analyzed.

Keywords: phase transition, methane hydrate, thermobaric conditions

Acknowledgments: The research was funded by a grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - doctors of sciences (Competition - MD-2020), according to the research project No. MD-2179.2020.1.

For citation: Davletshina M. R., Chiglintseva A. S. Chislennoye issledovaniye razrusheniya monolita gidrata sfericheskoy formy [Numerical Study of the Destruction of a Spherical Hydrate Monolith]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2021, Issue 6 (134), pp. 42-51. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-42-51>.

Введение

В настоящее время известно огромное число источников выхода газа (метана) с поверхности морского дна [1, 2]. Аналогичные проявления выхода газа в виде пузырьков также наблюдались и на озере Байкал [3, 4]. Следует отметить, что всплытие таких метановых пузырей сопровождалось появлением газогидратной оболочки, что обусловлено низкими температурами окружающей воды и высоким гидростатическим давлением. Из визуального наблюдения кусков монолита природного газогидрата (доставленного со дна Байкала например) при подъеме в воде видно их разложение (растрескивание) на более мелкие кусочки [3, 4].

Представляется, что такая картина разрушения гидратов аналогична процессу объемного вскипания перегретой воды. Как известно, согласно основным концепциям вскипания метастабильной жидкости происходит благодаря наличию в ней различных частиц (микропузырьков газа, например), служащих зародышами парообразования. Аналогично можно предположить, что природные монолиты газогидрата метана также содержат множество газовых включений в виде мелких сферических или цилиндрических пузырьков, а также в виде замкнутых трещин. При снижении давления в жидкой или газовой средах, окружающих монолит газогидрата, ниже значения равновесного давления, соответствующей его исходной температуре, основная масса газогидрата переходит в метастабильное состояние, поскольку в процессе подъема гидратного монолита в воде при определенной глубине начнется разрушение (раздробление) монолита. Причем в

одних случаях разрушение происходит в более медленном темпе, а именно на начальном этапе монолит распадается на более крупные куски, которые в последующем распадаются на мелкие. В других же случаях гидрат в течение достаточно небольшого промежутка времени (порядка десяти секунд) распадается на мелкие частицы. Такой различный характер, по-видимому, определяется объемной концентрацией газовых включений, а также наличием различных примесей.

Теоретические исследования образования и разложения газогидратных частиц при их всплытии в воде рассмотрены, в частности, в работах [5, 6]. Исследование режимов замещения диоксидом углерода метана в его газогидрате представлено, в частности, в [7-10].

В данной работе представлена модель разрушения газогидратной частицы в воде, когда включение имеет сферическую форму. На основе полученной системы, состоящей из уравнений сохранения массы и тепла, получены распределения температуры в системе полость - газогидрат, а также проанализировано влияние исходной температуры системы и температуры в полости на динамику разложения гидрата.

Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим неподвижную частицу гидрата, находящуюся в воде и имеющую внутри полость сферической формы. Начало координат свяжем с центром частицы. Исходные радиусы полости и гидратной частицы примем соответственно равными a_0 и a_h . Также примем, что исходная температура T_0 системы полость - гидрат и соответствующее этому

значению давление находятся в области, удовлетворяют условиям свободного существования смеси метана и его газогидрата. При уменьшении внешнего давления, обусловленного, например, подъемом частицы, термодинамические параметры соответствуют условиям стабильного существования газа (метана) и воды, т.е. частица находится выше верхней границы зоны устойчивого существования гидрата.

В этом случае происходит разложение газогидратной частицы. При этом продукты разложения гидрата (метан и вода) находятся в сферической полости, а гидратная оболочка находится в контакте с окружающей водой, температура которой равна T_0 .

Уравнение теплопроводности в области гидрата ($a < r < a_h$) в сферическом случае имеет вид:

$$\rho_h c_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_h}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где r - радиальная координата;

t - время;

T - температура;

ρ_i , c_i , λ_i - соответственно плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности i -ой фазы;

a - текущий радиус полости;

нижние индексы $i = h, g, l$ относятся соответственно к параметрам гидрата, газа и воды.

