

---

---

# ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

Научная статья

УДК 628.477.6; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-125-133

## ТЕХНОЛОГИЯ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА ИЗ ОТХОДА ЭНЕРГЕТИКИ И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

✉ Николаева Лариса Андреевна;

Зайнуллина Элеонора Райнуровна;

Сафина Гульшат Галлямутдиновна.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

✉ [Larisanik16@mail.ru](mailto:Larisanik16@mail.ru)

*Аннотация.* Разработана технология замкнутого цикла получения товарного строительного гипса с применением отхода энергетики и дымовых газов тепловой электростанции. В основе технологии применяется абсорбционный метод очистки газовых выбросов промышленных предприятий от диоксида серы  $\text{SO}_2$  с использованием суспензии карбонатного шлама и получением готового продукта – двухводного гипса. Влажный шлам образуется на тепловой электростанции при водоподготовке природной воды в результате процессов коагуляции и известкования. Коагуляция проводится семиводным сульфатом двухвалентного железа  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ , известкование – насыщенным раствором известкового молока  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В результате совмещения двух процессов образуется суспензия определенного химического состава. Определен химический состав шлама и эксплуатационные характеристики. Основным веществом в химическом составе является карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ , что позволяет применять суспензию шлама в химической реакции взаимодействия с дымовыми газами тепловой электростанции с образованием строительного гипса. Подобран и рассчитан абсорбер с псевдооживленной насадкой для очистки газовых выбросов мокрой суспензией и получения товарного двухводного гипса. В качестве насадок выбраны полые или сплошные гидрофобные полиэтиленовые шарики для снижения прилипания частиц суспензии шлама к их поверхности. Представлена технологическая схема очистки дымовых газов от диоксида серы с получением готового продукта – строительного гипса. Схема включает предложенный адсорбер, бак суспензии шлама, гидроциклон и фильтр-пресс. Рассчитана себестоимость полученного товарного строительного гипса, которая составила 15 руб./кг, окупаемость производства 3,5 мес. Рассчитан предотвращенный экологический вред от деградации почв и земель, от внедрения данной технологии на тепловой электростанции за счет снижения выброса диоксида серы в атмосферный воздух, который составил около 1 млн руб./год.

*Ключевые слова:* газовые выбросы, диоксид серы, суспензия карбонатного шлама, абсорбер, двухводный гипс, товарный продукт

**Для цитирования:** Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Сафина Г.Г. Технология замкнутого цикла получения строительного гипса из отхода энергетики и дымовых газов тепловой электростанции // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 1 (69). С. 125–133. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-125-133.

Scientific article

## CLOSED-CYCLE TECHNOLOGY FOR OBTAINING CONSTRUCTION GYPSUM FROM WASTE ENERGY AND FLUE GASES OF THERMAL POWER PLANTS

✉Nikolaeva Larisa A.;  
Zaynullina Eleonora R.;  
Safina Gulshat G.

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

✉Larisanik16@mail.ru

*Abstract.* A closed-cycle technology for building gypsum producing using energy waste and flue gases of thermal power plants has been developed. The technology is based on an absorption method for purifying gas emissions from industrial enterprises from sulfur dioxide  $\text{SO}_2$  using a suspension of carbonate sludge and obtaining a finished product – gypsum dihydrate. The commercial gypsum is obtained by using a suspension of carbonate sludge as a reagent. The suspension is formed at the stage of preliminary purification of natural water during coagulation and liming. Coagulation is carried out with ferrous sulfate heptate  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ , liming – with a saturated solution of lime milk  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . As a result of combining the two processes, a suspension of a certain chemical composition is formed. The chemical composition of the sludge and its technological characteristics are presented. The main substance in the chemical composition is calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$ , which allows using a sludge suspension in the chemical reaction of the interaction of flue gases from thermal power plants with the formation of building gypsum. An absorber with a fluidized nozzle has been selected and designed to purify gas emissions from wet suspensions and produce commercial dihydrate gypsum. Hollow or solid hydrophobic polyethylene balls were selected as nozzles to reduce the adhesion of sludge suspension particles to their surface. A technological scheme is presented for purifying flue gases from sulfur dioxide to obtain the finished product – building gypsum. The scheme includes the proposed adsorber, sludge suspension tank, hydrocyclone and filter press. The cost of the resulting commercial building gypsum was calculated, which amounted to 15 rub./year, the payback period was 3,5 years. The prevented environmental harm from soil and land degradation from the introduction of this technology at thermal power plants was calculated by reducing the emission of sulfur dioxide into the air, which amounted to about 1 mil. rub./year.

