

ISSN: 2658-5782

Номер 2

Апрель-Июнь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Математическая модель распространения многофазного течения для случая повреждения подводного трубопровода¹

Кильдибаева С.Р., Далинский Э.Т., Кильдибаева Г.Р.

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, Стерлитамак

В работе рассматривается модель течения углеводородов из поврежденного подводного трубопровода, через который транспортируются нефть и сопутствующий газ. Процесс миграции нефти и газа описывается течением многофазной затопленной струи. Известны температура истекающих из трубопровода углеводородов, их начальная скорость, температура окружающей воды и глубина пролегания трубопровода. Рассматриваются два случая различных начальных параметров истечения углеводородов из трубопровода. В первом случае термобарические условия окружающей среды отвечают условиям образования и стабильного существования гидрата. Такой случай соответствует условиям истечения углеводородов в Мексиканском заливе. Во втором случае гидрат не образуется. Такие истечения соответствуют случаям транспортировки нефти по трубопроводам в Балтийском море (например, «Северный поток–2»). Для процесса гидратообразования характерна следующая динамика изменения пузырька: сначала он будет полностью газовым, затем на его поверхности начнет образовываться гидратная оболочка (композитный пузырек), затем пузырек полностью станет гидратным, что является завершающим этапом. Для моделирования динамики распространения струи углеводородов рассмотрен интегральный Лагранжевый метод контрольного объема, согласно которому струя рассматривается в виде последовательности контрольных объемов. При моделировании течения струи учитываются законы сохранения массы, импульса и энергии для компонент, входящих в контрольный объем. Уравнения записаны с учетом возможного образования гидрата. В работе получены теплофизические характеристики углеводородов, поступающих из поврежденного трубопровода, для случаев глубоководного и мелководного пролегания трубопровода. Проанализированы траектории миграции углеводородов, зависимость температуры и плотности струи от вертикальной координаты.

Ключевые слова: углеводороды, разлив нефти, разрыв трубопровода, нефть, метан, гидратообразование, гидрат

1. Введение

Уменьшение запасов нефти и газа в недрах континента приводит к увеличению добычи углеводородов на дне Мирового океана [1]. Такой метод добычи увеличивает риски возникновения аварийных ситуаций, последствиями которых являются разлив нефти и последующее загрязнение водоема, гибель флоры и фауны региона [2, 3]. К таким же

последствиям может приводить транспортировка углеводородов с использованием подводных трубопроводов. При разрыве трубопровода нефть и газ также могут попадать в водоем.

Для случая миграции углеводородов из поврежденной скважины или при разрыве трубопровода примем, что течение происходит в виде затопленной струи [4]. Пусть в начальный момент известны температура истекающих из трубопровода углеводородов, их начальная скорость, температура окружающей воды и глубина пролегания трубопровода. В зависимости от глубины пролегания и условий окружающей среды возможны различные варианты состава струи. В работе рассматривается два случая различных начальных параметров ис-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-31-00264 мол_а).

течения углеводородов из трубопровода. В первом случае термобарические условия окружающей среды отвечают условиям образования и стабильного существования гидрата. Такой случай соответствует случаям разливов углеводородов в Мексиканском заливе. Во втором случае термобарические условия окружающей среды отвечают условиям, когда течение происходит без фазовых переходов и на поверхности газовых пузырьков не образуется гидратная оболочка. Такой случай соответствует возможному разливу, возникающему при повреждении трубопровода, который транспортирует углеводороды в Балтийском море (например, трубопровод «Северный поток-2»).

Для моделирования динамики распространения струи углеводородов будет рассмотрен интегральный Лагранжевый метод контрольного объема (ИЛМКО), согласно которому струя рассматривается в виде последовательности элементарных контрольных объемов (КО) [5–7]. ИЛМКО дополнен соотношениями, соответствующими процессу образования гидрата. При моделировании течения струи учитываются законы сохранения массы, импульса и энергии для компонент, входящих в контрольный объем.

В связи с увеличением объемов добычи нефти в глубоководных месторождениях Мирового океана возрастает вероятность разливов нефти в океан. Зачастую такие разливы носят техногенный характер — повреждение скважин, нефтепроводов и буровых установок. Причиной разлива может стать коррозия трубопровода, механическое повреждение нефтедобывающей конструкции, пожар и т.д. Разливы нефти в Мексиканском заливе на платформах *Deerwater Horizon*, *Ixtoc-1*, а также в заливе Аляска *Eхxon Valdez* являются яркими примерами, которые свидетельствуют о необходимости изучения методов устранения утечек. За последнее десятилетие в результате аварий по всему миру в Мировой океан вылилось более 1 миллиарда галлонов нефти, что свидетельствует о серьезном масштабе проблемы.

В связи с возможными утечками углеводородов в воды Мирового океана существует необходимость исследования особенностей распространения нефтепродуктов. Прогноз миграции нефтепродуктов позволит сократить время ликвидации утечки. Для этого важно изучать особенности распространения нефти и сопутствующего газа, их взаимодействие с окружающей водой, а также исследовать влияние подводных течений на распространение нефти в окружающей среде. Для анализа распространения траектории струи, прогнозирования ее поведения и теплофизических ха-

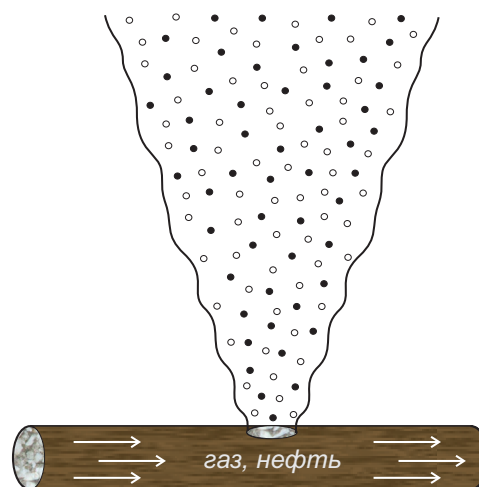


Рис. 1. Схема течения углеводородов в виде затопленной струи при повреждении подводного трубопровода

рактеристик был использован ИЛМКО. Согласно методике расчета струи представляется в виде последовательности КО, каждый из которых характеризуется показателями температуры, скорости, плотности, расположения в пространстве, а также объемному содержанию каждой из компоненты в струе. Зная изменения данных параметров от вертикальной координаты, получим сведения о распространении струи.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Примем, что на дне водоема существует некоторый источник истечения нефтепродуктов (рис. 1). Возникновение источника имеет техногенный характер и может быть вызвано разрывом трубопровода или аварией на нефтедобывающей конструкции. В качестве начальных параметров, описывающих течение струи, используются параметры радиуса источника (r), температура поступающих из источника углеводородов (T^e), объемные расходы поступающих углеводородов (Q_o^e, Q_g^e), температура и скорость течения окружающей среды (T_w, \vec{V}_w). В рамках модели условимся, что нефть распространяется в виде капель, а газ — в виде пузырьков. Под действием течения окружающей среды струя может отклоняться, а пузырьки газа (гидрата) покидать пределы струи.

Для моделирования распространения многофазной струи используем следующую систему уравнений:

$$\frac{dM}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_{com} Q^f, \quad (1)$$

$$\rho = \sum_i \alpha_i \rho_i, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad \alpha_i = V_{ki}/V_k,$$

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs}, \quad (2)$$

$$c = \sum_i \chi_i c_i, \quad \chi = M_i/M,$$

$$J_g = G \cdot J_h, \quad J_w = (1 - G)J_h, \quad J_h = N4\pi a_{gh}^2 j_h, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = w, \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}(Mu) = u_w \rho_w Q_w - u \rho_{com} Q^f,$$

$$\frac{d}{dt}(Mv) = v_w \rho_w Q_w - v \rho_{com} Q^f,$$

$$\frac{d}{dt} = [(M_w + M_o)w + (M_g + M_h) \cdot (w + w_b)] = \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &= w_w \rho_w Q_w - (w + w_b) \rho_w Q^f + \\ &+ (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g + \\ &+ (\rho_w - \rho_{com}) \pi b^2 h (\alpha_g + \alpha_h) g. \end{aligned}$$

Здесь V_k — контрольный объем; M — масса КО; b , h — радиус и высота КО; Q_w — объемный расход вовлеченной в струю окружающей воды; Q^f — объемный расход газа/гидрата, «покидающий» КО в связи с искривлением струи; j_h — интенсивность образования гидрата, отнесенная к площади поверхности пузырька; g — сила тяжести; w_b — скорость пузырька; J_i — интенсивности воды, газа и гидрата при образовании гидрата; G , — гидратное число; a_{gh} , ρ_{com} , N — радиус, плотность и количество пузырьков в КО; V_{ki} — объем; $\chi_i = M_i/M$ — массовое содержание; M_i — масса; ρ_i — плотность; α_i — объемное содержание; c_i — теплоемкость i -й компоненты в КО; нижние индексы ($i = o, g, h, w$) соответствуют нефти, газу, гидрату и воде.

Система уравнений (1)–(5) включает в себя уравнение сохранения масс, энергии, импульсов, а также вспомогательные соотношения, описывающие процесс гидратообразования и изменения пространственных КО в пространстве.

3. Результаты расчетов

Результаты расчетов приведены для двух случаев. Первый случай отвечает условиям стабильного существования гидрата. Второй случай соответствует истечению углеводородов без фазовых переходов и соответственно гидратообразования. Линейные размеры цилиндрического контрольного объема (радиус и высота) в начальный момент

времени соответствуют радиусу источника, из которого поступают нефть и газ.

Начальные параметры для случая глубоководного разлива: $r = 0.2$ м, $T^e = 80^\circ\text{C}$, $Q_o^e = 0.5$ м³/с, $Q_g^e = 0.5$ м³/с, $T_w = 10^\circ\text{C}$, $V_w = 0$ м/с, $\rho_o = 650$ кг/м³, $\rho_h = 910$ кг/м³, $\rho_w = 1010$ кг/м³, $\rho_g = 99.25$ кг/м³, $a_o = 10^{-3}$ м, $p_0 = 15$ МПа. Глубина разлива $h_z = 1500$ м, температура окружающей воды 4°C .

Начальные параметры для случая мелководного разлива: $r = 0.2$ м, $T^e = 60^\circ\text{C}$, $Q_o^e = 0.1$ м³/с, $Q_g^e = 0.1$ м³/с, $T_w = 10^\circ\text{C}$, $V_w = 0$ м/с, $\rho_o = 850$ кг/м³, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $\rho_g = 7.3$ кг/м³, $a_o = 10^{-3}$ м, $p_0 = 1$ МПа. Глубина разлива $h_z = 100$ м, температура окружающей воды 10°C .

На рис. 2 представлены траектории струи для двух случаев. Здесь и далее фрагмент (а) соответствует случаю, когда течение струи происходит в условиях стабильного существования гидрата,

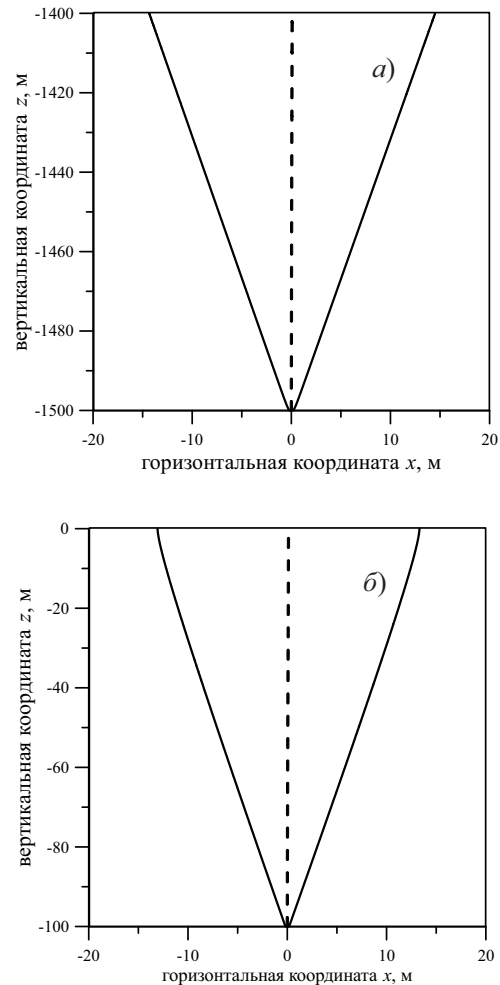


Рис. 2. Траектория струи для случая глубоководного (а) и мелководного (б) разливов

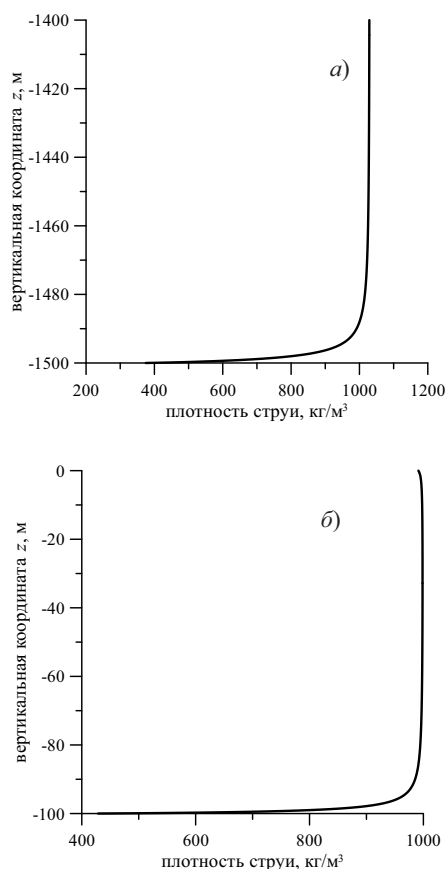


Рис. 3. Плотность струи для случая глубоководного (а) и мелководного (б) разливов

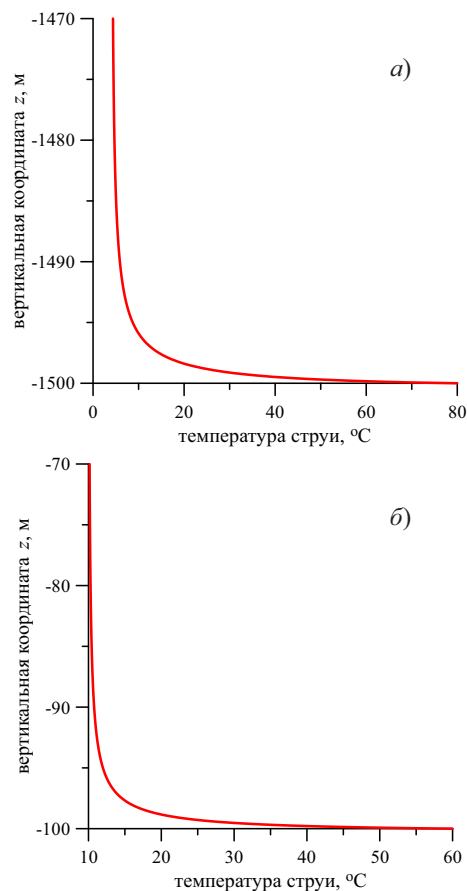


Рис. 4. Температура струи для случая глубоководного (а) и мелководного (б) разливов

фрагмент (б) — случаю мелководного разлива, когда давление и температура не соответствуют условиям стабильного существования гидрата. Таким образом, в первом случае в составе струи помимо капель нефти, пузырьков газа и вовлеченной в струю воды, присутствуют композитные пузырьки (пузырьки метана, на которых начинается гидратообразование). Для описания процесса гидратообразования принята модель, основанная на диффузионном переносе газа через гидратную оболочку. Более подробно модель описана в работах [8, 9]. На рис. 2 видно, что для каждого случая траектория струи расширяется. Это связано с взаимодействием с окружающей водой и процессом «захвата» окружающей воды в струю. Степень расширения радиуса струи зависит от скорости струи, состава компонентов струи, наличия образования гидрата.

На рис. 3 представлена зависимость плотности струи от вертикальной координаты. Начальное значение плотности струи зависит от объемных

расходов компонентов струи, поступающих из поврежденного трубопровода. Значение плотности струи возрастает с увеличением объема воды, вовлекаемой в струю из окружающей воды. Так, плотность струи возрастает до значения, соответствующего плотности окружающей воды: до 1030 kg/m^3 для первого случая (а) и до 1010 kg/m^3 для второго случая (б).

На рис. 4 представлена зависимость температуры струи от вертикальной координаты. Согласно графикам наблюдается уменьшение температуры струи в связи с взаимодействием с более холодной окружающей водой. Температура струи уменьшается до температуры окружающей среды.

4. Выводы

В работе рассмотрена модель течения углеводородов для двух случаев: случай, когда глубина пролегания трубопровода соответствует условиям стабильного существования гидрата (глубоковод-

ный случай) и случай, когда глубина пролегания трубопровода не соответствует условиям гидратообразования (мелководный случай). Первый случай отвечает условиям добычи и транспортировки в Мексиканском заливе, второй случай — транспортировке углеводородов через трубопроводы в Балтийском море (например, «Северный поток-2»).

Исследованы особенности распространения углеводородов для каждого из случаев, получены траектории струи, зависимости теплофизических параметров струи по вертикальной координате от начальных условий пролегания трубопровода.

Список литературы

- [1] Akhmetov R.R., Krainov S.A. Oil spills from offshore drilling and development: causes and effects on plants and animals // *European Science*. 2017. № 8(30). С. 16–21.
<https://cyberleninka.ru/article/n/17902399>
- [2] Богоявленский В.И., Баринев П.С., Богоявленский И.В. Катастрофа в мексиканском заливе на месторождении Ixtoc комплекса Cantarell // *Бурение и нефть*. 2018. № 1. С. 3–13.
<https://burneft.ru/archive/issues/2018-01/3>
- [3] Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Катастрофический разлив нефти в мексиканском заливе в апреле–мае 2010 г. // *Исследование Земли из космоса*. 2010. № 6. С. 67–72.
<http://naukarus.com/katastroficheskiy-razliv-nefti-v-meksikanskom-zalive-v-aprele-mae-2010-g>
- [4] Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 1. С. 79–88.
https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=172742&ARTICLE_ID=172749
- [5] Yapa P.D. Final Report Submitted to The Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology (CICEET) Project Title: A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills. 2003. P. 1–18.
<https://crrc.unh.edu/sites/crrc.unh.edu/files/yapa-ciceet-final-pp1-18.pdf>
- [6] Yapa P.D., Zheng L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: model development // *Journal of hydraulic research, international association of hydraulic research, The Netherlands*. 1997. Vol. 35, № 5. P. 673–688.
[DOI: 10.1080/00221689709498401](https://doi.org/10.1080/00221689709498401)
- [7] Chen F., Yapa P.D. Three-dimensional visualization of multi-phase (oil/gas/hydrate) plumes // *Environmental Modelling & Software*. 2004. V. 19, No. 7–8. Pp. 751–760.
[DOI: 10.1016/j.envsoft.2003.08.008](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.08.008)
- [8] Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И. Образование и разложение газогидратных включений при миграции в воде // *Теплофизика и аэромеханика*. 2014. Т. 21, № 3. С. 355–364.
<https://www.sibran.ru/upload/iblock/ef2/ef2873e7e9f36ed1a13028edb003dd6b.pdf>
- [9] Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. О Механизмах роста гидратной оболочки на поверхности всплывающих газовых пузырьков // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2015. № 3. С. 73–86.
[DOI: 10.17223/19988621/35/10](https://doi.org/10.17223/19988621/35/10)



Mathematical model of multiphase flow propagation for the case of underwater pipeline damage

Kildibaeva S.R., Dalinskij E.T., Kildibaeva G.R.

Sterlitamak Branch of Bashkir State University, Sterlitamak

The paper deals with the case of damage to the underwater pipeline through which oil and associated gas are transported. The process of oil and gas migration is described by the flow of a multiphase submerged jet. At the initial moment, the temperature of the incoming hydrocarbons, their initial velocity, the temperature of the surrounding water, the depth of the pipeline is known. The paper considers two cases of different initial parameters of hydrocarbon outflow from the pipeline. In the first case, the thermobaric environmental conditions correspond to the conditions of hydrate formation and stable existence. Such a case corresponds to the conditions of the hydrocarbons flow in the Gulf of Mexico. In the second case, hydrate is not formed. Such flows correspond to the cases of oil transportation through pipelines in the Baltic sea (for example, Nord stream–2). The process of hydrate formation will be characterized by the following dynamics of the bubble: first, it will be completely gas, then a hydrate shell (composite bubble) will begin to form on its surface, then the bubble will become completely hydrate, which will be the final stage. The integral Lagrangian control volume method will be considered for modeling the dynamics of hydrocarbon jet propagation. According to this method, the jet is considered as a sequence of elementary volumes. When modeling the jet flow, the laws of conservation of mass, momentum and energy for the components included in the control volume are taken into account. The equations are used taking into account the possible formation of hydrate. Thermophysical characteristics of hydrocarbons coming from the damaged pipeline for cases of deep-water and shallow-water pipeline laying are obtained. The trajectories of hydrocarbon migration, the dependence of the jet temperature and density on the vertical coordinate are analyzed.

Keywords: hydrocarbons, oil spill, pipeline rupture, oil, methane, hydrate formation, hydrate

References

- [1] Akhmetov R.R., Krainov S.A. Oil spills from offshore drilling and development: causes and effects on plants and animals // European Science. 2017. № 8(30). C. 16–21.
<https://cyberleninka.ru/article/n/17902399>
- [2] Bogoyavlenskij V.I., Barinov P.S., Bogoyavlenskij I.V. Katastrofa v meksikanskom zalive na mestorozhdenii Ixtoc kompleksa Cantarell [Katastrofa v meksikanskom zalive na mestorozhdenii Ixtoc kompleksa Cantarell]. Burenie i neft – Drilling and oil. 2018. No. 1. Pp. 3–13 [in Russian].
<https://burneft.ru/archive/issues/2018-01/3>
- [3] Lavrova O.YU., Kostyanov A.G. Katastroficheskiy razliv nefti v meksikanskom zalive v aprele-mae 2010 g [Catastrophic oil spill in the Gulf of Mexico in May–April 2010]. Issledovanie Zemli iz kosmosa – Earth exploration from space. 2010. No. 6. Pp. 67–72 [in Russian].
<http://naukarus.com/katastroficheskiy-razliv-nefti-v-meksikanskom-zalive-v-aprele-mae-2010-g>
- [4] Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model of a submerged jet accounting for two limiting schemes of hydrate formation // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. Vol. 25, No. 1. Pp. 75–83.
DOI: 10.1134/s0869864318010079
- [5] Yapa P.D. Final Report Submitted to The Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology (CICEET) Project Title: A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills. 2003. Pp. 1–18.
<https://crrc.unh.edu/sites/crrc.unh.edu/files/yapa-ciceet-final-pp1-18.pdf>
- [6] Yapa P.D., Zheng L. Simulation of oil spills from underwater accidents I: model development // Journal of hydraulic research, international association of hydraulic research, The Netherlands. 1997. Vol. 35, № 5. Pp. 673–688.
DOI: 10.1080/00221689709498401
- [7] Chen F., Yapa P.D. Three-dimensional visualization of multiphase (oil/gas/hydrate) plumes // Environmental Modelling & Software. 2004. V. 19, No. 7–8. Pp. 751–760.
DOI: 10.1016/j.envsoft.2003.08.008
- [8] Shagapov V.S., Tazetdinov B.I. Formation and dissociation of gas hydrate inclusions during migration in water // Thermophysics and Aeromechanics. 2014. Vol. 21, No. 3. Pp. 337–345.
DOI: 10.1134/S086986431403007X
- [9] SHagapov V.SH., CHiglinceva A.S., Rusinov A.A. O Mekhanizmah rosta gidratnoj obolochki na poverhnosti vsplyvayushchih gazovyh puzyrkov [The dynamics of a multiphase jet stream, taking into account the flow of the surrounding water]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics. 2015. No. 3. Pp. 73–86 [in Russian].
DOI: 10.17223/19988621/35/10