Будем полагать, что температура в сферической полости прослеживает за равновесной температурой T_s диссоциации газогидрата, зависящей от текущего давления. В соответствие с этим можно записать:

$$t > 0, 0 \leq r \leq a: T = T_s(p). \quad (2)$$

Температура на поверхности гидратной частицы равна исходной температуре T_0 :

$$t > 0, r = a_h: T = T_0. \quad (3)$$

Следует отметить, что при небольших перепадах давления равновесная температура довольно хорошо аппроксимируется зависимостью вида

$$T_s(p) = T_{h0} + T_* \ln(p/p_{h0}),$$

где T_* - эмпирический параметр, который зависит от вида газогидрата и от рассматриваемых диапазонов температур и давлений;

T_{h0} - равновесная температура соответствующая давлению p_{h0} [11, 12].

В данной работе рассматривается только тепловая задача, т.е. случай, когда газогидратная частица неподвижна в жидкости. Это означает, что величина давления p постоянна, т.е. температура полости, как следует из (2), не изменяется.

Условие баланса тепла на подвижной поверхности фазового перехода ($r = a$) с учетом (2) имеет вид:

$$\rho_h l_h \dot{a} = \lambda_h \left(\frac{\partial T_h}{\partial r} \right)_{r=a}. \quad (4)$$

Здесь l_h - удельная теплота разложения гидрата;

$\dot{a} = \frac{da}{dt}$ - скорость движения фронта фазового перехода.

Уравнение сохранения массы продуктов m разложения гидрата (газа и воды) имеет вид:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi \rho_h a^2 \dot{a}. \quad (5)$$

С другой стороны, масса газа и воды в полости может быть определена через среднюю плотность ρ газожидкостной смеси:

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho. \quad (6)$$

Среднюю плотность газожидкостной смеси, которую можно записать как [13]

$$\rho = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha),$$

где ρ_i ($i = g, l$) - истинные плотности газа и воды;

α - объемная концентрация газа;

нижние индексы $i = g, l$ соответствует газу и воде.

Если в исходном состоянии ($t \leq 0$) внутри полости находится только один газ, то α будет переменной величиной.

Поэтому для получения замкнутой системы уравнений добавим уравнение для изменения массы воды в полости, которое в сферическом случае имеет вид:

$$\frac{dm_l}{dt} = 4\pi\rho_h(1-G)a^2\dot{a}. \quad (7)$$

Здесь G - массовое содержание газа в составе гидрата.

С другой стороны, для массы воды, содержащейся в полости, можно записать:

$$m_l = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_l (1 - \alpha). \quad (8)$$

Газ будем считать калорически совершенным с уравнением состояния:

$$p = \rho_g R_g T,$$

где R_g - приведенная газовая постоянная.

Гидрат и вода являются несжимаемыми.

В качестве начальных условий ($t \leq 0$) примем

$$a = a_0, \quad p = p_0, \quad \alpha = 1, \quad T = T_0 \quad (0 \leq r \leq a_h). \quad (9)$$

Решение представленной системы уравнений осуществлялось конечно-разностным методом с использованием алгоритма ловли фронта в узел пространственной сетки, рассмотренного в [14-17].

Результаты численного эксперимента

На рисунке 1 для момента времени $t = 5$ мин представлено распределение системы полость - гидрат для исходной температуры частицы $T_0 = 274$ К.

Для остальных параметров, характеризующих систему приняты следующие значения [17]:

$$c_h = 2100 \text{ Дж/(кг·К)},$$

$$\lambda_h = 2.45 \text{ Вт/(м·К)},$$

$$l_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг},$$

$$\rho_h = 900 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

$$R_g = 520 \text{ Дж/(кг·К)},$$

$$G = 0.12.$$

Температура полости полагалась равной $T_s = 279$ К, что соответствует равновесной температуре разложения гидрата при давлении $p = 5$ МПа.

