

УДК 614.878, 504.054

DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0017

**ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СОРБЦИИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ**

© Автор 2022

SPIN: 3925-7290

AuthorID: 1034714

ORCID: 0000-0001-6482-9625

БУЛКИН Сергей Александрович, аспирант

*Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
(141435, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А, e-mail: s.bulkin@amchs.ru)*

Аннотация. В работе рассматривается возможность ликвидации техногенных чрезвычайных ситуаций с разливом хлорсодержащих веществ в жидкой фазе с применением сорбентов на основе углеродных материалов. Углеродные материалы являются сорбентами, получаемыми путем карбонизации природного или растительного сырья с последующей активацией. Сорбенты из углеродных материалов обладают высокой химической стойкостью, что позволяет их применять в агрессивных жидких средах. Хлорсодержащие вещества широко используются в промышленном секторе экономики в качестве прекурсоров или конечных продуктов. Применение их в большом количестве приводит к возникновению потенциальных угроз в связи с концентрированием таких веществ в зонах хранения. Опасность хлорсодержащих веществ заключается в токсичном воздействии на живой организм, в случае разлива или выброса таких веществ возможно негативное воздействие как на человека, так и на окружающую среду. Расположение предприятий промышленного сектора в населенных пунктах создает опасность поражения населения и территорий такими типами веществ в случае возможных аварий. Моделирование сорбционного процесса с использованием метода ультрафиолетовой спектроскопии делает возможным определение концентрации хлорсодержащего вещества в жидкой фазе. Применение сорбции в качестве способа ликвидации разливов хлорсодержащих веществ способно привести к уменьшению негативного воздействия хлорсодержащих веществ в жидкой фазе на население и территорию.

Ключевые слова: сорбция, сорбенты, хлорсодержащие вещества, ликвидация, разлив, жидкая фаза, углеродные материалы, токсичность, отравление, негативное воздействие.

**ENSURING THE SAFETY OF THE TERRITORIES AND THE POPULATION DURING
RESPONSE OF THE CONSEQUENCES OF ACCIDENTAL SPILLS
OF TOXIC CHLORINE-CONTAINING SUBSTANCES**

© The Author 2022

BULKIN Sergey Aleksandrovich, postgraduate student

*The Civil Defence Academy of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters*

(141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, st. Sokolovskaya, building 1A, e-mail: s.bulkin@amchs.ru)

Abstract. The paper considers the possibility of eliminating man-made emergencies with the spill of chlorine-containing substances in the liquid phase using sorbents based on carbon materials. Carbon materials are sorbents obtained by carbonization of natural or vegetable raw materials with subsequent activation. Sorbents made of carbon materials have high chemical resistance, which allows their use in aggressive liquid media. Chlorine-containing substances are essential in the industrial sector of the economy, used as precursors or end products. Their use in large quantities leads to the emergence of potential threats due to the concentration of such substances in storage areas. The danger of such substances lies in the toxic effect on a living organism, in the event of a spill or release of such substances, a negative impact on both humans and the environment is possible. The location of enterprises of the industrial sector in settlements creates a risk of damage to the population and territories by such types of substances in the event of possible accidents. Simulation of the sorption process using the method of ultraviolet spectroscopy makes it possible to determine the concentration of a chlorine-containing substance in the liquid phase. The use of sorption as a method for eliminating spills of chlorine-containing substances is capable of reducing the negative impact of chlorine-containing substances in the liquid phase on the population and territory.

Keywords: sorption, sorbents, chlorine-containing substances, liquidation, spill, liquid phase, carbon materials, toxicity, poisoning, negative impact.

Для цитирования: Булкин С.А. Зависимость скорости сорбции от характеристик углеродных сорбентов применяемых при ликвидации разливов хлорсодержащих веществ / С.А. Булкин// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 2(58). – С. 98-102. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0017.

