

Использование отходов производств для сорбции токсичных газов

© 2023. С. Л. Фукс, к. т. н., доцент,
С. В. Девятерикова, к. т. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr01730@vyatsu.ru

Перспективной и актуальной в охране окружающей среды является очистка отходящих газов одних производств твёрдыми отходами других предприятий. В данной работе приведены результаты исследований очистки отходящих газов от аммиака и бензола отходами теплоэнергетики (зола уноса) и химической промышленности (вторичный политетрафторэтилен).

В результате деятельности предприятий теплоэнергетики, работающих на каменном угле, образуется зола уноса, требующая размещения на золошлакоотвалах. Золошлакоотвалы занимают большие площади и значительно нагружают местную экосистему. Уменьшение объёмов золоотвалов возможно за счёт использования золы в производстве строительных, звукопоглощающих и термоизоляционных материалов. Зола уноса можно применять как основу для гетерогенных катализаторов. Также зола уноса используется для производства цеолитов и в качестве добавки для улучшения структуры почв. В ряде исследований приведены положительные результаты очистки сточных вод от нефтепродуктов и ионов тяжёлых металлов, а также поглощения оксида серы (IV) из атмосферного воздуха.

В нашей работе предложено использовать золу уноса в качестве сорбента для извлечения аммиака, содержащегося в отходящих газах производств азотной кислоты и азотных удобрений. Адсорбат может быть применён в качестве удобрения для кислых почв.

Побочным продуктом производства политетрафторэтилена является вторичный политетрафторэтилен. Методом исчерпывающего фторирования возможно преобразование его в ультрадисперсный порошок с размерами частиц 0,20–1,35 мкм. Нанесение его на пористый материал позволит получить сорбент, который можно использовать для извлечения паров бензола из отходящих газов производств, использующих бензол, например, в качестве растворителя. В исследовании показано, что разработанный сорбент эффективно очищает отходящие газы от паров бензола по сравнению с активированным углём. Исследования очистки нагретых газов показали, что с увеличением времени очистки эффективность падает практически до нуля, что, предположительно, обусловлено конденсацией жидкой фракции бензола на поверхности сорбента.

Ключевые слова: зола уноса, политетрафторэтилен, активированный уголь, адсорбция, аммиак, бензол.

Utilization of industrial wastes for sorption of toxic gases

© 2023. S. L. Fuks ORCID: 0000-0002-9238-2944*
S. V. Devyaterikova ORCID: 0000-0003-1863-1209*
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr01730@vyatsu.ru

The purification of exhaust gases of some industries by solid wastes of other enterprises is promising and up-to-date in environmental protection. This paper presents the research results on purification of waste gases from ammonia and benzene by wastes from thermal power engineering (fly ash) and chemical industry (secondary polytetrafluoroethylene).

Operation of heat power industry plants, which are powered by bituminous coal, results in producing fly ash which is to be stored in special ash ponds. Ash ponds occupy large areas and significantly burden the local ecosystem. Using ash in building, sound-absorbing, and heat insulating materials' production reduces the volumes of ash ponds. Fly ash can be used as a base for heterogeneous catalysts. Fly ash can also be used in zeolite production and for soil structure improvement. A number of studies provide positive results of wastewater treatment from oil products and heavy metal ions, as well as absorption of air sulfur (IV) oxide.

We propose fly ash using as a sorbent for ammonia adsorbing from exhaust gases in nitric acid and nitrogen fertilizers production. The adsorbate can be applied as a fertilizer for acid soils.

Secondary polytetrafluoroethylene is a co-product of polytetrafluoroethylene production. It can be converted into ultradisperse powder with particle sizes of 0.20–1.35 μm by method of exhaustive fluoridation; the powder applies to a sponge material. The resulting sorbent can be used to extract benzene vapors from the exhaust gases of industries using

benzene, for example, as a solvent. Compared to activated carbon, the developed sorbent effectively removes benzene vapors from exhaust gases. Over time, the purification efficiency of heated gases decreases to almost zero. Presumably this is due to liquid benzene fraction condensation on the sorbent surface.

Keywords: fly ash, polytetrafluoroethylene, activated carbon, adsorption, ammonia, benzene.