Исходные радиусы частицы и полости полагались равными соответственно $a_h = 10$ мм и $a_0 = 1$ мм.

Как следует из рисунка 1, в области газогидрата температура убывает от максимального значения на краю полости до минимального, соответствующего поверхности газогидратной частицы. При этом, как следует из постановки задачи, температура в области, содержащей газ и воду, постоянна.

На рисунке 2 представлены зависимости объемной концентрации газа и радиуса полости от времени при различных значениях исходной температуры. Как следует из рисунка 2, с ростом исходной температуры интенсивность образования полости уменьшается.

Рисунок 1. Распределение температуры системы полость - гидрат

Figure 1. Temperature distribution of the cavity - hydrate system

Это обусловлено тем, что интенсивность разложения гидрата, лимитируемая подводом тепла к границе полость - газогидрат, с ростом температуры T_0 уменьшается. Поэтому вследствие интенсивного разложения гидрата при более низких значениях T_0 объемная концентрация газа в полости уменьшается быстрее.

На рисунке 3 представлены зависимости объемной концентрации газа и радиуса полости от времени при различных значениях температуры полости при $T_0 = 274$ K. На рисунке 3, а температура полости полагалась равной $T_s = 276.3$ K (соответствует давлению 3.8 МПа); на рисунке 3, б - $T_s = 276.8$ K (соответствует давлению 4 МПа). Как следует из рисунка 3, с уменьшением температуры полости (что соответствует уменьшению давления) интенсивность разложения гидрата также уменьшается. Это объясняется тем, что с уменьшением температуры полости уменьшается и поток тепла, направленный на разложение гидрата. Как следствие, при более высоких значениях T_s объемная концентрация газа в полости уменьшается быстрее.

Рисунок 2. Зависимость объемной концентрации газа (а) и радиуса полости (б) от времени при $T_0 = 274$ K (1) и 276 K (2)

Figure 2. Dependence of volumetric gas concentration (a) and cavity radius (b) on time at $T_0 = 274$ K (1) and 276 K (2)

Рисунок 3. Зависимость объемной концентрации газа (а) и радиуса полости (б) от времени при $T_s = 276.3$ К (1) и 276.8 К (2)

Figure 3. Dependence of volumetric gas concentration (a) and cavity radius (b) on time at $T_s = 276.3$ K (1) and 276.8 K (2)

Выводы

Представлена математическая модель разрушения газогидратной частицы в воде, когда включение имеет сферическую форму. На основе полученной системы, состоящей из уравнения сохранения массы и тепла, получены распределения температуры в системе полость - газогидрат, а также проанализировано влияние исходной температуры системы

и температуры в полости на динамику разложения гидрата.

Установлено, что с ростом исходной температуры интенсивность образования полости уменьшается.

Показано, что при более высоких значениях температуры в полости объемная концентрация газа в ней уменьшается быстрее.

Список источников

1. Черткова Л.В., Стунжас П.А. Геохимия газов Парамуширского подводного источника. Курильская островная дуга // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 35-50.
2. Егоров А.В., Нигматулин Р.И., Римский-Корсаков Н.А., Рожков А.Н., Сагалевич А.М., Черняев Е.С. Разрушение глубоководных метановых пузырей // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 505-514.

References

1. Chertkova L.V., Stunzhas P.A. Geokhimiya gazov Paramushirskogo podvodnogo istochnika. Kuril'skaya ostrovnaya duga [Geochemistry of Gases from the Paramushirskiy Underwater Source. Kuril Island Arc]. *Vulkanologiya i seismologiya - Vulkanologiya i Seismologiya*, 1990, No. 3, pp. 35-50. [in Russian].
2. Egorov A.V., Nigmatulin R.I., Rimskii-

