



Совершенствование адсорбционно-абсорбционной установки очистки газовой смеси от легких органических соединений и сероводорода при погрузке нефти на морские танкеры



Валерий П. Мешалкин¹ vpmeshalkin@gmail.com  0000-0001-6956-6705
Евгений А. Бабаков¹ babakhol@mail.ru  0000-0002-4729-4881

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

Аннотация. В статье предложено совершенствование адсорбционно-абсорбционных установок рекуперации паров нефти за счет применения узла очистки от сернистых соединений. Данный узел позволяет удалять из паров нефти экологически опасные сернистые компоненты, негативно влияющие на адсорбционные фильтры, без повышения температуры и значительного перепада давления газовой смеси. Актуальность проведенного исследования обусловлена тем, что морские терминалы являются объектами значительной эмиссии углеводородов и сернистых соединений. Интенсивное испарение нефти в процессе налива приводит к загрязнению атмосферного воздуха и потере ценного продукта. Решить проблему призваны установки рекуперации паров с узлом очистки от сернистых соединений, однако их внедрение на объектах налива требует установки дополнительных побудителей расхода и, как правило, дополнительному расходу электроэнергии. Основная цель исследования состояла в изыскании возможностей повышения экологической безопасности и совершенствования адсорбционно-абсорбционных установок рекуперации паров на действующих объектах налива морских танкеров с учетом существующего уровня их технического оснащения. Установлено, что использование предложенного узла очистки от сернистых соединений позволяет ожидать уменьшения расхода энергоресурсов за счет отсутствия побудителей расхода (газодувки), а также увеличение работы адсорбционных фильтров на 35–45 %. Эффективность моделирования очистки низконапорного газа от сероводорода подтверждена исследованиями на лабораторной установке, включающей реактор сероочистки. Очистка газа от сероводорода с помощью комплекса хелатного железа обеспечивает конверсию сероводорода в серу, остаточное содержание сероводорода при этом может быть снижено менее 1 ppm. Реализация каталитической очистки комплексом хелатного железа в дисковом пленочном аппарате позволяет очистить газовую смесь от примесей сероводорода.

Ключевые слова: газовая смесь, установка рекуперации, органические соединения, жидкофазное окисление, сероводород.

Improvement of the adsorption-absorption vapor recovery unit for cleaning the gas-air mixture from volatile organic compounds and hydrogen sulfide when loading naphtha on marine tankers

Valery P. Meshalkin¹ vpmeshalkin@gmail.com  0000-0001-6956-6705
Evgeny A. Babakov¹ babakhol@mail.ru  0000-0002-4729-4881

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

Abstract. The article proposes the improvement of adsorption and absorption plants for the recovery of naphtha vapors through the use of a sulfur compounds purification unit. This unit allows you to remove environmentally hazardous sulfur components from naphtha vapors, which adversely affect adsorption filters, without increasing the temperature and significant pressure drop of the gas-air mixture. The relevance of the study is due to the fact that marine terminals are objects of significant emissions of hydrocarbons and sulfur compounds. Intensive evaporation of naphtha during the filling process leads to air pollution and loss of valuable product. Vapor recovery units with a desulfurization unit are designed to solve the problem, however, their implementation at loading facilities requires the installation of additional flow stimulators and, as a rule, additional electricity consumption. The main purpose of the study was to find ways to improve environmental safety and improve adsorption and absorption vapor recovery units at existing sea tanker loading facilities, taking into account the current level of their technical equipment. It is established that the use of the proposed desulfurization unit makes it possible to expect a reduction in energy consumption due to the absence of flow stimulators (gas blowers), as well as an increase in the operation of adsorption filters by 35–45%. The effectiveness of modeling the purification of low-pressure gas from hydrogen sulfide has been confirmed by studies on a laboratory installation including a desulfurization reactor. Purification of gas from hydrogen sulfide using a chelated iron complex ensures the conversion of hydrogen sulfide into sulfur, while the residual content of hydrogen sulfide can be reduced to less than 1 ppm. The implementation of catalytic purification by a chelated iron complex in a disk film apparatus makes it possible to purify the gas-air mixture from hydrogen sulfide impurities.

Keywords: gas-air mixture, recovery unit, organic compounds, liquid-phase oxidation, hydrogen sulfide.

Введение

Нефть представляет собой смесь парафинов, oleфинов, нафтенов, ароматических соединений, так же возможно наличие сернистых соединений.