Перспективной и актуальной в охране окружающей среды является очистка отходящих газов одних производств твёрдыми отходами других предприятий. В работе приведены результаты исследований очистки отходящих газов от аммиака и бензола отходами теплоэнергетики (зола уноса) и химической промышленности (вторичный политетрафторэтилен).

В химическом производстве в результате синтеза политетрафторэтилена (ПТФЭ) на внутренней поверхности реактора образуется вторичный ПТФЭ. Для его переработки применяются способы термической деструкции в присутствии водяного пара, а также обработка высшими фторидами переходных металлов. Разработана технология получения ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) методом исчерпывающего фторирования с использованием в качестве носителя фтора трифторида кобальта [1].

Целью исследования являлось определение эффективности поглощения паров аммиака и бензола золой уноса и ультрадисперсным политетрафторэтиленом (УПТФЭ), полученным методом исчерпывающего фторирования с использованием в качестве носителя фтора трифторида кобальта.

Объекты и методы исследований

Объекты исследования: ультрадисперсный ПТФЭ, зола уноса теплоэлектростанции, активированный уголь марки БАУ-А, пары аммиака и бензола.

Аммиак находится в отходящих газах производств азотной кислоты, азотных удобрений [2].

Бензол широко используется в качестве растворителя и в производстве синтетических каучуков, волокон, красителей, поверхностно-активных веществ, инсектицидов, лекарственных веществ и содержится в отходящих газах данных производств [3–4].

Зола уноса накоплена на золошлакоотвалах теплоэлектростанций, использующих уголь. Это приводит к высокой нагрузке на окружающую среду. Одним из способов ликвидации золошлаковых отходов является переработка золы и шлака. Несмотря на это

уровень использования золы и шлака в России составляет не более 4% [5].

Наиболее эффективным является уменьшение объёмов золоотвалов за счёт получения строительных материалов (цемента, полимерцемента, бетонных и асфальтобетонных смесей, геополлимерных вяжущих [6–12]). Значительно расширить спектр использования золы позволяют современные технологии строительства при формировании изделий 3D-принтером [13]. Исследования показали, что золу уноса можно также использовать как основу для гетерогенных катализаторов [14, 15]. Разработан метод изготовления звукопоглощающих и термоизоляционных материалов [16–18]. Также зола уноса используется для производства цеолитов и в качестве добавки для улучшения структуры почв [19]. В исследованиях [20–22] приведены положительные результаты очистки сточных вод от нефтепродуктов, ионов тяжёлых металлов: хрома, никеля, меди, свинца, кадмия и цинка. В работах [18, 23] показано, что зола уноса в силу высокоразвитой пористости способна поглощать оксид серы(IV) из атмосферного воздуха.

Для исследования морфологии частиц золы уноса и порошка УПТФЭ применяли сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) марки JEOL JSM-6510 LV. Для изучения качественного и количественного состава химических элементов использовали датчик энергодисперсионного рентгеновского анализа Oxford, встроенного в СЭМ. Изображение морфологии поверхности на СЭМ получали с помощью программного пакета Sem main me. Для шести выбранных частиц золы уноса определяли рентгеновский спектр, указывающий на элементный качественный и количественный состав. Результаты шести экспериментов усреднялись.

Процесс деструкции отходов политетрафторэтилена осуществляли при нагреве в интервале температур 430–500 °С в присутствии переносчика фтора – CoF_3 [24].

Для получения количественных характеристик адсорбции аммиака или бензола проводили серию опытов по пропусканию воздушной смеси через колонки с адсорбентом. Условиями являлись постоянная температура,

время, объёмный расход и масса адсорбента. В качестве адсорбентов использовали активированный уголь марки БАУ-А, синтетический мелкопористый силикагель – носитель УПТФЭ и золу уноса. Заданную концентрацию примеси бензола и аммиака в воздухе создавали путём введения их в специальную ёмкость, встроенную в установку с определённым объёмным расходом (2 л/мин). Для адсорбции газов из полученной смеси устанавливали колонки, заполненные сорбентами в количестве 35 г. На выходе из колонки непоглощённый сорбентами аммиак реагировал с раствором соляной кислоты. По изменению концентрации кислоты определялся остаток аммиака в воздухе. Концентрацию бензола в смеси определяли с помощью газоанализатора «КОЛИОН» на входе в колонку и выходе из неё. Эффективность очистки воздуха от аммиака и бензола рассчитывали по формуле:

$$I = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \cdot 100\%,$$

где c_0 – концентрация аммиака или бензола до колонки, мг/м³; c_1 – концентрация бензола после колонки, мг/м³.

