

Инжиниринг усовершенствованной модели хемосорбционно-адсорбционной химико-технологической системы рекуперации летучих органических соединений из газовой нефтетанкерной смеси

Валерий П. Мешалкин¹ vpmeshalkin@gmail.com  0000-0000-9443-7847
Евгений А. Бабаков¹ babakhol@mail.ru  0000-0000-8484-3448
Сергей Г. Тихомиров² tikhomirov_1957@mail.ru  0000-0002-8192-0049

1 Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Миусская площадь, А-47, г. Москва, 125047, Россия

2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье рассматривается усовершенствование химико-технологических систем, применяемых для рекуперации паров нефти, с использованием хемосорбционно-адсорбционных схем, включающих узел хемосорбции. Этот узел, в состав которого входит дисковый комбинированный хемоаппарат, предназначен для удаления сернистых компонентов, представляющих экологическую опасность, из газовой смеси нефтетанкерного судна. Указанные компоненты негативно влияют на адсорбционные фильтры с активированным углем и загрязняют атмосферу. Актуальность данного исследования связана с тем, что морские терминалы вырабатывают значительные объемы легких органических и сернистых соединений, выбрасываемых в атмосферу. Процесс наполнения нефтетанков приводит к интенсивным испарениям нефти, что в свою очередь вызывает загрязнение воздуха и потери полезного продукта. Для решения этой проблемы предлагается использовать химико-технологические системы с узлом очистки от сернистых соединений, однако их внедрение требует установки дополнительных устройств для увеличения расхода и, зачастую, вызывает прирост потребления электроэнергии. Основной целью исследования стало выявление возможностей повышения экологической безопасности и оптимизации адсорбционно-абсорбционных систем для рекуперации летучих органических соединений из газовых смесей на работающих нефтетанкерных терминалах с учетом их современного технического состояния. Установлено, что предложенный узел очистки позволяет снизить потребление энергоресурсов за счет отсутствия дополнительных установок (газодувок) и увеличить эффективность работы адсорбционных фильтров на 15–25%. Эффективность методологии очистки низконапорного газа от сероводорода была подтверждена результатами лабораторных исследований с использованием реактора для сероочистки. Применение гомогенного катализатора для очистки газа обеспечивает превращение сероводорода в серу, а меркаптанов — в дисульфиды, при этом содержание остаточного сероводорода и меркаптанов снижается до менее 1 ppm. Также подтверждена эффективность рекуперации летучих органических соединений из газовых смесей нефтетанкерных судов с использованием хемосорбционно-адсорбционной химико-технологической системы.

Ключевые слова: нефть, рекуперация паров, абсорбционно-адсорбционная система, легкие органические соединения, жидкофазное окисление сероводорода.

Engineering of an improved model of a chemisorption-adsorption chemical-technological system for the recovery of volatile organic compounds from a gas oil tanker mixture

Valery P. Meshalkin¹ vpmeshalkin@gmail.com  0000-0000-9443-7847
Evgenii A. Babakov¹ babakhol@mail.ru  0000-0000-8484-3448
Sergey G. Tikhomirov² tikhomirov_1957@mail.ru  0000-0002-8192-0049

1 Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Miusskaya square, 9, 125047, Russia

2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article discusses the improvement of chemical and technological systems used for the recovery of oil vapors through chemisorption and adsorption processes, including a chemisorption unit. This unit, which consists of a disk-based chemo-absorber, is designed to remove harmful sulfur components from the gas mixture in oil tanker vessels. These components can negatively affect activated carbon filters and pollute the atmosphere. The relevance of this research lies in the fact that marine terminals emit significant amounts of light organic compounds and sulfur into the atmosphere during the process of filling oil tanks. The intense evaporation of oil during this process leads to air pollution and loss of valuable product. To solve this problem, we propose using chemical technology systems with a sulfur compound purification unit. However, their implementation requires additional equipment, which can increase consumption and often leads to an increase in electricity usage. The main goal of this study was to find ways to improve environmental safety and optimize adsorption and absorption systems for recovering volatile organic compounds from gas mixtures at oil tanker terminals. We took into account the current technical state of these terminals. We found that the proposed purification unit can reduce energy consumption by eliminating the need for additional installations such as gas blowers. It also increases the efficiency of adsorption filters by 15-25%. The effectiveness of low-pressure gas purification from hydrogen sulfide has been confirmed by laboratory studies using a desulfurization reactor. The use of a homogeneous catalyst for gas purification ensures the conversion of hydrogen sulfide into sulfur and mercaptans into disulfides, while reducing the content of residual hydrogen sulfide and mercaptan to less than 1 ppm. The efficiency of recovering volatile organic compounds from gas mixtures on oil tanker vessels has also been confirmed using a chemisorption-adsorption chemical technology system.