*Keywords:* gas emissions, sulfur dioxide, carbonate sludge suspension, absorber, gypsum dihydrate, commercial product

**For citation:** Nikolaeva L.A., Zaynullina E.R., Safina G.G. Closed-cycle technology for obtaining construction gypsum from waste energy and flue gases of thermal power plants // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 1 (69). P. 125–133. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-125-133.

### Введение

Статья посвящена разработке технологии замкнутого цикла получения готового товарного продукта строительного гипса из твердого отхода энергетики и дымовых газов тепловой электростанции (ТЭС).

Объекты теплоэнергетики, эксплуатирующиеся на мазуте и угле, являются основными источниками газовых выбросов в окружающую среду. Диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ), образующиеся при сжигании твердого и жидкого топлива, имеют III класс опасности. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, количество  $\text{SO}_2$ , выбрасываемое в атмосферу в стране, составляет около 3 683 000 т/год. Диоксид серы токсичен, входит в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды

(распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 июля 2015 г. № 1316р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды»). Рост производства электроэнергии и постоянные изменения в структуре топливного баланса не исключает увеличение доли не только вторичных энергетических ресурсов («зеленая энергетика»), но и увеличение доли твердого топлива. Это неизбежно приведет к увеличению выбросов  $SO_2$  в атмосферу [1].

Снижение этих выбросов имеет научное и практическое значение. В Российской Федерации приняты предельно-допустимые концентрации  $SO_2$  в атмосферном воздухе: максимально разовая ПДК (ПДК МР) –  $0,5 \text{ мг/м}^3$ , среднесуточное ПДК (ПДКСС) –  $0,05 \text{ мг/м}^3$ .

### Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются отходы энергетики и дымовые газы ТЭС. Для проведения исследования использовались методы, рекомендованные ведомственно-экологическим контролем, такие как фотоколориметрический анализ, рентгенографический фазовый анализ.

### Результаты исследования и их обсуждение

Существуют различные технологии сероочистки газовых выбросов. В табл. 1 представлено сравнение технико-экономических показателей различных технологий сероочистки [2].

Таблица 1

#### Технико-экономические показатели различных технологий сероочистки

Показатель	Способ сероочистки			
	МИС*	МСС*	СИТ*	УМСС* (E-SO <sub>x</sub> )
Содержание серы на рабочую массу в топливе $S^p$ , %	2,0	0,5–2,0	0,5–1,0	0,3–0,8
Эффективность связывания $SO_2$ , %	95–98	86–92	30–50	50–70
Удельные капитальные затраты, долл./кВт установленной мощности	150–240	120–160	30–60	40–50
Стоимость удаления одной тонны $SO_2$ , долл./т	500–550	450–650	530–650	350

\*МИС – мокроизвестняковый способ; МСС – мокросухой способ; СИТ – сухая известняковая технология; УМСС (E-SO<sub>x</sub>) – упрощенная мокросухая сероочистка

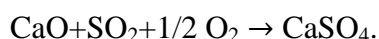
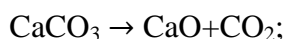
Снизить концентрацию  $SO_2$  на тепловых электрических станциях можно тремя способами:

1. Очисткой топлива от соединений серы до его сжигания.
2. Связыванием  $SO_2$  в процессе горения.
3. Очисткой дымовых газов.

