ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Повышение эффективности систем улавливания паров нефти при товарно-транспортных операциях на нефтеналивных терминалах

В.В.ПШЕНИН ✉, Г.С.ЗАКИРОВА

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Пшенин В.В., Закирова Г.С. Повышение эффективности систем улавливания паров нефти при товарно-транспортных операциях на нефтеналивных терминалах // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 121-128. EDN FFTUZK. DOI: 10.31897/PMI.2023.29

Аннотация. Рассмотрена проблема потерь от испарения легких фракций углеводородов при погрузке судов танкерного флота. Установлено, что в открытых источниках единого подхода к моделированию системы «танкер – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» не существует. Отсутствие общепризнанной модели делает невозможным научно-обоснованное применение средств сокращения потерь и разработку соответствующих мероприятий. Динамика роста давления во внутренней емкости танкера описывается дифференциальным уравнением, учитывающим нестационарный характер процесса. Уравнение преобразовано к безразмерному виду и исследовано относительно критериев подобия данной системы. Такое исследование позволило однозначно установить общий характер изменения давления во внутренней емкости танкера и прогнозировать пиковые значения его роста на начальном этапе операции погрузки. Полученные уравнения апробированы на данных реальных погрузок танкеров и показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными. На разных этапах операции погрузки компонентный состав паров меняется, что показано в результате хроматографического анализа газовой смеси. Располагая моделью вытеснения углеводородных паров из внутренней емкости танкера, стало возможным предложить мероприятия по минимизации негативного воздействия на окружающую среду и возврату ценных паров продукта в технологическую цепочку транспорта.

***Ключевые слова*:** нефтяной танкер; морские терминалы; потери от испарения; сырая нефть; нефтяной терминал; установки рекуперации паров; летучие органические соединения; потери нефти

Поступила: 30.09.2022 ***Принята: 13.02.2023*** ***Онлайн: 12.04.2023*** ***Опубликована: 29.02.2024***

Введение. В процессе погрузки танкеров интенсивно испаряются нефть или нефтепродукты, что увеличивает избыточное давление в их внутреннем пространстве. В случае высоких темпов погрузки и недостаточной пропускной способности систем газоотвода, при достижении критического значения давления происходит выброс части газовоздушной смеси (ГВС) в атмосферу. Стравливание паров в атмосферу через дыхательную арматуру или мастрайзер нежелательно по следующим причинам:

• безвозвратная потеря ценного сырья (например, для танкера класса Aframax размеры потерь за одну операцию погрузки сырой нефти приблизительно могут составлять половину объема одной железнодорожной цистерны);

• риск аварийной остановки погрузки в результате срабатывания систем автоматики на причале из-за загазованности;

• испарение легких фракций ухудшает показатели качества нефтепродуктов;

• загрязнение атмосферного бассейна [1, 2].

Способ борьбы с потерями от испарения нефтеналивных терминалах – внедрение и эффективная эксплуатация установок рекуперации паров (УРП) [3, 4]. Если в отечественной практике нефтеналивные терминалы только начали оснащаться подобными устройствами примерно с 2010 г. (в основном импортного производства), то за рубежом наработан богатый практический опыт их использования [5, 6]. В общемировой практике исследований в данной области лидерами

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN FFTUZK
DOI: 10.31897/PMI.2023.29

являются страны, для которых характерны большие объемы танкерных перевозок: США, Япония, Норвегия, Китай [7, 8]. Несмотря на относительно успешное применение данных установок, накопился и негативный опыт. Исследования в данной области (прежде всего проект VocSim, реализованный Norwegian Marine Technology Research Institute [1]), несмотря на существенное финансирование, не смогли дать универсальное решение по моделированию системы «танкер – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров» [9, 10]. Причины состоят в следующем: процесс испарения нефти (нефтепродуктов) носит сложный нестационарный характер; уникальность каждого нефтеналивного терминала и танкера; большое количество влияющих факторов. Отдельные исследования в области теплообмена во внутренней емкости танкера [11], определения состава паров [12, 13], процессов испарения различных продуктов [14, 15], совершенствования отдельных систем и средств сокращения выбросов [16, 17] и т.д. носят частный характер, не позволяют эффективно решить задачу снижения выбросов и оперативного контроля в рамках нефтеналивного терминала в целом [18, 19].

