ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ГАЗОГИДРАТНОЙ СКВАЖИНОЙ

INTERACTION OF HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS WITH A GAS HYDRATE WELL

В. А. Акчурина
Venera A. Akchurina

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
филиал, г. Октябрьский,
Республика Башкортостан,
Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Branch, Oktyabrskiy,
Republic of Bashkortostan,
Russian Federation

А. С. Чиглинцева
Angelina S. Chiglintseva

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
филиал, г. Октябрьский,
Республика Башкортостан,
Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Branch, Oktyabrskiy,
Republic of Bashkortostan,
Russian Federation

М. А. Фатыхов
Minnekhan A. Fatykhov

Башкирский государственный
педагогический университет
им. М. Акмуллы,
г. Уфа, Российская Федерация

Bashkir State Pedagogical
University n.a. M. Akmulla,
Ufa, Russian Federation

Образование газогидратных отложений на внутренней поверхности газодобывающего оборудования — часто встречающийся вид осложнения при добыче газа, приводящий к значительному уменьшению полезного использования трубопроводов и газопроводов. Интенсивность их образования может привести к полному перекрытию подъемных труб и кольцевых каналов в межтрубном пространстве на определенных участках, что требует проведения ремонтных работ по очистке скважин от газогидратов. На основе анализа методов очистки скважин от залежей газогидратов было выявлено, что в ряде случаев одним из эффективных методов предотвращения их образования и борьбы с ними является использование энергии высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полей. В данной работе исследуются процессы нагрева и разложения газогидратных отложений в стволе скважины.

The formation of gas hydrate deposits on the inner surface of gas production equipment is a frequently occurring type of complication in gas production, leading to a significant decrease in the useful section of pipes and gas pipelines. The intensity of their formation can lead to a complete overlap of the lifting pipes and annular channels in the annulus in certain areas, which necessitates repair work to clean the wells of gas hydrates. Based on the analysis of methods for cleaning wells from gas hydrate deposits, it was revealed that in some cases one of the effective methods of preventing their formation and combating them is to use the energy of high-frequency and superhigh frequency electromagnetic fields. The article explores the processes of heating and decomposition of gas hydrate deposits in the wellbore. About 30 % of the thermal energy released in the wellbore interacting with the electromagnetic field is consumed to heat the medium surrounding the well. The need for timely removal of the gas-water mixture formed in the annulus for the decomposition of gas hydrate along the entire length of the well is established.

Газогидраты представляют собой в электродинамическом отношении диэлектрик со слабой электропроводностью [1, 2]. При распространении в них электромагнитных волн

высокочастотного и сверхвысокочастотного диапазонов наблюдается частотная дисперсия диэлектрической проницаемости, которая, по-видимому, вызвана ориентационной поля-

Ключевые слова

взаимодействие; высокочастотное
электромагнитное поле;
газогидрат; скважина

Key words

interaction; high-frequency
electromagnetic field;
gas hydrate; well

ризацией полярных компонент. За счет диэлектрических потерь происходит диссипация энергии электромагнитных волн, этот процесс является объемным, характерные размеры объема определяются частотой и структурой электромагнитной волны и диэлектрическими параметрами газогидрата. В результате появления в среде объемных тепловых источников происходит нагрев, и становится возможным разложение газогидрата на газ и воду в объеме. Весьма перспективным представляется использование энергии высокочастотного (или сверхвысокочастотного) электромагнитного поля для восстановления скважин и участков трубопроводов, простаивавших из-за образования гидратных и парафиновых пробок.

В данной работе проведено математическое моделирование термодинамического процесса разрушения газогидратных пробок при создании высокочастотного электромагнитного поля в газовой скважине. При этом приняты следующие предположения: в межтрубное пространство скважины, в котором образовалась газогидратная пробка, вводится энергия высокочастотного электромагнитного поля мощностью ω_0 от генератора, установленного на устье ($z = 0$); фонтанная труба заполнена газогидратом такой же высоты H , что и в межтрубном пространстве; после разложения газогидрата в них образуется газоводяная смесь с постоянным объемным газосодержанием α_q и отбор ее не производится; газоводяная смесь характеризуется некоторыми усредненными значениями физических параметров; вследствие малой толщины и большой теплопроводности стенок труб характерное время выравнивания температур в них очень мало; отражение электромагнитных волн о границы раздела твердый газогидрат — газоводяная смесь отсутствует; в межтрубном пространстве скважины распространяется волна типа ТЕМ. При этих предположениях температура в скважине характеризуется системой уравнений:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + q_i, \quad i = 1, \dots, 7 \quad (1)$$

