А.С. Чиглинцева, М.Р. Давлетшина, М.В. Столповский (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ И ИСТОЧНИКА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДИНАМИКУ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА

Angelina S. Chiglintseva, Milyausha R. Davletshina, Maxim V. Stolpovsky
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

INFLUENCE OF PARAMETERS OF A POROUS MEDIUM AND A MICROWAVE SOURCE ON THE DYNAMICS OF GAS HYDRATE DECOMPOSITION

Введение

Добыча газа из газогидратного пласта связана с фазовыми переходами в процессе разложения газогидрата на жидкость и газ и реализуется различными методами.

Разложение газогидрата происходит вследствие повышения температуры, разгерметизации (снижения давления), использования ингибиторов, воздействием сверхвысокочастотным электромагнитным излучением и др.

Цели и задачи

Рассмотреть процесс разложения газового гидрата в радиальной модельной постановке на примере гидрата метана.

Методы

Математическое моделирование.

Результаты

В статье представлены результаты численного моделирования процессов разложения газовых гидратов в высокочастотном электромагнитном поле.

Приведены результаты численного эксперимента процесса разложения и показаны распределения температур и давления, а также зависимость от коэффициента проницаемости.

Background

Gas production from a gas hydrate reservoir is associated with phase transitions in the process of decomposition of a gas hydrate into liquid and gas and is implemented by various methods.

The decomposition of gas hydrate occurs due to increase in temperature, depressurization (decrease in pressure), use of inhibitors, exposure by microwave electromagnetic radiation, etc.

Aims and Objectives

Aims and Objectives

Research the process of gas hydrate decomposition in a radial model setting using the example of methane hydrate.

Methods

Math modeling.

Results

The article presents the results of numerical modeling of gas hydrates decomposition in a high-frequency electromagnetic field.

The results of a numerical experiment of the decomposition process are presented, and the temperature and pressure distributions, as well as the dependence on the permeability coefficient, are shown.

Представлены также распределения температуры и давление пласта, исследованы зависимости положения границы фазового перехода от параметров среды и источника СВЧ-излучения.

The distributions of temperature and pressure of the formation are also presented, the dependences of the position of the phase transition boundary on the parameters of the medium and the source of microwave radiation are studied.

Ключевые слова: фазовый переход; СВЧ-излучение; гидрат метана; фильтрация газа

Key words: : phase transition; microwave radiation; methane hydrate; gas filtration

Введение

Добыча газа из газогидратного пласта связана с фазовыми переходами в процессе разложения газогидрата на жидкость и газ и реализуется различными методами. Разложение газогидрата происходит вследствие повышения температуры, разгерметизации (снижения давления), использования ингибиторов, воздействием сверхвысокочастотным электромагнитным излучением и др.

В работе рассматривается процесс разложения газового гидрата в радиальной модельной постановке на примере гидрата метана. Математическое моделирование широко используется для изучения процессов образования и разложения газовых гидратов.

В работе [1] изучена аналитическая зависимость и предложено автомодельное решение задачи разложения гидрата под воздействием газа под воздействием СВЧ-излучения.

Предложена математическая модель процессов фильтрации разложения газогидратов посредством электромагнитных излучений, которые более эффективны, чем обычное тепловое воздействие, обусловленное кондуктивной теплопроводностью. В результате автомодельного решения такой задачи были получены распределения давления и температуры в различные моменты времени.

В работе [2] представлены результаты натурального эксперимента по разложению гидрата пропана при воздействии сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Рассматриваются возможности полного разложения гидратной пробки, образовавшейся в трубе.

Однако численное решение в такой постановке не выполнялось, поэтому разработка математического обеспечения и численная реализация подобных задач являются на сегодняшний день актуальными.

Постановка задачи

Рассмотрим горизонтальный круговой пористый пласт радиусом R_k , в центре которого пробурена скважина радиусом r_w , вскрывшая его на все толщину.

Предположим, что в исходном состоянии пласт заполнен газом (метаном) и его гидратом с исходной гидратонасыщенностью ν .

Пусть в момент времени $t > 0$ на границе пористой среды ($r = r_w$) начинает работать излучатель высокочастотных электромагнитных колебаний. Ввиду того что газ и дистиллированная вода являются диэлектриками, поглощение энергии СВЧ-излучения происходит в тонком газогидратном слое - фронтальной границе.

В результате такого воздействия в пласте возникают две области: ближняя, примыкающая к скважине и содержащая газ (метан) и воду, и дальняя, насыщенная газогидратом и газом.