Введение. Развитие химического сектора экономики с получением новых органических соединений с атомами хлора представляет опасность в случае техногенной чрезвычайной ситуации с выбросом или разливом в окружающую среду химических веществ [1, 2]. Хлорсодержащие вещества имеют более высокие показатели токсичности, что делает их потенциально опасными веществами при поражении живого организма [3]. В тоже время, хлорсодержащие вещества являются необходимыми полупродуктами, например, в фармацевтической и химической областях промышленного синтеза, при обеззараживании медицинских отходов и при обработке мяса [4-7]. Использование разнообразных по структуре хлорсодержащих веществ усложняет проведение мероприятий по ликвидации аварии с выбросом или разливом химических веществ. Методики по ликвидации аварий с выбросом или разливом аварийно химически опасных веществ (АХОВ) [8-10], не могут быть применены в полном объеме проводимых мероприятий. Однако, некоторые мероприятия, указанные в документах [8-10], содержат методики по сбору химических веществ с применением сыпучих сорбентов. В опубликованных исследованиях [11-15] в качестве сыпучего сорбента применяли углеродные материалы. Достоинством углеродных материалов, применяемых в качестве сорбентов, является их относительно невысокая стоимость.

На основании государственных докладов «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», в статье [16] были рассмотрены статистические данные по количеству аварий с выбросом/угрозой выброса АХОВ. На сегодняшний момент на территории Российской Федерации сохраняется опасность выброса/угрозы выброса АХОВ в пределах 2% от общего количества аварий в течение календарного года. Оценка эффективности мероприятий по ликвидации разлива хлорсодержащих веществ не может быть проведена из-за отсутствия подобных мероприятий. Однако, возможно сравнение с проводимыми мероприятиями по ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, с применением сорбентов [17]. Предполагается, что при практическом применении аналогичных мероприятий в случае ликвидации разливов хлорсодержащих веществ засыпка сорбентами окажет положительный эффект и обеспечит защиту от токсичного воздействия территории и населения в зоне разлива.

Проведенный анализ рассматриваемого проблемного вопроса показал, что существуют способы ликвидации разливов химических веществ, отнесенных к группе аварийно химически опасных веществ (АХОВ). В ряде работ [18-23] приводятся расчеты параметров мероприятий локализации и ликвидации разлива АХОВ, но некоторые из предложенных мероприятий не могут применяться в связи с особенностью физико-химических свойств и химического строения хлорсодержащих органических соединений.

В случае возможной техногенной чрезвычайной ситуации с разливом хлорсодержащих органических веществ возникает вопрос об отсутствии методического аппарата, позволяющего обеспечить безопасность населения и территорий в ходе проведения мероприятий, направленных на защиту от негативного воздействия источника потенциальной опасности. Сорбция является эффективным способом удаления химических веществ как в газовой фазе, так и в жидкой фазе. Недостатком такого метода является определение насыщения сорбента в течение определенного отрезка времени, что в данный момент происходит экспериментальным путем.

Методология. Цель статьи – определить возможность использования углеродных сорбентов при ликвидации техногенных чрезвычайных ситуаций с разливом хлорсодержащих веществ в жидкой фазе на основе моделирования сорбционного процесса экспериментальным путем с применением небольших масс сорбента.

Для достижения цели работы необходимо подобрать такое соотношение сорбента к массе хлорсодержащего органического соединения, которое удовлетворяло бы условию использования минимального количества сорбента, с учетом ликвидации разлива хлорсодержащего органического соединения до допустимых концентраций в компонентах окружающей среды. Предельно допустимые концентрации химических веществ в различных природных средах указаны в нормативном документе [24]. Экспериментальное исследование процесса сорбции рассмотрено авторами работ [11-15] в стационарных условиях. Процесс сорбции проводили в закрытой колбе с постоянным перемешиванием водного раствора хлорсодержащего вещества. Измерение оптической плотности растворов хлорсодержащего вещества проводили методом оптической спектрометрии на приборе *Hitachi U-1900*, концентрацию хлорсодержащих веществ в растворе определяли, используя методику построения градуировочного графика.

Результаты. Были проанализированы данные по адсорбции хлорсодержащих органических веществ (ХСВ) по работам [11-15]. В роли сорбентов использовались активированные угли различных марок. Активированные угли обладают набором характеристик [25, 26], которые удовлетворяют ряду параметров: являются химически стойкими, обладают большой площадью поверхности на 1 г вещества, обладают различными размерами пористой структуры (микро-, мезо- и макропоры). К хлорсодержащим органическим соединениям, обладающим высокой токсичностью, можно отнести пестициды. Как пример пестицида, использованного в работах [11, 12], можно выделить 2,4-дихлорфеноксиуксусную кислоту, которая используется в сельскохозяйственной деятельности. На основании экспериментальных данных из работ [11-15] была изучена зависимости скорости сорбции в жидкой фазе от соотношения масс сорбента к массе органического вещества на различных типах

сорбента (табл. 1). Скорость сорбции определена как изменение концентрации во времени контакта сорбента с хлорсодержащим веществом в жидкой фазе. Для доказательства универсальности применяемого подхода были выбраны другие классы органических соединений (поликетид, сложный эфир, карбоновая кислота).