Для цитирования

Мешалкин В.П., Бабаков Е.А. Совершенствование адсорбционно-абсорбционной установки очистки газовой смеси от легких органических соединений и сероводорода при погрузке нефти на морские танкеры // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 243–248. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-243-248

For citation

Meshalkin V.P., Babakov E.A. Improvement of the adsorption-absorption vapor recovery unit for cleaning the gas-air mixture from volatile organic compounds and hydrogen sulfide when loading naphtha on marine tankers. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 243–248. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-2-243-248

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

в нефтеперерабатывающих производствах растет количество морских грузоперевозок данного продукта [1]. Выбросы в атмосферу при погрузке нефти в морские танкеры являются значительными загрязнителями окружающей среды. Выбросы в основном состоят из легких органических соединений, неметановых соединений, а также сероводорода [2]. Летучие органические соединения (далее ЛОС) – это органические химические вещества, которые легко испаряются при нормальных условиях. ЛОС включают различные вещества, такие как алканы (например, метан, этан, пропан и т. д.), алкены, альдегиды, ароматические углеводороды и т. п.

Материалы и методы

В стандартах качества воздуха, разработанных Агентством по охране окружающей среды США, максимально допустимое количество УВ за 3 ч составляет $1,6 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ (0,24 промилле). Недавно принятый Европейским сообществом предельный уровень выбросов ограничен в 35 г. общего содержания органических соединений (ООС) на кубический метр (35 г. ООС выделенных/м³) для средств хранения и распределения нефтепродуктов [3]. Гетеборгский протокол 1999 года по борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном был принят для

установления уровней выбросов для четырех загрязнителей, включая серу, NO_x, ЛОС и аммиак. Протокол устанавливает жесткие предельные значения для конкретных источников выбросов. В Российской Федерации устанавливаются предельно-допустимая концентрация (ПДК) органических и сернистых соединений в атмосферном воздухе согласно требованиями ФЗ № 96 от 4 мая 1999 г. «Об охране атмосферного воздуха». Эти требования направлены на снижение воздействия на окружающую среду [4].

Во время загрузки судов на газовую фазу танкеров влияет образование паров углеводородов в объеме жидкости и их диффузия, а также одновременное изменение объема загрузки и выпуск газа из танкера [5,6]. В результате газовая смесь инертного газа и паров углеводородов выходит из танков морского судна. Эта смесь потенциально может быть заменена газом, более насыщенным парами ЛОС. Концентрация легких органических и сернистых соединений в газовой смеси достигает максимума в конце загрузки [7]. Количественный и компонентный состав газовой смеси нефти в момент полного заполнения танкера представлен в таблице 1 [8].

Таблица 1.

Количественный и компонентный состав газовой смеси нефти в момент полного заполнения танкера

Table 1.

Quantitative and component composition of the gas-air mixture of naphtha at the moment of full filling of the tanker

Компоненты Components	Содержание углеводородов, мг/м ³ Content of hydrocarbons, mg/m ³	ПДК м/р, мг/м ³ WMD, m/r, mg/m ³	Порог чувствительности по запаху, мг/м ³ Odor susceptibility threshold, mg/m ³
Пропан Propane	18600	200,0	
н-Бутан n-Butane	27300	200,0	483
H ₂ S	120	0,008	0,008
Алканы > C ₅ (н-Пентан, н-Гексан, Гептан, н-Октан) Alkanes > C ₅ (n-Pentane, n-Hexane, Heptane, n-Octane)	49250	≥50	≥33
М-ксилол M-xylene	640	≥1,4	≥40
Арены (Бензол, толуол) Arenas (Benzene, Toluene)	5400	≥0,3	≥30

Установки для рекуперации (улавливания) паров ЛОС ограничивают выбросы летучих органических соединений и возвращают ЛОС в жидкую фазу. На современных морских нефтепродуктовых терминалах применяются в основном адсорбционно-абсорбционные установки (рисунок 1). Данные УРП размещаются в береговой зоне или в непосредственной близости от трубопроводов, проходящих по морскому причалу.