За рубежом применяется для очистки жидкого топлива два метода – прямой и косвенный. Прямой метод включает обработку жидкого топлива каталитическим гидрированием. В этом случае выделяется сероводород, который затем восстанавливается до элементарной серы. Косвенный метод включает вакуумную перегонку топлива. В среднем

стоимость сероочистки в обоих методах примерно одинаковая при близкой эффективности очистки [3, 4].

Удаление серы в твердом топливе (колчеданной ( $\text{FeS}_2$ ) происходит путем обогащения, так как она содержится в углях в виде отдельных включений. Одним из способов удаления серы в твердом топливе является его сжигание в кипящем слое [5]. Применение кипящего (псевдооживленного) слоя при сжигании сернистых углей позволяет значительно уменьшить содержание оксидов серы и азота в дымовых газах. В этой технологии дробленый уголь с размерами частиц 1,5–6 мм инертным материалом и известняком размещают на неподвижной решетке, через которую подается воздух под давлением. При этом образуется кипящий слой и происходит одновременно с процессом горения процесс десульфуризации. Происходят реакции:



В результате реакции образуется гипс. Эффективность сероочистки в этом случае зависит от количества известняка [6].

В статье рассматривается очистка дымовых газов от диоксида серы мокроизвестняковым способом в абсорбере шламовой суспензией карбонатного шлама с получением готового продукта двухводного гипса. Шлам – многотоннажный отход энергетики, который образуется на ТЭС в результате водоподготовки на стадии предварительной очистки природной воды. Предварительная очистка воды включает две стадии: коагуляцию и известкование. Как правило, в результате этих двух процессов образуется суспензия определенного химического состава, который зависит от химического состава исходной сырой воды. В ранних работах [7] рассматривается применение высушенного шлама Казанской ТЭЦ-1 в качестве сорбционного материала для очистки дымовых газов от диоксида серы. В данной технологии предлагается использование влажной суспензии шлама в абсорбционных процессах.

Проведен рентгенографический фазовый анализ карбонатного шлама влажностью 3 % Казанской ТЭЦ-1 на дифрактометре D 8 ADVANCE фирмы Bruker. Результаты анализа представлены в табл. 1. В настоящее время шлам является отходом 5 класса опасности, складывается в накопителях, в результате чего увеличивается экологическая нагрузка на прилегающие территории [8].

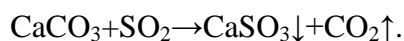
Таблица 2

#### Результаты химического и фазового анализа состава шлама химводоподготовки КТЭЦ-1

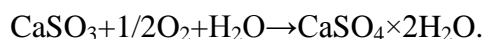
Вещество	Формула	Содержание %
Кальцит	$\text{CaCO}_3$	72
Брусит	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	9
Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	< 1
Кварц	$\text{SiO}_2$	0,5
Прочие вещества	–	17,5

По результатам анализа видно, что карбонатный шлам на 70 % представляет собой карбонат кальция в форме кальцита.

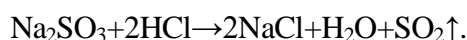
В основе технологии получения товарного продукта гипса при очистке дымовых газов лежит химическая реакция взаимодействия  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaCO}_3$  в объеме распыления суспензии шлама с образованием сульфита кальция:



Процесс протекает в абсорбере с псевдооживленным слоем. В нижней части абсорбера накапливается суспензия  $\text{CaSO}_3$ , при барботаже воздуха через слой этой суспензии происходит доокисление  $\text{CaSO}_3$  в двухводный сульфат кальция  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  (гипс) [8]:



Экспериментальные исследования данного процесса проведено на лабораторной установке, собранной на кафедре «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета. В установке использована реакционная колонна (рис. 1), корпус которой изготовлен из нержавеющей стали, что обеспечивает защиту от агрессивных сред.  $\text{SO}_2$  получен в лабораторных условиях по следующей реакции:



Газ подается в абсорбер через штуцер, распылитель, присоединенный к концу штуцера, обеспечивает равномерное распределение газа через суспензию карбонатного шлама. При абсорбции концентрация диоксида серы изменялась в диапазоне  $0\text{--}3\ 000\ \text{мг/м}^3$ , расход составлял  $4 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^3/\text{с}$ .