В результате сравнительного анализа можно сказать, что скорость процесса сорбции замещенных ароматических соединений зависит от наличия в строении атомов хлора при условии небольших линейных размеров молекулы (рис. 1).

Сравнительные характеристики используемых в эксперименте сорбентов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Определение скорости сорбции в жидкой фазе (v) и соотношения масс сорбента к массе органического вещества (m_c/m_b) на различных типах сорбента

Вещество	Сорбент	Изменение концентрации ХСВ, ΔC , мг/л	Время сорбции t , ч	m_c/m_b	Скорость сорбции, v мг/(л*ч)	Ссылка на источник*
Тетрациклин	Терморасширенный графит	10,63	6	0,94	1,77	[13]
		7,53	6	1,33	1,26	
		3,15	6	3,17	0,53	
Этилбензоат	Активированный уголь кокосового ореха	390,00	7	1,28	55,71	[14]
		385,00	7	1,30	55,00	
		345,00	7	1,45	49,29	
		310,00	7	1,61	44,29	
		265,00	7	1,89	37,86	
		220,00	7	2,27	31,43	
		125,00	7	4,00	17,86	
2,4-Дихлорфеноксиуксусная кислота	Гранулированный активированный уголь	109,50	1350	0,23	0,08	[11]
		107,25	1350	0,23	0,08	
		92,50	1350	0,27	0,07	
		69,25	1350	0,36	0,05	
		47,50	1350	0,53	0,04	
2,4-Дихлорфеноксиуксусная кислота	Активированный уголь кокосового ореха	25,00	1350	1,00	0,02	[12]
		93,50	350	0,27	0,27	
		78,00	350	0,32	0,22	
		73,75	350	0,34	0,21	
		62,25	350	0,40	0,18	
Салициловая кислота	Гранулированный активированный уголь	50,75	350	0,49	0,15	[15]
		37,25	350	0,67	0,11	
		184,00	48	0,54	3,83	
		139,00	48	0,72	2,90	
		117,00	48	0,85	2,44	
		92,00	48	1,09	1,92	
		68,00	48	1,47	0,09	
		46,00	48	2,17	0,08	

* Данные полученные с открытых литературных источников

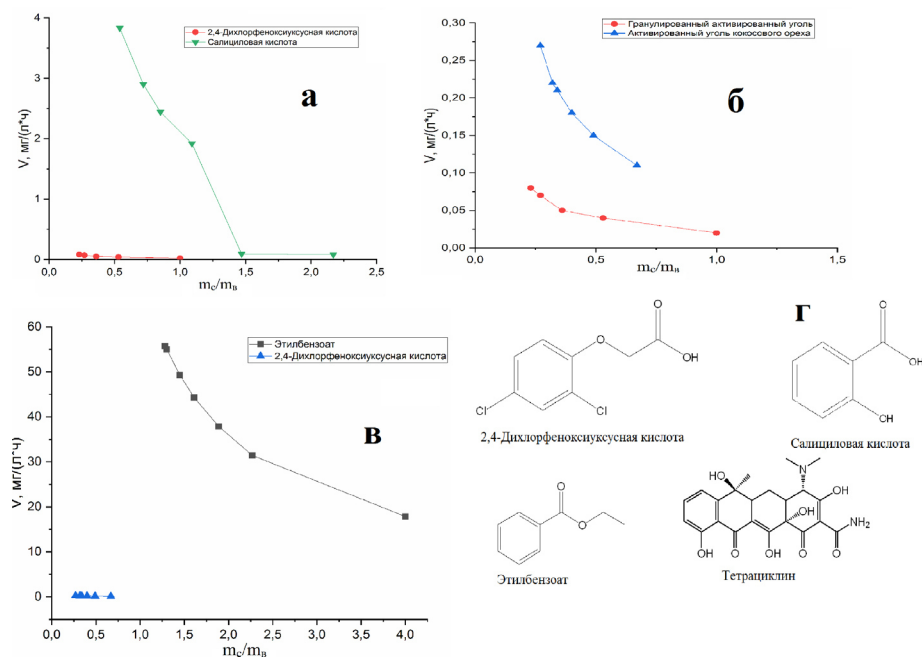


Рисунок 1 – Зависимость скорости сорбции химического вещества (v) от соотношения масс сорбента к массе вещества (m_c/m_b)