Важным вопросом является общий объем выброса летучих углеводородов через мастрайзер. Контроль этой величины не ведется – на линии мастрайзера не установлены средства измерения расхода, а расчетные оценки либо невозможны, либо являются неточными из-за отсутствия модели изменения давления в газовом пространстве танкера. Газовоздушная смесь, стравливаемая через мастрайзер, напрямую попадает в атмосферу, минуя УРП, что делает невозможным хотя бы частичное улавливание паров. Стравливание паров происходит при превышении критического давления через специальную трубопроводную обвязку танкера. Режим истечения характеризуется нелинейностью по давлению, также существует неопределенность в вопросе продолжительности открытия мастрайзера. Как правило, открытие происходит по указанию капитана танкера на непродолжительный период в момент пиковой динамики роста давления в целях его стабилизации. Со стороны терминала эти процессы фиксируются как неизбежные издержки технологического процесса. Такой подход не вполне корректен, поскольку нельзя исключить нештатные ситуации полностью, но можно минимизировать их негативное влияние.

Цель исследования – обеспечить научную базу для мероприятий по сокращению потерь и повышению эффективности эксплуатации УРП. Для этого последовательно решен ряд сопряженных задач: выполнено моделирование динамики роста давления в газовом пространстве танкера; проведена апробация полученного решения на данных реальной погрузки в порту Козьмино; экспериментально установлено количественное содержание углеводородов C_1-C_{10} на различных этапах погрузки. В рамках приведенной модели получены оценки для возможного резерва сокращения выбросов при недопущении открытия мастрайзера.

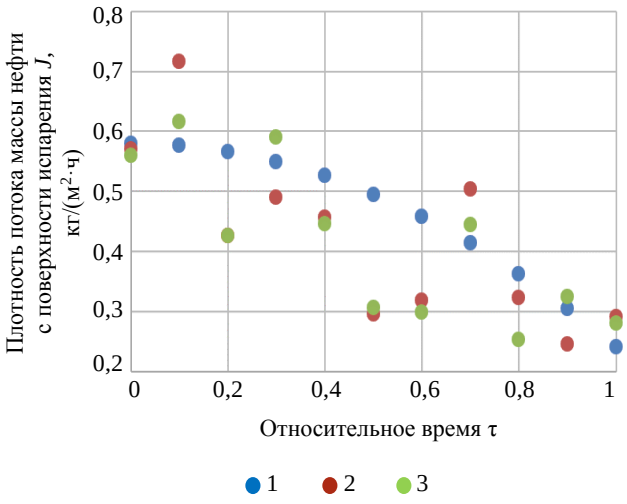


Рис.1. Динамика массоотдачи с поверхности зеркала нефти (нефтепродукта) в процессе погрузки танкеров
1 – «ANTONIS»; 2 – «FRONT CASTOR»; 3 – «MASTERA»

Методы. В части получения экспериментальных данных о количественном содержании углеводородов C_1-C_{10} на различных этапах погрузки использованы данные хроматографического анализа отобранных проб вытесняемой ГВС на установке «Хроматэк-Кристалл 5000» [20, 21]. Данные получены по результатам лабораторных исследований при участии автора, а результаты опубликованы ранее в открытых источниках [22, 23]. В рамках исследований испарения углеводородов интерес представляет совокупная массоотдача с поверхности зеркала нефти (нефтепродукта) углеводородов C_1-C_{10} (рис.1) [24, 25].

Массоотдача с течением времени убывает, поскольку газовое пространство над поверхностью нефти (нефтепродукта) насыщается и затрудняет дальнейшее испарение [26, 27]. Однако есть ряд вторичных эффектов, которые могут

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN FFTUZK
DOI: 10.31897/PMI.2023.29

препятствовать гладкому характеру этой функции: качка танкера; неравномерность работы системы газоотвода; внутренние конвективные токи; изменение температуры окружающей среды [27, 28]. Принципиальная схема отвода паров при наливе груза предусматривает линию «стендер отвода газовой фазы – трубопровод отвода газовой фазы – установка рекуперации паров – свеча рассеивания» и соответствующую арматуру (рис.2) [29, 30].

Данные по давлению и температуре в процессе налива приняты по данным автоматизированного рабочего места диспетчера УРП [31, 32]. Часть данных получена из систем автоматики танкера (давление в танках, содержание кислорода, температура) [33, 34]. Процесс вытеснения нефтяных паров при погрузке танкера приведен на рис.3.