Для описания тепловых и гидродинамических полей в задаче о разложении газогидрата примем следующие допущения. Будем полагать, что пористость является величиной постоянной; скелет пористой среды, гидрат и вода являются несжимаемыми и неподвижными, а газ калорически совершенным:

$$m = \text{const}; v_{sk} = v_h = v_w = 0; \rho_{sk} = \rho_h = \rho_w = \text{const}; \rho_g = p/R_g T,$$

где m - пористость;

ρ_i и v_i - соответственно плотность и скорость i -ой фазы;

p - давление;

T - температура;

R_g - приведенная газовая постоянная.

Здесь и в дальнейшем нижние индексы $i = sk, g, h, w$ соответствуют параметрам скелета, газа, гидрата, воды.

Система основных уравнений представляет собой уравнения неразрывности и притока тепла и закон Дарси [3] и в осесимметричном приближении имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mS_g \rho_g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rmS_g v_g \rho_g) &= 0, \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + c_g \rho_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1) \\ m S_g v_g &= - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial r}. \end{aligned}$$

Здесь r - пространственная координата;

t - время;

c_g, v_g, μ_g и S_g - соответственно теплоемкость, скорость, вязкость и насыщенность для газовой фазы.

Величины удельной объемной теплоемкости ρC и коэффициента теплопроводности λ будем считать постоянными, поскольку

они определяются, в основном, параметрами скелета пористой среды.

Кроме того, рассматриваемую систему (1) необходимо дополнить условиями баланса массы воды и газа на подвижной границе фазовых переходов $r = r_{(n)}$, на которой происходит процесс разложения гидрата [4-6]:

$$\begin{aligned} m S_{g(2)} \rho_{g(n)} (v_{g(2)} - \dot{r}_{(n)}) - m G v_h \dot{r}_{(n)} &= m S_{g(1)} \rho_{g(n)} (v_{g(1)} - \dot{r}_{(n)}), \\ m S_{l(1)} \rho_l \dot{r}_{(n)} &= m (1 - G) v_h \dot{r}_{(n)}. \end{aligned}$$

Здесь $S_{l(1)} = 1 - S_{g(1)}$ - водонасыщенность ближней области;

$\dot{r}_{(n)}$ - скорость движения границы фазовых переходов $r = r_{(n)}$;

нижние индексы $i = 1$ и 2 соответствуют параметрам ближней и дальней областей.

Из данной системы для величины $S_{l(1)}$ можно получить [7, 8]:

$$S_{l(1)} = \frac{(1 - G) \rho_h}{\rho_l} v.$$

При этом используя закон Дарси, условия баланса массы газа и тепла можно также представить в виде [9]:

$$\begin{aligned} \frac{k_{g(1)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial r} - \frac{k_{g(2)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial r} &= m \dot{r}_{(n)} \left(S_{g(2)} - S_{g(1)} + \frac{G v_h}{\rho_{g(n)}} \right), \\ \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} &= m \rho_h v L_h \dot{r}_{(n)} - q. \quad (2) \end{aligned}$$

Здесь L_h - удельная теплота разложения гидрата;

q - интенсивность поглощения излучения гидратом.

При этом будем считать, что давление и температура на этой границе являются величинами непрерывными и связанными с условием трехфазного равновесия:

$$T_n(p) = T_{h0} + T_* \ln(p / p_{h0}). \quad (3)$$

Здесь T_{h0} - равновесная температура, соответствующая давлению p_{h0} ;

T^* - эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Будем полагать, что в начальный момент времени пласт насыщен метаном и гидратом, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют условию их стабильного существования, т.е. $T_0 < T_n(p_0)$:

$$t = 0: p = p_0, T = T_0, (r_w \leq r \leq R_k). \quad (4)$$

Пусть в момент времени $t > 0$ на границе «скважина - пористая среда» начинает функционировать источник излучения. При этом в данной задаче будем полагать, что интенсивность поглощения излучения q выражается зависимостью:

$$t > 0: q = \frac{Q}{2\pi r_{(n)}} (r = r_w), \quad (5)$$

где Q - мощность излучения.