Проведённые многократные исследования гранулометрического состава золы уноса для различных целей, выполненные виброрассевом ВР-1, показали погрешность измерений ±5%.

Результаты и обсуждение

В золе уноса присутствуют несгоревшие частицы угля в виде кокса, микросферы различного размера, состава, свойств и формы, в том числе полые ценосферы, а также частички кварцевого песка и агломераты сложного состава. Средний размер частиц золы составляет 132±3 мкм. Гранулометрический состав, определяемый с помощью виброрассева марки ВР-1, приведён в таблице 1.

Морфология частиц золы уноса и УПТФЭ, полученного в результате термодеструкции отходов политетрафторэтилена методом исчерпывающего фторирования, представлена на рисунке 1.

Пористые частицы золы уноса, образующиеся в процессе охлаждения расплава шлака, имеют неправильную сферическую форму. Минимальное и максимальное содержание элементов в золе уноса приведено в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

Гранулометрический состав золы уноса (100 г)
Fly ash granulometric composition (100 g)

Размер частиц, мкм / Particle size, μm		Масса частиц, г Particle weight, g
минимум / minimum	максимум / maximum	
450	1200	2,23
315	450	2,08
125	315	52,69
90	125	36,06
< 90		6,94

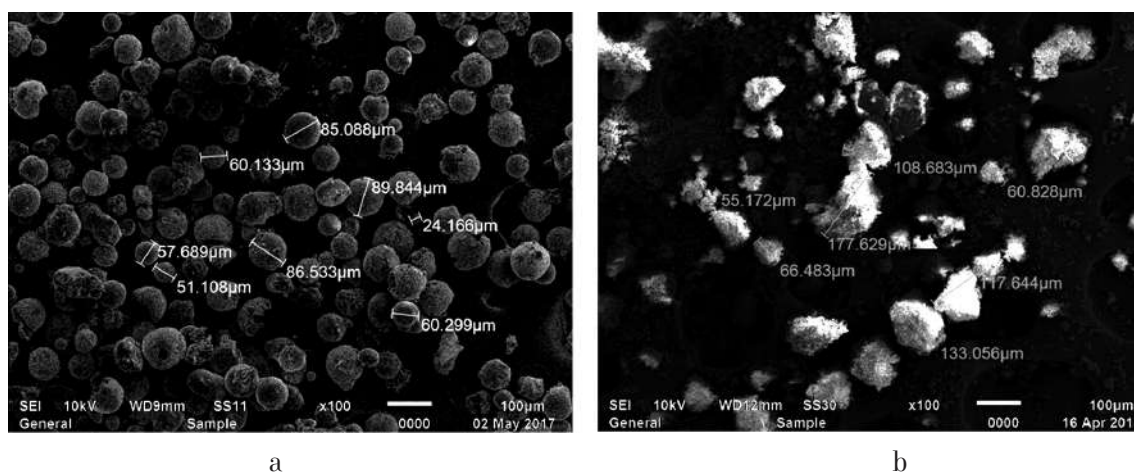


Рис. 1. Морфология частицы золы уноса (а) и УПТФЭ (б). 100×
Fig. 1. Fly ash (a) and ultradisperse polytetrafluoroethylene (b) particle morphology. 100×

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав золы уноса (вес. %) / Fly ash elementary composition (weight. %)

Элемент / Element	Минимум / minimum	Максимум / maximum	Элемент / Element	Минимум / minimum	Максимум / maximum
C	6,39	24,71	K	0,88	1,49
O	41,95	52,15	Ca	0,39	3,17
Na	0,79	1,48	Ti	0,31	2,39
Mg	0,32	0,99	Fe	1,21	8,28
Al	7,30	11,86	Zr	1,59	2,92
Si	13,62	23,30			

Таблица 3 / Table 3

Элементный состав порошка УПТФЭ [25] / Ultradisperse polytetrafluoroethylene (UPTFE) powder elementary composition [25]

Элемент / Element	Весовой состав, % / Weight composition, %		Среднее значение, % / Mean value, %
	минимум / minimum	максимум / maximum	
C	21,22	32,98	27,10
O	28,85	46,18	37,51
F	32,60	38,17	35,39

