Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 92–98. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 92–98. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 669.162.263.222

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-92-98

ОСЕССИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА О РАЗРУШЕНИИ МОНОЛИТА ГИДРАТА

Ангелина Сергеевна Чиглинцева¹, Миляуша Рафаэлевна Давлетшина¹,
Максим Владимирович Столповский¹, Екатерина Юрьевна Кочанова¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Екатерина Юрьевна Кочанова, moto8728@mail.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 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.

Ключевые слова

газовые гидраты, фазовый переход, монолит гидрата, термобарические условия

Благодарность

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

Для цитирования

Чиглинцева А.С., Давлетшина М.Р., Столповский М.В., Кочанова Е.Ю. Осесимметричная задача о разрушении монолита гидрата // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 92–98. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-92-98>.

Original article

AXISYMMETRIC PROBLEM OF FRACTURE OF A HYDRATE MONOLITH

Angelina S. Chiglintseva¹, Milyausha R. Davletshina¹,
Maxim V. Stolpovsky¹, Ekaterina Yu. Kochanova¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Corresponding author

Ekaterina Yu. Kochanova, moto8728@mail.ru

Abstract. The paper presents a mathematical model of fracture 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 free existence of gas and water, the gas hydrate begins to decompose. On the basis of the obtained system, consisting of the equations of conservation of mass and heat, the temperature distributions in the «cavity — gas hydrate» system were obtained, and the influence of the initial temperature of the system and the temperature in the cavity on the dynamics of hydrate decomposition was analyzed.

For citation

Chiglintseva A.S., Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Kochanova E.Yu. Osesimmetrichnaya zadacha o razrushenii monolita gidrata [Axisymmetric Problem of Fracture of a Hydrate Monolith]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 92-98. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-92-98>.

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 вскипание 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 среде окружающей 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 разруше-

Keywords

gas hydrates, phase transition, hydrate monolith, 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.

ние (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 10 с) распадается на мелкие частицы. Такой различный характер, по-видимому, определяется объемной концентрацией газовых включений, а также наличием различных примесей.

Теоретическое исследование образования и разложения газогидратных частиц при их всплытии в воде, рассмотрено, в частности, в работах [5, 6]. 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.

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, удов-

летворяют 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:

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

Здесь 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.

Здесь и далее 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 соответствии 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} [7, 8].

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 m продуктов разложения гидрата (газа и воды) отнесенной на единицу длины имеет вид:

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

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

$$m = \pi a^2 \rho. \quad (6)$$

Среднюю плотность газожидкостной смеси, которую можно записать как [9]:

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

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

α — объемная концентрация газа.

Здесь и далее нижний индекс $i = g, l$ 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:

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

Здесь G массовое содержание газа в составе гидрата. С другой стороны, для массы воды, содержащейся в полости, можно записать:

$$m_l = \pi a^2 \rho_l (1 - \alpha). \quad (8)$$

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 ме-

тодом с использованием алгоритма ловли фронта в узел пространственной сетки, рассмотренного в [10–14].

Результаты расчетов

На рисунке 1 для момента времени $t = 4$ и 7 мин представлено распределение системы «полость — гидрат» для исходной температуры частицы $T_0 = 274$ К. Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения [15]: $c_h = 2100$ Дж/(кг·К), $\lambda_h = 2.45$ Вт/(м·К), $l_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\rho_h = 900$ кг/м³, $\rho_l = 1000$ кг/м³, $R_g = 520$ 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.

Рисунок 1. Распределение температуры системы «полость — гидрат» в моменты времени $t = 4$ мин (1) и 7 мин (2)

Figure 1. Temperature distribution of the «cavity — hydrate» system at moments of time $t = 4$ min (1) and 7 min (2)

Как следует из анализа 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 масс смеси, воды и газа (3), приходящихся на

единицу длины от времени. Температура в смеси полагалась равной $T_s = 276.3$ К, что соответствует давлению 3.8 МПа. Как следует из анализа рисунка 2, с ростом исходной температуры интенсивность образования полости уменьшается. 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.

Рисунок 2. Зависимости масс смеси (1), воды (2) и газа (3), приходящихся на единицу длины от времени

Figure 2. Dependences of the masses of the mixture (1), water (2) and gas (3) per unit length on time

На рисунке 3 представлены зависимости объемной концентрации газа и радиуса полости от времени при различных значениях температуры полости при $T_0 = 274$ К. На рисунке 3, а температура полости полагалась равной $T_s = 276.3$ К (соответствует давлению 3.8 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 3. Зависимости радиуса полости (а) и объемной концентрации газа (б) от времени при $T_s = 276.3$ К

Figure 3. Dependences of the cavity radius (a) and the volumetric gas concentration (b) on time at $T_s = 276.3$ K

Выводы

Представлена математическая 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 проанализиро-

вано 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. Чертова 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., Сагалевиц А.М., Черняев Е.С. Разрушение глубоководных метановых пузырей // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 505-514.
3. Егоров А.В., Нигматулин Р.И., Рожков А.Н. Переход глубоководных 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. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов 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.
8. 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.
9. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред: В 2 ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
10. 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.
11. 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.

12. 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.

13. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Додова М.И. Численное решение задачи об образовании гидрата двуокиси углерода в пористом пласте, изначально насыщенном гидратом метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 91-98.

14. 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.

15. Gimaltdinov I.K., Levina T.M., Stolpovskii M.V., Solovov D.V. Dynamics of the Localized Pulse in Bubbly Liquid // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Article Number 022002. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022002.

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-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. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A., Tazetdinov B.I. O migratsii odinochnogo 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].

8. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Belova S.V. K teorii protsesssa 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].

9. 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].

10. 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.

11. 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.

12. Gimaltdinov I.K., Musakaev N.G., Khasanov M.K., Stolpovskii M.V. Osobennosti protsesssa razlozheniya gazovykh gidratov pri teplovom i depressionnom vozdeistviyakh 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].

13. Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V., Dodova M.I. Chislennoe reshenie zadachi ob obrazovanii gidrata dvuokisi 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].

14. 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.

15. Gimaltdinov I.K., Levina T.M., Stolpovskii M.V., Solovov D.V. Dynamics of the Localized Pulse in Bubbly Liquid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 463, Article Number 022002. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чиглинцева Ангелина Сергеевна, доктор физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», УГНТУ, Уфа, Россия

Angelina S. Chiglintseva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russia

changelina@rambler.ru

Давлетишина Миляуша Рафаэлевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Физика», УГНТУ, Уфа, Россия

Milyausha R. Davletshina, Candidate of Agricultural Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russia

davletshina@yandex.ru

Столповский Максим Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», УГНТУ, Уфа, Россия

Maxim V. Stolpovsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russia

s_maxim.pmm@mail.ru

Кочанова Екатерина Юрьевна, ассистент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», УГНТУ, Уфа, Россия

Ekaterina Yu. Kochanova, Assistant of Computing and Engineering Cybernetics Department, USPTU, Ufa, Russia

moto8728@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.09.2021; одобрена после рецензирования 30.09.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 09.09.2021; approved after reviewing 30.09.2021; accepted for publication 01.11.2021.