а – сравнение сорбции 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты и салициловой кислоты на гранулированном активированном угле; б – сравнение сорбции 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты на активированном угле кокосового ореха и гранулированном активированном угле; в – сравнение сорбции этилбензоата и 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты на активированном угле кокосового ореха; г – структурные формулы используемых химических веществ

Таблица 2 – Порометрические характеристики углеродных сорбентов

Характеристика поверхности	Терморасширенный графит	Активированный уголь кокосового ореха	Гранулированный активированный уголь
Размер пор, нм	0,7 - 10	0,7 - 2,0	0,8-2,0
Средний размер пор с учетом щелевых пор по методу Хорвата-Кавазое, нм	0,9	0,8	0,8
Объем микропор по Дубинину-Астахову, см ³ /г	0,15	0,43	0,640
Общая поверхность по БЭТ, м ² /г	370	936	1514
Поверхность микропор по t-plot, м ² /г	60	856	1552

Как видно из таблицы 2, наибольшие отличия у исследуемых сорбентов проявляются в общей поверхности и поверхности микропор. Сравнение параметров сорбции хлорсодержащих и не содержащих хлор соединений показывает, что наличие в структуре молекулы хлора снижает значения скорости сорбции. Это позволяет предположить, что достижение равновесия процессов сорбции и десорбции в жидкой среде для хлорсодержащих веществ наступает быстрее.

С точки зрения возможности проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ по локализации и ликвидации разлива химического вещества в жидкой среде такой параметр как время, затраченное на сорбционный процесс, является определяющим в условиях недопущения распространения зоны химического заражения. На практике, по данным ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов [17], предпочтительнее оказываются сорбционные материалы, которые позволяют сорбировать вещество в диапазоне от 24 до 48 часов.

Сравнивая значения скоростей при различных процессах сорбции 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты на углеродных сорбентах (гранулированный активированный уголь и активированный уголь кокосового ореха), мы можем наблюдать корреляцию, что позволяет говорить о возможности вариативного применения их при ликвидации разливов в жидкой фазе. Вариативность применения различных типов сорбентов, в процессе ликвидации разливов одного и того же органического соединения, является экономически выгодным аспектом при организации работ по локализации и ликвидации аварий. Однако стоит учитывать время сорбционного процесса, за которое достигается насыщение сорбента.

Авторами работ [27-29] были получены экспериментальные данные предполагаемого механизма протекания сорбционного процесса с разнообразными по химической структуре молекулами. Выдвигаемые теоретические основы механизма адсорбции подразумевают взаимодействие адсорбируемого вещества с адсорбатом за счет физических сил или с образованием химических связей [30-33]. Анализ зависимостей $C = f(t)$ показывает идентичность изменения концентрации сорбируемого вещества во времени, не зависимо от природы как улавливаемого загрязнителя, так и самого сорбента. Отличительной особенностью являются только линейные размеры молекулы сорбируемого вещества, что также необходимо учитывать при определении параметров протекания сорбционного процесса. Известный механизм адсорбции вещества дает возможность предсказывать характер сорбционного процесса на новых веществах, с аналогичным фраг-

ментом в углеродном скелете. Таким образом, строение вещества не изменяет графическую зависимость процесса адсорбции и дает основание использования математических зависимостей относительной концентрации от соотношения масс.

Обсуждение. Подобных экспериментальных исследований, при моделировании разлива химических веществ в жидкой среде засыпкой сорбентом не проводились. В связи с этим сравнение полученных результатов возможно с методиками, описанными в источниках [8-10], в части, касающейся способа ликвидации разлива засыпкой твердым сыпучим сорбентом. Указывается, что соотношение массы АХОВ к массе сорбента равно 1:3-4, но обоснование использования такой массы сорбента не приводится. Конечная концентрация после процесса сорбции может быть установлена с помощью критериев отнесения к чрезвычайным ситуациям [34], но для различных веществ предельно допустимые концентрации определяются в конкретном компоненте окружающей среды. Если изменение концентрации (ΔC) принимается равной 1т, то рассчитать скорость сорбционного процесса не представляется возможным, из-за отсутствия времени контакта АХОВ в жидкой фазе с твердым сорбентом.