совместно с краевыми условиями

$$T_i = T_0 + T_z, \quad t = 0, \quad i = 1, \dots, 7, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad (3)$$

$$T_z = T_0 + rz, \quad r \rightarrow \infty, \quad (4)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r}, \quad (5)$$

$$T_i = T_{i+1}, \quad r = R_j \quad (i = 2, \dots, 5; j = 1, \dots, 4),$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \rho_1 L \frac{dR_5}{dt}, \quad (6)$$

$$T_1 = T_2 = T_R, \quad r = R_5(t),$$

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} + \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} = \rho_5 L \frac{dR_6}{dt}, \quad (7)$$

$$T_5 = T_6 = T_R, \quad r = R_6(t),$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial z} = 0, \quad z = 0, z = H, \quad (i = 1, \dots, 7). \quad (8)$$

В этих уравнениях и в дальнейшем индекс «1» относится к твердому гидрату, заполняющему фонтанную трубу, «2» — газоводяной смеси, образующейся в ней, «3» — фонтанной трубе, «4», «5» — газоводяной смеси и твердому гидрату в межтрубном пространстве соответственно, «6» — эксплуатационной колонне, «7» — окружающей ее породе (рисунок 1), Γ — геотермический градиент, T_p , L — температура разложения газогидрата и теплота фазового перехода.

Рисунок 1. Геометрия модели. Радиусы концентрических окружностей труб $R_j = 0.065; 0.073; 0.128; 0.137 \text{ m}$ ($j = 1, \dots, 4$). Частота поля $f = 13.56 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, мощность на устье скважины $W_0 = 60 \text{ кВт}$, нижняя граница газогидратной пробки $H = 700 \text{ м}$

До начала разложения газогидрата в фонтанной трубе и межтрубном пространстве граничные условия (5) имеют вид

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = -\lambda_{i+2} \frac{\partial T_{i+2}}{\partial r}, \quad (9)$$

$$T_i = T_{i+2}, \quad r = R_j \quad (i = 1, 3; j = 1, 2).$$

Выражения для распределенных тепловых источников, входящих в систему уравнений (1), представляются в виде:

$$q_1 = q_2 = q_7, q_3 = \frac{K_{\alpha 3} W_0 e^{-2K_{\alpha z}}}{\pi R_2} \delta(r - R_2),$$

$$q_6 = \frac{K_{\alpha 6} W_0 e^{-2K_{\alpha z}}}{\pi R_3} \delta(R_3 - r), \quad (10)$$

$$q_4 = \frac{K'_{\alpha 4} W_0 e^{-2K_{\alpha z}}}{\pi r^2 \ln \frac{R_6}{R_2}}, q_5 = \frac{K'_{\alpha 5} W_0 e^{-2K_{\alpha z}}}{\pi r^2 \ln \frac{R_3}{R_6}}.$$

Коэффициент затухания электромагнитной волны в межтрубном пространстве зависит от электрофизических свойств материалов фонтанной трубы и эксплуатационной колонны, твердого газогидрата и газовой смеси, образующейся в процессе разложения, и описывается формулой

$$K_{\alpha} = K_{\alpha 3} + K'_{\alpha 4} + K'_{\alpha 5} + K_{\alpha 6}, \quad (11)$$

$$K'_{\alpha 3} + K_{\alpha 6} = \frac{R_5}{2Z_e(t) \ln \frac{R_3}{R_2}} \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (12)$$

$$R_5 = \sqrt{\frac{\pi f \mu_{am}}{\sigma_m}},$$

$$K'_{\alpha 4} = \frac{\omega}{c_r} \sqrt{\frac{\epsilon'_4}{2} (\sqrt{1 + tg^2 \delta_4} - 1)} \frac{\ln(R_6/R_2)}{\ln(R_3/R_2)} =$$

$$= K_{\alpha 4} \frac{\ln(R_6/R_2)}{\ln(R_3/R_2)}, \quad (13)$$

$$K'_{\alpha 5} = \frac{\omega}{c_r} \sqrt{\frac{\epsilon'_5}{2} (\sqrt{1 + tg^2 \delta_5} - 1)} \frac{\ln(R_3/R_6)}{\ln(R_3/R_2)} =$$

$$= K_{\alpha 5} \frac{\ln(R_3/R_6)}{\ln(R_3/R_2)}, \quad (14)$$

где $\epsilon', tg\delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь соответствующих сред; μ_{am} , σ_m — абсолютная магнитная проницаемость и электропроводность материалов труб соответственно.