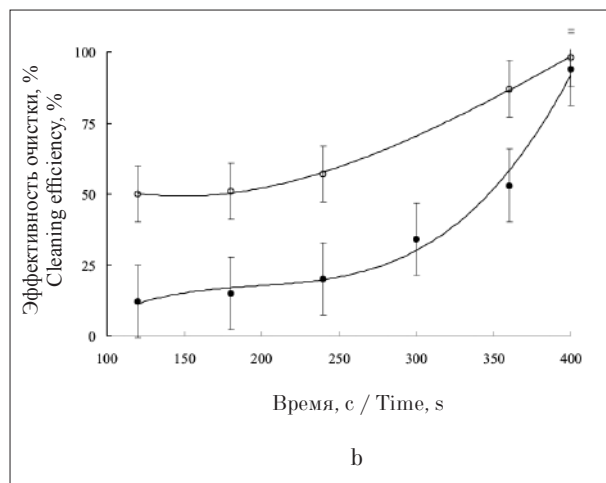
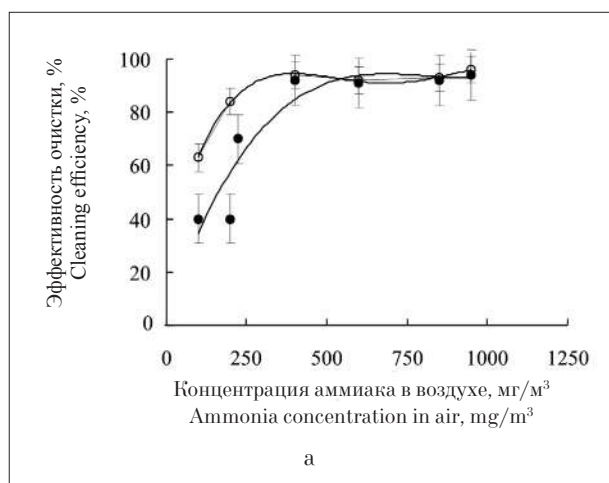


Рис. 2. Зависимость эффективности очистки воздуха от концентрации аммиака (a) и от времени адсорбции (b) золой уноса (○) и активированным углём (●). Температура 20 °C / Fig. 2. Dependence of air purification efficiency on ammonia concentration (a) and on adsorption time (b) with fly ash (○) and activated carbon (●). The temperature is 20 °C

В таблице 3 приведён состав УПТФЭ.

Из таблицы 3 видно, что частицы УПТФЭ содержат элементы, количество которых возрастает в ряду C → F → O. Результаты эффективности сорбентов по отношению к аммиаку представлены на рисунке 2.

При увеличении концентрации аммиака в воздухе и времени эффективность сорбентов возрастает независимо от их природы. Однако активированный уголь очищает воздух лучше золы уноса при одинаковой массе поглотителя. Для повышения эффективности очистки золой уноса необходимо увеличить её массу в адсорбере.

Результаты эффективности сорбентов по отношению к парам бензола приведены на рисунке 3.

Из приведённых результатов следует, что с течением времени эффективность сорбентов возрастает, причём силикагель, модифицированный УПТФЭ, показал лучшие результаты.

Результаты исследования влияния температуры паров бензола на сорбцию приведены на рисунке 4.

Показано, что пары бензола поглощаются с большим эффектом силикагелем, модифицированным УПТФЭ, независимо от их температуры. С увеличением времени очистки нагрет-