**Рис. 1. Лабораторная установка очистки дымовых газов от диоксида серы суспензией карбонатного шлама**

Рассмотрим технологическую схему (рис. 2) очистки дымовых газов с включенным абсорбером [9].

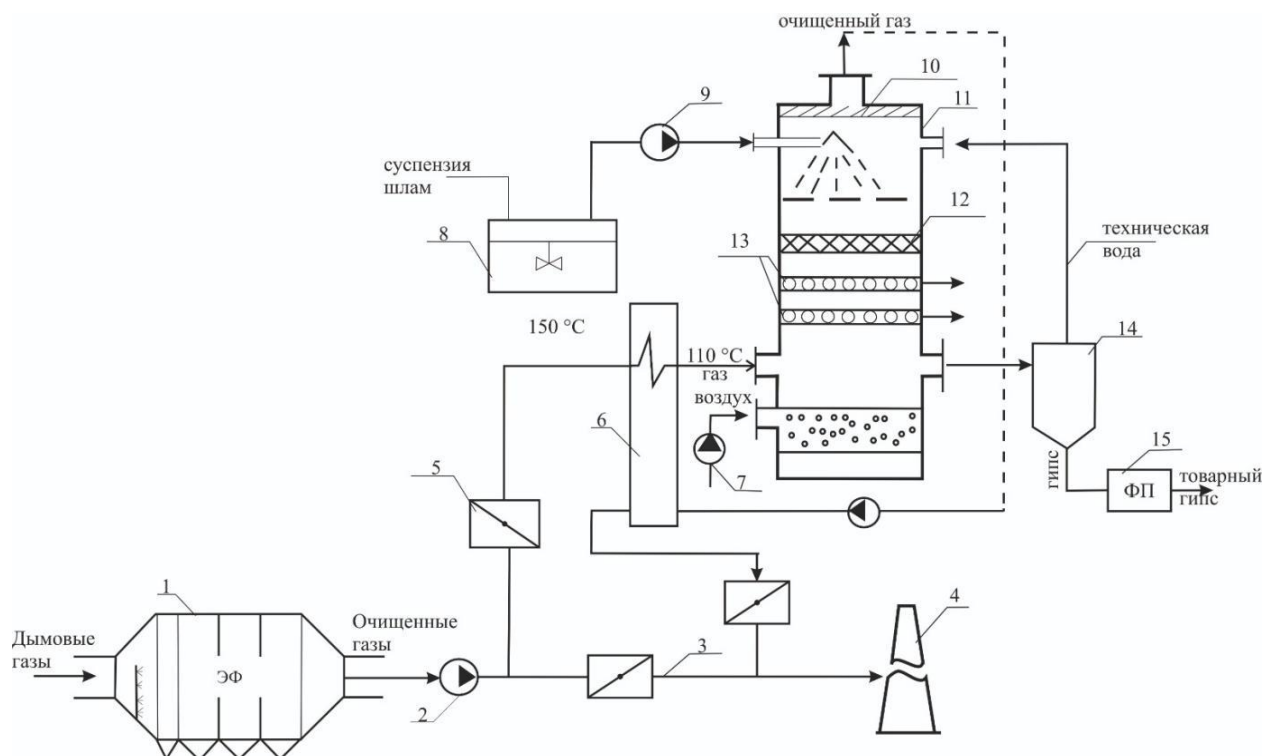


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема очистки дымовых газов от диоксида серы мокроизвестняковым способом:

- 1 – электрофильтр; 2 – дымосос; 3 – байпасная линия; 4 – дымовая труба; 5 – задвижки; 6 – регенеративный газовый подогреватель (РГП); 7 – воздуходувка; 8 – бак для суспензии гипса; 9 – насос подачи суспензии; 10 – каплеуловитель; 11 – абсорбер; 12 – зона промывки газов от механических примесей; 13 – зона реакции шламовой суспензии с дымовыми газами; 14 – гидроциклон; 15 – фильтр-пресс

В абсорбере суспензия шлама реагирует с диоксидом серы из дымовых газов, которые поступают в аппарат после электрофильтра и дымососа через РГП. Для регулирования температуры уходящих газов предусмотрена байпасная линия (на выходе температура дымовых газов – 70–80 °С). Абсорбер представляет собой аппарат следующей конструкции.

В качестве насадочных тел применяются полые или сплошные гидрофобные полиэтиленовые шарики для снижения прилипания частиц карбонатного шлама к их поверхности [10, 11]. Шарики фиксируются нижней (опорной) и верхней (ограничивающей) решеткой.

Живое сечение опорных решеток принимают 0,35–0,45, а ограничительных – 0,8–0,9. Статическая высота слоя насадки (в неподвижном состоянии) составляет 0,2–0,3 м, а расстояние между решетками 1–1,5 м, что допускает 3–4-кратное расширение слоя. Приведенную скорость газа принимают 2,5–5 м/с при плотностях орошения 25–100 м/ч. Забивание насадки твердыми частицами шлама не происходит вследствие интенсивного движения насадочных тел.

Дымовые газы поступают в нижнюю часть абсорбера и движутся снизу вверх, в зоне реакции происходит взаимодействие диоксида серы с суспензией карбонатного шлама. Далее газы промываются (12), очищаются от механических примесей и подаются в каплеуловитель (10). Образовавшийся  $\text{CaSO}_3$  доокисляется в гипс в результате подачи воздуха (7). Из нижней части аппарата образующаяся суспензия гипса подается в гидроциклон (14), в котором гипс обезвоживается, более мелкие частицы возвращаются в абсорбер (11). Суспензия гипса из гидроциклона подается на фильтр-пресс (15),

где высушивается до влажности 35–45 %. Сточная вода из гидроциклона и фильтр-пресса возвращается обратно в абсорбер в качестве технической воды для промывки дымовых газов.

Строительный гипс или, как его называют, «строительное тесто», представляет собой серую массу со специфическим запахом.

Чаще всего обжиг гипса проводится во вращающихся печах или в мельницах совмещенного помола и обжига [12, 13].

Обжиг проводят при температуре 150–180 °С. В результате получается менее пористый и более прочный алебастр, который измельчается в порошок. Этим методом сушки получается чистый гипс (95–98 %). Он дороже по стоимости, применяется в медицине, в искусстве при изготовлении гипсовых скульптур, изготовлении декора. Полученный полуводный гипс измельчают в мелкий порошок.

Представленная технология получения строительного гипса из отхода энергетики шлама водоподготовки за счет мокрого улавливания диоксида серы имеет и ряд недостатков: образование минерализованных сточных вод. Поэтому в представленной технологии все образующиеся сточные воды не сбрасываются, а возвращаются в общий цикл в качестве технической воды для отмывки газовых выбросов от механических примесей. Для определения стоимости технологического оборудования принимаются различные цены, учитываются и затраты на транспортировку, расходы на монтажные работы, учитывается и себестоимость полученного товарного строительного гипса (15 руб./кг). По данной технологии окупаемость производства составляет 3,5 года при существующей стоимости товарного гипса 30–40 руб./кг (2023 г). При этом предотвращенный экологический вред от деградации почв и земель (за счет минимизации площадей шламонакопителей) при внедрении данной технологии на ТЭС от снижения выброса диоксида серы в атмосферный воздух будет небольшой и составит примерно около 1 млн руб./год. Но, если рассмотреть данный предотвращенный экологический вред в целом по всей России, то он будет существенным. В настоящее время этот вопрос является очень актуальным, ему необходимо уделять особое внимание на энергетических объектах, правильно подбирать высокоэффективное оборудование с расчетом срока окупаемости.