Газовоздушная смесь, образующаяся при загрузке морского танкера, отводится в установку рекуперации. Работа УРП предусматривает

подачу газовой смеси в адсорбционные фильтры, заполненные активированным углем. После определенного количества времени работы адсорбционный фильтр насыщается углеводородами, и поток газовой смеси переключается на второй фильтр-адсорбер из пары, в то время как первый адсорбер регенерируется за счет создания в корпусе адсорбционного фильтра вакуума [9]. Компоненты, десорбированные из фильтра, компримируются вакуумным насосом до давления 110–115 кПа и подаются в колонну повторного поглощения (контактный аппарат), где они абсорбируются во встречном

потоке жидкого продукта. В качестве жидкого абсорбента используется складываемый или перегружаемый нефтепродукт. Остаточный воздух, насыщенный углеводородами, покидает колонну через верх и перемещается обратно на вход паров в УРП [10].

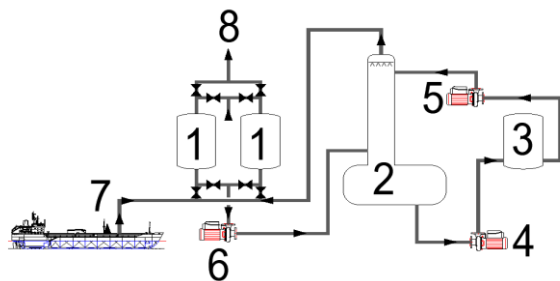


Рисунок 1. Схема адсорбционно-абсорбционной установки для очистки газовой смеси от морских танкеров: 1 – адсорбционный фильтр; 2 – колонна-абсорбер; 3 – резервуар с продуктом; 4 – возвратный насос; 5 – подающий насос; 6 – вакуумный насос; 7 – танкер; 8 – очищенный воздух

Figure 1. Scheme of the adsorption-absorption type vapor recovery unit for cleaning the gas-air mixture from marine tankers: 1 – adsorption filter; 2 – absorber column; 3 – product tank; 4 – return pump; 5 – feed pump; 6 – vacuum pump; 7 – tanker; 8 – purified air

Вместе с тем, метан практически не адсорбируется универсальными активированными углями. Этан слабо адсорбируется, но в процессе адсорбции вытесняется более тяжелыми компонентами, к которым активированный уголь имеет большую адсорбирующую способность [11].

Одним из важных параметров в выборе конструкции и размеров адсорбера играет время адсорбции и десорбции. Так, если система, состоящая из нескольких адсорберов, должна обеспечить непрерывную очистку газовых потоков значительных объемов, важно рассчитать время цикла каждого адсорбера и выбрать его необходимый размер, учитывая отведенную площадь.

Анализ решений стандартной адсорбционно-абсорбционной установки рекуперации паров нефти показал, что наличие сероводорода в газовой смеси приводит к снижению эффективности данных установок. При попадании паров сероводорода в активированный уголь происходит окисление сероводорода до элементарной серы кислородом на поверхности активированного угля. Полученная в результате окисления элементарная сера задерживается активированным углем. По мере заполнения его поверхности процесс очистки газа прекращается [10].

В настоящее время для очистки газовой смеси от сероводорода применяется в основном хемосорбционный метод очистки газовой смеси производительностью не более 30000 м³/час, в которых использованы

адсорбенты на основе оксидов металлов (железа, марганца, цинка), которые необратимо реагируют с H₂S [12]. Также может применяться каталитическое жидкофазное окисление сероводорода [13]. Использование хемосорбционных способов сопряжено с перепадом давления на адсорбционных фильтрах в среднем не менее 10 кПа, также для адсорбентов на основе оксидов железа требуется дополнительное увлажнение газовой смеси [16–20]. При использовании каталитического жидкофазного окисления сероводорода в качестве каталитического аппарата используют барботажные аппараты, перепад давления в которых зависит от высоты жидкости и составляет не менее 1,5 метра водяного столба. В связи с тем, что рабочее избыточное давление в танках судна составляет от 7000 Па изб. для использования хемосорбционных и жидкофазных способов очистки требуются дополнительные газодувки для повышения давления перед адсорберами. Использование газодувок приводит к повышению температуры газовой смеси, что негативно сказывается на адсорбции ЛОС на адсорбционных фильтрах активированным углем, дополнительному расходу электроэнергии, а также данное требует дополнительной защиты от возможности вакуумирования танков морского судна. При повышении давления на 10 кПа температура газовой смеси повышается не менее чем на 10 °С, что может являться критическим параметром при исходной температуре газовой смеси от 30 °С для адсорбционно-абсорбционных установок [14].