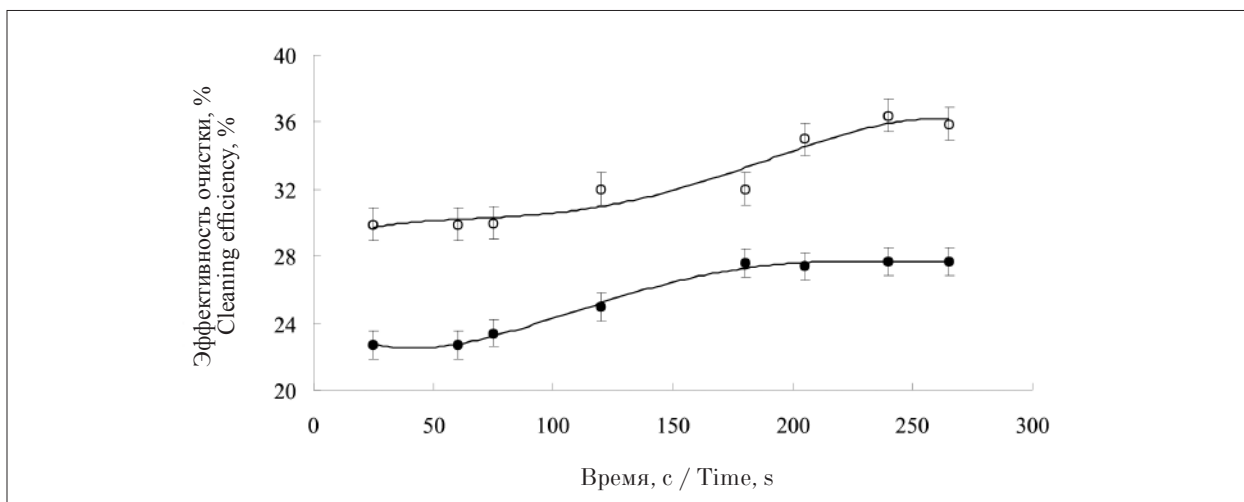


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки от времени адсорбции силикагелем (●) и силикагелем, модифицированным УПТФЭ (○). Температура 20 °С
Fig. 3. Dependence of purification efficiency on adsorption time with silica gel (●) and with silica gel modified with UPTFE (○). The temperature is 20 °C