Уравнение состояния ГВС в дифференциальной форме имеет вид:

$$\frac{dP}{dt}V + \frac{dV}{dt}P = \frac{dG}{dt}RT\,, \tag{1}$$

где V – объем газового пространства, м^3; P – давление в газовом пространстве, Па; R – газовая постоянная для данного компонентного состава (принимается исходя из средней молярной массы паров), Дж/кмоль·К; T – температура внутри газового пространства танкера.

Уравнение приведено к безразмерному виду, установлено, что темп роста давления во внутренней емкости танкера определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dy}{d\tau}(1-\tau) = y + \psi\left(1-(1-\xi)\tau^2\right) - \frac{\sqrt{y^2-1}}{\theta}\,, \tag{2}$$

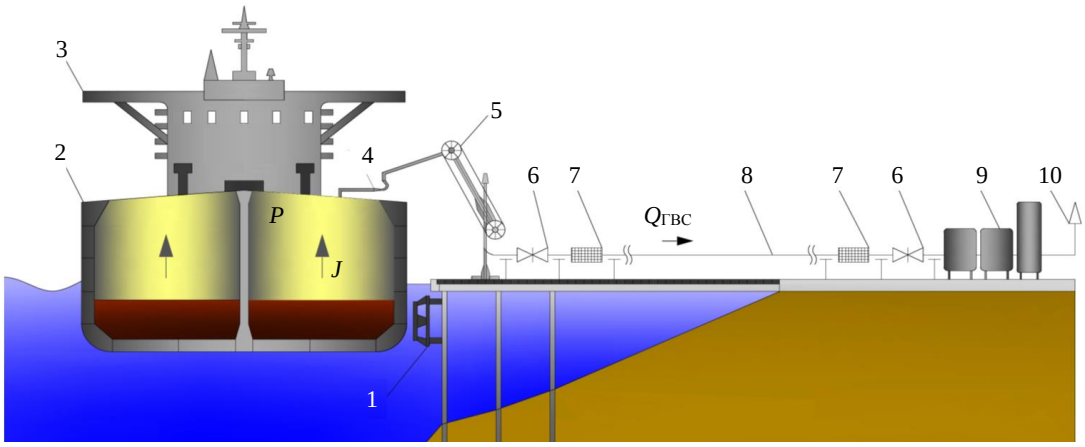


Рис.2. Принципиальная схема газоотводных систем танкера береговых и причальных сооружений

1 – узел защиты причальных сооружений; 2 – двойной корпус; 3 – танкер; 4 – мастрайзер; 5 – стендер отвода газовой фазы; 6 – запорно-регулирующая арматура; 7 – детонационный преградитель; 8 – трубопровод отвода газовой фазы; 9 – УРП нефти; 10 – свеча рассеивания; $Q_{ГВС}$ – расход ГВС; J – массоотдача

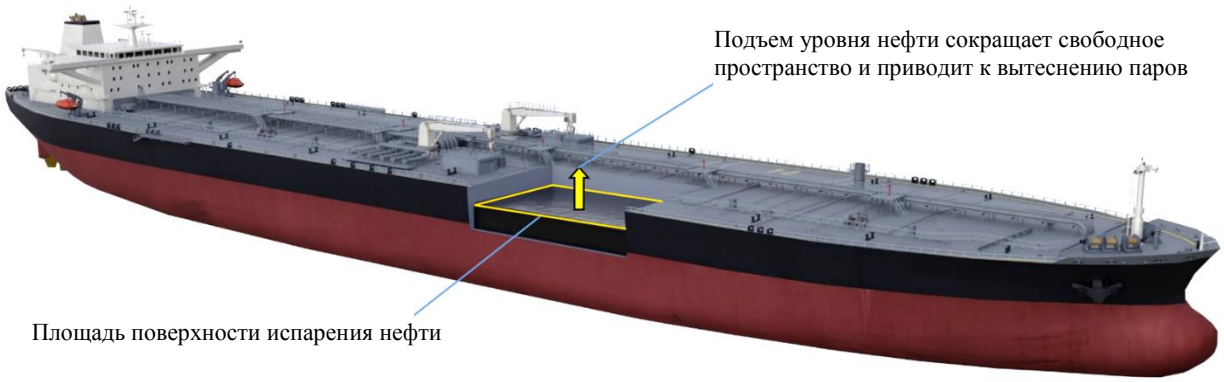


Рис.3. Подъем уровня нефти (один отсек показан в разрезе) и вытеснение нефтяных паров при погрузке танкера