Keywords: oil, vapor recovery, absorption-adsorption system, light organic compounds, liquid-phase oxidation of hydrogen sulfide.

Для цитирования

Мешалкин В.П., Бабаков Е.А., Тихомиров С.Г. Инжиниринг усовершенствованной модели хемосорбционно-адсорбционной химико-технологической системы рекуперации летучих органических соединений из газовой нефтетанкерной смеси // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 4. С. 215–221. doi:10.20914/2310-1202-2024-4-215-221

For citation

Meshalkin V.P., Babakov E.A., Tikhomirov S.G. Engineering of an improved model of a chemisorption-adsorption chemical-technological system for the recovery of volatile organic compounds from a gas oil tanker mixture. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 4. pp. 215–221. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-4-215-221

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Нефть состоит из углеводородов, которые в основном представляют собой водород (около 13% по массе) и углерод (около 85%). Другие элементы, такие как азот (около 0,5%), сера (0,5%), кислород (1%) и металлы, такие как железо, никель и медь (менее 0,1%), также могут быть смешаны с углеводородами в небольших количествах. Преимущественно нефть состоит из алканов линейного и разветвленного строения, циклоалканов и ароматических углеводородов, а также сернистых соединений. Состав нефти зависит от её месторождения. В связи с увеличением спроса на нефть для использования в нефтеперерабатывающих производствах растет количество морских грузоперевозок данного продукта. Выбросы летучих органических и сернистых соединений при погрузке нефти в морские танкеры значительно загрязняют окружающую среду [1]. Летучие органические и сернистые соединения (далее ЛОСС) легко испаряются при нормальных условиях и состоят из смеси различных веществ, таких как алканы (например, метан, этан, пропан и т. д.), алкены, альдегиды, ароматические углеводороды и т. п., включая метан, который влияет на изменение климата [2].

Материалы и методы

Действующие положения и правила по эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу жестко регулируют требования по эмиссии ЛОС

и систем контроля выброса паров. В 2005 году принята Директива 2005/35/ЕС о загрязнении источников с судов и наложении штрафов за нарушения. Его цель состояла в том, чтобы ужесточить существующие правила для предотвращения выброса загрязняющих веществ с судов. [3].

Все нефтеналивные суда, подлежащие контролю за выбросами паров VOC, должны быть оснащены системой сбора паров, которая получила одобрение Регистром в соответствии с «Стандартами для систем контроля выбросов паров» (смотрите циркуляр ИМО MCS/Circ.585) и соблюдает требования 9.9 части VII «Системы и трубопроводы» Правил классификации и проектирования морских судов. На судах, перевозящих сырую нефть, обязательно наличие планов управления ЛОС, которые должны быть одобрены Регистром и разработаны согласно резолюции ИМО МЕРС.185(59), а также циркулярам ИМО МЕРС.1/Circ.680 и МЕРС.1/Circ.719 [4].

При загрузке нефтяного танкера испарившиеся ЛОСС разбавляются в огромных количествах инертного газа, когда газовая смесь вытесняется притоком нефти во время погрузочных операций танкерных резервуаров морских судов. Концентрация легких органических и сернистых соединений в газоздушном смеси достигает максимума в конце загрузки. Типичный состав газовой нефтетанкерной смеси в момент полного заполнения нефтяного танкера представлен в таблице 1 [5].

Таблица 1.

Типичный состав газовой нефтетанкерной смеси в момент полного заполнения танкера

Table 1.