Условия на контуре питания представим в виде:

$$t > 0: p = p_0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 (r = R_k). \quad (6)$$

На основе первого уравнения системы (1) с учетом закона Дарси, а также уравнения состояния калорически совершенного газа, уравнения пьезопроводности, описывающие распределения давления в ближней ($i = 1$) и дальней ($i = 2$) областях, имеют вид [10-12]:

$$\frac{\partial p_{(i)}}{\partial t} = \frac{k_{g(i)}}{m S_{g(i)} \mu_g} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p_{(i)} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial r} \right). \quad (7)$$

Отметим, что (7) получено в предположении, что изменения температуры ΔT в области фильтрации метана небольшие, т.е. $\Delta T \ll T$.

Аналогично, уравнение энергии (второе уравнение системы (1)) можно представить в виде:

$$\frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \kappa^{(T)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial r} \right) + \frac{\rho_{(i)} C_{(i)}}{\rho C} \frac{k_{(i)}}{\mu_{(i)}} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial r} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial r}, \quad (8)$$

где $\kappa^{(T)} = \lambda / \rho C$ - коэффициент температуропроводности пласта.

В настоящей работе будем рассматривать случай, соответствующий отсутствию отбора или закачки газа через скважину энергия излучения вводится через непроницаемую границу.

В этом случае будем считать, что давление в ближней области однородно и совпадает с величиной давления на границе фазовых переходов, а температура определяется через соотношение (3):

$$t > 0: p = p_{(n)}, T = T_{(n)} (r_w \leq r \leq r_{(n)}). \quad (9)$$

Для численного решения задачи (7)-(9) с начальными и граничными условиями (4)-(6) используется метод ловли границы фазового перехода в узле пространственной сетки.

Результаты численного эксперимента

На рисунке 1 для момента времени $t = 10$ сут представлены распределения температуры и давления в пласте при действии источника излучения мощностью $Q = 10^2$ Вт/м.

Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения

$$\begin{aligned} m &= 0,1, \nu = 0,2, \mu_g = 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}, \\ \lambda &= 2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), L_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}, \\ R_g &= 520 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), G = 0,12, \\ \rho C &= 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3), T_{h0} = 280 \text{ К}, \\ T^* &= 10 \text{ К}, p_{h0} = 5,5 \text{ МПа}, \\ \rho_h &= 900 \text{ кг}/\text{м}^3, \rho_w = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3, \\ r_w &= 0,1 \text{ м}, R_k = 50 \text{ м}. \end{aligned}$$

Исходные давление и температура полагались равными $p_0 = 5$ МПа и $T_0 = 275$ К соответственно; проницаемость дальней области, насыщенной метаном и его гидратом, принималась равной $k_{g(2)} = 10^{-17} \text{ м}^2$.

Рисунок 1. Распределение температуры и давления в пласте

Как показано на рисунке 1, основной перепад температуры и давления реализуется в малой области возле фронта фазового перехода. При этом давление и температура на фронте и, соответственно, в ближней области поднимаются выше исходных значений и составляют соответственно $p_{(n)} = 6,6$ МПа и $T_{(n)} = 281,8$ К.

На рисунке 2 представлены зависимости температуры и давления на границе фазового перехода от времени. Линии 1 и 2 соответствуют значениям проницаемости дальней области $k_{g(2)} = 10^{-18}$ м² и $k_0 = 10^{-17}$ м².

Как следует из рисунка 2, значения давления и, соответственно, температуры на границе фазового перехода с течением времени уменьшаются.

Это объясняется тем, что интенсивность поглощения излучения гидратом согласно зависимости (5) уменьшается с течением времени. Вследствие этого уменьшается и интенсивность разложения гидрата и, как следствие, давление и температура на границе фазового перехода.

Из рисунка 2 также следует, что с увеличением проницаемости дальней области значения $p_{(n)}$ и $T_{(n)}$ уменьшаются.

Как следует из рисунка 2, скорость движения фронта с течением времени уменьшается. Это объясняется тем, что быстрота разложения гидрата определяется интенсивностью поглощения излучения, которая уменьшается с увеличением координаты фронта фазового перехода согласно зависимости (5). При этом с уменьшением значения проницаемости дальней области значения координаты фронта фазового перехода увеличиваются.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты численных расчетов для максимальных температуры (a) и давления (b) в зависимости от параметров пористой среды: исходной температуры и давления пласта.

На рисунке 5 представлены зависимости температуры T , давления $p(s)$ и координаты границы фазовых переходов $r(s)$ от мощности источника Q при заданном коэффициенте проницаемости ($k_0 = 10^{-17}$ м²).