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN FFTUZK
DOI: 10.31897/PMI.2023.29

где y – безразмерное давление; τ – безразмерное время; ψ – критерий подобия для вклада массоотдачи в динамику роста давления; θ – критерий подобия для вклада гидравлического сопротивления в динамику роста давления; ξ – безразмерное соотношение для массоотдачи;

$$y = \frac{P}{P_к}; \tag{3}$$

$$\psi = \frac{JFRT}{Q_З P_к}; \tag{4}$$

$$\theta = \frac{Q_З \sqrt{\lambda \frac{L_{эф}}{D}}}{S\sqrt{RT}}; \tag{5}$$

$$\tau = \frac{t}{\tau_{зак}}\ ; \tag{6}$$

$$\xi = \frac{J_к}{J_н}\ , \tag{7}$$

$P_к$ – давление в конечной точке; F – площадь поверхности испарения; $Q_З$ – расход заполнения танкера нефтью; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; D – диаметр трубопровода; S – площадь сечения трубопровода газовой фазы; t – текущее время, прошедшее от начала погрузки; $\tau_{зак}$ – полное время налива; $J_к$, $J_н$ – массоотдача в конечный и начальный момент времени.

С точки зрения безразмерных параметров динамика изменения давления описывается функциональной зависимостью вида:

$$y = \tilde{f}\left(\psi, \theta, \xi, \tau\right). \tag{8}$$

Зависимость (8) может быть положена в качестве опорной при проектировании стендового оборудования для проверки гипотез по работе систем рекуперации паров и систем газоотвода на маломасштабных установках в лабораторных условиях [35]. Величина потерь углеводородов при открытии мастрайзера должна определяться, исходя из массового расхода ГВС через вентиляционную систему танкера:

$$G_{мр} = \frac{S_{вент}\sqrt{\left[P_м\right]^2 - P_{атм}{}^2}}{\sqrt{RT}\sqrt{2\ln\frac{\left[P_м\right]}{P_{атм}} + \lambda\frac{L_{эф}}{D_{вент}}\varepsilon_{т.р}}}, \tag{9}$$

где $S_{вент}$ – площадь сечения трубопровода вентиляционной системы танкера; $[P_м]$ – давления открытия мастрайзера; $P_{атм}$ – атмосферное давление; T – температура ГВС; $L_{эф}$ – эффективная длина с учетом местных сопротивлений; $D_{вент}$ – диаметр трубопровода вентиляционной системы танкера; R – газовая постоянная; $\varepsilon_{т.р}$ – фактор, учитывающий степень открытия мастрайзера.

Массовый расход связан с объемным расходом через следующее соотношение:

$$G_{мр} = Q_{мр}\rho_{ГВС}, \tag{10}$$

где $Q_{мр}$ – объемный расход ГВС через мастрайзер; $\rho_{ГВС}$ – плотность ГВС.

Потери углеводородов через мастрайзер за год следует определять из уравнения:

$$G_{общ} = Q_{мр}\, c_{ув.ср}\, \tau_{мр}\, N_н, \tag{11}$$

где $c_{ув.ср}$ – средняя концентрация углеводородов в выбросе, г/м^3; $\tau_{мр}$ – средняя продолжительность нахождения мастрайзера в открытом состоянии; $N_н$ – количество случаев открытия мастрайзера за год.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 121-128
© В.В.Пшенин, Г.С.Закирова, 2024

Оценочный расчет ущерба в стоимостном выражении:

$$У = G_{общ}\ \sigma_{выброс} + G_{общ}\ S_{оч}\ \sigma_{нефти}, \quad (12)$$

где $\sigma_{выброс}$ – ставка платы за выброс 1 т суммы углеводородов C_1-C_{10}; $S_{оч}$ – прогнозная степень очистки ГВС; $\sigma_{нефти}$ – стоимость 1 т нефти.

Обсуждение результатов. Проведена апробация разработанной модели на данных реальной погрузки танкера, а также получен ряд практических результатов (см. таблицу). Основные сведения по погрузке танкера: дедвейт танкера 106208 т; размеры 241×44 м; инертный газ – выхлопные газы; плотность нефти при 20 °С – 0,872 т/м^3; давление насыщенных паров нефти 54,3 кПа; продолжительность погрузки 14,21 ч. Результаты апробации разработанной модели на данных реальной операции погрузки приведены на рис.4.

Поскольку модель показала удовлетворительную сходимость (расхождения не превышают 10 %) с данными, полученными в ходе погрузки, ее результаты предложено применить для оценки потерь в случае открытия мастрайзера. Пиковое давление достигается с двух часов от начала погрузки при линейно возрастающем расходе закачки [36]. В такие моменты нередко открывается мастрайзер на танкерах. Расчеты приведены на примере работы системы газоотводной системы танкеров и адсорбционной УРП в порте Козьмино (рис.5).

Результаты апробации математической модели

Время с начала погрузки, ч	Давление по данным систем автоматики танкера, Па	Давление во внутреннем пространстве танкера по результатам моделирования, Па
0	101815	101815
1	103596	104081
2	103899	104159
3	107643	108083
4	108681	108651
5	108894	108544
6	108837	108357
7	108702	108742
8	108550	108730
9	108399	108274
10	108253	108268
11	104983	105313
12	104891	104886
13	105585	105820
14	103946	104236

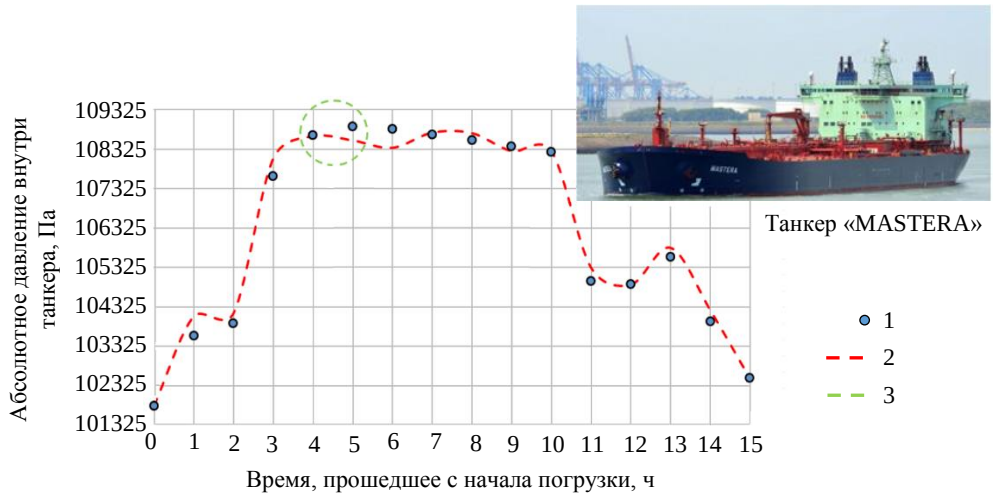


Рис.4. Результаты апробации математической модели

1 – данные автоматики танкера «MASTERA»; 2 – результаты в рамках разработанной модели; 3 – область открытия мастрайзера

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN FFTUZK
DOI: 10.31897/PMI.2023.29

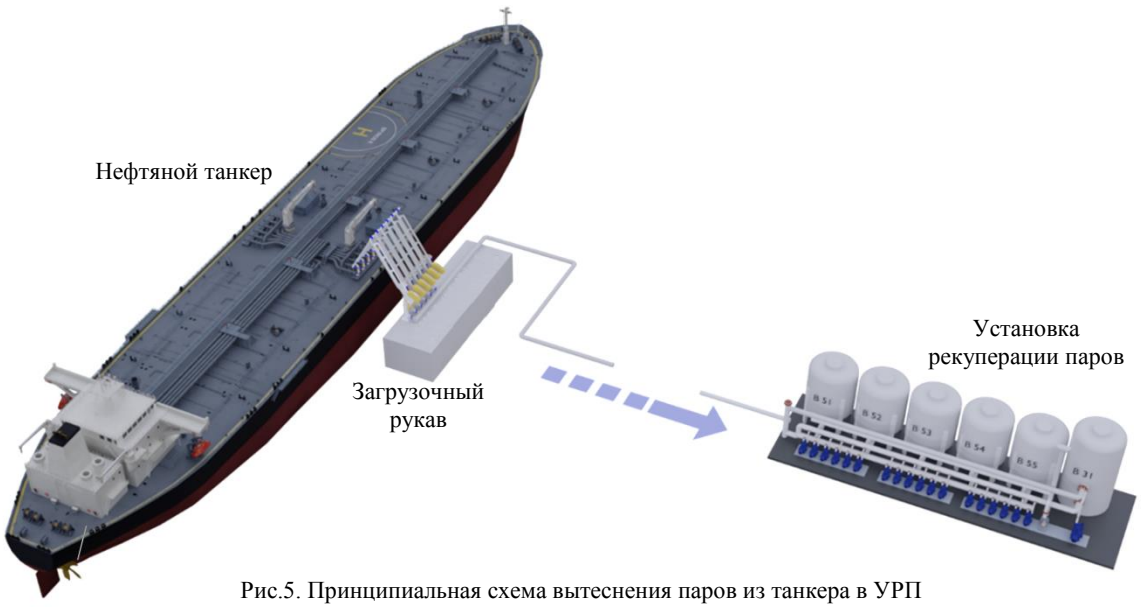


Рис.5. Принципиальная схема вытеснения паров из танкера в УРП

На основе разработанной методики по оценке ущерба, связанного с открытием мастрайзера, выполнены прогнозные расчеты данной величины при среднем массовом содержании углеводородов C_1-C_{10} 273,52 г/м^3 и степени очистки ГВС 72,6 % [37, 38].

Результаты расчетов ущерба, вызванного открытием мастрайзера (из расчета 50 открытий мастрайзера в год, что принято по осредненным данным эксплуатации) [39]: оценочная величина потерь углеводородов за один налив – 12,3 т; прогнозные годовые потери углеводородов – 615 т; ущерб в стоимостном выражении за 1 год (с учетом стоимости безвозвратно потерянного продукта) – 26,623 млн руб.

Ущерб в стоимостном выражении может быть либо полностью устранен, либо минимизирован в случае оперативного управления погрузкой танкера и контролем за работой систем УРП [40, 41].

Заключение. В рамках исследования впервые получена обобщенная модель динамики роста давления в газовом пространстве танкера и проведена апробация полученного решения на данных реальной погрузки в нефтеналивном терминале. Установлено, что изменение давления во время погрузки носит нелинейный характер и имеет локальный максимум. В целях недопущения открытия мастрайзера следует соблюдать такие режимы погрузки, которые находятся вне области критических давлений. Экспериментально установлено, что количественное содержание углеводородов C_1-C_{10} возрастает с ходом погрузки. При этом на начальном ее этапе испаряются легкие компоненты (метан, этан, пропан, бутан), а на завершающих стадиях – гексан и высшие C_{6+}. В рамках разработанной модели оценен возможный резерв по сокращению выбросов в окружающую среду при открытии мастрайзера. Оперативное управление погрузкой танкера позволяет сократить выбросы, сохраняя при этом порядка 26 млн руб. в год.

Проведенные исследования позволяют обеспечить научную базу для мероприятий по сокращению потерь и повышению эффективности эксплуатации УРП. В будущем данные исследования помогут не только повысить эффективность отечественных установок в рамках собственных разработок в русле программ импортозамещения, но и обеспечить безопасную, ресурсосберегающую, экологичную работу нефтеналивных терминалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Invernizzi M., Sironi S.* Odour Emission Rate Estimation Methods for Hydrocarbon Storage Tanks // Chemical Engineering Transactions. 2021. Vol. 85. P. 67-72. DOI: 10.3303/CET2185012

2. *Milazzo M.F., Ancione G., Lisi R.* Emissions of volatile organic compounds during the ship-loading of petroleum products: Dispersion modelling and environmental concerns // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 204. Part 1. P. 637-650. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.045

3. *Woohyun Kim, Munkyu Yoon, Moonyong Lee, Sunwon Park.* CFD Analysis of Cavitation in a Crude Oil Pipeline to an Oil Tanker // Computer Aided Chemical Engineering. 2012. Vol. 31. P. 580-584. DOI: 10.1016/B978-0-444-59507-2.50108-6

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Nwachukwu A.N.* Volatile Organic Compounds Characterization: a Case Study of a Tank Farm in the United States // JSM Environmental Science and Ecology. 2015. Vol. 3 (2). № 1019. DOI: 10.47739/2333-7141/1019

5. *Nwachukwu A.N.* Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) at an Industrial Lagoon Site in North-West England, UK // International Journal of Current Research and Academic Review. 2015. Vol. 3. № 10. P. 164-177.