Typical composition of the gas oil tanker mixture at the moment of complete filling of the tanker

Компоненты Components	Содержание углеводородов, мг/м ³ Hydrocarbon content, mg/m ³	ПДК м/р, мг/м ³ MPC m/r, mg/m ³	Порог чувствительности по запаху, мг/м ³ Odor sensitivity threshold, mg/m ³
Метан Methane	7144,67	200	
Этан Ethan	8694,25	200	
Пропан Propane	74329,5	200	
Изобутан Isobutane	124584	15	483
н-Бутан n-Butane	174304	200	483
H ₂ S	496,98	0,008	0,008
Изоалканы > C ₅ (Изопентан, 2-Метилпентан и др.) Isoalkanes > C ₅ (Isopentane, 2-Methyl pentane, etc.)	43457, 4	от 50	От 50
Алканы > C ₅ (н-Пентан, н-Гексан, Гептан, н-Октан) Alkanes > C ₅ (n-Pentane, n-Hexane, Heptane, n-Octane)	17345,4	От 50	От 33
Меркаптаны (Метилмеркаптан, Этилмеркаптаны) Mercaptan (Methyl Mercaptan, Ethyl Mercaptan)	777,09	0,006	0,0001
Циклоалканы (Метилциклопентан, Циклогексан, и др.) Cycloalkanes (Methylcyclopentane, Cyclohexane, etc.)	691	От 1,4	От 40
Арены (Бензол, толуол) Arenas (Benzene, Toluene)	82,41	От 0,3	От 30

Химико-технологические системы (далее – ХТС) рекуперации паров ЛОСС из газовой нефтетанкерной смеси ограничивают выбросы летучих загрязняющих веществ в атмосферу и возвращают ЛОС в жидкую фазу абсорбента. Для современных морских терминалов в основном

применяются традиционные адсорбционно-абсорбционные ХТС (рисунок 1). Данные установки рекуперации паров (далее УРП) размещаются в береговой зоне или в непосредственной близости от трубопроводов, проходящих по морскому причалу [6].

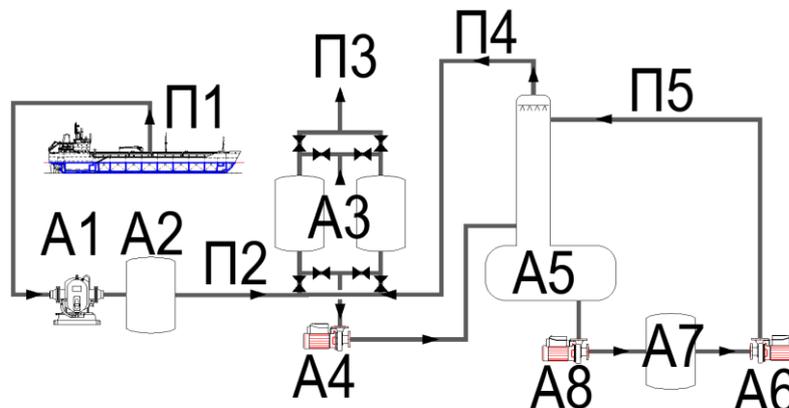


Рисунок 1. Схема традиционной адсорбционно-абсорбционной химико-технологической системы рекуперации легких органических соединений из газовой нефтетанкерной смеси: П1 – газовый поток от танкера; А1 – газодувочный аппарат; А2 – адсорбер с хемосорбентом; П2 – очищенная от сернистых соединений газовая смесь; А3 – адсорбционная колонна с активированным углем; П3 – очищенная газовая смесь; А4 – вакуумный насос; А5 – колонна-абсорбер; П4 – остаточная газовая смесь; А7 – береговой резервуар с абсорбентом; А6 – подающий насос; А8 – возвратный насос, П5 – подача абсорбента

Figure 1. Scheme of traditional adsorption-absorption chemical-technological system for recovery of light organic compounds from gas oil tanker mixture: П1 – gas flow from the tanker; А1 – gas blower; А2 – adsorber with chemisorbent; П2 – gas mixture purified from sulfur compounds; А3 – adsorption column with activated carbon; П3 – purified gas mixture; А4 – vacuum pump; А5 – absorber column; П4 – residual gas mixture; А7 – shore tank with absorbent; А6 – feed pump; А8 – return pump; П5 – supply of absorbent