### Заключение

Разработана технология замкнутого цикла получения товарного строительного гипса с применением отхода энергетики и дымовых газов ТЭС. В основе технологии применяется абсорбционный метод очистки газовых выбросов промышленных предприятий от диоксида серы  $SO_2$  с использованием суспензии карбонатного шлама и получением готового продукта – двуводного гипса. Представлен химический состав шлама, его технологические характеристики. Основным веществом в химическом составе является карбонат кальция  $CaCO_3$ , что позволяет применять суспензию шлама в химической реакции взаимодействия дымовых газов ТЭС с образованием строительного гипса. Подобран и рассчитан абсорбер с псевдоожиженной насадкой для очистки газовых выбросов мокрой суспензии и получения товарного двуводного гипса. В качестве насадок выбраны полые или сплошные гидрофобные полиэтиленовые шарики для снижения прилипания частиц суспензии шлама к их поверхности. Представлена технологическая схема очистки дымовых газов от диоксида серы с получением готового продукта – строительного гипса. Схема включает предложенный адсорбер, бак для суспензии шлама, гидроциклон и фильтр-пресс. Рассчитана себестоимость полученного товарного строительного гипса, которая составляет 15 руб./кг, окупаемость производства – 3,5 года. Рассчитан предотвращенный экологический вред от деградации почв и земель от внедрения данной технологии на ТЭС за счет снижения выброса диоксида серы в атмосферный воздух, который составил около 1 млн руб./год.

**Список источников**

1. Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 8 июня 2015 г. № 1316-р. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
2. Dominik Blasenbauer, Florian Huber. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe // *Waste Management*. 2020. Vol. 102. P. 868–883.
3. Trends in utilization of coal fly ash in india: a review / Venktesh Sharma [et al.] // *Journal of Engineering Design & Analysis*. 2019. Т. 2. № 12-16. С. 13–16.
4. Калыгин В.Г. Промышленная экология: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. 4-е изд., перераб. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 432 с.
5. Способ сжигания в кипящем слое: пат. 2217658 Рос. Федерация № 2002109885/06 / Пузырев Е.М., Сидоров А.М., Скрябин А.А., Щербakov Ф.В.; заявл. 15.04.02; опубл. 27.11.03, Бюл. № 3. 6 с.
6. Способ получения гипса: пат. 1315387 Рос. Федерация № 3950294 / Гладкий А.В., Говоров В.В.; заявл. 30.05.85; опубл. 07.06.87, Бюл. № 21.
7. Николаева Л.А. Очистка сточных вод ТЭС от нефтепродуктов гидрофобным карбонатным шламом // *Теплоэнергетика*. 2020. № 10. С. 79–85.
8. Николаева Л.А., Хуснутдинова Э.М. Научные подходы в технологии очистки газовых выбросов от оксида серы на промышленных предприятиях // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 4. С. 4–9.
9. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Очистка производственных сточных вод от нефтепродуктов модернизированным сорбционным материалом на основе карбонатного шлама // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2016. № 7. С. 51–58.
10. Абсорбер с псевдооживленной насадкой: пат. 2178333 Рос. Федерация / Ананьев А.А., Беккер В.Ф., Затонский А.В.; заявл. 07.05.99; опубл. 20.01.02.
11. Maksim Kamarou, Natalia Korob. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 100. P. 324–332.
12. Weiming Song, Jianan Zhou, Bao Wang. Production of SO<sub>2</sub> Gas: New and efficient utilization of flue gas desulfurization gypsum and pyrite resources // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. № 58. P. 20450–20460.
13. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 8–16.

**References**

1. Ob utverzhenii perechnya zagryaznyayushchih veshchestv, v otnoshenii kotoryh primenyayutsya mery gosudarstvennogo regulirovaniya v oblasti ohrany okruzhayushchej sredy: rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federacii ot 8 iyunya 2015 g. № 1316-r. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».
2. Dominik Blasenbauer, Florian Huber. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe// *Waste Management*. 2020. Vol. 102. P. 868–883.
3. Trends in utilization of coal fly ash in india: a review / Venktesh Sharma [et al.] // *Journal of Engineering Design & Analysis*. 2019. Т. 2. № 12-16. S. 13–16.
4. Kalygin V.G. Promyshlennaya ekologiya: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij. 4-e izd., pererab. M.: Izd. centr «Akademiya», 2010. 432 s.
5. Sposob szhiganiya v kipyashchem sloe: pat. 2217658 Ros. Federaciya № 2002109885/06 / Puzyrev E.M., Sidorov A.M., Skryabin A.A., Shcherbakov F.V.; zayavl. 15.04.02; opubl. 27.11.03, Byul. № 3. 6 s.



6. Sposob polucheniya gipsa: pat. 1315387 Ros. Federaciya № 3950294 / Gladkij A.V., Govorov V.V.; zayavl. 30.05.85; opubl. 07.06.87, Byul. № 21.
7. Nikolaeva L.A. Ochistka stochnyh vod TES ot nefteproduktov gidrofobnym karbonatnym shlamom // Teploenergetika. 2020. № 10. S. 79–85.
8. Nikolaeva L.A., Husnutdinova E.M. Nauchnye podhody v tekhnologii ochistki gazovyh vybrosov ot oksida sery na promyshlennyh predpriyatiyah // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2021. T. 25. № 4. S. 4–9.
9. Nikolaeva L.A., Golubchikov M.A. Ochistka proizvodstvennyh stochnyh vod ot nefteproduktov modernizirovannym sorbcionnym materialom na osnove karbonatnogo shlama // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2016. № 7. S. 51–58.
10. Absorber s psevdoozhizhennoj nasadkoj: pat. 2178333 Ros. Federaciya / Anan'ev A.A., Bekker V.F., Zaton'skij A.V.; zayavl. 07.05.99; opubl. 20.01.02.
11. Maksim Kamarou, Natalia Korob. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2021. Vol. 100. P. 324–332.
12. Weiming Song, Jianan Zhou, Bao Wang. Production of SO<sub>2</sub> Gas: New and efficient utilization of flue gas desulfurization gypsum and pyrite resources // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. № 58. R. 20450–20460.
13. Obzornyj analiz sposobov polucheniya vyazhushchih iz gipsosoderzhashchih othodov promyshlennyh proizvodstv / N.I. Alfimova [i dr.] // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2020. № 11. S. 8–16.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 10.01.2024; одобрена после рецензирования: 12.02.2024; принята к публикации: 13.02.2024

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 10.01.2024; approved after review: 12.02.2024; accepted for publication: 13.02.2024

*Информация об авторах:*

**Николаева Лариса Андреевна**, заведующая кафедрой «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), доктор технических наук, профессор, e-mail: Larisanik16@mail.ru, SPIN-код: 9652-0146

**Зайнуллина Элеонора Райнуровна**, аспирантка Казанского государственного энергетического университета (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), e-mail: my-elechka@mail.ru, SPIN-код: 2030-1380

**Сафина Гульшат Галлямутдиновна**, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51), кандидат химических наук, доцент, e-mail: safgoulshat@mail.ru, SPIN-код: 3462-0439

*Information about the authors:*

**Nikolaeva Larisa A.**, head of the department of engineering ecology and occupational safety of Kazan state energy university (420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51), doctor of technical sciences, professor, e-mail: Larisanik16@mail.ru, SPIN: 9652-0146

**Zainullina Eleonora R.**, postgraduate student of Kazan state energy university (420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51), e-mail: my-elechka@mail.ru, SPIN: 2030-1380

**Safina Gulshat G.**, associate professor of the department of engineering ecology and occupational safety of Kazan state energy university (420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51), candidate of chemical sciences, associate professor, e-mail: safgoulshat@mail.ru, SPIN: 3462-0439