3. Егоров А.В., Нигматулин Р.И., Рожков А.Н. Переход глубокоководных метановых пузырей в твердые гидратные формы. М.: ИП Мех РАН, 2013. 34 с.
4. Егоров А.В., Рожков А.Н. Разрушение подводных залежей газовых гидратов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 93-103.
5. Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И. Моделирование динамики образования и разложения газогидратных частиц при их всплытии в воде // Вестник Самарского государственного университета. Естественная серия. 2013. № 9-2 (110). С. 133-139.
6. Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И., Нурисламов О.Р. К теории образования и разложения газогидратных частиц в процессе их всплытия в воде // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 6 (26). С. 106-113.
7. Столповский М.В., Хасанов М.К., Кулаков П.А. Исследование процесса закачки диоксида углерода в метаногидратные пласты с учетом реальных свойств газов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 2. С. 101-112.
8. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Додова М.И. Численное решение задачи об образовании гидрата двуоксида углерода в пористом пласте, изначально насыщенном гидратом метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 91-98.
9. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Хасанов М.К. Вытеснение метана из газогидрата в пористой среде при закачке углекислого газа // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 3 (347). С. 3-12. DOI: 10.15372/PMTF20180101.
10. Хасанов М.К., Столповский М.В., Гималтдинов И.К. Моделирование образования газогидрата при инъекции углекислого газа в природный пласт // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 3 (349). С. 94-102. DOI: 10.15372/PMTF20180310.
11. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русinov А.А., Тазетдинов Б.И. О миграции одиночного газового пузырька в воде // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 3. С. 440-446. DOI: 10.7868/S004036441702017X.
12. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Белова С.В. К теории процесса образования газогидрата в замкнутом теплоизолированном объеме, опрессованном метаном // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1208-1222.
13. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред: В 2 Ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
14. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S. Technologies for Methane Production from Hydrogen Using a Heated Liquid // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Korsakov N.A., Rozhkov A.N., Sagalevich A.M., Chernyaev E.S. Razrushenie glubokovodnykh metanovykh puzyrei [Breakup of Deep-Water Methane Bubbles]. *Okeanologiya - Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 4, pp. 505-514. [in Russian].
3. Egorov A.V., Nigmatulin R.I., Rozhkov A.N. *Perekhod glubokovodnykh metanovykh puzyrei v tverdye gidratnye formy* [Transition of Deep-Sea Methane Bubbles into Solid Hydrated Forms]. Moscow, IP Mekh RAN Publ., 2013. 34 p. [in Russian].
4. Egorov A.V., Rozhkov A.N. Razrushenie podvodnykh zalezhei gazovykh gidratov [Breakdown of Under-Water Gas Hydrate Deposits]. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza - Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 2014, No. 5, pp. 93-103. [in Russian].
5. Shagapov V.Sh., Tazetdinov B.I. Modelirovanie dinamiki obrazovaniya i razlozheniya gazogidratnykh chastits pri ikh vsplytii v vode [Modeling of Dynamics of Formation and Decomposition of Gas Hydrate Particles During Their Surfacing in Water]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya - Bulletin of Samara State University. Natural Science Series*, 2013, No. 9-2 (110), pp. 133-139. [in Russian].
6. Shagapov V.Sh., Tazetdinov B.I., Nurislamov O.R. K teorii obrazovaniya i razlozheniya gazogidratnykh chastits v protsesse ikh vsplytiya v vode [A Contribution to the Theory of Gas Hydrate Particle Formation and Decomposition in the Process of Their Ascent in Water]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika - Tomsk State University Journal Of Mathematics And Mechanics*, 2013, No. 6 (26), pp. 106-113. [in Russian].
7. Stolpovskii M.V., Khasanov M.K., Kulakov P.A. Issledovanie protsessa zakachki dioksida ugleroda v metanogidratnye plasty s uchetom real'nykh svoystv gazov [The Study of the Injection Process of Carbon Dioxide in Methanehydrate Layers Taking into Account the Real Properties of Gases]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle - Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*, 2018, No. 2, pp. 101-112. [in Russian].
8. Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V., Dodova M.I. Chislennoe reshenie zadachi ob obrazovanii gidrata dvoukisi ugleroda v poristom plaste, iznachal'no nasyshchennom gidratom metana [Numerical Solution of the Problem of the Formation of Carbon Dioxide Hydrate in a Porous Reservoir, Initially Saturated with Methane Hydrate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, Vol. 328, No. 6, pp. 91-98. [in Russian].
9. Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V., Khasanov M.K. Vytesnenie metana iz gazogidrata v poristoi srede pri zakachke uglekislogo gaza [Recovery of Methane from Gas Hydrates in a Porous Medium by Injection of Carbon Dioxide]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika - Prikladnaya*