Газовый поток П1 из грузового танка судна, в который осуществляется погрузка, подается газодувочным аппаратом А1 в адсорбер А2, заполненный хемосорбентом (железо, марганец, цинк и т. п.). Сернистые соединения газовой смеси П1 в адсорбционном аппарате А2 необратимо реагируют с сероводородом и частично с меркаптанами [7]. Очищенная от сернистых соединений газовая смесь П2 поступает на одну из адсорбирующих колонн А3, заполненных активированным углем, затем очищенная от углеводородов газовая смесь П3 поступает в атмосферу. После определенного количества времени работы фильтра А3 загрузка с активированным углем насыщается ЛОС, Поток П2 переключается на второй фильтр-адсорбер из пары А3, в то время как первый адсорбер регенерируется за счет создания в корпусе фильтра вакуума с помощью вакуумного насоса А4. С понижением давления процесс адсорбции реверсируется, и ЛОС покидают поверхность активированного угля и перемещаются при помощи вакуумного насоса А4 в колонну повторного поглощения А5, где они абсорбируются

во встречном потоке жидкого продукта П5 [8]. В качестве жидкого абсорбента используется складированный или перегружаемый нефтепродукт. Остаточная газовая смесь П4 покидает адсорбционную колонну А5 через верх и перемещается обратно на вход адсорбционных аппаратов А3 [9]. Вместе с тем, метан практически не адсорбируется универсальными активированными углями. Эта слабо адсорбируется, но в процессе адсорбции вытесняется более тяжелыми компонентами, к которым активированный уголь имеет большую адсорбирующую способность [10].

Обсуждение

Предлагается применить хемосорбционно-адсорбционную ХТС рекуперации УВ, отличающуюся тем, что применяется комбинированный хемосорбционный дисковый аппарат, не требующий применения дополнительного газодувочного аппарата [11]. Данный аппарат выполняет очистку от сернистых соединений на основе каталитической технологии очистки газа от H_2S и RSH в элементарную серу и дисульфиды [12], а также абсорбцию ЛОС (рисунок 2).

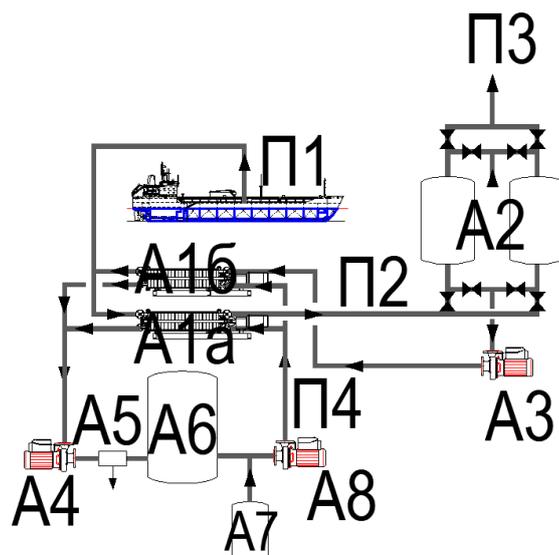


Рисунок 2. Усовершенствованная новая абсорбционно-адсорбционная химико-технологическая система рекуперации легких органических соединений из газовой нефтетанкерной смеси: П1 – газовый поток от танкера; А1 – хемосорбционный дисковый аппарат; П2 – очищенная от сернистых соединений газовая смесь; А2 – адсорбционная колонна с активированным углем; П3 – очищенная газовая смесь; А3 – вакуумный насос; А4 – возвратный насос; А5 – фильтр-пресс; А7 – резервуар с раствором катализатора; А8 – подающий насос; П4 – жидкая смесь абсорбента и раствора катализатора

Figure 2. Improved new absorption-adsorption chemical-technological system for recovery of light organic compounds from gas oil tanker mixture: П1 – gas flow from the tanker; А1 – chemisorption disk apparatus; П2 – gas mixture purified from sulfur compounds; А2 – adsorption column with activated carbon; П3 – purified gas mixture; А3 – vacuum pump; А4 – return pump; А5 – filter press; А7 – tank with catalyst solution; А8 – feed pump; П4 – liquid mixture of absorbent and catalyst solution

