

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЛИКВИДАЦИИ ГЛУБОКОВОДНЫХ УТЕЧЕК УГЛЕВОДОРОДОВ, КОТОРЫЕ СОПРОВОЖДАЮТСЯ ОБРАЗОВАНИЕМ ГИДРАТОВ

ON THE SPECIFICS OF ELIMINATING DEEP-SEA HYDROCARBON LEAKS ACCOMPANIED BY HYDRATES FORMATION

С. Р. Кильдибаева
Svetlana R. Kildibaeva

Башкирский государственный университет, филиал,
г. Стерлитамак,
Республика Башкортостан,
Российская Федерация

Bashkir State University,
Branch, Sterlitamak,
Republic of Bashkortostan,
Russian Federation

Г. Р. Кильдибаева
Gulnaz R. Kildibaeva

Башкирский государственный университет, филиал,
г. Стерлитамак,
Республика Башкортостан,
Российская Федерация

Bashkir State University,
Branch, Sterlitamak,
Republic of Bashkortostan,
Russian Federation

А. С. Чиглинцева
Angelina S. Chiglintseva

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

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Работа посвящена особенностям ликвидации глубоководных утечек, возникающих при разработке нефтегазовых месторождений. Рассмотрены основные способы ликвидации утечек, проанализированы достоинства и недостатки различных подходов, особое внимание уделено одному из наиболее перспективных способов механического сбора углеводородов — куполу-сепаратору, который может быть установлен непосредственно над местом разлива. Установка купола-сепаратора способна не только устранить утечку углеводородов, но и продолжить разработку месторождения, откачивая накопленные углеводороды с помощью трубок.

Особенностью работы является рассмотренный случай поступления углеводородов из поврежденной скважины или трубопровода под углом к горизонту. Ранее рассматривался только случай вертикального поступления углеводородов. Для случая течения углеводородов под углом к горизонту проанализированы теплофизические параметры струи и траектория струи. Для рассмотренного случая рассмотрена возможность установки купола-сепаратора. Рассмотрен процесс накопления углеводородов в куполе, получена зависимость температуры нефти от времени. Процесс распространения затопленной струи и накопления углеводородов рассмотрен с учетом возможного образования гидратов. Для процесса гидратообразования будет характерна следующая динамика изменения пузырька: сначала он будет полностью газовым, затем на его поверхности начнет образовываться гидратная оболочка (композитный пузырёк), затем пузырек полностью станет гидратным, что станет завершающим этапом. Для моделирования динамики распространения струи углеводородов рассмотрен интегральный Лагранжевый метод контрольного объёма (ИЛМКО), согласно которому струя рассматривается в виде последовательности элементарных объёмов. ИЛМКО дополнен соотношениями, соответствующими процессу образования гидрата. При моделировании течения струи учитываются законы сохранения массы, импульса и энергии для компонент, входящих в контрольный объём.

The work is devoted to the features of deep-water leak elimination that occur during the development of oil and gas fields. The main ways to eliminate leaks are considered, the advantages and disadvantages of various approaches are analyzed, and special attention is paid to one of the most promising methods of mechanical collection of hydrocarbons

Ключевые слова

газовые гидраты; нефть; разливы нефти; образование гидратов; ликвидация разлива

Key words

gas hydrates; oil; oil spills; hydrate formation; spill response

– a dome separator that can be installed directly above the spill site. The installation of a dome separator can not only eliminate the leakage of hydrocarbons, but also continue the development of the field, pumping out the accumulated hydrocarbons using pipes.

A special feature of the work is the considered case of the receipt of hydrocarbons from a damaged well or pipeline at an angle to the horizon. Previously, only the case of vertical supply of hydrocarbons was considered. For the case of hydrocarbon flow at an angle to the horizon, the thermophysical parameters of the jet and the jet trajectory are analyzed. For the considered case, the possibility of installing a dome-separator is considered. The process of accumulation of hydrocarbons in the dome is considered, and the dependence of oil temperature on time is obtained. The process of propagation of a submerged jet and accumulation of hydrocarbons is considered taking into account the possible formation of hydrates. The process of hydrate formation will be characterized by the following dynamics of changes in 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 completely become hydrated, which will be the final stage. To model the dynamics of hydrocarbon jet propagation, the integral Lagrangian control volume method is considered, according to which the jet is considered as a sequence of elementary volumes. The method is supplemented with ratios corresponding to the process of hydrate formation. 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.

Введение

Изучение проблем глубоководной добычи полезных ископаемых, таких как нефть, газ и газовые гидраты, с каждым годом становится всё более актуальной. Актуализация проблемы связана с уменьшением объемов добычи углеводородов традиционными способами, что вызвано уменьшением их запасов. В связи с этим перед учёными ставится новая задача — поиск инновационных способов добычи углеводородов. Одним из таких способов является добыча нефти, газа и гидратов из залежей на дне Мирового океана. Положительной стороной таких методов является то, что эти залежи практически нетронуты, и в случае удачно разработанный методики добычи о проблеме иссекающих недр можно будет забыть на некоторое время. Отрицательной стороной является опасность разливов углеводородов в океан, что негативно влияет на район разлива, отравляя флору и фауну на многие километры вокруг.

О способах ликвидации разливов

Причинами разливов углеводородов в водоем могут быть: аварийное повреждение скважины (добывающей, разведочной, наблюдательной или нагнетательной), повреждение подводного трубопровода, крушение танкера, нарушение герметичности нефтехранилища и т.д. Как показывает практика, почти все этапы добычи, хранения и транспортировки углеводородов в нефтяной отрасли сопровождаются авариями.

В статье будут рассмотрены случаи, когда разлив нефти происходит на большой глубине

в результате повреждения скважины или трубопровода, когда в составе вытекающей смеси присутствуют как нефть, так и газ, а условия окружающей среды соответствуют условиям стабильного существования гидрата. Разливы такого рода являются результатом разработки глубоководных залежей. Условия добычи на большой глубине при высоких давлениях требуют особого внимания к соблюдению правил эксплуатации оборудования, своевременной проверке изношенности оборудования, соблюдению технологии добычи и оперативному реагированию в случае, если случилась авария или разлив. Несоблюдение описанных норм эксплуатации может привести к разливу нефтепродуктов, ликвидация которых крайне сложный процесс в условиях большой глубины водоема.

Для ликвидации утечек углеводородов в водоеме в первую очередь применяются методы по локализации разлива. Так или иначе, в случае разлива часть нефтепродуктов попадет в водоем, поэтому важно хотя бы уменьшить объем территории, которую занимает нефть, т.е. локализовать разлив. Для ликвидации разлива используются следующие методы:

- механический;
- биологический;
- физико-химический;
- термический.

При механическом способе ликвидации сбор нефти осуществляется с использованием

специальных устройств [1, 2]. Биологический метод подразумевает использование микроорганизмов, а физико-химический — применение диспергентов. В случае применения термического метода нефть поджигают. Практика разливов показывает, что использование только одного метода не позволяет достичь хороших результатов. Так, например, для использования термического метода слой нефти должен быть достаточно большим в случае тонкой пленки он не применим. С точки зрения экологии, самыми безопасными остаются механические способы сбора нефти.

Использование купола-сепаратора для механического сбора углеводородов

Одним из механических методов устранения утечки является установка купола-сепаратора над местом разлива. Разлив нефти в Мексиканском заливе (Deerwater Horizon, 2010 г.) показал, как важна быстрая локализация и ликвидация разлива. На момент разлива общественность впервые столкнулась с такой проблемой, отсутствовали быстрые и качественные методы устранения разлива, вследствие чего устранение разлива заняло более 5 мес., а в океан вылилось более 5 млн баррелей нефти [3]. Позднее появились модели по прогнозированию такого рода утечек, математические модели устройств, предназначенных для сбора углеводородов, и другие идеи для сбора нефти. Одним из наиболее привлекательных для учёных способов является установка устройства — купола-сепаратора для сбора углеводородов. Его преимуществом является не только сбор нефтепродуктов, но и возможность дальнейшей разработки месторождения. В работах [1, 2] рассматривается купол из полиуретана, который обладает рядом преимуществ: мобильность транспортировки, легкая установка, относительно низкая стоимость производства. Такое устройство накапливает внутри все компоненты смеси, поступающей из скважины, которые расслаиваются внутри купола, что позволяет установить трубки и откачивать каждую из них по отдельности.

При разливе нефти в Мексиканском заливе также одним из вариантов устранения утечки являлась установка купола. Температура и давление окружающей среды таковы, что соответствуют условиям стабильного существования гидрата. Попытка установки железобетонного купола над местом разлива была безуспешной вследствие накопления внутри

купола газовых гидратов — соединений, образованных из сопутствующего газа и окружающей воды. Гидратные пузырьки внутри купола придавали конструкции нежелательную плавучесть, из-за чего купол невозможно было зафиксировать, и он постоянно всплывал.

Согласно постановке задачи, в начальный момент известны объемные расходы нефти и газа, поступающих из скважины, их температура и температура окружающей среды. Для моделирования распространения углеводородов рассматривается математическая модель затопленной струи, более подробно описанная в работах [1, 4–8]. С течением времени температура струи уменьшается, и на поверхности пузырьков газа начинают образовываться газовые гидраты. Со временем пузырьки газа полностью переходят в гидратное состояние. Во избежание проблемы накопления гидратных пузырьков внутри купола, его стенки можно прогревать. Повышение температуры спровоцирует нарушение термобарических условий стабильного существования гидрата, и купол-сепаратор будет успешно зафиксирован и будет производить сбор нефтепродуктов.

Основные уравнения

Для моделирования распространения многофазной струи использована следующая система уравнений:

$$\frac{dM}{dt} = \rho_w Q_w - \rho_g Q^f, \quad \rho = \sum_i \alpha_i \rho_i, \quad (1)$$

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

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w, \quad c = \sum_i \chi_i c_i, \quad \chi_i = M_i / M, \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = w, \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v, \quad (3)$$

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

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

$$\frac{d}{dt}[(M_w + M_o)w + M_g \cdot (w + w_g)] = \quad (4)$$

$$= w_w \rho_w Q_w - (w + w_b) \rho_g Q^f +$$

$$+ (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g +$$

$$+ (\rho_w - \rho_g) \pi b^2 h \alpha_g g.$$

Здесь и далее нижние индексы ($i = o, g, w$) соответствуют нефти, газу и воде; r — радиус повреждения трубопровода; Q_o^e, Q_g^e — объемные расходы поступающих углеводородов;

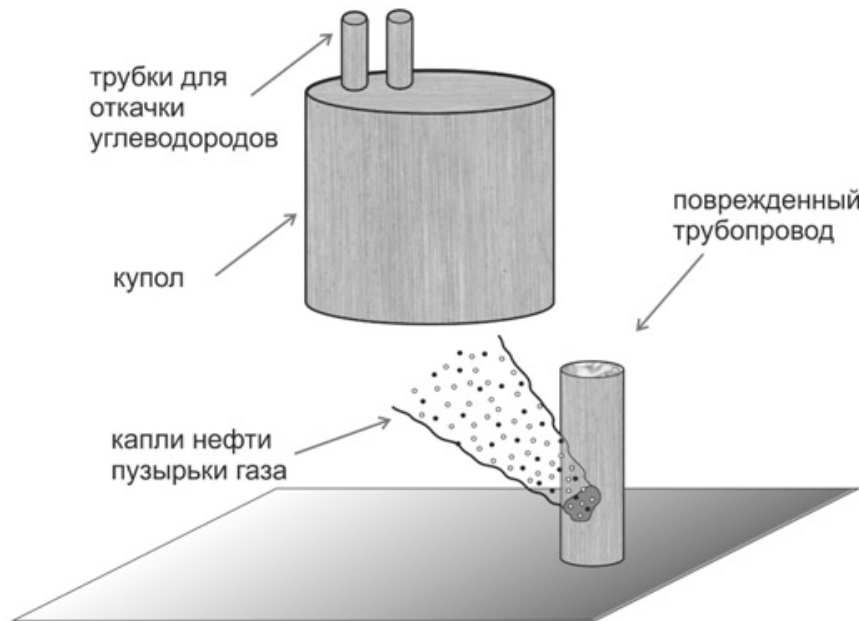


Рисунок 1. Схема течения углеводородов в виде затопленной струи и накопления в куполе-сепараторе при повреждении подводного трубопровода

T_w и \vec{V}_w — температура и скорость течения окружающей среды; V_k — контрольный объем; b и h — радиус и высота КО; ρ_i — плотность; α_i — объемное содержание; c_i — теплоемкость i -й компоненты в КО.

Система уравнений (1)–(4) включает в себя уравнение сохранения масс, энергии, импульсов, а также уравнение, описывающее динамику изменения пространственных координат КО в пространстве.

Дополним систему (1)–(4) следующими уравнениями, описывающими процесс отделения пузырьков из струи и вовлечения окружающей воды в струю:

$$Q^f = J^f \frac{4}{3} \pi a_g^3, \quad (5)$$

$$Q_w = 2\pi b h \alpha \left| \|\vec{V}\| - V_w' \right|, \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt{2} \left(0.057 + \frac{0.554 \sin \varphi}{E^2 Fr^2} \right) \left(1 + 5 \frac{V_w'}{\|\vec{V}\| - V_w'} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где J^f — поток пузырьков, покидающих КО, Fr — число Фруда, определяющееся следующим образом.

Для описания процесса накопления углеводородов в устройстве для сбора рассмотрим систему уравнений, включающую уравнения сохранения масс и энергии для накопленных компонентов. Система уравнений (7)–(9) описывает процесс накопления углеводородов:

$$\frac{dM_g}{dt} = 0, \quad \frac{dM_o}{dt} = m_o^+ - m_o^-, \quad (7)$$

$$m_o^+ = \rho_o Q_o^+, \quad m_o^- = \rho_o Q_o^-,$$

$$\frac{dM_h}{dt} = m_h^+, \quad m_h^+ = \rho_{com} Q_g,$$

$$\frac{dU_o}{dt} = -S_d q_{ho} - S_d q_{ow} + c_o m_o^+ T_o^+ - c_o m_o^- T_o^-, \quad (8)$$

$$U_o = c_o M_o T_o,$$

$$\frac{dU_g}{dt} = -S_d q_{gh} + c_g m_g^+ T_g^+ - c_g m_g^- T_g^-, \quad (9)$$

$$U_g = c_g M_g T_g,$$

верхние индексы «+» и «-» относятся к накопленным и откачиваемым углеводородам; m_i — массовый расход; M_i — масса; Q_i^j — объемный расход поступающего и откачиваемого дизельного топлива, $S_i^{(e)}$ — площадь поверхности купола; T_i^+ — температура поступающих из струи углеводородов для i -й компоненты; $q_i^{(e)}$ — поток тепла, уходящий из слоя i -й компоненты через стенку купола, q_{ho} , q_{gh} , q_{ow} — потоки тепла между слоями. Методика расчетов тепловых потоков более подробно приведена в работе [1].

Результаты расчетов

Результаты расчетов приведены для следующих начальных параметров в случае глубо-

ководного разлива: $r = 0.1$ м, $T^e = 80$ °С, $Q_o^e = 0.2$ м³/с, $Q_g^e = 0.2$ м³/с, $V_w = 0.1$ 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 пролегания трубопровода $h = 1500$ м, температура окружающей воды 4 °С. Высота, на которой закреплен купол $h^* = 3$ м, высота купола 7 м, радиус купола 2 м. Радиус купола должен быть строго больше радиуса струи, чтобы углеводороды могли полностью накапливаться внутри купола.

На рисунке 2 представлена зависимость температуры струи от вертикальной координаты. Согласно графику, наблюдается уменьшение температуры струи в связи с взаимодействием с более холодной окружающей водой. Температура струи уменьшается до температуры окружающей среды.

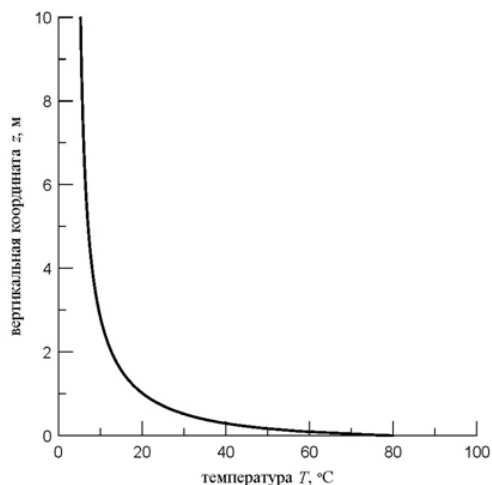


Рисунок 2. Температура струи для случая глубоководного разлива

На рисунке 3 представлена температура слоя нефти, накапливающегося внутри купола. Начальная температура слоя нефти соответствует температуре струи. В связи с тем что температура струи с увеличением вертикальной координаты понижается, начальная температура накопления слоя нефти $T_o = 5.2$ °С. С течением времени температуры слоев стремятся к температуре углеводородов, приходящих из струи на высоте $z_{ow} = z_o$, соответственно $T = 9.5$ °С.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. К теории накопления углеводородов в куполе, применяемом для ликвидации техногенного разлива на дне океана // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 1. С. 260–265.
2. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Теоретическая модель накопления углеводородов в куполе с учётом гидратообразования, лимитирующегося теплообменом // Известия Томского политехнического

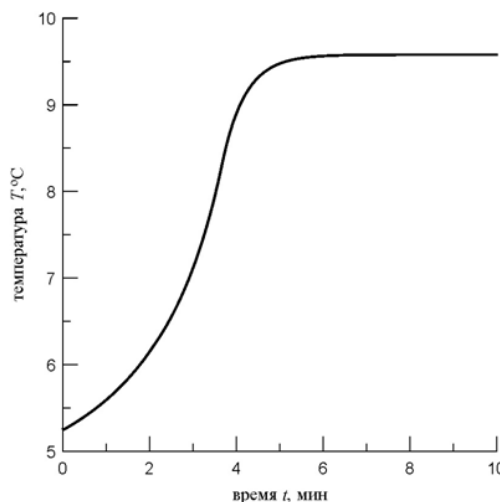


Рисунок 3. Температуры слоя нефти, накопленного внутри купола

Выводы

Процесс устранения разливов углеводородов — сложный и трудоемкий. В идеале необходимо проводить профилактические меры по предупреждению утечек: проверка состояния оборудования и профессионализма профильных специалистов и т.д. В случае возникновения разлива важно своевременно реагировать на утечку. Для этого необходимо заблаговременно предпринимать следующие шаги: разрабатывать модели для прогнозирования миграции углеводородов, разрабатывать модели работы устройств для устранения утечек и тестировать устройства для сбора углеводородов в рамках лабораторных и полевых экспериментов. Таким образом, можно сократить время ликвидации утечки и, соответственно, минимизировать последствия разлива.

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

- университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 2. С. 167–174. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/117.
3. Fleeger J.W., Riggio M.R., Mendelsohn I.A., Lin Q., Houc A., Deis D.R. Recovery of Saltmarsh Meiofauna Six Years after the Deepwater Horizon Oil Spill // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2018. Vol. 502. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.jembe.2017.03.001.
4. Chen F., Yapa P.D. A Model for Simulating Deepwater Oil and Gas Blowouts – Part II: Comparison of

Numerical Simulations with Deepspill Field Experiments // *Journal of Hydraulic Research*. 2003. Vol. 41. Issue 4. P. 353–365. DOI: 10.1080/00221680309499981.

5. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A Model for Simulating Deepwater Oil and Gas Blowouts – Part I: Theory and Model Formulation // *Journal of Hydraulic Research*. 2003. Vol. 41. Issue 4. P. 339–351. DOI: 10.1080/00221680309499980.

6. 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.

7. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Математическая модель затопленной струи с учетом влияния 3D течения окружающей воды // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование*. 2019. Т. 12. № 1. С. 137–143. DOI: 10.14529/mmp190112.

8. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Эволюция нефтегазовой струи, истекающей через разрыв магистрального нефтепровода (газопровода), расположенного на дне водоема // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 5. С. 193–200. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2651.

330, No. 2, pp. 167–174. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/117. [in Russian].

3. Fleeger J.W., Riggio M.R., Mendelsohn I.A., Lin Q., Houc A., Deis D.R. Recovery of Saltmarsh Meiofauna Six Years after the Deepwater Horizon Oil Spill. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018, Vol. 502, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.jembe.2017.03.001.

4. Chen F., Yapa P.D. A Model for Simulating Deepwater Oil and Gas Blowouts — Part II: Comparison of Numerical Simulations with Deepspill Field Experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, Vol. 41, Issue 4, pp. 353–365. DOI: 10.1080/00221680309499981.

5. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A Model for Simulating Deepwater Oil and Gas Blowouts — Part I: Theory and Model Formulation. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, Vol. 41, Issue 4, pp. 339–351. DOI: 10.1080/00221680309499980.

6. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model' zatoplennoi strui s uchetom dvukh predel'nykh skhem gidratoobrazovaniya [Model of a Submerged Jet Accounting for Two Limiting Schemes of Hydrate Formation]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, Vol. 25, No. 1, pp. 79–88. [in Russian].

7. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Matematicheskaya model' zatoplennoi strui s uchetom vliyaniya 3D techeniya okruzhayushchei vody [Mathematical Model of the Submerged Jet Taking into Account the Influence of 3D Flow of the Ambient Water]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye — Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 137–143. DOI: 10.14529/mmp190112. [in Russian].

8. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Evolyutsiya neftegazovoi strui, istekayushchei cherez razryv magistral'nogo nefteprovoda (gazoprovoda), raspolozhennogo na dne vodoema [Evolution of Oil and Gas Jet Flowing through Rupture of Main Oil Pipeline (Gas Pipeline) Located on Bottom of Water Reservoir]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, Vol. 331, No. 5, pp. 193–200. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2651. [in Russian].

REFERENCES

1. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. K teorii nakopleniya uglevodorodov v kupole, primenyaemom dlya likvidatsii tekhnogenogo razliva na dne okeana [On the Theory of Accumulation of Hydrocarbons in a Dome Used to Eliminate a Technogenic Spill at the Bottom of the Ocean]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, Vol. 91, No. 1, pp. 260–265. [in Russian].

2. Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Teoreticheskaya model' nakopleniya uglevodorodov v kupole s uchetom gidratoobrazovaniya, limitiruyushchegosya teploobmenom [Theoretical Model for Hydrocarbon Accumulation in a Dome Taking into Account Condensation, Limited by Heat Transfer]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, Vol.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Кильдибаева Светлана Рустамовна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования, БашГУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Svetlana R. Kildibaeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Informatics and Programming Department, BashSU, Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: freya.13@mail.ru

Кильдибаева Гульназ Ринатовна, магистрант 2 года обучения, БашГУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Gulnaz R. Kildibaeva, 2nd Year Undergraduate Student, BashSU, Branch, Sterlitamak, Russian Federation

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

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

e-mail: changelina@rambler.ru