Из рисунка 5, *a* видим, что с увеличением мощности излучателя значение максимальной температуры растет нелинейно, что связано с квадратичной зависимостью, описанной в основных уравнениях.

На рисунке 6 представлены зависимости температуры T , давления $p(s)$ и координаты границы фазовых переходов $r(s)$ от величины гидратонасыщенности пласта ($k_0 = 10^{-18}$ м²). Рисунок 6, *c* позволяет наблюдать квадратичную зависимость координаты границы фазового перехода от величины гидратонасыщенности пласта.

Рисунок 2. Зависимости температуры (а) и давления (b) на границе фазового перехода от времени

Рисунок 3. Зависимости максимальной температуры (а) и давления (b) от исходной температуры пласта

Рисунок 4. Зависимости максимальной температуры (а) и давления (b) от исходного давления пласта

Рисунок 5. Зависимости максимальной температуры (а), давления (b) и координаты фронта фазового перехода (с) от величины Q . ($k_0 = 10^{-17} \text{ м}^2$)

Рисунок 6. Зависимости максимальной температуры (а), давления (b) и координаты фронта фазового перехода (с) от величины гидратонасыщенности пласта ($k_0 = 10^{-18} \text{ м}^2$)

Как следует из рисунка 6, с, скорость движения фронта с течением времени уменьшается. Это объясняется тем, что быстрота разложения гидрата определяется интенсивностью поглощения излучения, которая уменьшается с увеличением координаты фронта фазового перехода согласно зависимости (5). При этом с уменьшением значения проницаемости дальней области значения координаты фронта фазового перехода увеличиваются.

Для случаев, представленных на рисунках 5 и 6, мощность источника СВЧ-излучения принята равной $Q = 104$ Вт/м. Это обстоятельство связано с тем, что при тепловом нагреве значительная часть подводимой энергии тратится на перегрев системы в первой зоне. В случае же подвода энергии за счет сверхвысокочастотного излучения

она в основном тратится на разложение газогидрата на границе фазовых переходов.

Вывод

В данной работе исследованы особенности разложения гидрата метана при воздействии СВЧ-излучения. Показано, что значения температуры и давления в пласте убывают со временем и расстоянием от источника СВЧ-излучения. Представлены зависимости координаты фронта разложения от времени при различных значениях коэффициента проницаемости.

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

Список литературы

- Шагапов В.Ш., Насырова Л.А., Потапов А.А., Дмитриев В.Л. Тепловой удар под воздействием энергии излучения на пористую среду, частично заполненную газогидратом // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 5. С. 47-53.
- Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я. Экспериментальные исследования разложения газогидрата в трубе при сверхвысокочастотном электромагнитном воздействии // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. Вып. 4. С. 612-617.
- Nigmatulin R.I., Shagapov V.SH., Nasyrova L.A. A «Thermal Shock» in a Porous Medium Saturated with a Gas Hydrate // Doklady Physics. 1999. Vol. 44. No. 5. P. 319-322.
- Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5-21.
- Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю. Мессояха - газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 3. С. 5-19.
- Черский Н.В., Бондарев Э.А. О тепловом методе разработки газогидратных месторождений // Доклады академии наук СССР. 1972. Т. 203. № 3. С. 550-552.

References

- Shagapov V.Sh., Nasyrova L.A., Potapov A.A., Dmitriev V.L. Teplovoi udar pod vozdeistviem energii izlucheniya na poristuyu sredu, chastichno zapolnennuyu gazogidratom [Thermal Shock Under the Action of Radiation Energy on a Porous Medium Partially Filled with Gas Hydrate]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2003, Vol. 76, No. 5, pp. 47-53. [in Russian].
- Fatykhov M.A., Bagautdinov N.Ya. Eksperimental'nye issledovaniya razlozheniya gazogidrata v trube pri sverkhvysokochastotnom elektromagnitnom vozdeistvii [Experimental Investigations of Decomposition of Gas Hydrate in a Pipe Under the Impact of a Microwave Electromagnetic Field]. *Teplofizika vysokikh temperatur - High Temperature*, 2005, Vol. 43, Issue 4, pp. 612-617. [in Russian].
- Nigmatulin R.I., Shagapov V.SH., Nasyrova L.A. A «Thermal Shock» in a Porous Medium Saturated with a Gas Hydrate. *Doklady Physics*, 1999, Vol. 44, No. 5, pp. 319-322.
- Makogon Yu.F. Gazogidraty. Istoriya izucheniya i perspektivy osvoeniya [Gas hydrates. Study History and Development Prospects]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana - Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 2010, No. 2, pp. 5-21. [in Russian].