Как видно из формул (13), (14), $K'_{\alpha 4}$, $K'_{\alpha 5}$ перераспределяются в соответствии с объемами, занимаемыми газовой смесью и газогидратом [3]. Волновое сопротивление среды, заполняющей межтрубное пространство скважины, становится также зависимым от размеров этих областей в соответствии с формулой

$$Z_e(t) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon'_{45}}}, \frac{\ln(R_3/R_2)}{\epsilon'_{45}} =$$

$$= \frac{\ln(R_3/R_6)}{\epsilon'_4} + \frac{\ln(R_6/R_2)}{\epsilon'_5}. \quad (15)$$

Значения диэлектрических параметров газовой смеси ($\epsilon'_4, tg\delta_4$, $\epsilon'_5 = \epsilon'_4, tg\delta_4$) опреде-

ляются из решения трансцендентных зависимостей [4]:

$$\frac{[(\epsilon'_4 - \epsilon'_w)^2 + (\epsilon''_4 - \epsilon''_w)^2][(\epsilon'_g)^2 + (\epsilon''_g)^2]^{1/3}}{[(\epsilon'_g - \epsilon'_w)^2 + (\epsilon''_g - \epsilon''_w)^2][(\epsilon'_4)^2 + (\epsilon''_4)^2]^{1/3}} = (1 - \alpha_d)^2,$$

$$\arctg \frac{\epsilon'_4 \epsilon'_g - \epsilon'_g \epsilon'_4}{\epsilon'_4 \epsilon'_g + \epsilon'_4 \epsilon'_g} = \quad (16)$$

$$= 3 \arctg \frac{(\epsilon'_4 - \epsilon'_w)(\epsilon''_g - \epsilon''_w) - (\epsilon'_g - \epsilon'_w)(\epsilon''_4 - \epsilon''_w)}{(\epsilon'_4 - \epsilon'_w)(\epsilon'_g - \epsilon'_w) + (\epsilon''_4 - \epsilon''_w)(\epsilon''_g - \epsilon''_w)}.$$

Здесь индексы «w» и «g» относятся к газу и воде соответственно.

Следует отметить, что для газовой смеси справедливо выражение

$$c_i \rho_i = c_g \rho_g \alpha_g + c_w \rho_w (1 - \alpha_g), \quad (i = 2, 4). \quad (17)$$

Температура разложения газогидрата T_p (в °C) связана с давлением гидратообразования P_p (в атмосферах) [5]:

$$T_b = 9,75 l_g P_b - 0,7. \quad (18)$$

Поскольку с увеличением глубины давление в скважине увеличивается, то соответственно изменяется и температура разложения газогидратной пробки. Аппроксимируя экспериментальные данные [5], полученные в одной из скважин, можно записать следующую зависимость:

$$P_p = P_{yp} e^{0,000136z}, \quad (19)$$

где P_{yp} — давление гидратообразования на устье скважины.

Краевая задача (1)–(9) совместно с формулами (10)–(19) решалась методом конечных разностей по неявной схеме на ЭВМ ЕС-1045. При этом выбиралась схема с фиксированным шагом по времени и использовались дробные пространственные шаги при определении положения границы раздела фаз [6]. Задача была решена в два этапа. Первый этап характеризует нагрев гидрата до достижения температуры T_p . В этом случае была решена система (1) из пяти уравнений при крайних условиях (2)–(4), (19). После достижения T_p у внешней стенки фонтанной трубы начинается второй этап нагрева гидрата. Температура, достигаемая за время нагрева на первом этапе, принимается за начальное условие для второго этапа.

Расчеты были проведены применительно к газогидрату Средне-Вилуйского месторождения Республики Якутии-Саха при значениях, приведенных в таблице 1 [7–12].

Таблица 1. Физические характеристики сред модели

Среда	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	α^7	ξ^8	$tg\delta$	$\mu_{nm} \cdot 10^{-7}$, Гн/м	$\sigma_m \cdot 10^{-7}$, Ом ⁻¹ м ⁻¹
гидрат ¹	689	2880	0.38	—	4.17 ²	0.1 ²	—	—
вода ¹	1000	4117	0.585	—	78.2	0.0046	—	—
газ ¹	188	3407	0.066	0.48	7	0	—	—
металл	790	502	46	—	—	—	34.16	0.34
порода	2080	1400	3.62	—	—	—	—	—

Примечание.¹ — $\rho, c, \lambda, \alpha_g$ приняты при давлении 20 МПа.

Вследствие малой толщины и большой теплопроводности стенок труб характерное время выравнивания температур в них очень мало. Поэтому выражения для q_3 и q_6 были приняты в виде:

$$q_3 = \frac{K_{23}W_0 e^{-2K\alpha z}}{\pi r^2 \ln \frac{R_2}{R_1}}, q_6 = \frac{K_{26}W_0 e^{-2K\alpha z}}{\pi r^2 \ln \frac{R_4}{R_3}}.$$

Результаты расчётных исследований проиллюстрированы на рисунках 2–4. Из рисунка 2 видно, что максимум температуры достигается на внешней стенке фонтанной трубы. С течением времени этот максимум растет быстрее, чем на эксплуатационной колонне. После достижения температуры фазового перехода скорость роста температуры на внешней стенке фонтанной трубы уменьшается, а на внутренней стенке эксплуатационной колонны увеличивается.

Рисунок 2. Распределение температуры по радиусу скважины на глубине 10 м в различные моменты времени (в ч): 1 — 0.2; 2 — 0.4; 3 — 0.5; 4 — 0.6; 5 — 2.9; 6 — 5.8; 7 — 34; 8 — 67 (9 — изотерма $T_p - T_0$, $T_0 = -10,4$ °C; 10 — фонтанная труба; 11 — эксплуатационная колонна)

На рисунке 3 отчетливо проявляется влияние диэлектрических свойств твердого газогидрата и газовой смеси на распределение температуры по глубине скважины.

Из рисунка 4 следует, что разложение газогидрата, находящегося в фонтанной трубе, начинается позже, чем в межтрубном простран-

Рисунок 3. Расчетное распределение температуры в середине межтрубного пространства (при $r = 0.1$ м) по глубине скважины в различные моменты времени после начала воздействия (в ч): 1 — 0,6; 2 — 2,9; 3 — 5,8; 4 — 34; 5 — 67; 6 — 120; 7 — 216; 8 — $T_p - T_0$, 9 — начальное распределение температуры по глубине скважины

Рисунок 4. Изменение со временем коэффициента затухания электромагнитной волны (1), границы фазового перехода в межтрубном пространстве (2) и фонтанной трубе (3) на глубине скважины, равной 10 м

стве. Это объясняется тем, что в межтрубном пространстве действует объемный источник тепла, а в газогидрат, находящийся в фонтанной трубе, тепло передается только посредством теплопроводности. Полное разложение газогидрата в фонтанной трубе происходит значительно позже, чем в межтрубном про-

странстве. В последнем процессе разложение газогидрата сначала идет достаточно быстро. Затем начинается движение границы фазового перехода $R_5(t)$ в газогидрате, находящемся в фонтанной трубе, и в дальнейшем скорость ее роста в межтрубном пространстве $R_6(t)$ существенно уменьшается. Одной из причин этих закономерностей является наличие больших затрат энергии на разрушение гидрата в фонтанной трубе. Кроме того, уменьшается K_a по экспоненциальному закону, как это видно из рисунка 4 (кривая 1), то есть K_a является переменной величиной в зависимости от времени из-за разложения газогидрата в межтрубном пространстве, причем газогидрат имеет существенно большие диэлектрические потери, чем газоводяная смесь ($K_{a4}=0.00296 \text{ м}^{-1}$, $K_{a5}=0.03 \text{ м}^{-1}$). Вследствие этого тепловыделение в рассматриваемой точке межтрубного пространства сильно уменьшается, электромагнитные волны проникают достаточно далеко в глубь скважины и соответственно скорость разложения газогидрата в межтрубном пространстве уменьшается. Отсюда следует,

что если вовремя отбирать образующуюся в межтрубном пространстве газоводяную смесь, то возможно разрушение газогидратной пробки по всей длине скважины.

Как видно из рисунка 2, около одной трети количества тепла затрачивается для прогрева окружающих скважину пород. Причем этот прогрев значительный и вполне достаточный для плавления мерзлых пород и нарушения устойчивости скважины. В связи с этим возникает проблема борьбы с этим явлением.

Вывод

Выявлено, что в ряде случаев одним из эффективных методов предотвращения их образования и борьбы с ними является использование энергии высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полей.

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

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Насыров Н.М. Исследование разложения газогидрата в высокочастотном электромагнитном поле // Разработка газоконденсатных месторождений: докл. междунар. конф. Краснодар: 1990. С. 37–41.
2. Фатыхов Л.М., Галкин С.В., Фатыхов М.А. Применение численного моделирования для оценки эффективности электромагнитной очистки скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 56–59. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-56-59.
3. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.
4. Челидзе Т.Л., Деревяненко Р.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наукова думка, 1987. 231 с.
5. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
6. Охлопков Н.М. О некоторых методах численной реализации многомерных задач математической физики. Якутск: 1976. 255 с.
7. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. М.: ИИЛ, 1960. 438 с.
8. Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. Новосибирск: Наука, 1985. 94 с.
9. Дегтярев Б.В., Бухгалтер Э.Б. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах. М.: Недра, 1976. 197 с.
10. Муравьев В.М. Спутник нефтяника. М.: Недра, 1977. 303 с.

11. Чистяков С.И., Саяхов Ф.Л., Бабалян Г.А. О высокочастотном нагреве призабойной зоны скважины // Нефтяное хозяйство. 1970. № 10. С. 49–52.

12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Недра, 1972. 720 с.

REFERENCES

1. Sayakhov F.L., Fatykhov M.A., Nasyrov N.M. Issledovanie razlozheniya gazogidrata v vysokochastotnom elektromagnitnom pole [Investigation of the Decomposition of Gas Hydrate in a High-Frequency Electromagnetic Field]. *Doklady mezhdunarodnoi konferentsii «Razrabotka gazokondensatnykh mestorozhdenii»* [Reports of the International Conference «Development of Gas Condensate Fields»]. Krasnodar, 1990, pp. 37–41. [in Russian].
2. Fatykhov L.M., Galkin S.V., Fatykhov M.A. Primenenie chislenno modelirovaniya dlya otsenki effektivnosti elektromagnitnoi ochistki skvazhin ot asfal'tosmoloparafinovyykh otlozhenii [Implementation of Numerical Modelling to Assess Efficiency Electromagnetic Technology of Cleaning of Wells from Wax Deposition]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2018, No. 8, pp. 56–59. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-56-59. [in Russian].
3. Volman V.I., Pimenov Yu.V. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics]. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 487 p. [in Russian].
4. Chelidze T.L., Derevyanenko R.I., Kurilenko O.D. *Elektricheskaya spektroskopiya geterogennykh sistem* [Electrical Spectroscopy of Heterogeneous Systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 231 p. [in Russian].

5. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p. [in Russian].

6. Okhlopkov N.M. *O nekotorykh metodakh chislennoi realizatsii mnogomernykh zadach matematicheskoi fiziki* [On Some Methods for the Numerical Implementation of Multidimensional Problems of Mathematical Physics]. Yakutsk, 1976. 255 p. [in Russian].

7. Khippel A.R. *Dielektriki i volny* [Dielectrics and Waves]. Moscow, IIL Publ., 1960. 438 p. [in Russian].

8. Groisman A.G. *Teplofizicheskie svoystva gazovykh gidratov* [Thermophysical Properties of Gas Hydrates]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 94 p. [in Russian].

9. Degtyarev B.V., Bukhgalter E.B. *Bor'ba s gidratami pri ekspluatatsii gazovykh skvazhin v severnykh raionakh*

[Combating Hydrates in the Operation of Gas Wells in the Northern Regions]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 197 p. [in Russian].

10. Muravev V.M. *Sputnik neftyanika* [Oilman's Satellite]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 303 p. [in Russian].

11. Chistyakov S.I., Sayakhov F.L., Babalyan G.A. O vysokochastotnom nagreve prizaboinoi zony skvazhiny [About High-Frequency Heating of the Bottomhole Zone of the Well]. *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 1970, No. 10, pp. 49–52. [in Russian].

12. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostei* [Handbook on Thermophysical Properties of Gases and Liquids]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 720 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Акчурина Венера Ахметовна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Venera A. Akchurina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: aveneraa@mail.ru

Чиглинецова Ангелина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Angelina Chiglintseva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: changelina@rambler.ru

Фатыхов Миннехан Абузарович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и теоретической физики, БГПУ им. М. Акмуллы, г. Уфа, Российская Федерация

Minnekhan A. Fatykhov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of General and Theoretical Physics Department, BSPU n.a. M. Akmulla, Ufa, Russian Federation

e-mail: office@bspu.ru