6. *Nguyen V.T., Pham T.V., Rogachev M.K. et al.* A comprehensive method for determining the dewaxing interval period in gas lift wells // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2023. Vol. 13. P. 1163-1179. DOI: 10.1007/s13202-022-01598-8

7. *Дмитриев М.Е., Садреева К.К., Пшенин В.В., Гайсин М.Т.* Определение относительного расхода газовой фазы при заполнении танкеров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 1. С. 10-13. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10102

8. *Давлетяров Р.Р., Лапина О.А., Половков С.А.* Обеспечение экологической безопасности в районе нефтеналивного терминала порта Приморск // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. № 2. С. 84-87.

9. *Шлёкова И.Ю., Игнатенко Н.В.* Герметизация налива и рекуперация углеводородных паров при отгрузке нефтепродуктов // Безопасность городской среды: Материалы V Международной научно-практической конференции, 21-23 ноября 2017, Омск, Россия. Омск: Омский ГАУ, 2018. С. 224-228.

10. *Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О.* Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 463-479. DOI: 0.31897/PMI.2021.3.15

11. *Karbasian H.R., Dae Yeon Kim, Sang Youl Yoon et al.* A new method for reducing VOCs formation during crude oil loading process // Journal of Mechanical Science and Technology. 2017. Vol. 31. Iss. 4. P. 1701-1710. DOI: 10.1007/s12206-017-0318-7

12. *Tokuslu A.* Estimating greenhouse gas emissions from ships on four ports of Georgia from 2010 to 2018 // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. Vol. 193. Iss. 7. № 385. DOI: 10.1007/s10661-021-09169-w

13. *Virdi S.S., Lee L.Y., Li C., Dev A.K.* Simulation of VOC Emission During Loading Operations in a Crude Oil Tanker // International Journal of Maritime Engineering. 2021. Vol. 163. Part A1. P. 1-16. DOI: 10.5750/IJME.V163IA1.1

14. *Nwachukwu A.N., Uwa C.U., Nwagu K.E., Ephraim B.E.* Determination of Volatile Organic Compounds at a Marine Terminal in United States Using in-Borehole Gas Monitoring // Journal of Marine Science and Technology. 2020. Vol. 28. № 3. P. 219-228. DOI: 10.6119/JMST.202006_28(3).0007

15. *Tamaddoni M., Sotudeh-Gharebagh R., Nario S. et al.* Experimental study of the VOC emitted from crude oil tankers // Process Safety and Environmental Protection. 2014. Vol. 92. Iss. 6. P. 929-937. DOI: 10.1016/j.psep.2013.10.005

16. *Guilin Hu, Butler J., Littlejohns J. et al.* Simulation of cargo VOC emissions from petroleum tankers in transit in Canadian waters // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2020. Vol. 14. Iss. 1. P. 522-533. DOI: 10.1080/19942060.2020.1728386

17. *Poornan P.D., Ali Hasan Ali Abdulla Al Hindi.* Takreer's Approach to Minimize Environmental Emissions by Vapor Recovery During Gasoline and Naphtha Ship Loading // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 7-10 November 2016, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2016. SPE-183323-MS. DOI: 10.2118/183323-MS

18. *Salomone S.* Reducing Emissions From Oil & Gas Facilities By Use Of Field Proven VOC Technology // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 25-27 October 2016, Perth, Australia. 2016. OnePetro, 2016. SPE-182204-MS. DOI: 10.2118/182204-MS

19. *Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L.* Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 32. Iss. 1. P. 113-119. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010

20. *Шаммазов И.А., Аминев А.Н., Пирогов А.Н. и др.* Решение задач оптимизации реконструкции и развития нефтепроводной системы // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 80-83. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-80-83

21. *Hao Xu, Xiafan Xu, Liubiao Chen et al.* A novel cryogenic condensation system combined with gas turbine with low carbon emission for volatile compounds recovery // Energy. 2022. Vol. 248. № 123604. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123604

22. *Пшенин В.В., Коршак А.А., Гайсин М.Т.* Использование метода структурной минимизации среднего риска для идентификации массоотдачи испаряющейся нефти при наливе в танкеры // Нефтяное хозяйство. 2019. № 10. С. 108-111. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-10-108-111

23. *Земенкова М.Ю., Чижевская Е.Л., Земенков Ю.Д.* Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 933-944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105

24. *Sangick Lee, Inhwan Choi, Daejun Chang.* Multi-objective optimization of VOC recovery and reuse in crude oil loading // Applied Energy. 2013. Vol. 108. P. 439-447. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.064

25. *Рогачев М.К., Александров А.Н.* Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 596-605. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13

26. *Rajabi H., Mosleh M.H., Mandal P. et al.* Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing – Global emission inventory and environmental release // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 727. № 138654. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138654

27. *Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D.* Improving the Method of Replacing the Defective Sections of Main Oil and Gas Pipelines Using Laser Scanning Data // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 48-75. DOI: 10.3390/app13010048

28. *Ilinova A.A., Chanysheva A.F.* Algorithm for assessing the prospects of offshore oil and gas projects in the Arctic // Energy Reports. 2020. Vol. 6. № 2. P. 504-509. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.11.110

29. *Yungmeister D.A., Lavrenko S.A., Yacheikin A.I., Urazbakhtin R.Y.* Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the Metrostroy Saint Petersburg mines // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. № 11. P. 1282-1288.

30. *Mayet A.M., Alizadeh S.M., Nurgalieva K.S. et al.* Extraction of Time-Domain Characteristics and Selection of Effective Features Using Correlation Analysis to Increase the Accuracy of Petroleum Fluid Monitoring Systems // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 6. № 1986. DOI: 10.3390/en15061986

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

31. *Александрова Т.Н., Потемкин В.А.* Разработка методики оценки процесса гидроциклонирования с учетом реологических параметров минеральной суспензии // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 908-916. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.12

32. *Yoo Youl Choi, Seok Hee Lee, Jae-Cheul Park et al.* The impact of corrosion on marine vapour recovery systems by VOC generated from ships // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 1. P. 52-58. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2018.01.002

33. *Bayirhan İ., Mersin K., Tokuşlu A., Gazioğlu C.* Modelling of Ship Originated Exhaust Gas Emissions in the Strait of Istanbul (Bosphorus) // International Journal of Environment and Geoinformatics. 2019. Vol. 6. Iss. 3. P. 238-243. DOI: 10.30897/ijegeo.641397

34. *Alver F., Saraç B.A., Şahin U.A.* Estimating of shipping emissions in the Samsun Port from 2010 to 2015 // Atmospheric Pollution Research. 2018. Vol. 9. Iss. 5. P. 822-828. DOI: 10.1016/j.apr.2018.02.003

35. *Litvinenko V.S., Bowbrick I., Naumov I.A., Zaitseva Z.* Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 338. № 130530. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530

36. *Пашкевич М.А., Быкова М.В.* Методология термодесорбционной очистки локальных загрязнений почв от нефтепродуктов на объектах минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 49-60. DOI: 10.31897/PMI.2022.6

37. *Gobbi G.P., Liberto L.D., Barnaba F.* Impact of port emissions on EU-regulated and non-regulated air quality indicators: the case of Civitavecchia (Italy) // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 719. № 134984. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134984

38. *Tokuşlu A., Burak S.* Examination of Exhaust Gas Emissions of Transit Ships in the Istanbul Strait // Academic Platform Journal of Engineering and Science. 2021. Vol. 9. Iss. 1. P. 59-66. DOI: 10.21541/apjes.705918

39. *Mihajlović M., Jovanović M., Pešić R.V.* Volatile organic compounds (VOC) policy innovation in petrochemicals river barge transportation // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. Part 2. P. 1559-1567. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.080

40. *Rahman M.M., Canter C., Kumar A.* Well-to-wheel life cycle assessment of transportation fuels derived from different North American conventional crudes // Applied Energy. 2015. Vol. 156. P. 159-173. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.004

41. *Barykin S.E., Smirnova E.A., Chzhao D. et al.* Digital echelons and interfaces within value chains: End-to-end marketing and logistics integration // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 13929. DOI: 10.3390/su132413929

***Авторы*: В.В.Пшенин**, *канд. техн. наук, доцент, pshenin_VV@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0003-4604-3172* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Г.С.Закирова,** *канд. техн. наук, ассистент, https://orcid.org/0000-0003-3877-8566* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0