ing. 2020. Vol. 919. Article Number 062070. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062070.

15. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K. Features of Decomposition of Gas Hydrate When Exposed to Microwave Radiation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 919. Article Number 062071. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062071.

16. Гималтдинов И.К., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К., Столповский М.В. Особенности процесса разложения газовых гидратов при тепловом и депрессионном воздействиях в пласте конечной протяженности // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2011. № 7. С. 6-13.

17. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K. Investigation of the Influence of Medium and Microwave Radiation Parameters on the Dynamics of Decomposition of Gas Hydrate // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 919. Article Number 062069. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062069.

Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika, 2018, Vol. 59, No. 1 (347), pp. 3-12. DOI: 10.15372/PMTF20180101. [in Russian].

10. Khasanov M.K., Stolpovskii M.V., Gimaltdinov I.K. Modelirovanie obrazovaniya gazogidrata pri inzhetsii uglekislogo gaza v prirodnyi plast [Modeling of Gas Hydrate Formation Upon Injection of Carbon Dioxide Gas into a Natural Reservoir]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika - Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*, 2018, Vol. 59, No. 3 (349), pp. 94-102. DOI: 10.15372/PMTF20180310. [in Russian].

11. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. O migratsii odnochnogo gazovogo puzyr'ka v vode [On the Migration of a Single Gas Bubble in Water]. *Teplofizika vysokikh temperatur - Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 2017, Vol. 55, No. 3, pp. 440-446. DOI: 10.7868/S004036441702017X. [in Russian].

12. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Belova S.V. K teorii protsessa obrazovaniya gazogidrata v zamknutom teploizolirovannom ob'eme, opressovannom metanom [On the Theory of Formation of a Gas Hydrate in a Heat-Insulated Space Compacted with Methane]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2017, Vol. 90, No. 5, pp. 1208-1222. [in Russian].

13. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred: V 2 Ch.* [Dynamics of Multiphase Media: In 2 Parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Part 1. 464 p. [in Russian].

14. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S. Technologies for Methane Production from Hydrogen Using a Heated Liquid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919, Article Number 062070. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062070.

15. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K. Features of Decomposition of Gas Hydrate When Exposed to Microwave Radiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919, Article Number 062071. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062071.

16. Gimaltdinov I.K., Musakaev N.G., Khasanov M.K., Stolpovskii M.V. Osobennosti protsessa razlozheniya gazovykh gidratov pri teplovom i depressionnom vozdetsviyakh v plaste konechnoi protyazhennosti [Process Specifics of Dissociation of Gas Hydrates at Thermal and Pressure Influences In Reservoir of Final Extent]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika - Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2011, No. 7, pp. 6-13. [in Russian].

17. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K. Investigation of the Influence of Medium and Microwave Radiation Parameters on the Dynamics of Decomposition of Gas Hydrate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919, Article Number 062069. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062069.

Информация об авторах

• Давлетшина Миләүшә Рафаэлевна, канд. с.-х. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: davletshina@yandex.ru

• Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: changelina@rambler.ru

Information about the authors

• Davletshina Milyausha R., Candidate
of Agricultural Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: davletshina@yandex.ru

• Chiglintseva Angelina S., Doctor of Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: changelina@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 28.08.2021; одобрена после рецензирования 20.09.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 28.08.2021; approved after reviewing 20.09.2021; accepted for publication 01.11.2021.