Низконапорный газовый поток П1 из грузового танка судна, в который осуществляется погрузка, поступает в дисковый хемосорбционный горизонтальный аппарат А1а. Сернистые соединения газовой смеси П1 в хемосорбционном аппарате А1а необратимо реагируют с раствором катализатора и окисляются с образованием серы и дисульфидов [13]. Для очистки от сероводорода и улавливания ЛОС в нижнюю часть цилиндра дискового аппарата А1а подается раствор абсорбента с катализатором П4, который образуется при дозировании концентрированного раствора катализатора из емкости А7 в поток абсорбента П4 [14], в противоположном направлении движется газовая смесь П1. Абсорбент после аппарата А1а, после окисления меркаптанов и сероводорода до дисульфидов и элементарной серы, содержащий средне- и мелкодисперсной серу поступает с помощью насоса А4 в фильтр-пресс А5. Серный осадок отводится фильтром-прессом А5 на потоке при циркуляции абсорбента. Абсорбент, насыщенный поглощенными углеводородами, возвращается в резервуар хранения А6. Очищенная от сернистых соединений газовая смесь П2 поступает на одну из адсорбирующих колонн А2,

заполненных активированным углем, затем очищенная от ЛОС газовая смесь П3 поступает в атмосферу. После определенного количества времени работы фильтра А2 загрузка с активированным углем насыщается ЛОС, Поток П2 переключается на второй фильтр-адсорбер из пары А3, в то время как первый адсорбер регенерируется за счет создания в корпусе фильтра вакуума с помощью вакуумного насоса А3. С понижением давления процесс адсорбции реверсируется, и ЛОС покидают поверхность активированного угля и перемещаются при помощи вакуумного насоса А3 в дисковый пленочный аппарат А1, где они абсорбируются во встречном потоке жидкого продукта П4 [15]. В качестве жидкого абсорбента используется складированный или перегружаемый нефтепродукт. Остаточная газовая смесь покидает дисковый пленочный аппарат А1б перемещается обратно на вход хемосорбционного дискового аппарата А1б [16].

В качестве жидкого абсорбента используется складированный или перегружаемый нефтепродукт. Для поглощения ЛОС применяется абсорбент, имеющийся в наличии в составе объекта.

Результаты

Нами были проведены экспериментальные исследования сероочистки/демеркаптанализации низконапорного газа по реакции



проводили на лабораторной установке, включающей хемосорбционный лабораторный аппарат. В данный аппарат помещали раствор

катализатора в дизельном топливе. На вход реактора подавали сырье сероочистки, модельную смесь метана с сероводородом и метилмеркаптаном. Реакцию проводили по методике [17] при температуре 25 °С, атмосферном давлении.

Содержание сероводорода и меркаптанов на входе и выходе сероочистки приведено в таблице 2.

Таблица 2.

Остаточное содержание сероводорода и метилмеркаптана до/после очистки в присутствии гомогенного катализатора при температуре 25 °С и атмосферном давлении

Table 2.

Residual content of hydrogen sulfide and methyl mercaptan before/after purification in the presence of a homogeneous catalyst at a temperature of 25 °С and atmospheric pressure

Опыт Experiment	Объем раствора катализатора, мл Volume catalyst solution, ml	Количество катализатора, мл* Amount catalyst solution, ml	Скорость газа, л/мин Gas velocity, l/min	H ₂ S, ppm		CH ₃ SH, ppm	
				Вход Inlet	Выход Output	Вход Inlet	Выход Output
1	200	0,1	8,0	250	6	250	20
2	200	0,1	7,0	250	7	250	20
3	200	0,3	6,0	250	7	250	20
4	200	0,3	5,0	250	5	250	20
5	200	0,5	5,0	250	0*	250	0*

Как видно из данных таблицы, каталитическая сероочистка [18] может обеспечить конверсию сероводорода в серу, меркаптанов в дисульфиды, остаточное содержание серосодержащих экотоксикантов при этом может быть снижено до требуемых показателей.

Заключение

Можно сделать вывод, что применение адсорбционно-абсорбционных ХТС рекуперации УВ из нефтетанкерных газов требует дополнительного оборудования (газодувка, фильтр перед газодувкой и т. п.) [18]. Нами предложена модернизация ХТС за счет применения ресурсоэффективной хемосорбционно-адсорбционной схемы, а именно:

1) Модернизация ХТС за счет применения хемосорбционно-адсорбционной схемы, оснащённой дисковым хемоаппаратом с применением

каталитического окисления сероводорода и меркаптанов в элементарную серу и дисульфиды, которая позволяет удалять из нефтетанкерных газов экологически опасные сернистые компоненты без повышения температуры и значительного перепада давления газовой смеси [19];

2) При использовании дискового хемоаппарата следует ожидать уменьшение расхода энергоресурсов за счет отсутствия газодувки, а также уменьшение ресурсоемкости адсорбционных фильтров, наполненных активированным углем, за счет предварительной абсорбции ЛОС из нефтетанкерных газов [20].

Данные результаты могут быть использованы при проектировании хемосорбционно-адсорбционных ХТС рекуперации ЛОС из нефтетанкерных газов.

Литература

- 1 Свецкий А.В. Правовая охрана морской среды при транспортировке нефти и нефтепродуктов: международно-правовые аспекты // Международное право и международные организации. 2022. № 4. С. 22–33. doi: 10.7256/2454-0633.2022.4.39139
- 2 Meshalkin V.P., Dovì V.G., Bobkov V.I., Belyakov A.V. et al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering // Mendeleev Communications. 2021. № 31. P. 593–604. doi: 10.1016/j.mencom.2021.09.003
- 3 Rajabi H., Mosleh M.H., Mandal P., Lea-Langton A. Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing. Global emission inventory and environmental release. Science of The Total Environment. 2020. V. 727. P. 132–139.
- 4 Guilin H., James B., Jennifer L., Qianpu W. et al. Simulation of cargo VOC emissions from petroleum tankers in transit in Canadian waters // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2020. № 14. P. 522–533. doi: 10.1080/19942060.2020.1728386
- 5 Темердашев А.З., Афонин А.С., Корпакова И.Г. Хромато-масс-спектрометрическая идентификация и компонентного состава выбросов углеводородов при перегрузке товарных нефтепродуктов // Аналитика и контроль. 2018. Т. 72. № 1. С. 999–1006. doi:10.15826/analitika.2018.22.1.008

- 6 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. doi: 10.31897/PMI.2023.29
- 7 João S., Ana L., Caetano M., Acto C., et al. Simulation and scale-up of the desulphurization of gas streams by adsorption method using numerical simulation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. V. 84. P. 103693. doi: 10.1016/j.jngse.2020.103693
- 8 Begmanova G.E., Dauletbayeva R.K., Atazhanova Z.S. Analysis of Modern Methods of Gas Cleaning From Hydrogen Sulfide // *American Journal of Social and Humanitarian Research*. 2022. V. 3. №. 5. P. 208–212. doi: 10.31150/ajshr.v3i5.1098
- 9 Guilin H., Butler J., Littlejohns J., Qianpu W. et al. Simulation of VOC Emission During Loading Operations in a Crude Oil Tanker. *International Journal of Maritime Engineering*. 2021. V. 163. P. 1–16. doi: 10.5750/ijme.v163iA1.1
- 10 Xu H., Xiao-tong X., Xiafan X., Jia G. et al. Development of a volatile organic compounds cryogenic condensation recovery system cooled by liquid nitrogen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. P. 1240. doi: 10.1088/1757-899X/1240/1/012098
- 11 Pshenin, V.V., Zakirova G.S., Antonov A.A., Skorobogatov A.A. Determination of the total volume of the displaced gas-air mixture per one operation of tanker loading. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2022. №. 5(139). P. 122–128. doi:10.17122/ntj-oil-2022-5-122-128
- 12 Pshenin V.V. Determining diameter of gas phase venting pipeline at marine oil-loading terminals. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2024. V. 14(2). P.120–127. doi:10.28999/2541-9595-2024-14-2-120-127
- 13 Коршак А.А., Николаева А.В., Нагаткина А.С., Гайсин М.Т. и др. Методика прогнозирования степени улавливания паров углеводородов при абсорбции // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т.10 № 2. С. 202–209. doi: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-202-209
- 14 Georgiadis A.G., Charisiou N.D., Goula M.A. Removal of Hydrogen Sulfide From Various Industrial Gases: A Review of The Most Promising Adsorbing Materials. *Catalysts*. 2020. V.10(5). P. 1–36. doi:10.3390/catal10050521
- 15 Choi Y.Y., Seok-Hee L., Jae-Cheul P., Doo J.C. et al. The impact of corrosion on marine vapour recovery systems by VOC generated from ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2018. V. 11. P. 52-58. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.01.002
- 16 Fetisov V.G., Mohammadi A.H., Pshenin V.V., Kupavykh K.S. et al. Improving the economic efficiency of vapor recovery units at hydrocarbon loading terminals. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*. 2021. № 76. P. 1–9. doi: 10.2516/ogst/2021022
- 17 Пат. № 2768952, RU, B01D3/08, Теплообменный аппарат // Тюрин А.А., Бабаков Е.А. № 2021100746 Заявл. 14.01.2021 г. Опубл. 25.03.2022
- 18 Коршак А.А., Коршак А.А., Захарченко А.В. Оценка области применения установок рекуперации паров нефтепродуктов по зарубежным данным // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т. 13, № 3. С. 252–260.
- 19 Коршак А.А., Гайсин М.Т. Методология выбора оптимального режима работы адсорберов при улавливании паров нефти и нефтепродуктов // Нефтяное хозяйство. 2022. № 8. С. 140–143. doi: 10.24887/0028-2448-2022-8-140-143
- 20 Коршак А.А., Выходцева Н.А., Гайсин М.Т. Влияние эксплуатационных факторов на работу адсорбционных установок рекуперации паров нефти // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9, № 5. С. 550–557. doi: 10.28999/2541-9595-2019-9-5-550-557

21

References

- 1 Savitsky A.V. Legal protection of the marine environment during transportation of oil and oil products: international legal aspects // *International law and international organizations*. 2022. no. 4. pp. 22–33. doi: 10.7256/2454-0633.2022.4.39139
- 2 Meshalkin V.P., Dovi V.G., Bobkov V.I., Belyakov A.V. et al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering // *Mendeleev Communications*. 2021. no. 31. pp. 593–604. doi: 10.1016/j.mencom.2021.09.003 (in Russian).
- 3 Rajabi H., Mosleh M.H., Mandal P., Lea-Langton A. Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing – Global emission inventory and environmental release. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 727. pp. 132–139.
- 4 Guilin H., James B., Jennifer L., Qianpu W. et al. Simulation of cargo VOC emissions from petroleum tankers in transit in Canadian waters // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2020. no. 14. pp. 522–533. doi: 10.1080/19942060.2020.1728386
- 5 Temerdashev A.Z., Afonin A.S., Korpakova I.G. Chromatographic-mass spectrometric study of the emissions composition during the petroleum products loading // *Analytics and control*. 2018. Vol. 72, no. 1. pp. 999–1006. doi: 10.15826/analitika.2018.22.1.008 (in Russian).
- 6 Pshenin V.V., Zakirova G.S. Improving the efficiency of oil vapor recovery units in the commodity transport operations at oil terminals // *Zapiski Gornogo Instituta*. 2024. Vol. 265. pp. 121–128. doi: 10.31897/PMI.2023.29 (in Russian).
- 7 João S., Ana L., Caetano M., Acto C. et al. Simulation and scale-up of the desulphurization of gas streams by adsorption method using numerical simulation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. doi: 10.1016/j.jngse.2020.103693
- 8 Begmanova G.E., Dauletbayeva R.K., Atazhanova Z.S. Analysis of Modern Methods of Gas Cleaning From Hydrogen Sulfide // *American Journal of Social and Humanitarian Research*. 2022. Vol. 3. no. 5. pp. 208–212. doi: https://doi.org/10.31150/ajshr.v3i5.1098
- 9 Guilin H., Butler J., Littlejohns J., Qianpu W. et al. Simulation of VOC Emission During Loading Operations in a Crude Oil Tanker. *International Journal of Maritime Engineering*. 2021. Vol. 163. pp. 1–16. doi: 10.1080/19942060.2020.1728386

10 Xu H., Xiao-tong X., Xiafan X., Jia G. et al. Development of a volatile organic compounds cryogenic condensation recovery system cooled by liquid nitrogen. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering . 2022. pp. 1240. doi: 10.1088/1757-899X/1240/1/012098

11 Pshenin, V.V., Zakirova G.S., Antonov A.A., Skorobogatov A.A. Determination of the total volume of the displaced gas-air mixture per one operation of tanker loading. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2022. no. 5. pp. 122–128. doi:10.17122/ntj-oil-2022-5-122-128

12 Pshenin V.V. Determining diameter of gas phase venting pipeline at marine oil-loading terminals. Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2024. Vol. 14. pp. 120–127. doi:10.28999/2541-9595-2024-14-2-120-127.

13 Korshak A.A., Nikolaeva A.V., Nagatkina A.S., Gaisin M.T. et al. Method for predicting the degree of hydrocarbon vapor recovery at absorption // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2020. Vol.10 no. 2. pp. 202–209. doi: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-202-209 (in Russian).

14 Georgiadis A.G., Charisiou N.D., Goula M.A. Removal of Hydrogen Sulfide From Various Industrial Gases: A Review of The Most Promising Adsorbing Materials. Catalysts. 2020. Vol. 10. pp. 1–36. doi:10.3390/catal10050521

15 Choi Y.Y., Seok-Hee L., Jae-Cheul P., Doo J.C. et al. The impact of corrosion on marine vapour recovery systems by VOC generated from ships. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2018. Vol. 11(1) doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.01.002

16 Fetisov V.G., Mohammadi A.H., Pshenin V.V., Kupavykh K.S., Artyukh D.E. Improving the economic efficiency of vapor recovery units at hydrocarbon loading terminals. Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles. 2021. no. 76. pp. 1–9. doi: 10.2516/ogst/2021022

17 Tyurin A.A., Babakov E.A. Heat and mass transfer apparatus // Patent RF, no. 276895, 2022. (in Russian).

18 Korshak A.A., Zakharchenko A.V. Assessment of scope of application of oil products vapor recovery units according to foreign data // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2023. Vol. 13, no. 3. pp. 252–260. (in Russian).

19 Korshak A.A., Gaisin M.T. Methodology for selecting the optimal operating mode of adsorbers for capturing oil and oil product vapors // Oil Industry. 2022. no. 8. pp. 140–143. doi: 10.24887/0028-2448-2022-8-140-143 (in Russian).

20 Korshak A.A., Vyhodtseva N.A., Gaisin M.T. Influence of operating factors on the performance of oil vapor recovery adsorption plants // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2019. Vol. 9. no. 5. pp. 550–557. doi: 10.28999/2541-9595-2019-9-5-550-557 (in Russian).

Сведения об авторах

Валерий П. Мешалкин д.т.н., академик РАН, кафедра логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва А-47, Миусская площадь, 9, 125047, Россия, vpmeshalkin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0000-9443-7847>

Евгений А. Бабakov соискатель, кафедра логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва А-47, Миусская площадь, 9, 125047, Россия, babakhol@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0000-8484-3448>

Сергей Г. Тихомиров д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tikhomirov_1957@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Information about authors

Valery P. Meshalkin Doctor of Technical Sciences., Academician of the RAS, professor, the department of logistics and economic informatics of Russia, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Miusskaya square, 9, 125047, Russia, vpmeshalkin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0000-9443-7847>

Evgenii A. Babakov postgraduate, department of logistics and economic informatics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Miusskaya square, 9, babakhol@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0000-8484-3448>

Sergey G. Tikhomirov Dr. Sci. (Engin.), professor, information and control systems department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tikhomirov_1957@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 29/10/2024	После редакции 14/11/2024	Принята в печать 28/11/2024
Received 29/10/2024	Accepted in revised 14/11/2024	Accepted 28/11/2024