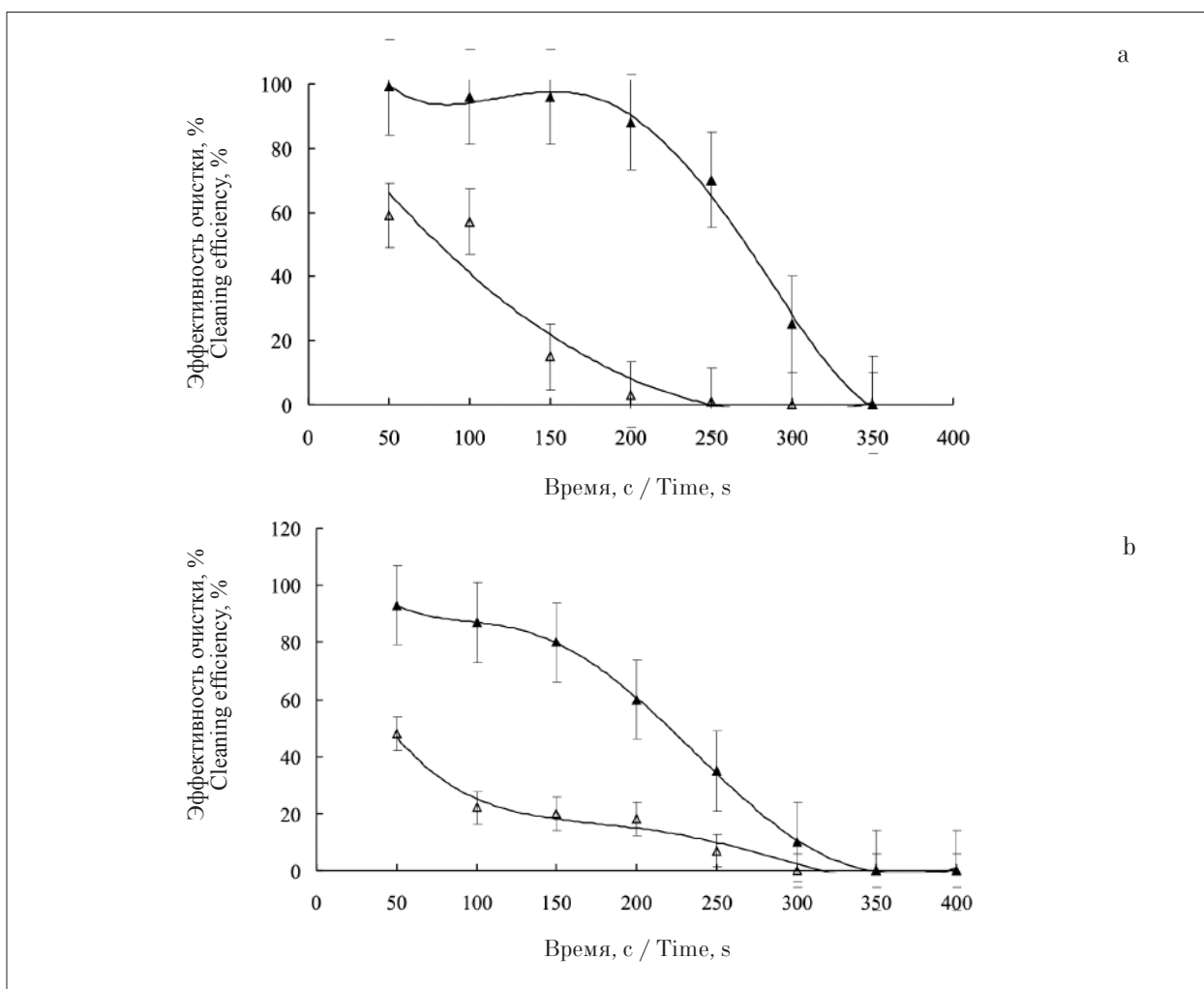


Рис. 4. Зависимость эффективности очистки воздуха от паров бензола от времени адсорбции силикагелем (Δ) и силикагелем, модифицированным УПТФЭ (▲) при различных температурах (а – 50 °С, б – 150 °С)
Fig. 4. Dependence of air purification efficiency from benzene vapors on adsorption time with silica gel (Δ) and with silica gel modified with UPTFE (▲) at different temperatures (a – 50 °C, b – 150 °C)

тых газов эффективность падает практически до нуля, что, предположительно, обусловлено конденсацией жидкой фракции бензола на поверхности сорбента.

Следовательно, при адсорбции бензола силикагелем, модифицированным УПТФЭ, очистку воздуха необходимо проводить при температуре 20 °С.

Заключение

Определён элементный состав исследуемой золы и порошка УПТФЭ. Установлено, что зола уноса способна поглощать аммиак из воздуха. При этом зола уноса обладает несколько худшими показателями адсорбции, чем активированный уголь при одинаковом количестве в адсорбере. При увеличении массы сорбента эффективность, предположительно, будет возрастать. Преимущества использования золы уноса заключаются в возможности применять золу уноса с адсорбированным аммиаком в качестве азотсодержащего удобрения.

Результаты исследований по очистке воздуха от паров бензола показали, что применение сорбента «силикагель – частицы УПТФЭ» наиболее эффективно при низких температурах.

Литература

1. Fuks S.L., Khitrin S.V., Vologzhanina Yu.V., Pinaeva L.N., Mikhailitsyna Yu.S., Devyaterikova S.V. Closed cycle of production of ultrafine polytetrafluoroethylene and new areas of use of fluoropolymer manufacture waste // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. V. 88. No. 11. P. 1800–1807.
2. Гольдинов А.Л. Комплексная азотнокислотная переработка фосфатного сырья. Л.: Изд-во Химия, 1982. 207 с.
3. Балабеков О.С. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. М.: Химия, 1991. 256 с.
4. Атрощенко В.И. Курс технологии связанного азота. М.: Химия, 1968. 384 с.
5. Сиротюк В.В. Опыт и перспективы использования золошлаковых материалов в транспортном строительстве // *Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11»*. Омск: ТГК-11, 2007. С. 37–52.
6. Ватин Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 4. С. 16–21.
7. Капустин Ф.Л., Фомина И.В. Малоцементные композиции на основе золы-уноса ТЭС // *Система*

управления экологической безопасностью: сборник трудов IX заочной международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 30–31 мая 2015 г. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 112–116.

8. Малахов Д.А. Актуализация применения золы-уноса в процессе изготовления неавтоклавного пенобетона // *Научные исследования и разработки студентов: сборник материалов Международной студенческой научно-практической конференции*. Чебоксары: Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2016. С. 78–81.

9. Ерощкина Н.А., Коровкин М.О., Чамурлиев М.Ю. Принципы выбора сырьевых компонентов в технологии получения геополимеров на основе золы уноса // *Теория. Практика. Инновации*. 2017. № 5. С. 153–161.

10. Делицын Л.М., Власов А.С. Комплексное использование углей на ТЭС // *ЭЖиП: Экология и промышленность России*. 2002. № 8. С. 37–39.

11. Maaroo M., Dursun S. Usability of fly ash from solid waste incineration as a concrete production as a supplement material // *Proceedings of the 3rd international conference on sustainable agriculture and environment*. Warsaw, Poland. September 26–28, 2016. Konya: Eğitim yayınevi, 2016. P. 421–427.

12. López-Zaldívar O., Mayor-Lobo P.L., Fernández-Martínez F., Hernández-Olivares F. Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators // *Materiales de Construcción*. 2015. V. 65. No. 319. P. 62–76.

13. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1. С. 27–46.

14. Wang S., Lu G.Q. Effect of chemical treatment on ni/fly-ash catalysts in methane reforming with carbon dioxide // *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2007. V. 167. P. 275–280.

15. Flores Y., Flores R., Gallegos A.A. Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system reactive black 5/H₂O₂ // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2008. V. 281. No. 1–2. P. 184–191.

16. Leiva C., Vilches L.F., Arenas C., Delgado S., Fernández-Pereira C. Potential recycling of bottom and fly ashes in acoustic mortars and concretes // *ACI Materials Journal*. 2012. V. 109. No. 5. P. 529–535.

17. Kaye G.W.C., Evans E.J. The sound-absorbing properties of some common out-door materials // *Proceedings of the Physical Society*. 1940. V. 52. No. 3. P. 371–379.

18. Leiva C., Arenas C., Vilches L.F., Alonso-Fariñas B., Rodríguez-Galán M. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties // *Waste Management*. 2015. V. 46. P. 298–303.

19. Ge J. C., Yoon S. K., Choi N. J. Application of fly ash as an adsorbent for removal of air and water pollutants // *Applied Sciences*. 2018. V. 8. No. 7. Article No. 1116.

20. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-basin

coal fly ash with various kinds of lignin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. No. 2. P. 122–129.

21. Cho H., Oh D., Kim K. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2005. V. 27. No. 1–3. P. 187–195.

22. Itskos G., Koukouzas N., Vasilatos C., Megremi I., Moutsatsou A. Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particle-size-fractions of fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2010. V. 183. No. 1–3. P. 787–792.

23. Cho H.H., Kim S.H., Seo Y.C., Back S.K., Joung H.T., Yoon H.C., Hong J.H. Applicability of coal combustion ashes to use as additives in flue gas desulfurization // Proceedings of the 24th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management. V. 24. Osaka: Osaka Institute of Technology, 2013. P. 687–688.

24. Хитрин С.В., Фукс С.Л., Казиевков С.А., Филатов В.Ю., Суханова Е.Н. Способ переработки фторопластов и материалов, их содержащих, с получением ультрадисперсного фторопласта и перфторпарафинов // Патент Ru № 2528054. Заявление: № 16 (45), 10.06.2013. Дата публикации: 10.09.2014. Бюл. № 25.

References

1. Fuks S.L., Khitrin S.V., Vologzhanina Yu.V., Pinaeva L.N., Mikhailitsyna Yu.S., Devyaterikova S.V. Closed cycle of production of ultrafine polytetrafluoroethylene and new areas of use of fluoropolymer manufacture waste // Russian Journal of Applied Chemistry. 2015. V. 88. No. 11. P. 1800–1807. doi: 10.1134/S10704272150110105

2. Goldinov A.L. Integrated nitric acid processing of phosphate rock. Leningrad: Khimiya, 1982. 207 p. (in Russian).

3. Balabekov O.S. Gas purification in the chemical industry. Processes and apparatuses. Moskva: Khimiya, 1991. 256 p. (in Russian).

4. Atroshchenko V.I. Fixed nitrogen technology course of. Moskva: Khimiya, 1968. 384 p. (in Russian).

5. Sirotyuk V.V. Experience and prospects of using ash and slag in transport construction // Rasshireniye regionalnoy syryevoy bazy vovlecheniyem v oborot zoloshlakoykh materiyalov TETs OAO “TGK-11”. Omsk: TGK-11, 2007. P. 37–52 (in Russian).

6. Vatyn N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lahtinen P. Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2011. No. 4. P. 16–21 (in Russian).

7. Kapustin F.L., Fomina I.V. Diluted cement compositions based on fly ash from TPPs // Sistema upravleniya ekologicheskoy bezopasnosti: sbornik trudov IX zaochnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ekaterinburg, 30–31 maya 2015 g. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2015. P. 112–116 (in Russian).

8. Malakhov D.A. Actualization of fly ash application in non-autoclaved foam concrete production process // Nauchnye issledovaniya i razrabotki studentov: sbornik materialov Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Cheboksary: Center of scientific cooperation “Interactive plus”, 2016. P. 78–81 (in Russian).

9. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Chamurliyev M.Yu. Principles of selection of raw material components in the technology of geopolymers production on the basis of fly ash // Teoriya. Praktika. Innovatsii. 2017. No. 5. P. 153–161 (in Russian).

10. Delitsyn L.M., Vlasov A.S. Integrated utilization of coals at TPPs // EKIP: Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2002. No. 8. P. 37–39 (in Russian).

11. Maarooof M., Dursun S. Usability of fly ash from solid waste incineration as a concrete production as a supplement material // Proceedings of the 3rd international conference on sustainable agriculture and environment. Warsaw, Poland. September 26–28, 2016. Konya: Eğitim yayinevi, 2016. P. 421–427.

12. López-Zaldívar O., Mayor-Lobo P.L., Fernández-Martínez F., Hernández-Olivares F. Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators // Materiales de Construcción. 2015. V. 65. No. 319. P. 62–76. doi: 10.3989/mc.2015.07114

13. Vatyn N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. 3D-printing in construction // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. No. 1. P. 27–46 (in Russian). doi: 10.18720/CUBS.52.3

14. Wang S., Lu G.Q. Effect of chemical treatment on ni/fly-ash catalysts in methane reforming with carbon dioxide // Studies in Surface Science and Catalysis. 2007. V. 167. P. 275–280. doi: 10.1016/S0167-2991(07)80144-3

15. Flores Y., Flores R., Gallegos A.A. Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system reactive black 5/H₂O₂// Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2008. V. 281. No. 1–2. P. 184–191. doi: 10.1016/j.molcata.2007.10.019

16. Leiva C., Vilches L.F., Arenas C., Delgado S., Fernández-Pereira C. Potential recycling of bottom and fly ashes in acoustic mortars and concretes // ACI Materials Journal. 2012. V. 109. No. 5. P. 529–535.

17. Kaye G.W.C., Evans E.J. The sound-absorbing properties of some common out-door materials // Proceedings of the Physical Society. 1940. V. 52. No. 3. P. 371–379. doi: 10.1088/0959-5309/52/3/307

18. Leiva C., Arenas C., Vilches L.F., Alonso-Fariñas B., Rodríguez-Galán M. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties // Waste Management. 2015. V. 46. P. 298–303. doi: 10.1016/j.wasman.2015.08.027

19. Ge J.C., Yoon S.K., Choi N.J. Application of fly ash as an adsorbent for removal of air and water pollutants // Applied Sciences. 2018. V. 8. No. 7. Article No. 1116. doi: 10.3390/app8071116

20. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-Basin coal fly ash with various kinds of lignin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. No. 2. P. 122–129. doi: 10.1088/1755-1315/272/2/022053
21. Cho H., Oh D., Kim K. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2005. V. 27. No. 1–3. P. 187–195. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.019
22. Itskos G., Koukouzas N., Vasilatos C., Megremi I., Moutsatsou A. Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particle-size-fractions of fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2010. V. 183. No. 1–3. P. 787–792. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.095
23. Cho H.H., Kim S.H., Seo Y.C., Back S.K., Joung H.T., Yoon H.C., Hong J.H. Applicability of coal combustion ashes to use as additives in flue gas desulfurization // Proceedings of the 24th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management. V. 24. Osaka: Osaka Institute of Technology, 2013. P. 687–688. doi: 10.14912/jsmcwm.24.0_687
24. Khitrin S.V., Fuks S.L., Kaziyenkov S.A., Filatov V.Yu., Sukhanova E.N. method of recycling fluoro-plasts and materials, containing them, with obtaining ultradisperse fluoro-plast and perfluoroparaffins // Patent Ru No. 2528054. Application: No. 16 (45), 10.06.2013. Publishing date: 10.09.2014. Bull. No. 25 (in Russian).