Обсуждение

Выполненный анализ режимов работы УРП показывает, что ряд проектных решений, являющимися типовыми для установок, рекуперующих пары легких нефтепродуктов могут являться критическими для улавливания паров нефти и приводят к дополнительному расходу электроэнергии и ресурсов.

Предлагается применить для очистки газовой смеси от сернистых соединений каталитическое жидкофазное окисление сероводорода в элементарную серу хелатным комплексом железа, с использованием в качестве каталитического аппарата – пленочного дискового горизонтального аппарата [15], который имеет минимальный перепад давления, а также развитую площадь поверхности массообмена (рисунок 2).

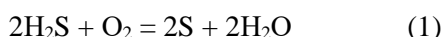
Для очистки от сероводорода в нижнюю часть цилиндра пленочного аппарата подается раствор комплексных соединений железа, в противоположном направлении движется ГВС с сероводородом. Раствор, после окисления сероводорода до элементарной серы, насыщенный мелкодисперсной серой и ионами железа,

возвращается в емкость-накопитель. Серный осадок отводится фильтром-прессом на потоке при циркуляции раствора из емкости-накопителя.

Очищенная от сероводорода газовоздушная смесь из верхней части с противоположной стороны горизонтального абсорбера поступает на адсорберы с активированным углем.

Подача раствора из емкости накопителя с хелатообразующими соединениями в пленочный аппарат и откачка из него осуществляется насосами в составе установки.

Моделирование очистки низконапорного газа от сероводорода по общей реакции каталитического окисления сероводорода



проводили на лабораторной установке, включающей реактор сероочистки. В лабораторный реактор сероочистки помещали раствор катализатора. На вход реактора подавали сырье сероочистки, модельную смесь метана с сероводородом в присутствии CO_2 . Реакцию проводили при температуре 25°C и атмосферном давлении.

Содержание сероводорода на входе и выходе сероочистки приведено в таблице 2

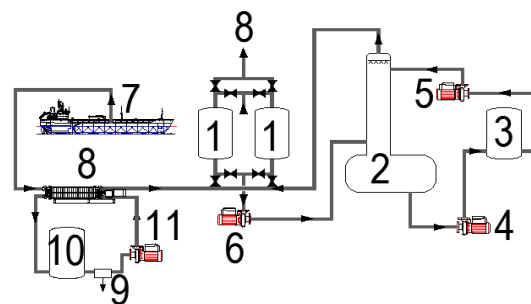


Рисунок 2. Схема адсорбционно-абсорбционной установки с дисковым пленочным горизонтальным аппаратом для жидкофазного каталитического окисления: 1 – адсорбционный фильтр; 2 – колонна-абсорбер; 3 – резервуар с продуктом; 4 – возвратный насос; 5 – подающий насос; 6 – вакуумный насос; 7 – морской танкер; 8 – очищенный воздух; 9 – фильтр-пресс для серы; 10 – емкость с раствором хелатного комплекса железа; 11 – циркулирующий насос

Figure 2. Scheme of the adsorption-absorption type vapor recovery unit with a disk film horizontal apparatus for liquid-phase catalytic oxidation: 1 – adsorption filter; 2 – absorber column; 3 – product tank; 4 – return pump; 5 – feed pump; 6 – vacuum pump; 7 – marine tanker; 8 – purified air; 9 – filter press for sulfur; 10 – container with a solution of chelated iron complex; 11 – circulating pump

Таблица 2.

Остаточное содержание сероводорода в газовой фазе до/после очистки растворами комплексных соединений железа температурой 25°C и атмосферном давлении

Table 2.

Residual content of hydrogen sulfide in the gas phase before/after purification with solutions of complex iron compounds at a temperature of 25°C 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	
				Вход inlet	Выход output
1	200	0,1	8,0	250	6
2	200	0,1	7,0	250	7
3	200	0,3	6,0	250	7
4	200	0,3	5,0	250	0
5	200	0,5	5,0	250	6

Как видно из данных таблицы, очистка газа от сероводорода с помощью комплекса хелатного железа обеспечивает конверсию сероводорода в серу, остаточное содержание сероводорода при этом может быть снижено менее 1 ppm.

В результате реакции 1 образуется мелкодисперсная элементарная сера и раствор с ионами железа. Мелкодисперсная элементарная сера накапливается в растворе и не влияет на очистку газового потока от примесей сероводорода. Серу необходимо выделять, например, с помощью пресс-фильтра [13].

Закключение

При эксплуатации адсорбционно-абсорбционных УРП на морских терминалах возникают проблемы, связанные с наличием сероводорода в парах нефти. Применение стандартных методов

очистки от сероводорода приводит к повышенному расходу электроэнергии и требует дополнительного оборудования (газодувка, фильтр перед газодувкой и т. п.). Одним из способов совершенствования существующих технологических схем, а также повышения энергоресурсоэффективности установок рекуперации паров на базе адсорбция-абсорбция и, как следствие, уменьшения воздействия на окружающую среду, является:

1) Модернизация УРП за счет применения узла очистки от сернистых соединений, оснащённого пленочным дисковым горизонтальным аппаратом с применением каталитического жидкофазного окисления сероводорода комплексом хелатного железа, позволяет удалять из паров нефти экологически опасные сернистые компоненты, негативно влияющие на адсорбционные

фильтры без повышения температуры и значительного перепада давления газовой смеси;

2) При использовании пленочного горизонтального дискового аппарата следует ожидать уменьшение расхода энергоресурсов за счет отсутствия газодувки, а также увеличение работы адсорбционных фильтров на 35–45%.

3) Реализация каталитической очистки комплексом хелатного железа в дисковом пленочном аппарате [15] позволяет очистить газ от примесей сероводорода.

Данные результаты могут быть использованы при проектировании технологической схемы адсорбционно-абсорбционных установок рекуперации.

Литература

- 1 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 // *Mendelev Communications*. 2021. №. 31. P. 593–604. doi: 10.1016/j.mencom.2021.09.003
- 2 Rajabi H., Mosleh M.H., Mandal P., Lea-Langton A. et al. Emissions of volatile organic compounds from crude oil processing—Global emission inventory and environmental release // *Science of The Total Environment*. 2020. V. 727. P. 138654. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138654
- 3 Huang J., Zhang B., Huang W., Zhu Z. et al. Research on the general technical standards of the gasoline vapor recovery unit set // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019. V. 118. P. 02017. doi: 10.1051/e3sconf/201911802017
- 4 Об охране атмосферного воздуха: Федеральный закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ (с изменениями на 11 июня 2021 года).
- 5 Milazzo M.M., 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. V. 204. P. 637–650.
- 6 Татаров А.Ю., Береза И.Г., Самойленко А.Ю., Башуров Б.П. Контроль за выбросом летучих органических соединений с нефтяных танкеров // *Эксплуатация морского транспорта* 2018. № 4(89). С. 104–107.
- 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 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.
- 9 Bhuvendralingam S. A decision Algorithm for optimizing Granular carbon adsorption process design, Michigan Technological University. 1992.
- 10 Слесаренко В.В., Лапшин В.Д., Соколова П.А. Совершенствование установок рекуперации паров нефти для снижения вредных выбросов в атмосферу // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. С. 182–189.
- 11 Bandoz T.J. On the adsorption/oxidation of hydrogen sulfide on activated carbons at ambient temperatures // *Journal of colloid and Interface Science*. 2002. V. 246. №. 1. P. 1-20. doi: 10.1006/jcis.2001.7952
- 12 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. 521.
- 13 ИТС 50–2017. Переработка природного и попутного газа. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. 2017.
- 14 Fetisov V., Mohammadi A.H., Pshenin V., Kupavykh K. 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. V. 76. P. 38. doi: 10.2516/ogst/2021022
- 15 Пат. № 2768952, RU, B01D 47/18, 53/74, 3/08. Тепломассообменный аппарат / Тюрин А.А., Бабаков Е.А. № 2021100746; Заявл. 14.01.2021; Опубл. 25.03.2022, Бюл. № 9.
- 16 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. URL: <https://www.grnjournals.us/index.php/ajshr/article/view/1098>
- 17 Хайрулин С.Р., Кузнецов В.В., Батуев Р.А., Теряева Т.Н. и др. Методы очистки коксового газа от сероводорода. Процессы утилизации H₂S. Сорбционные процессы (обзор). Часть 1 // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. №. 3 (143). С. 60-80.
- 18 Утёмов А.В., Веригин А.Н. Очистка нефтяного газа сернистых месторождений с использованием роторно-дисковых массообменных аппаратов // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2018. № 46(72). С. 102–107
- 19 Khabazipour M., Anbia M. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using porous materials: A review // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. V. 58. №. 49. P. 22133-22164. doi: 10.1021/acs.iecr.9b03800
- 20 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. 521. doi: 10.3390/catal10050521

References

- 1 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. *Mendelev Communications*. 2021. no. 31. pp. 593–604. doi: 10.1016/j.mencom.2021.09.003
- 2 Rajabi H., Mosleh M.H., Mandal P., Lea-Langton A. 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. pp. 138654. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138654

- 3 Huang J., Zhang B., Huang W., Zhu Z. et al. Research on the general technical standards of the gasoline vapor recovery unit set. E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. vol. 118. pp. 02017. doi: 10.1051/e3sconf/201911802017
- 4 On the protection of atmospheric air: Federal Law of May 4, 1999 No. 96 FZ (as amended on June 11, 2021). (in Russian).
- 5 Milazzo M.M., 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. pp. 637–650.
- 6 Tatarov A.Yu., Bereza I.G., Samoilenko A.Yu., Bashurov B.P. Control over the emission of volatile organic compounds from oil tankers. Exploitation of sea transport 2018. no. 4(89). pp. 104–107. (in Russian).
- 7 Dmitriev M.E., Sadreeva K.K., Pshenin V.V., Gaisin M.T. Determination of the relative consumption of the gas phase when filling tankers. Transport and storage of oil products and hydrocarbon raw materials. 2019. no. 1. pp. 10–13. doi:10.24411/0131–4270–2019–10102 (in Russian).
- 8 Temerdashev A.Z., Afonin A.S., Korpakova I.G. Chromato-mass-spectrometric identification and component composition of hydrocarbon emissions during reloading of commercial petroleum products. Analytics and control. 2018. vol. 72. no. 1. pp. 999–1006. (in Russian).
- 9 Bhuvendralingam S. A decision Algorithm for optimizing Granular carbon adsorption process design, Michigan Technological University. 1992.
- 10 Slesarenko V.V., Lapshin V.D., Sokolova P.A. Improvement of oil vapor recovery units to reduce harmful emissions into the atmosphere. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal. 2013. pp. 182–189. (in Russian).
- 11 Bandosz T.J. On the adsorption/oxidation of hydrogen sulfide on activated carbons at ambient temperatures. Journal of colloid and Interface Science. 2002. vol. 246. no. 1. pp. 1–20. doi: 10.1006/jcis.2001.7952
- 12 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. no. 5. pp. 521.
- 13 ITS 50–2017. Processing of natural and associated gas. Information and technical guide to the best available technologies. 2017. (in Russian).
- 14 Fetisov V., Mohammadi A.H., Pshenin V., Kupavykh K. 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. vol. 76. pp. 38. doi: 10.2516/ogst/2021022
- 15 Tyurin A.A., Babakov E.A. Heat exchanger. Patent RF, no. 2768952, 2022.
- 16 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. Available at: <https://www.grnjournals.us/index.php/ajshr/article/view/1098>
- 17 Khairulin S.R., Kuznetsov V.V., Batuev R.A., Teryaeva T.N. et al. Methods of purification of coke gas from hydrogen sulfide. H₂S recycling processes. Sorption processes (review). Part 1. Alternative energy and ecology. 2014. no. 3 (143). pp. 60–80. (in Russian).
- 18 Utemov A.V., Verigin A.N. Purification of oil gas from sulfur deposits using rotary-disk mass transfer apparatus. Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). 2018. no. 46(72). pp. 102–107. (in Russian).
- 19 Khabazipour M., Anbia M. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using porous materials: A review. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. vol. 58. no. 49. pp. 22133–22164. doi: 10.1021/acs.iecr.9b03800
- 20 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. no. 5. pp. 521. doi: 10.3390/catal10050521

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/0000-0001-6956-6705>

Евгений А. Бабаков аспирант, 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/0000-0002-4729-4881>

Information about authors

Valery P. Meshalkin Dr. Sci. (Engin.), academician of the RAS, professor, logistics and economic informatics department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Miusskaya square, 9, 125047, Russia, vpmeshalkin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6956-6705>

Evgeny A. Babakov graduate student, logistics and economic informatics department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Miusskaya square, 9, babakhol@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4729-4881>

Вклад авторов

Валерий П. Мешалкин консультация в ходе исследования
Евгений А. Бабаков написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Valery P. Meshalkin consultation during the study
Evgeny A. Babakov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 05/04/2022	После редакции 28/04/2022	Принята в печать 24/05/2022
Received 05/04/2022	Accepted in revised 28/04/2022	Accepted 24/05/2022