Выводы. Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволяет определить параметры сорбционных процессов и в дальнейшем использовать их для моделирования процесса сорбции, применяемого для ликвидации техногенной чрезвычайной ситуации с разливом хлорсодержащих органических соединений в жидкой фазе. Изучение скоростей сорбции позволит прогнозировать необходимые затраты на мероприятия по ликвидации разлива. Различные типы сорбентов при ликвидации разлива хлорсодержащего вещества позволяют выбирать оптимальные варианты сорбента, исходя из наличия имеющихся запасов.

Дальнейшее исследование вопроса скорости сорбционного процесса позволит прогнозировать временной отрезок, необходимый для полного проведения мероприятий по удалению хлорсодержащего вещества из окружающей среды. Создание математической модели, описывающей зависимости скорости сорбции от относительных масс сорбента, позволит обоснованно применить необходимые массы сорбента при проведении мероприятий по ликвидации разлива хлорсодержащих АХОВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Симачев Ю., Акиндинова Н., Яковлев А. Структурные изменения в российской экономике и структурная политика. Аналитический доклад. Изд. НИУ ВШЭ. – 2018. – 252 с.
2. Бархатова Е.И. Тенденции развития химического сек-

тора мировой экономики. /Е.И. Бархатова // Известия ИГЭА. – 2011. – №3 (77). – С. 111-114.

3. ГОСТ Р 22.0.05-2020. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения.

4. Брагина И.В., Федорова Н.Е., Волкова В.Н., Егорченкова О.Е., Мухина Л.П., Ларькина М.В. Метод многокомпонентного исследования гербицидов различных химических классов в воде // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95. – № 11. – С. 1099-1104.

5. Бутко М.П., Попов П.А., Онищенко Д.А. Классификация дезинфицирующих средств и оценка их эффективности // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. – 2018. – № 3 (27). – С. 134-142.

6. Мюллер М.Р., Хэйгман С.Д., Мустрейв С.А., Клэйн Д., Вогт П. Повторное использование активированного хлорсодержащего вещества для обработки мяса скота и птиц. Патент на изобретение RU 2710352 С2, 25.12.2019. Заявка № 2017108446 от 28.08.2015.

7. Есякова О.А., Николаева Т.А. Экологически безопасная технология обезвреживания и утилизации медицинских отходов // Экология и безопасность жизнедеятельности. сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 147-150.

8. Директива начальника штаба гражданской обороны «О совершенствовании защиты населения от сильнодействующих ядовитых веществ и классификации административно – территориальных единиц и объектов народного хозяйства по химической опасности» ДНГО №3 от 4.12.1990г.

9. РД 52.04.253-90 «Методика прогнозирования масштабов загрязнения АХОВ при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200007358> (дата обращения 11.03.2022 года).

10. Методические рекомендации по организации и технологиям ликвидации чрезвычайных ситуаций с наличием химических и радиоактивных веществ. Беларусь, 2014. – 151 с.

11. Kulaishin S.A., Vedenyapina M.D., Lapidus A.L., Sharifullina L.R. Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on granular activated carbon // Solid Fuel Chemistry. – 2020. – Т. 54. – № 1. – С. 54-60.

12. Vedenyapina M.D., Kulaishin S.A., Vedenyapina A.A., Lapidus A.L., Sharifullina L.R. Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on activated carbon // Solid Fuel Chemistry. – 2017. – Т. 51. – № 2. – С. 115-121.

13. Vedenyapina M.D., Borisova D.A., Rakishhev A.K., Vedenyapina A.A. Adsorption of tetracycline from aqueous solutions on expanded graphite // solid fuel chemistry. 2014. – т. 48. – № 5. – С. 323-327.

14. Vedenyapina M.D., Strel'tsova E.D., Sharpai Y.V., Terent'ev A.O., Vedenyapina A.A. Adsorption of ethyl benzoate on activated carbon // Solid Fuel Chemistry. – 2017. – Т. 51. – № 1. – С. 44-47.

15. Ракишев А.К., Веденяпина М.Д., Кулайшин С.А., Курилов Д.В. Адсорбция салициловой кислоты из водной среды на микропористом гранулированном активированном угле // Химия твердого топлива. 2021. № 2. С. 54-59. DOI: 10.31857/S0023117721020067.

16. Булкин С.А. Проблемные вопросы обеспечения безопасности при выбросах и разливах аварийно-химически опасных веществ на территории Российской Федерации / Булкин С.А., Сергеев И.Ю., Шарифуллина Л.Р., Валуев Н.П. // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник», 2022, №1.-С.117-125.- Режим доступа: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2022/v1/N24_117-125.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

17. Применение сорбентов при ликвидации разливов нефти. Технический информационный документ 8. // ITOFF Ltd. Produced by Impact PR & Design Limited, Canterbury, UK. – 2012. – 12с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ospri.online/rukovodstva-i-rekomendacii/tekhnicheskie-informacionnye-dokumenty>. (дата обращения 11.03.2022 года).

18. Иванов С.Н. Ликвидации разлива аммиака на ж/д станции // Актуальные проблемы технической безопасности. Сборник научных статей II национальной научно-практической конференции. Москва, 2020. – С. 195-198.

19. Першиков Д.Г., Чуйков А.М., Дорохова О.В. Мероприятия по защите, спасению людей, ликвидации аварий,

локализации их последствий на опасном производственном объекте // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 1 (10). – С. 294-296.

20. Минин А.С., Зарубина Е.В. Актуальность применения современных мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2018. – Т. 1. – С. 436-438.

21. Присяжнюк С.П., Присяжнюк А.С., Храбан А.В., Петров А.А., Соколов А.Н. Сценарий ликвидации чрезвычайной ситуации с выбросом АХОВ // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021682021, 28.12.2021. Заявка № 2021680973 от 15.12.2021.

22. Хичев Д.С., Черкашина Ю.С., Шарафан А.А., Филимонов А.А. Ликвидация очагов поражения АХОВ // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в техносфере и защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 156-157.

23. Никулин Р.А. Ликвидация чрезвычайной ситуации при аварии, связанной с утечкой АХОВ на железнодорожных станциях // сборник статей XXVIII Международной научно-практической конференции : в 2 ч.. 2019. – С. 96-100.

24. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». [Электронный ресурс]. URL: <https://rkc56.ru/documents/4538>. (дата обращения 11.03.2022 года).

25. Мухин В.М., Клушин В.Н. Производство и применение углеродных адсорбентов. Учебное пособие. // М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – 2012. – 308 с.

26. Наинг Линн Сое, Зин Мое, Мин Тху, Мьят Мин Тху, Со Вин Мьинт, Нистратов А.В., Клушин В.Н. Углеродные адсорбенты на базе растительных отходов Мьянмы как средства очистки производственных выбросов и сбросов // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – Т. 19. – № 5. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2019. с. 574-580. DOI: 10.17308/sorpchrom.2019.19/1172.

27. Jia L., Long C., Xing B., Shi J., Lian F. VOCs adsorption on activated carbon with initial water vapor contents: adsorption mechanism and modified characteristic curves // The Science of the Total Environment. – 2020. – Т. 731. – С. 139184.

28. Huang B., Zhao R., Xu H., Deng J., Li W., Wang J., Yang H., Zhang L. Adsorption of methylene blue on bituminous coal: adsorption mechanism and molecular simulation // ACS Omega. – 2019. – Т. 4. – № 9. – С. 14032-14039.

29. Hashi K., Sakuma H., Tamura K., Kamon M. Caffeine adsorption on natural and synthetic smectite clays: adsorption mechanism and effect of interlayer cation valence // Journal of Physical Chemistry C. – 2020. – Т. 124. – № 46. – С. 25369-25381.

30. Iribarne F., Denis P.A. Adsorption of organic molecules on graphene and fluorographene: an unresolved discrepancy between experiment and theory // International Journal of Quantum Chemistry. – 2021. – Т. 121. – № 10. – С. e26605.

31. Shimizu S., Matubayasi N. Adsorbate-adsorbate interactions on microporous materials // Microporous and Mesoporous Materials. – 2021. – Т. 323. – С. 111254.

32. Fechtner M., Kienle A. Efficient simulation and equilibrium theory for adsorption processes with implicit adsorption isotherms – ideal adsorbed solution theory // Chemical Engineering Science. – 2018. – Т. 177. – С. 284-292.

33. Xie J., Liang Y., Zou Q., Li X., Wang Z. Prediction model for isothermal adsorption curves based on adsorption potential theory and adsorption behaviors of methane on granular coal // Energy and Fuels. – 2019. – Т. 33. – № 3. – С. 1910-1921.

34. Приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 05.07.2021 № 429 «Об установлении критериев информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера» (Зарегистрирован 16.09.2021 № 65025).

Статья поступила в редакцию 11.04.2022

Статья принята к публикации 20.06.2022