7. Веригин Н.Н., Хабибуллин И.Л., Халиков Г.А. Линейная задача о разложении гидратов газа в пористой среде // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1980. № 1. С. 174-177.

8. Бондарев Э.А., Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. К математическому моделированию диссоциации газовых гидратов // Доклады академии наук СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 575-578.

9. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. М.: Наука, 2016. 240 с.

10. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Axisymmetric Problem of Heat and Mass Transfer in Saturated Porous Medium // Journal of Engineering Physics. 1980. Vol. 38. No 5. P. 581-585. DOI: 10.1007/BF00861276.

11. Цыпкин Г.Г. Влияние разложения газового гидрата на добычу газа из пласта, содержащего гидрат и газ в свободном состоянии // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2005. № 1. С. 132-142.

12. Чиглинцева А.С., Давлетшина М.Р., Столповский М.В. Численное решение задачи о разложении гидрата метана при тепловом воздействии // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики: матер. XII Всеросс. съезда: В 4 т. Уфа: Изд-во БашГУ, 2019. Т. 2. С. 1137-1139.

5. Makogon Yu.F., Omelchenko R.Yu. Messoyakha - gazogidratnaya zalez', rol' i znachenie [Messoyakha - Gas Hydrate Reservoir, Role and Significance]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana - Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 2012, No. 3, pp. 5-19. [in Russian].

6. Cherskii N.V., Bondarev E.A. O teplovom metode razrabotki gazogidratnykh mestorozhdenii [On the Thermal Method for the Development of Gas Hydrate Fields]. *Doklady akademii nauk SSSR - Soviet Physics. Doklady*, 1972, Vol. 203, No. 3, pp. 550-552. [in Russian].

7. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Lineinaya zadacha o razlozhenii gidratov gaza v porистой srede [Linear Problem of the Decomposition of Gas Hydrates in a Porous Medium]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza - Izvestiya Akademii Nauk USSR. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 1980, No. 1, pp. 174-177. [in Russian].

8. Bondarev E.A., Maksimov A.M., Tsypkin G.G. K matematicheskomu modelirovaniyu dissotsiatsii gazovykh gidratov [On Mathematical Modeling of the Dissociation of Gas Hydrates]. *Doklady akademii nauk SSSR - Soviet Physics. Doklady*, 1989, Vol. 308, No. 3, pp. 575-578. [in Russian].

9. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. *Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gidratov v sistemakh dobychi, transportirovki i khraneniya gaza* [Dynamics of the Formation and Decomposition of Hydrates in Gas Production, Transportation and Storage Systems]. Moscow, Nauka Publ., 2016. 240 p. [in Russian].

10. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Axisymmetric Problem of Heat and Mass Transfer in Saturated Porous Medium. *Journal of Engineering Physics*, 1980, Vol. 38, No 5, pp. 581-585. DOI: 10.1007/BF00861276.

11. Tsypkin G.G. Vliyaniye razlozheniya gazovogo gidrata na dobychu gaza iz plasta, soderzhashchego gidrat i gaz v svobodnom sostoyanii [Effect of Decomposition of a Gas Hydrate on the Gas Recovery from a Reservoir Containing Hydrate and Gas in the Free State]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza - Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 2005, No. 1, pp. 132-142. [in Russian].

12. Chiglintseva A.S., Davletshina M.R., Stolpovskii M.V. Chislennoe reshenie zadachi o razlozhenii gidrata metana pri teplovom vozeistvii [Numerical Solution of the Problem of the Decomposition of Methane Hydrate Under Thermal Action]. *Materialy XII Vserossiiskogo s"ezda «Fundamental'nye problemy teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki»: V 4 t.* [Materials of the XII All-Russian Congress «Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics»: In 4 Volumes]. Ufa, BashGU Publ., 2019, Vol. 2, pp. 1137-1139. [in Russian].

Авторы

• Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-56
e-mail: changelina@rambler.ru

• Давлетшина Миляуша Рафаэлевна, канд. физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-56
e-mail: davletshina@yandex.ru

• Столповский Максим Владимирович, канд. физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-14
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

The Authors

• Chiglintseva Angelina S., Doctor Physical and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-56
e-mail: changelina@rambler.ru

• Davletshina Milyausha R., Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-56
e-mail: davletshina@yandex.ru

• Stolpovsky Maxim V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-14
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru