РЕЖИМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА ДИОКСИДА СЕРЫ В ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ, ИЗНАЧАЛЬНО СОДЕРЖАЩЕМ МЕТАН И ВОДУ

MODES OF SULFUR DIOXIDE HYDRATE FORMATION IN A POROUS RESERVOIR INITIALLY CONTAINING METHANE AND WATER

М. К. Хасанов

Marat K. Khasanov

Стерлитамакский филиал
Башкирского государственного
университета,
г. Стерлитамак,
Российская Федерация

Sterlitamak Branch
of Bashkir State University,
Sterlitamak, Russian Federation

М. В. Столповский

Maksim V. Stolpovskii

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Представлена математическая модель инъекции жидкого диоксида серы в пористый пласт, изначально насыщенный метаном и водой. На основе численных решений построены распределения давления и температуры пласта в различные моменты времени. Показано, что при низких значениях давления инъекции образование гидрата диоксида серы происходит в режиме с формированием области, содержащей метан и его гидрат, а при высоких — без формирования последней. Исследовано влияние исходной температуры пласта и температуры инжектируемого диоксида серы на режимы образования гидрата SO_2 . Показано, что образование гидрата SO_2 происходит в режиме без формирования области, насыщенной метаном и его гидратом, как при высоких исходных температурах системы, так и при высоких температурах инжектируемого в пласт жидкого диоксида серы. Построена зависимость критической температуры инъекции, при превышении которой реализуется режим без образования области, содержащей метан и его газогидрат, от давления нагнетания SO_2 . Установлено, что режим с образованием области, насыщенной метаном и его газогидратом, характерен для случая низких значений температуры и давления инъекции.

A mathematical model of the injection of liquid sulfur dioxide into a porous reservoir, initially saturated with methane and water, is presented. Based on numerical solutions, the pressure and temperature distributions of the reservoir at various points in time are constructed. It is shown that at low injection pressures, the formation of sulfur dioxide hydrate occurs in the regime with the formation of an area containing methane and its hydrate, and high values — without the formation of the latter. The influence of the initial reservoir temperature and the temperature of injected sulfur dioxide on the formation modes of SO_2 hydrate is studied. It is shown that the formation of SO_2 hydrate occurs in the regime without the formation of an area saturated with methane and its hydrate, both at high initial temperatures of the system and at high temperatures of liquid sulfur dioxide injected into the reservoir. The dependence of the critical injection temperature, above which a regime without the formation of an area containing methane and its gas hydrate, on the injection pressure SO_2 , is built. It is established that the regime with the formation of an area saturated with methane and its gas hydrate is typical for the case of low values of injection temperature and pressure.

Ключевые слова

газогидрат диоксида серы;
вытеснение; гидрат метана;
фазовый переход

Key words

sulfur dioxide gas hydrate;
displacement; methane hydrate;
phase transition

Введение

Утилизация промышленных газов в настоящее время является одной из важных проблем экологии. Одним из эффективных способов ее решения рассматривается так называемый метод подземной консервации газов, таких как CO_2 , SO_2 , в истощенные месторождения природного газа [1, 2] с последующим переводом их в газогидратное состояние. Такая форма консервации этих газов способствует более надежному их хранению при относительно невысоких тепловых затратах. Экспериментальные работы, проведенные на образцах малого размера и показавшие возможность таких процессов, представлены, в частности, в работах [3–7]. Теоретические модели инъекции CO_2 в пласты, насыщенные метаном и водой, рассматривались в работах [8, 9]. В настоящей работе представлена математическая модель инъекции диоксида серы в истощенное месторождение природного газа. На основе модели показано, что образование гидрата диоксида серы может происходить в двух режимах: с образованием области, содержащей метан и его гидрат в состоянии термодинамического равновесия, так и в отсутствии последней. Исследуется влияние исходной температуры и температуры инъекции на режимы образования гидрата SO_2 .

Постановка задачи

На рисунке 1 приведена фазовая диаграмма системы « SO_2 — H_2O », на котором представлены термобарические условия существования газогидрата SO_2 [10]. На рисунке 1 кривая 1 соответствует трехфазному равновесию между газообразным диоксидом серы, его газогидратом и водой, кривая 2 — двухфазное равновесие между жидким и газообразным диоксидом серы, а кривая 3 — равновесие между жидкой двуокисью серы, газогидратом и водой. Газогидрат диоксида серы существует в области параметров, лежащей левее кривой 3 и выше кривой 1. В верхней квадрупольной точке Q_2 ($T_Q = 285,1$ К и $p_Q = 0,233$ МПа) жидкий и газообразный диоксид серы, а также его газогидрат и вода находятся в равновесии.

Рассмотрим пористый пласт длины L ($0 \leq x \leq L$), который в начальный момент времени насыщен метаном и водой с исходной водонасыщенностью S_0 . Положим, что в исходном состоянии температура пласта T_0 ниже температуры T_Q , соответствующей квадрупольной точке, а исходное давление p_0 соответствует термодинамическим условиям су-

Рисунок 1. Фазовая диаграмма системы « SO_2 — H_2O ».

ществования диоксида серы в жидком состоянии и его газогидрата (т.е. выше кривой 2 на рисунке 1). Следовательно, в рассматриваемом случае исходное состояние системы соответствует термобарическим условиям существования газогидрата SO_2 . Пусть через левую границу пласта ($x = 0$) непрерывно нагнетается жидкая двуокись серы, давление p_c и температура T_c которой соответствуют условиям существования газогидрата SO_2 . При указанных термобарических условиях, согласно представленной схеме, в пласте образуются две области: ближняя, содержащая жидкий SO_2 и его гидрат, и дальняя, насыщенная метаном и водой. Образование гидрата диоксида серы происходит на подвижной фронтальной поверхности, совпадающей с поверхностью вытеснения метана двуокисью серы.

Основные уравнения

Для описания процессов тепломассопереноса, сопровождающихся образованием гидрата диоксида серы, примем следующие допущения. Будем полагать, что температуры пористой среды и насыщающего вещества совпадают; скелет пористой среды, газогидрат, вода несжимаемы и неподвижны. При этом пористость является величиной постоянной, а метан и диоксид серы рассматриваются соответственно как калорически совершенный газ и упругая жидкость. Гидрат SO_2 является двухкомпонентной системой с массовой долей газа-гидратообразователя равной G .

Система основных уравнений, представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния при отмеченных выше допущениях в каждой из областей, имеет вид [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{(i)}\phi S_{(i)}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{(i)}\phi S_{(i)}v_{(i)}) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C T_{(i)}) + \rho_{(i)} C_{(i)} \phi S_{(i)} v_{(i)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} \right),$$

$$\phi S_{(i)} v_{(i)} = - \frac{k_{(i)}}{\mu_{(i)}} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\rho_s = \rho_{0s} \exp(\beta(p - p_0)), \quad \rho_g = p/R_g T.$$

Здесь нижние индексы $i = s, m$ относятся соответственно к параметрам жидкой двуокиси серы и метана; ϕ — пористость; $\rho(i), v(i), k(i), C(i)$ и $\mu(i)$ — соответственно истинная плотность, скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость i -ой фазы; p — давление; T — температура; $S(i)$ — насыщенность пор i -ой фазой; R_g — газовая постоянная метана; β — коэффициент объемного сжатия жидкого SO_2 ; ρ_{0s} — истинная плотность жидкой двуокиси серы, соответствующая давлению p_0 ; ρ_c и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы. Поскольку основной вклад в значения ρ_c и λ вносят соответствующие параметры скелета пористой среды, то будем считать их постоянными величинами.

Зависимость коэффициента фазовой проницаемости $k(i)$ от насыщенности $S(i)$ и абсолютной проницаемости k_0 зададим на основе формулы Козени [11]:

$$k_{(i)} = k_0 S_{(i)}^3 \quad (i = s, m).$$

Кроме того, представленная система уравнений (1) дополняется соотношениями на подвижной границе фазовых переходов $x = x(n)$, следующими из условий баланса масс и тепла на ней:

$$-\frac{k_s}{\mu_s} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} = \phi \left(S_s + \frac{\rho_h G}{\rho_s} S_h \right) \dot{x}_{(n)},$$

$$-\frac{k_m}{\mu_m} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} = \phi S_m \dot{x}_{(n)}, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} = \phi \rho_h L_h S_h \dot{x}_{(n)}.$$

Здесь ρ_h и L_h — соответственно плотность и удельная теплота образования гидрата SO_2 ; S_h — гидратонасыщенность; $\dot{x}_{(n)}$ — скорость движения границы фазового перехода. Нижние индексы 1 и 2 относятся к параметрам ближней и дальней областей. Поскольку исходная водонасыщенность полагалась равной S_{10} , то из условия баланса массы воды, содержащейся в гидрате, для величины S_h получим:

$$S_h = \frac{\rho_l S_{10}}{\rho_h (1 - G)},$$

где ρ_l — плотность воды.

Начальные условия, а также условия на внешних границах пласта представим в виде:

$$t = 0: \quad p = p_0, \quad T = T_0 \quad (0 \leq x \leq L);$$

$$x = 0: \quad p = p_e, \quad T = T_e \quad (t > 0); \quad (3)$$

$$x = L: \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (t > 0).$$

На основе системы (1) можно получить следующие уравнения пьезопроводности, описывающие распределения давления в ближней ($i = 1$) и дальней ($i = 2$) областях:

$$\frac{\partial p_{(1)}}{\partial t} = \frac{k_s}{\phi(1 - S_h) \rho_s \beta \mu_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_s \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_{(2)}}{\partial t} = \frac{k_m}{\phi S_m \mu_m} \frac{\partial}{\partial x} \left(p_{(2)} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} \right). \quad (5)$$

Уравнение теплопроводности (второе уравнение системы (1)) после преобразований также можно представить в виде:

$$\frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} \right) + X_{(i)} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x}, \quad (6)$$

где $\kappa^{(T)} = \lambda / \rho C$ — коэффициент температуропроводности пласта, $X_{(1)} = \frac{\kappa^{(T)} \rho_s C_s k_s}{\lambda \mu_s}$,

$$X_{(2)} = \frac{\kappa^{(T)} \rho_m C_m k_m}{\lambda \mu_m}.$$

Система уравнений (4) — (6) с начальными и граничными условиями (3), а также условиями (2) на подвижной границе фазовых переходов является замкнутой. Для ее решения используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки [12], заключающийся в том, что за неизвестный и определяемый в ходе решения задачи временной отрезок фронт фазового перехода перемещается по координатной сетке ровно на один шаг.

Анализ результатов расчетов

Полученные численные решения исследовались на выполнение условия существования в свободном состоянии в дальней области гетерогенной смеси метана и воды. Данное условие состоит в том, что локальная температура в данной области должна быть выше равновесной температуры T_r трехфазного равновесия системы «метан — гидрат метана — вода» при заданном давлении p . Для большинства гидратов равновесная температура

тура с высокой степенью точности аппроксимируется зависимостью [10]:

$$T_r = T_{r0} + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{r0}} \right), \quad (7)$$

где T_{r0} — равновесная температура, соответствующая давлению p_{r0} ; T_* — эмпирический параметр. В частности, для гидрата метана $T_{r0} = 280$ К, $T_* = 10$ К, $p_{r0} = 5,5$ МПа.

а) $p_e = 4,5$ МПа; б) $p_e = 4,2$ МПа

Рисунок 2. Распределение температуры и давления в пласте для момента времени $t = 20$ сут

На рисунке 2 приведены распределения температуры и давления в пласте для момента времени $t = 20$ сут для случая нагнетания жидкого диоксида серы под давлениями $p_e = 4,5$ МПа (рисунок 2, а) и $p_e = 4,2$ МПа (рисунок 2, б). Штриховая линия — равновесная температура гидрата метана, определяемая из условия (7). Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: $L = 50$ м; $m = 0,2$; $S_{l0} = 0,1$; $k_0 = 10^{-15}$ м²; $G = 0,372$; $\mu_s = 3,68 \cdot 10^{-4}$ Па·с; $\mu_m = 1 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $\lambda = 2$ Вт/(м·К); $\rho_c = 2 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³); $\beta_s = 1,35 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹; $\rho_h = 1390$ кг/м³; $\rho_l = 1000$ кг/м³;

$\rho_{os} = 1433$ кг/м³; $C_s = 1350$ Дж/(К·кг); $C_m = 1560$ Дж/(К·кг); $L_h = 2,62 \cdot 10^5$ Дж/кг; $p_0 = 4,1$ МПа; $T_e = 270$ К; $T_0 = 280$ К. Как следует из анализа рисунка 2, а, при высоких давлениях инъекции жидкого диоксида серы температура в области, насыщенной метаном и водой, выше равновесной температуры образования гидрата метана. Следовательно, в данном случае предложенная модель с вытеснением метана является термодинамически непротиворечивой. С уменьшением величины давления инъекции температура в дальней области, как это следует из рисунка 2, б,

опускается ниже равновесной температуры образования гидрата метана. В этом случае предложенная модель является термодинамически противоречивой. Следовательно, в этом случае необходимо рассматривать еще одну область, содержащую метан и его гидрат в состоянии термодинамического равновесия.

Для объяснения полученных из рисунка 2 закономерностей на рисунке 3 для момента времени $t = 20$ сут представлены зависимости температуры $T_{(n)}$ на границе фазового перехода и его координаты $x_{(n)}$ от давления инъекции p_e . Штриховая линия соответствует равновесной температуре для гидрата метана. Как следует из рисунка 3, с увеличением величины p_e увеличиваются как значение координаты фронта фазового перехода, так и значение температуры на ней. Это объясняется тем, что с ростом величины p_e увеличивается интенсивность фазовых переходов, которая, согласно закону Дарси, пропорциональна перепаду давления $\Delta p = p_e - p_0$ в системе. Кроме того, увеличение величины $x_{(n)}$ с ростом давления инъекции способствует уменьшению потерь тепла на фронте через левую, более холодную, границу пласта. Таким образом, уменьшение потока тепла на фронте через левую границу пласта, а также увеличение интенсивности фазового перехода, связанных с ростом величины давления инъекции, приводит к увеличению значений $T_{(n)}$. Следовательно, режим с образованием в пласте области, содержащей метан и его газогидрат, будет характерен для случаев, когда интенсивность фазовых переходов мала, т.е. для низких значений величины p_e .

На рисунке 4 для момента времени $t = 20$ сут представлены зависимости температуры на границе фазового перехода от значения температуры инъекции (рисунок 4, а) и исходной температуры пласта (рисунок 4, б). Для рисунка 4, а $p_e = 4,4$ МПа и $T_0 = 280$ К; для рисунка 4, б — $p_e = 4,55$ МПа и $T_e = 270$ К. Остальные параметры соответствуют таковым на рисунке 2. Штриховой линией обозначена равновесная температура образования гидрата метана. Как следует из рисунка 4, а, температура на границе фазового перехода монотонно возрастает в зависимости от температуры инъекции. Аналогичное увеличение температуры на границе фазового перехода, как следует из рисунка 4, б, происходит и с ростом начальной температуры пласта. Таким образом, образование гидрата SO_2 происходит

Рисунок 3. Зависимость температуры на границе фазового перехода и ее координаты от давления инъекции для момента времени $t = 20$ сут

в режиме без формирования области, насыщенной метаном и его гидратом как при высоких исходных температурах системы, так и при высоких температурах инжектируемого в пласт жидкого диоксида серы.

На рисунке 5 для момента времени $t = 100$ сут представлена зависимость критической температуры инъекции, при превышении которой реализуется режим без образования области насыщенной метаном и его гидратом, от давления нагнетания p_e жидкого SO_2 . Как следует из рисунка 5, с увеличением величины p_e значение критической температуры инъекции уменьшается. Это объясняется тем, что с ростом давления инъекции увеличивается интенсивность фазового перехода и, следовательно, температура на нем. Следовательно, в таких случаях режим без образования области, содержащей метан и его газогидрат, может реализовываться и при бо-

Рисунок 4. Зависимость температуры на границе фазовых переходов для момента времени $t = 20$ сут от температуры инъекции (а), исходной температуры пласта (б)

Рисунок 5. Зависимость критической температуры от давления инъекции для момента времени $t = 100$ сут

лее низких значениях температур нагнетания жидкого SO_2 .

Вывод

Таким образом, режим с образованием области, насыщенной метаном и его газогидратом, характерен для случая низких значений температуры и давления инъекции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00967.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Li Q., Li X., Wei N., Fang Z. Possibilities and Potentials of Geological Co-Storage CO_2 and SO_2 in China // *Energy Procedia*. 2011. Vol. 4. P. 6015–6020. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.605.
2. Anshits A., Kirik N., Shibistov B. Possibilities of SO_2 Storage in Geological Strata of Permafrost Terrain // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. 2006. Vol. 65. P. 93–102. DOI: 10.1007/1-4020-4471-2_09.
3. Ota M., Abe Y., Watanabe M., Smith Jr.R.L., Inomata H. Methane Recovery from Methane Hydrate Using Pressurized CO_2 // *Fluid Phase Equilibria*. 2005. Vol. 228–229. P. 553–559. DOI: 10.1016/j.fluid.2004.10.002.
4. Ota M., Saito T., Aida T., Watanabe M., Sato Y., Smith Jr. R.L. Macro and Microscopic CH_4 - CO_2 Replacement in CH_4 Hydrate Under Pressurized CO_2 // *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 2007. Vol. 53. No. 10. P. 2715–2721.

5. Yoon J.H., Kawamura T., Yamamoto Y., Komai T. Transformation of Methane Hydrate to Carbon Dioxide Hydrate: in Situ Raman Spectroscopic Observations // *Journal of Chemical Physics*. 2004. Vol. 108. P. 5057–5059.
6. Schicks J.M., Luzi M., Beeskow-Strauch B. The Conversion Process of Hydrocarbon Hydrates into CO_2 Hydrates and Vice Versa: Thermodynamic Considerations // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2011. Vol. 115. P. 13324–13331. DOI: 10.1021/jp109812v.
7. Lee B.R., Koh C.A., Sum A.K. Quantitative Measurement and Mechanisms for CH_4 Production from Hydrates with the Injection of Liquid CO_2 // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014. Issue 16. P. 14922–14927. DOI: 10.1039/C4CP01780C.
8. Khasanov M.K., Stolpovsky M.V., Gimaltdinov I.K. Mathematical Model for Carbon Dioxide Injection into Porous Medium Saturated with Methane and Gas Hydrate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 127. P. 21–28. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.028.

9. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Duong N.H. Theoretical Research of the Gas Hydrate Deposits Development Using the Injection of Carbon Dioxide // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 107. P. 347–357. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.034.

10. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.

11. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1982. 211 с.

12. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

REFERENCES

1. Li Q., Li X., Wei N., Fang Z. Possibilities and Potentials of Geological Co-Storage CO₂ and SO₂ in China. *Energy Procedia*, 2011, Vol. 4, pp. 6015–6020. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.605.

2. Anshits A., Kirik N., Shibistov B. Possibilities of SO₂ Storage in Geological Strata of Permafrost Terrain. *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, 2006, Vol. 65, pp. 93–102. DOI: 10.1007/1-4020-4471-2_09.

3. Ota M., Abe Y., Watanabe M., Smith Jr.R.L., Inomata H. Methane Recovery from Methane Hydrate Using Pressurized CO₂. *Fluid Phase Equilibria*, 2005, Vol. 228–229, pp. 553–559. DOI: 10.1016/j.fluid.2004.10.002.

4. Ota M., Saito T., Aida T., Watanabe M., Sato Y., Smith Jr.R.L. Macro and Microscopic CH₄-CO₂ Replacement in CH₄ Hydrate Under Pressurized CO₂. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 2007, Vol. 53, No. 10, pp. 2715–2721.

5. Yoon J.H., Kawamura T., Yamamoto Y., Komai T. Transformation of Methane Hydrate to Carbon Dioxide

Hydrate: in Situ Raman Spectroscopic Observations. *Journal of Chemical Physics*, 2004, Vol. 108, pp. 5057–5059.

6. Schicks J.M., Luzi M., Beeskow-Strauch B. The Conversion Process of Hydrocarbon Hydrates into CO₂ Hydrates and Vice Versa: Thermodynamic Considerations. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2011, Vol. 115, pp. 13324–13331. DOI: 10.1021/jp109812v.

7. Lee B.R., Koh C.A., Sum A.K. Quantitative Measurement and Mechanisms for CH₄ Production from Hydrates with the Injection of Liquid CO₂. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, Issue 16, pp. 14922–14927. DOI: 10.1039/C4CP01780C.

8. Khasanov M.K., Stolpovsky M.V., Gimaltdinov I.K. Mathematical Model for Carbon Dioxide Injection into Porous Medium Saturated with Methane and Gas Hydrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, Vol. 127, pp. 21–28. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.028.

9. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Duong N.H. Theoretical Research of the Gas Hydrate Deposits Development Using the Injection of Carbon Dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 107, pp. 347–357. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.034.

10. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnnykh usloviyakh* [Natural Gas Hydrates]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 236 p. [in Russian].

11. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkostei i gazov v prirodnnykh plastakh* [The Movement of Liquids and Gases in Natural Reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 211 p. [in Russian].

12. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational Heat Transfer]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 784 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Хасанов Марат Камилович, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой прикладной информатики и программирования, БашГУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Marat K. Khasanov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Applied Informatics and Programming Department, BashSU, Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: hasanovmk@mail.ru

Столповский Максим Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Maksim V. Stolpovskii, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru