

УДК 574+502.1:622.692.48

В.В. Пшенин¹, e-mail: vladimirspmi@mail.ru; **Н.А. Зарипова¹**, e-mail: Znatalya93@mail.ru;

А.К. Николаев¹, e-mail: aleknikol@mail.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (Санкт-Петербург, Россия).

Моделирование процесса вытеснения нефтяных паров при наливке железнодорожных цистерн

В статье предложена математическая модель процесса вытеснения паров нефти во время налива железнодорожных цистерн, позволяющая в условиях действующего производственного объекта приближенно определять параметры эмиссии углеводородов при минимуме контролируемых параметров. Модель не привязана жестко к операциям налива железнодорожных цистерн и характеризуется достаточной общностью, что делает возможным ее применение с учетом ряда оговорок при расчете выбросов при операциях налива любых транспортных емкостей.

Актуальность проведенного исследования обусловлена тем, что нефтеналивные железнодорожные эстакады являются объектами значительной эмиссии углеводородов. Интенсивное испарение нефти (нефтепродукта) в процессе налива приводит к загрязнению атмосферного воздуха и потере ценного продукта. Решить проблему призваны установки рекуперации паров, однако их внедрение на объектах налива ограничено дороговизной, сложностью эксплуатации и, как правило, отсутствием положительного экономического эффекта. Ситуация усложняется тем, что количественные параметры эмиссии углеводородов даже на объектах, оснащенных установками рекуперации паров, зачастую не контролируются либо их контроль осуществляется не в полном объеме.

Основная цель исследования состояла в изыскании возможностей повышения экологической безопасности и оптимизации работы систем установок рекуперации паров на действующих объектах налива железнодорожных цистерн с учетом существующего уровня их автоматизации и оснащенности приборами контроля. Установлено, что использование предложенной модели при учете монтажа кислородомера на линии организованного отвода паров от наполняемых железнодорожных цистерн позволяет в динамическом режиме осуществлять мониторинг параметров эмиссии углеводородов.

Эффективность моделирования подтверждена численными примерами расчета изменения объемных долей компонентов газозооудшной смеси и коэффициента превышения за время операции налива железнодорожного маршрута.

Ключевые слова: испарение нефти, налив нефти, железнодорожные цистерны, потери нефти, установки рекуперации паров.

.....

V.V. Pshenin¹, e-mail: vladimirspmi@mail.ru; **N.A. Zaripova¹**, e-mail: Znatalya93@mail.ru;

A.K. Nikolaev¹, e-mail: aleknikol@mail.ru

¹ State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training «Saint-Petersburg Mining University» (Saint Petersburg, Russia).

Modeling of the Process of Oil Vapors Displacement during Railroad Tanks Loading

The article proposes the mathematical model of the oil vapor displacement process in loading of tank cars which allows approximate estimation of hydrocarbon emission parameters with minimum controlled variables and under operational production project. The Model is not hard binding to loading operations of tank cars and characterized by sufficient commonness which makes its application in loading of any tank cars possible taking into account a number of limitations in estimating emissions. The research carried out being of current importance is conditioned by considerable hydrocarbon emissions resulting from oil loading operations of tank cars. Intensive oil (product) evaporation in loading causes air pollution and losses of a valuable product. Vapor regeneration units are designed to solve the problem but their introduction into loading facilities is limited by their high price, operation complexity and, generally, by the absence of a positive economic effect. The situation being aggravated can be explained by incomplete or no control over the hydrocarbon emission quantitative variables even at the facilities equipped with the above units.

The central objective of the Research was to find the ways of higher environmental safety and performance optimization of vapor regeneration units at operational oil tank loading facilities in view of the current level of automation and

instrumentation. It has been established that application of the Model proposed with regard to installation of the oxygen analyzer at the line of controlled vapor removal from loading tank cars allows dynamic monitoring of hydrocarbon emission variables. The Model efficiency has been proved by numerical calculations of changes in volume concentration of air-gas components and the excess factor during a loading operation on the railway route.

Keywords: evaporation of oil, oil loading, railway tanks, oil losses, vapor recovery units.

Обеспечению промышленной и экологической безопасности объектов налива железнодорожных цистерн, морских нефтеналивных терминалов, станций автоналива как ключевых элементов нефтетранспортной системы уделяется большое внимание [1–3]. Экологические риски при эксплуатации подобных объектов сопряжены прежде всего с загрязнением атмосферного воздуха за счет эмиссии углеводородов при заполнении транспортных емкостей. Точное определение количественных параметров эмиссии затруднено ввиду большого количества влияющих на эти параметры факторов (тип налива, условия окружающей среды, физико-химические свойства продукта, конструктивные особенности и т. д.), часть из которых носит случайный или сложнопрогнозируемый характер.

В российской практике при расчете потерь от испарения в пунктах налива железнодорожных цистерн принято пользоваться формулами П.Р. Ривкина [5–7], к числу достоинств которых можно отнести относительную простоту. В то же время данные формулы недостаточно точны и опираются на эмпирические коэффициенты, не имеющие достаточного физического обоснования и полученные на основе весьма ограниченной выборки.

В зарубежной практике в основном применяется нормативный подход [8]. Отсутствие должного внимания к данной проблематике в последние десятилетия связано с отсутствием запроса на исследования – сложившаяся практика инструментальных замеров и расчетов по упрощенным методикам оказалась крайне удобной для всех участников производственного процесса.

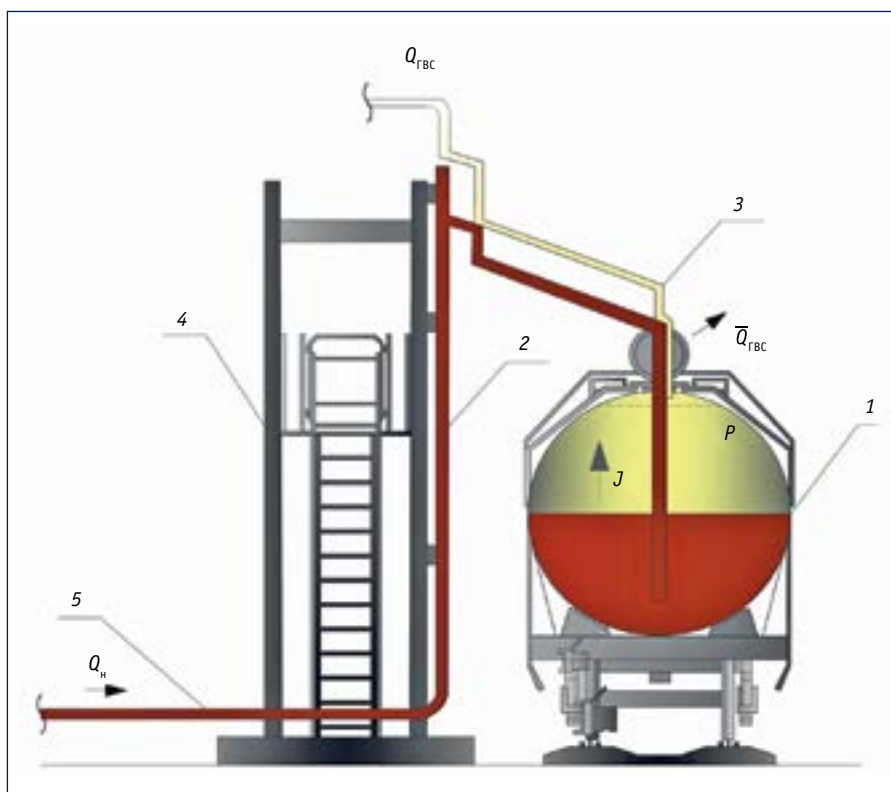


Рис. 1. Принципиальная схема системы отвода образующейся газовой фазы из заполняемой нефтью железнодорожной цистерны:

1 – подводящий трубопровод; 2 – площадка обслуживания; 3 – стояк налива; 4 – рукав отвода паров; 5 – цистерна; Q_n – объемный расход налива нефти, м³/ч; $\bar{Q}_{гвс}$ – неучтенный объемный расход газовой смеси, м³/ч; $Q_{гвс}$ – объемный расход газовой смеси, м³/ч; P – давление, Па; J – плотность массы потока газовой смеси, кг/м³

Fig. 1. Basic diagram of the system to remove the resultant vapor phase from the oil loading tank car:

1 – supply line; 2 – operating platform; 3 – loading pipe riser; 4 – vapor removal tube; 5 – tank; Q_n – volume oil loading flow rate, m³/h; $\bar{Q}_{гвс}$ – unaccounted volume air-gas flow rate, m³/h; $Q_{гвс}$ – volume air-gas flow rate, m³/h; P – pressure, Pa; J – air-gas flow mass density, kg/m³

Однако в настоящее время устойчивой тенденцией является развитие и повсеместное внедрение ресурсосберегающих технологий. Применительно к процессам налива речь прежде всего идет о рекуперационных технологиях. Внедрение установок рекуперации

паров (УРП) нефти и нефтепродуктов на объектах налива и организация контроля за выбросами вновь актуализируют запрос на создание физически обоснованных моделей определения параметров выбросов углеводородов.

Ссылка для цитирования (for citation):

Пшенин В.В., Зарипова Н.А., Николаев А.К. Моделирование процесса вытеснения нефтяных паров при наливке железнодорожных цистерн // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 6. С. 79–82.

Pshenin V.V., Zaripova N.A., Nikolaev A.K. Modeling of the Process of Oil Vapors Displacement during Railroad Tanks Loading. Territorija «NEFTEGAS» [Oil and Gas Territory]. 2019;6:79–82. (In Russ.)

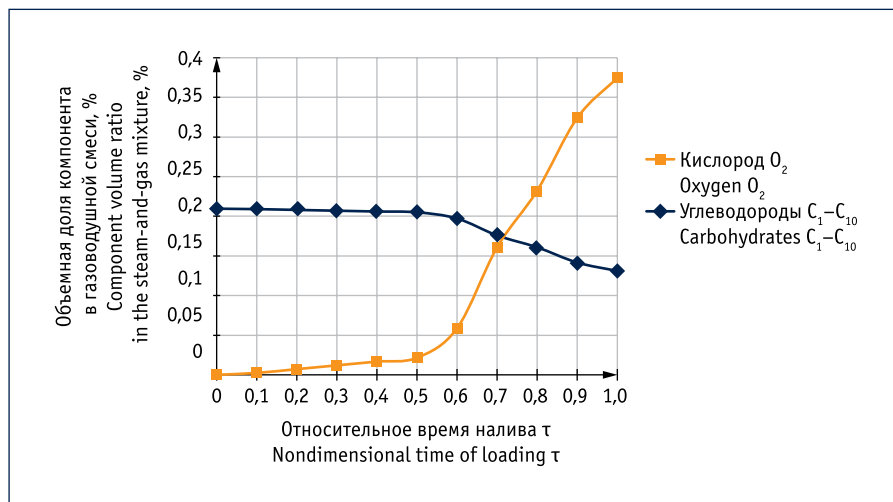


Рис. 2. Изменение объемных долей компонентов газовой смеси за время операции налива железнодорожного маршрута

Fig. 2. Volume concentration changes of air-gas components during a loading operation on the railway route

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ ПАРОВ НЕФТИ ПРИ НАЛИВЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

Рассмотрим подробнее операцию налива железнодорожной цистерны нефтью или нефтепродуктом и организацию отвода вытесняемых паров.

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы отвода паров нефти из заполняемой железнодорожной цистерны.

Изменение во времени массы воздуха в газовом пространстве (ГП) можно рассчитать с помощью дифференциального уравнения:

$$\frac{dm_b}{dt} = C_{mb} \cdot G_{ГВС} - C_{mb} \cdot \bar{G}_{ГВС}, \quad (1)$$

где m_b – масса воздуха в ГП, кг; C_{mb} – массовая концентрация воздуха в газовой смеси (ГВС), д. ед., равная отношению массы воздуха к общей массе ГВС в ГП; $G_{ГВС}$ – массовый расход ГВС, поступающий на УРП, кг/ч; $\bar{G}_{ГВС}$ – неучтенный массовый расход ГВС, обусловленный негерметичностью системы отвода паров (иными словами, расход утечки), кг/ч.

Массовое содержание воздуха в единице объема газовой смеси C_b , кг/м³, по определению равно:

$$C_b = \frac{m_b}{V} = \frac{m_b}{(V_{нач} - Q_n \cdot t)} = \frac{m_b}{Q_n \cdot \tau_n \cdot (1 - \tau)}, \quad (2)$$

где $V_{нач}$ – начальный объем газового пространства, м³ (поскольку железнодорожные цистерны заполняются практически полностью, можно принять допущение $V_{нач} = Q_n \cdot \tau_n$); Q_n – объемный расход налива нефти, м³/ч; V – объем газового пространства, м³; t – время, прошедшее от начала налива, ч; τ_n – продолжительность операции налива, ч; τ – относительное время операции налива, безразмерное.

Величины C_b и C_{mb} в уравнении (1) связаны соотношением:

$$C_{mb} = \frac{C_b}{\rho_{ГВС}}, \quad (3)$$

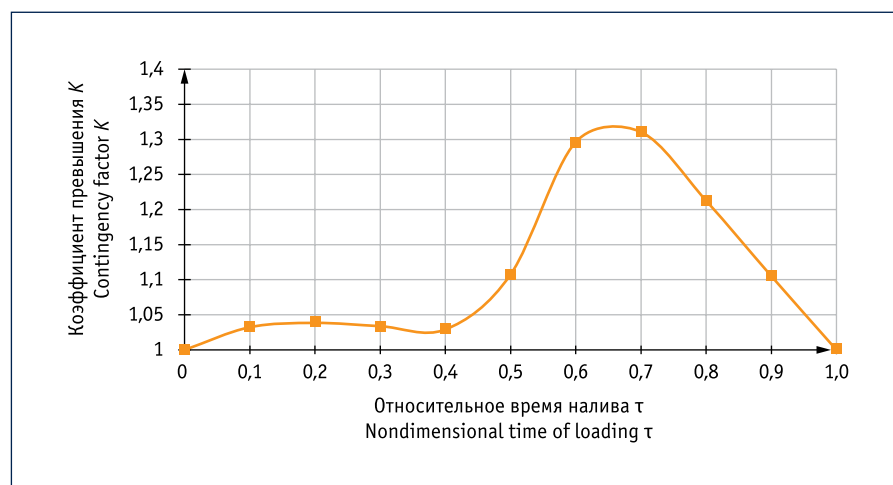


Рис. 3. Изменение коэффициента превышения за время операции налива железнодорожного маршрута

Fig. 3. Excess factor changes during a loading operation on the railway route

где $\rho_{ГВС}$ – плотность ГВС в цистерне, кг/м³, при давлении P , Па.

Плотность ГВС при давлении P и при атмосферном давлении $P_{атм}$ определяется соответственно по формулам:

$$\rho_{ГВС} = \frac{P \cdot M_{ГВС}}{\bar{R} \cdot T}, \quad (4)$$

$$\rho_{ГВС(а)} = \frac{P_{атм} \cdot M_{ГВС}}{\bar{R} \cdot T}, \quad (5)$$

где $\rho_{ГВС}$, $\rho_{ГВС(а)}$ – плотность ГВС при давлении P и при атмосферном давлении $P_{атм}$ соответственно, кг/м³; $M_{ГВС}$ – молярная масса газовой смеси, кг/кмоль; \bar{R} – универсальная газовая постоянная 8314 Дж/(кмоль·К); T – температура ГВС, К.

Поскольку продолжительность налива железнодорожного маршрута относительно невелика, изменением температуры ГВС допустимо пренебречь $T \approx \text{const}$, или $dT/dt \approx 0$. Если ввести параметр относительного давления, $u \approx P/P_{атм}$, то из уравнений (4) и (5) следует $\rho_{ГВС}/\rho_{ГВС(а)} = P/P_{атм}$.

Коэффициент превышения, или коэффициент относительного расхода [4], K по определению равен отношению объемного расхода ГВС при давлении в конечной точке отвода паров (в рассматриваемом случае – при атмосферном давлении $P_{атм}$) к объемному расходу налива:

$$K = \frac{Q_{ГВС(а)} + \bar{Q}_{ГВС(а)}}{Q_n}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{ГВС(a)}}$ – объемный расход ГВС при атмосферном давлении, м³/ч; $\bar{Q}_{\text{ГВС(a)}}$ – неучтенный объемный расход ГВС при атмосферном давлении, обусловленный негерметичностью системы отвода паров, м³/ч.

Подставив (2) и (3) в уравнение (1), после алгебраических преобразований получаем:

$$\frac{dC_b}{d\tau}(1-\tau) = C_b \left(1 - \frac{K}{y}\right) \quad (7)$$

Массовое содержание воздуха в единице объема ГВС определяется по формуле:

$$C_b = \rho_b \cdot \chi_b = y \cdot \rho_{\text{в(а)}} \cdot \chi_{\text{в}} \quad (8)$$

где ρ_b , $\rho_{\text{в(а)}}$ – плотность воздуха при давлении P и при атмосферном давлении $P_{\text{атм}}$ соответственно, кг/м³; χ_b – объемная доля воздуха в ГВС, д. ед.

Подставив (7) в (8), получим уравнение для мгновенно значения коэффициента превышения в общем виде:

$$K = y \cdot \left[1 - (1-\tau) \cdot \frac{d(\ln(\chi_b \cdot y))}{d\tau}\right] \quad (9)$$

Плотность воздуха при атмосферном давлении $P_{\text{атм}} = 101325$ Па и фиксированной температуре постоянна. Например, при $P_{\text{атм}} = 101325$ Па и $T = 293$ К она составляет $\rho_{\text{в(а)}} \approx 1,2$ кг/м³. Объемная доля кислорода в воздухе составляет 20,9476 %. С учетом этих допущений можно записать (8) в виде:

$$C_b = \rho_b \cdot \chi_b = 4,7738 \cdot y \cdot \rho_{\text{в(а)}} \cdot \chi_{\text{O}_2} \quad (10)$$

где χ_{O_2} – объемная доля кислорода в ГВС, д. ед.

С учетом (10), сократив константы в левой и правой части уравнения (7), получим:

$$\frac{d(\chi_{\text{O}_2} \cdot y)}{d\tau} \cdot (1-\tau) = (\chi_{\text{O}_2} \cdot y) \cdot \left(1 - \frac{K}{y}\right) \quad (11)$$

Раскрыв дифференциал в уравнении (11), получим выражение для коэффициента превышения, записанное с использованием объемной доли кислорода:

$$K = y \cdot \left[1 - \frac{(1-\tau) \cdot \left(\frac{d\chi_{\text{O}_2}}{d\tau} \cdot y + \frac{dy}{d\tau} \cdot \chi_{\text{O}_2}\right)}{\chi_{\text{O}_2} \cdot y}\right] \quad (12)$$

Выражения (9) и (12) имеют ряд аналитических решений в случае некоторых допущений, таких как постоянство относительного давления, аналитический вид функций для χ_b и χ_{O_2} . Однако в рамках данной статьи останавливаться на этих решениях нецелесообразно. В первом приближении можно пренебречь изменением давления, тогда в силу $P \approx P_{\text{атм}}$ величина изменения относительного давления и $dy/d\tau \approx 0$ и $y \approx 1$, и уравнение (12) значительно упростится:

$$K = 1 - \frac{(1-\tau) \cdot \left(\frac{d\chi_{\text{O}_2}}{d\tau}\right)}{\chi_{\text{O}_2}} = 1 - (1-\tau) \cdot \left(\frac{d(\ln(\chi_{\text{O}_2}))}{d\tau}\right) \quad (13)$$

Уравнение (13) можно использовать для численной оценки коэффициента превышения по данным реальных трендов из системы автоматизации нефтеналивной эстакады, если от дифференциалов перейти к соответствующим разностям.

XXVI специализированная выставка



АО «Тюменская ярмарка»

Адрес: Россия, 625013, г. Тюмень, ул. Севастопольская, 12, Выставочный зал
 телефакс: (3452) 48-55-56, 48-66-99, 48-53-33; e-mail: tyumfair@gmail.com. www.expo72.ru



2019
НЕФТЬ И ГАЗ
 Топливо энергетический комплекс

17-20
сентября



ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Приведем численный пример расчета коэффициента превышения по разработанной методике. В качестве исходных данных приняты экспериментальные значения, полученные при наливе железнодорожного маршрута на действующей нефтеналивной эстакаде. На рис. 2 представлен характер изменения объемных долей компонентов ГВС за время операции налива, принятый по показаниям поточного кислородомера на трубопроводе организованного отвода газовой фазы.

На рис. 3 представлен график изменения коэффициента превышения за время операции налива железнодорожного маршрута, рассчитанный по формуле (13) с использованием приемов дифференцирования функций, заданных таблично. Из рис. 3 видно, что характер кривой для коэффициента превышения во многом совпадает с теоретическими

ожиданиями. Функция принимает значение 1 в начале и конце операции налива, при этом она имеет явно выраженный максимум ($K_{\max} = 1,31$). Максимум функции смещен вправо, поскольку для рассматриваемых условий интенсивное испарение углеводородов начинается приблизительно с середины операции налива. В рассматриваемом примере в точке максимума объемный расход ГВС составлял $2620 \text{ м}^3/\text{ч}$ при расходе налива $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$, среднее интегральное значение коэффициента превышения составило $\bar{K} = 1,12$. По графику ясно видно, сколь существенное влияние оказывает явление превышения на общий объем вытесняемой из железнодорожных цистерн ГВС.

ВЫВОДЫ

1. Объемный расход ГВС, вытесняемый из железнодорожных цистерн, может существенно (до 30 % в рассматри-

ваемом случае) превышать объемный расход наливаемой нефти (нефтепродукта).

2. При установке кислородомера на линии организованного отвода паров от наполняемых железнодорожных цистерн и при использовании предложенной в работе модели можно в динамическом режиме производить мониторинг параметров эмиссии углеводородов.

3. Выработанные подходы позволяют дать оценку степени герметичности системы отвода паров, если на ней установлен измеритель расхода, и спрогнозировать валовой выброс углеводородов.

4. Уравнения (12) и (13) имеют при учете некоторых допущений ряд аналитических решений, однако поскольку они представляют научный интерес, их целесообразно рассмотреть в следующих работах.

Литература:

1. Давлетяров Р.Р., Лапина О.А., Половков С.А. Обеспечение экологической безопасности в районе нефтеналивного терминала Порты Приморск // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. №2 (18). С. 84–87.
2. Выходцева Н.А., Костина Е.А., Уколова Е.С. Биомониторинг акватории бухты Козьмина в районе нефтеналивного терминала «Спецморнефтепорт Козьмино» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. №1 (13). С. 86–91.
3. Вакаев А.Ю., Росляков Д.А., Киняшов М.А. Анализ современного состояния и перспектив реконструкции наливных пунктов московского региона ОАО «АК «Транснефть» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. №3 (15). С. 80–85.
4. Пшенин В.В., Гайсин М.Т. Моделирование газодинамических процессов при наливке танкеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S28. С. 3–12.
5. Ривкин П.Р., Курганский М.И., Бронштейн И.С. Потери нефтепродуктов от испарения при различных способах налива железнодорожных цистерн // Нефтяное хозяйство. 1974. №2.
6. Ривкин П.Р. Исследование потерь нефти и нефтепродуктов от испарения при наливке в транспортные емкости: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1975. 252 с.
7. Ривкин П.Р., Батталов А.З., Бронштейн И.С. и др. К определению коэффициентов превышения объема выходящей из резервуара паровоздушной смеси над объемом закачанной нефти // Технология перекачки нефти, предотвращение потерь, автоматизированная система управления нефтепроводным транспортом: сб. научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института по сбору, подготовке и транспортировке нефти и нефтепродуктов. Уфа, 1985. С. 75–79.
8. Mulder T. VOC recovery systems // Hydrocarbon Engineering. 2007. Vol. 12. Iss. 6. P. 37–40.

References:

1. Davletjarov R.R., Lapina O.A., Polovkov S.A. Ensuring Environmental Safety around the Oil Loading Port Primorsk. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov* [Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation]. 2015;2(18):84–87. (In Russ.)
2. Vykhotseva N.A., Kostina E.A., Ukolova E.S. Biomonitoring of the Offshore Area of Koz'mino Oil Port Bay in the Area of the Oil Loading Terminal of Spetsmornefteport Koz'mino LLC. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov* [Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation]. 2014;1(13):86–90. (In Russ.)
3. Vakaev A.Y., Roslyakov D.A., Kinyashov M.A. Analysis of the Current State and Prospects of Reconstruction of Moscow Region Transneft JSC Loading Depots. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov* [Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation]. 2014;3(15):80–85. (In Russ.)
4. Pshenin V.V., Gaysin M.T. Gas Dynamics Modeling during Tanker Loading Operations. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2017;S28:3–12. (In Russ.)
5. Rivkin P.R., Kurganskiy M.I., Bronshtein I.S. Vapor Losses when Loading Tank Cars in Different Ways. *Neftyanyoye khozyaistvo* [Oil Industry]. 1974;2. (In Russ.)
6. Rivkin P.R. Investigation on Evaporation Losses of Oil and Its Products in Loading of Tank Cars. Thesis for a Candidate Degree in Engineering Sciences. Moscow, 1975. (In Russ.)
7. Rivkin P.R., Battalov A.Z., Bronshtein I.S., et al. On the Excess Factors of Vapor Volume Leaving the Tank over the Oil Volume Pumped. In collected research papers "Technology of oil transfer, prevention of losses, automated pipeline transportation management system". Ufa: ALL-Russian Research Institute for Gathering, Treatment and Transportation of Oil and its Products. 1985. P. 75–79. (In Russ.)
8. Mulder T. VOC recovery systems. *Hydrocarbon Engineering*. 2007;12(6):37–40.