



НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ОКСИДА СЕРЫ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

¹Л.А. Николаева, ¹Э.М. Хуснутдинова

¹Казанский государственный энергетический университет

Предложен адсорбционный метод очистки газовых выбросов промышленных предприятий. В качестве сорбционного материала использован отход энергетики – шлам химводоочистки (ХВО) Набережночелнинской ТЭЦ, образующийся при коагуляции и известковании природной воды. Представлен химический состав шлама, его технологические характеристики, построена изотерма адсорбции оксида серы модифицированным шламом, определены его суммарный объем пор, удельная поверхность и сорбционная емкость. Представлен расчет параметров модернизации технологической схемы очистки газовых выбросов от оксида серы линии производства бисульфита натрия на АО "Химический завод им. Л.Я. Карпова".

Ключевые слова: газовые выбросы, оксид серы, гранулированный сорбционный материал, бисульфит натрия, адсорбер

Статья поступила в редакцию 13.10.2020, доработана 11.11.2020, принята к публикации 18.12.2020

Scientific Approaches in the Technology of Purification of Gas Emissions from Sulfur Oxide at Industrial Enterprises

¹L.A. Nikolaeva, ¹E.M. Khusnutdinova

¹Kazan State Power Engineering University, 420066 Kazan, Russia

An adsorption method for purification of gas emissions at industrial enterprises is proposed. Waste from the power industry – chemical water treatment sludge (CWO) of Naberezhnochninskaya CHPP, formed during coagulation and liming of natural water was used as a sorption material. The chemical composition of the sludge and its technological characteristics are presented, an isotherm of the sulfur oxide adsorption by the modified sludge is constructed, its total pore volume, specific surface area and sorption capacity are determined. The calculation of the parameters of the modernization of the technological scheme for the purification of gas emissions from sulfur oxide of the line for the production of sodium bisulfite at JSC "Chemical Plant named after L.Ya. Karpov" is presented.

Keywords: gas emissions, sulfur oxide, granular sorption material, sodium bisulfite, adsorber

Received 13.10.2020, revised 11.11.2020, accepted for publication 18.12.2020

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-4-4-9

Источниками загрязнения атмосферы и биосферы являются следующие производства: нефтехимические и нефтеперерабатывающие заводы, тепловые электростанции и металлургические комбинаты [1]. В процессе работы данных производств в атмосферу выделяется большое количество оксидов азота и серы, сероводорода, углекислого газа и многих других соединений. Наибольшую опасность представляют собой соединения серы, которые обра-

зуются при сжигании серосодержащего топлива, а также в результате химических превращений. Оксид серы токсичен и входит в Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (Распоряжение № 1316-р от 8.07.2015г.).

Поступающий в атмосферу оксид серы окисляется до серного ангидрида, который, взаимодействуя с парами воды, об-

разует капельки серной кислоты. Сернистый ангидрид участвует в формировании кислотных дождей. Общемировой выброс SO_2 оценивается в 190 млн т в год [2].

Методы очистки промышленных газовых выбросов (ГВ) от SO_2 подразделяются на абсорбционный, каталитический, биохимический и адсорбционный [3]. Одним из эффективных способов очистки газовых выбросов от SO_2 является адсорбция на пористых материалах.

Данный способ — один из самых распространенных методов защиты воздушного бассейна от загрязнений. Он экономически выгоден при концентрациях примесей в газах более 2–5 мг/м³ [4]. Наиболее распространены адсорберы с неподвижным слоем гранулированного или сотового адсорбента.

Современные адсорбенты, выпускаемые промышленностью, характеризуются высокой стоимостью. Поэтому применение новых сорбционных материалов на основе отходов производства для очистки газовых выбросов является актуальной задачей.

Цель работы — исследование адсорбционной очистки газовых выбросов промышленных предприятий от оксида серы гранулированным карбонатным шламом.

Методы исследований

В ходе исследований использованы методы фотометрического, фотоколориметрического и йодометрического анализа. Для определения удельной поверхности гранул ГРСМ использовался порометр "Сорби-М".

Результаты и их обсуждение

В России ежегодно образуется около 6 млрд т отходов производства и потребления. Увеличивается количество отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот, а размещаются на полигонах и свалках, что приводит к выводу продуктивных сельскохозяйственных угодий из оборота. В настоящее время активно проводится разгрузка мусорных контейнеров экологической нагрузки на окружающую среду с помощью вторичного использования отходов производства. Организация упорядоченного обращения отходов производства и потребления превратилась в последние годы в одну из наиболее острых экологических проблем России, как следует из Указа Президента РФ № 176 от 19.04.2017 г. "Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025", Распоряжению Правительства РФ № 84-р от 25.01.2018 г. "Стратегия развития промышленности по обработке,

утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года" и проекта ФЗ "О вторичных материальных ресурсах".

Рассмотрим возможность адсорбционной очистки карбонатным шламом химводоочистки (ХВО) природной воды Набережночелнинской ТЭЦ (предприятие энергетики г. Набережные Челны Республики Татарстан, входит в состав АО "Татэнерго").

Исследования показали, что карбонатный шлак ХВО и его модификации могут использоваться в качестве адсорбционного материала для удаления различных вредных примесей из ГВ промышленных предприятий, поэтому использование его в технологиях очистки ГВ может быть одним из приоритетных направлений, поскольку ежегодно происходит увеличение объемов карбонатных шламов, требующих утилизации. Рентгенографический качественный анализ на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker показал следующий химический состав шлама: кальцит CaCO_3 — 71 %; брусит $\text{Mg}(\text{OH})_2$ — 8,5 %; портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ < 1 %; кварц SiO_2 — 0,6 %; прочие вещества — 19 %. Технические характеристики шлама: насыпная плотность — 560 кг/м³; суммарный объем пор — 0,375 см³/г; диаметр рабочей фракции 0,5–1,40 мм; содержание органического углерода — 11 %; гуминовые вещества — 15 % от общей массы образца, которые выявлены методом газовой хромато-масс-спектрометрии [5]; влажность шлама — 3 %, зольность — 88 %.

Для модификации карбонатного шлама ХВО Набережночелнинской ТЭЦ использовались частицы размером 0,01–0,09 мм, которые смешивали с жидким натриевым стеклом (ЖНС) и методом ручного окатывания получали гранулированный сорбционный материал (ГРСМ). При изготовлении гранул с использованием ЖНС весьма важен темп нагревания. Если давление насыщенного пара в глубинных слоях ЖНС окажется выше атмосферного давления, то произойдет вспучивание материала. Данным явлением пользуются для

получения пористых материалов, резко снижая внешнее давление в нагретой системе в той стадии, когда жидкое стекло еще сохраняет пластичность. Такой же результат достигается при быстром повышении температуры после гранулирования жидкого стекла, так как существует значительный градиент влажности материала от поверхности к центру гранулы.

Чтобы получить сорбционный материал, обладающий наибольшей сорбционной емкостью, необходимо определить условия формования гранул. Экспериментальным путем подобрано соотношение шлама и ЖНС при массовой и объемной доле компонентов 2:1, соответственно [8]. При меньшем соотношении происходит неполное пропитывание шлама ЖНС, при последующем обжиге гранулы осыпаются. При большем соотношении происходит перерасход связующего.

Температура обработки гранул ГРСМ при их изготовлении влияет на значения суммарного объема пор V_Σ и удельную поверхность $S_{уд}$. Для проведения эксперимента в тарельчатом грануляторе изготавливали гранулы ГРСМ размером 0,5–2,5 мм. Условия нагревания изменяли в пределах 200–500 °С с шагом 50 °С. Термообработку проводили в муфельной печи "МФ-10" (Россия) с электронным блоком управления. При времени термообработки 3 ч получили следующие результаты:

$T, ^\circ\text{C}$	200	250	300	350	400	450	500
$S_{уд}, \text{м}^2/\text{м}^3$	392	470	560	667	720	725	725
$V_\Sigma, \text{см}^3/\text{г}$	0,21	0,27	0,38	0,42	0,45	0,46	0,46

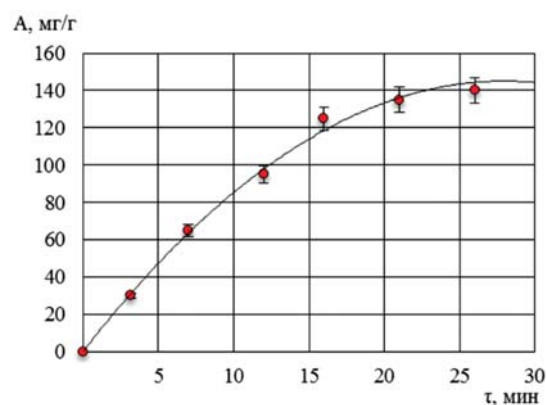


Рис. 1. Зависимость сорбционной емкости ГРСМ от времени

Fig. 1. Dependence of the GRSM sorption capacity on then time

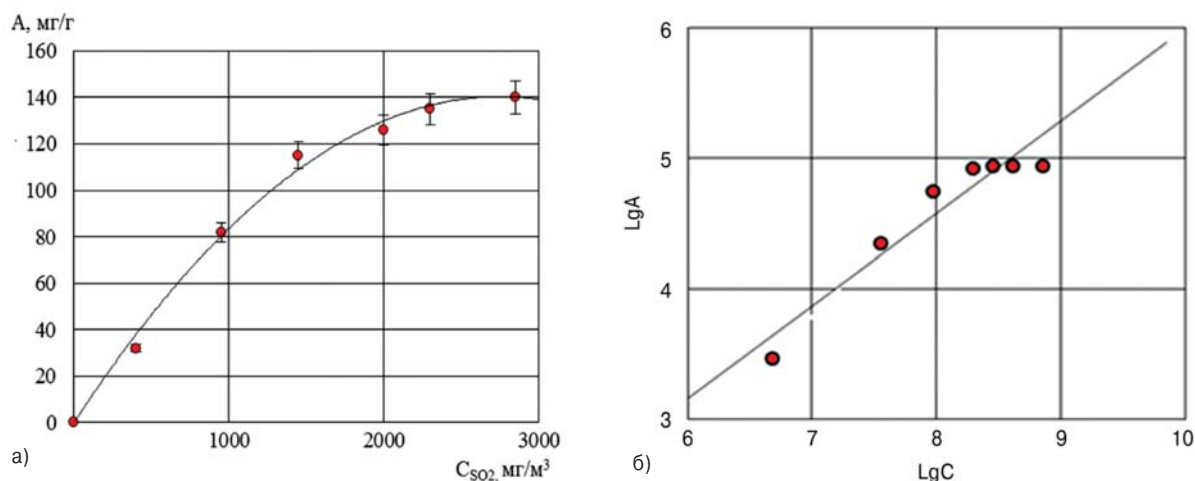


Рис. 2. Изотерма адсорбции SO_2 ГPCM (а) и ее вид в логарифмических координатах (б)

Fig. 2. GRSM (a) SO_2 adsorption isotherm and its logarithmic coordinates (b)

В ходе исследований было определено, что при температуре 500°C достигаются максимальные значения суммарного объема пор и удельной поверхности. Для определения удельной поверхности гранул ГPCM использовался порометр "Сорби-М". С его помощью определяется удельная поверхность сорбционного материала путем сравнения объемов газа азота (адсорбата), сорбируемого гранулами ГPCM, со стандартным материалом — силикагелем.

Для исследования сорбционных свойств ГPCM в газовой среде, приближенной по составу к газовым выбросам предприятий, использовалась созданная на кафедре "Технология воды и топлива" Казанского государственного энергетического университета модельная установка с неподвижным слоем ГPCM.

Результаты исследования сорбционных свойств ГPCM по отношению к оксиду серы показали, что адсорбционная емкость шлама реализуется в течение первых минут контакта и по истечении 16 мин достигает 140 мг/г по оксиду серы. Адсорбционная емкость составляет 14% по массе. На рис. 1 представлена кинетическая зависимость изменения сорбционной емкости ГPCM от времени.

Основные результаты исследований ГPCM, а также оптимальные параметры промышленных установок очистки могут быть получены с помощью изотермы сорбции (зависимости сорбционной емкости A от изменения концентрации SO_2), которая представлена на рис. 2, а.

Изотерма адсорбции соответствует изотерме Ленгмюра L-типа. Выпуклая форма изотермы

подтверждает эффективную физическую адсорбцию. На рис. 2, б представлена изотерма адсорбции SO_2 в логарифмических координатах.

На рис. 3 приведены результаты экспериментальных исследований сорбционных свойств ГPCM при разных соотношениях карбонатного шлама и ЖНС. Жидкое стекло соответствует ТУ 20.13.62-001-01775192-2018 и изготавливается по технологическому регламенту, утвержденному в установленном порядке. Раствор приготавливали автоклавным растворением стекловидного силиката соответствующего щелочного металла (силикат-глыбы). Основные физико-химические показатели ЖНС: плотность при температуре $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ — $1,25\text{ г/см}^3$, условная вязкость по вискозиметру В 3-4 — 100 с , динами-

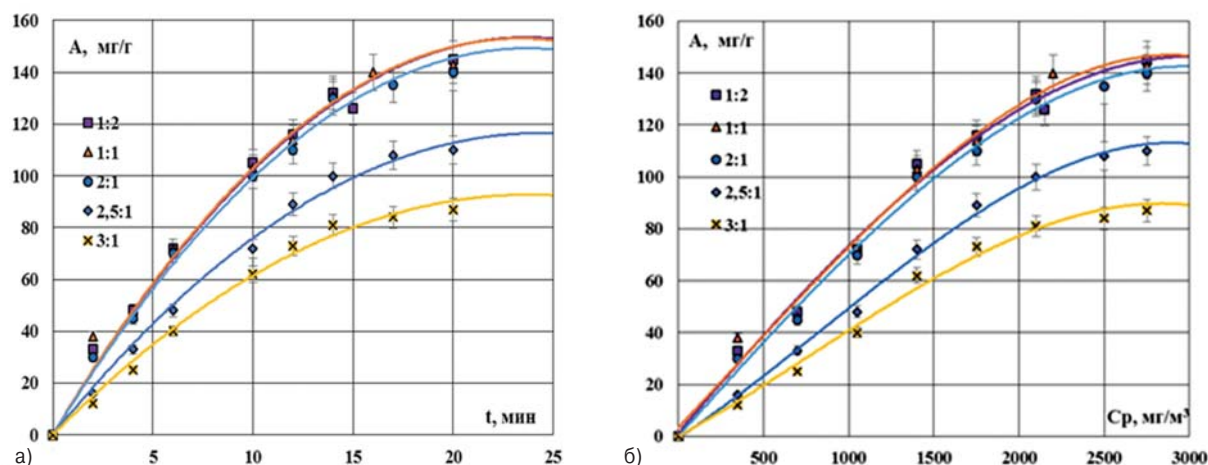


Рис. 3. Зависимость адсорбционной емкости ГPCM по SO_2 от времени t (а) и равновесной концентрации C_p (б) при разных соотношениях шлама и ЖНС

Fig. 3. Dependence of the SO_2 GRSM adsorption capacity on the time t (a) and the equilibrium concentration C_p (b) at different ratios of sludge and LHS

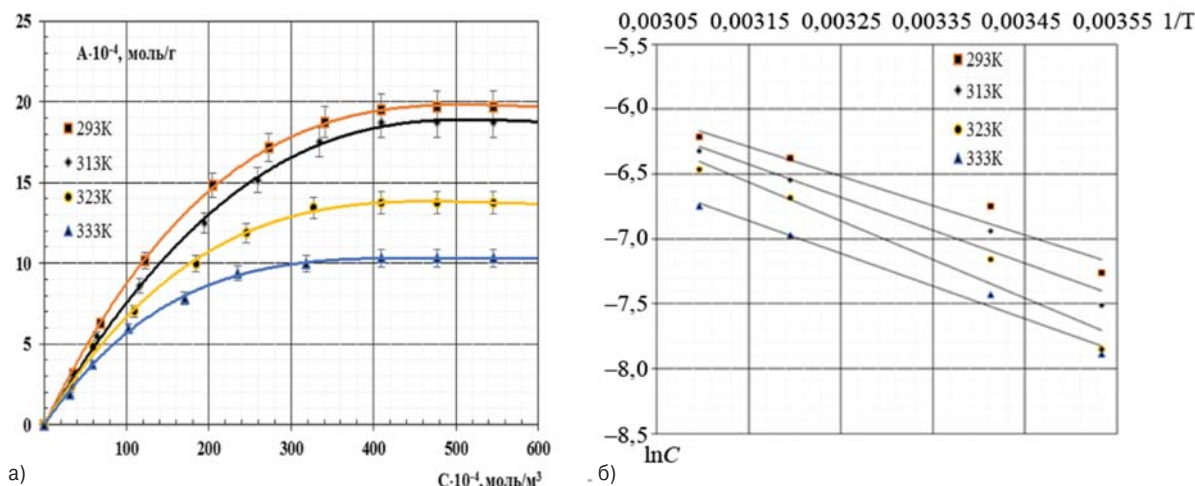


Рис. 4. Изотермы (а) и изостеры (б) адсорбции SO₂ ГPCM при разных температурах
Fig. 4. SO₂ HRMS adsorption isotherms (a) and isosteres (b) at different temperatures

ческая вязкость — 15 Па·с, силикатный модуль — 2,1.

Для изучения механизма процесса адсорбции SO₂ ГPCM был исследован процесс в статических условиях при разных температурах (293 К, 313 К, 323 К, 333 К). На рис. 4, а, б показаны соответственно изотермы и изостеры адсорбции по SO₂ (при сорбции оксида серы, концентрация изменялась в диапазоне 0–3000 мг/м³).

Изостеры показывают взаимосвязь равновесных температур и концентраций при постоянной емкости сорбента. При увеличении температуры величина дифференциальной теплоты уменьшается.

Повышение температуры приводит к уменьшению адсорбционной емкости $A \cdot 10^{-4}$ по SO₂, что характерно для экзотермического процесса и свидетельствует о физической природе сил. По уравнению Клаузиуса-Клайперона определена дифференциальная теплота адсорбции

$$\Delta \ln C / \Delta (1/T) = -Q/R, \quad (1)$$

где C — концентрация оксида серы в газе, моль/м³; T — температура, К; Q — дифференциальная теплота изостеры адсорбции, Дж/моль; R — молярная газовая постоянная 8,341 Дж/моль·К.

Дифференциальная теплота изостеры адсорбции определяется по уравнению:

$$Q = -R[\Delta \ln C / \Delta (1/T)]. \quad (2)$$

По углам наклона изостер в соответствии с уравнением (2) рассчитывали дифференциальную теплоту адсорбции SO₂ гранулами ГPCM. Результаты рас-

четов приведены ниже. Их анализ показывает, что с увеличением адсорбционной емкости $A \cdot 10^{-4}$ оксида серы величина дифференциальной теплоты адсорбции увеличивается:

$A \cdot 10^{-4}, \text{моль/г} \dots$	17,19	21,88	22,97	23,44
$Q, \text{кДж/моль} \dots$	9,31	12,17	13,64	14,22

Энергия Гиббса процесса адсорбции определяется по уравнению

$$\Delta G = -RT \ln K_p \quad (3)$$

где ΔG — энергия Гиббса, Дж/моль; T — температура, К; K_p — константа адсорбционного равновесия.

Полученные значения свободной энергии Гиббса (–25,17––26,39 кДж/моль) с повышением температуры изменяются незначительно и подтверждают самопроизвольное протекание адсорбции SO₂ на ГPCM.

Изучена кинетика процесса адсорбции SO₂ ГPCM и получены кинетические кривые при разных температурах в зависимости от времени адсорбции t (рис. 5).

Для определения констант скорости адсорбции использованы кинетические уравнения. Установлено, что с повышением температуры константы скорости адсорбции уменьшаются, что характерно для неактивированной адсорбции:

Температура, К.....	293	313	323	333
Константа скорости $K \cdot 10^3, \text{с}^{-1} \dots$	9,54	8,93	8,17	5,74

При адсорбции не все молекулы SO₂ могут проникнуть в поры и адсорбироваться, а только

те, которые обладают избытком энергии активации, поэтому при высоких температурах скорость адсорбции увеличивается. Рассчитана энергия активации адсорбции по уравнению Аррениуса. Значение кажущейся энергии активации (14,7 кДж/моль) свидетельствует о протекании физической адсорбции.

Проведенные исследования позволили получить следующие технологические характеристики ГPCM: адсорбционная емкость по SO₂ — 140 мг/г; суммарный объем пор — 0,450 см³/г; удельная поверхность — 725 м²/кг; прочность на истирание — 79 %. Эффективность очистки газа от SO₂ ГPCM составила 99,9 %.

Полученные экспериментальные данные по исследованию зависимостей были аппроксимированы, а также выполнен их корреляционный анализ. Резуль-

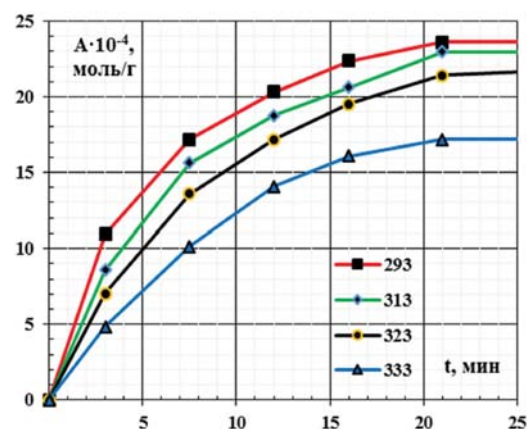


Рис. 5. Кинетические зависимости адсорбции SO₂ ГPCM при разных температурах

Fig. 5. Kinetic dependences of SO₂ HRMS adsorption at different temperatures

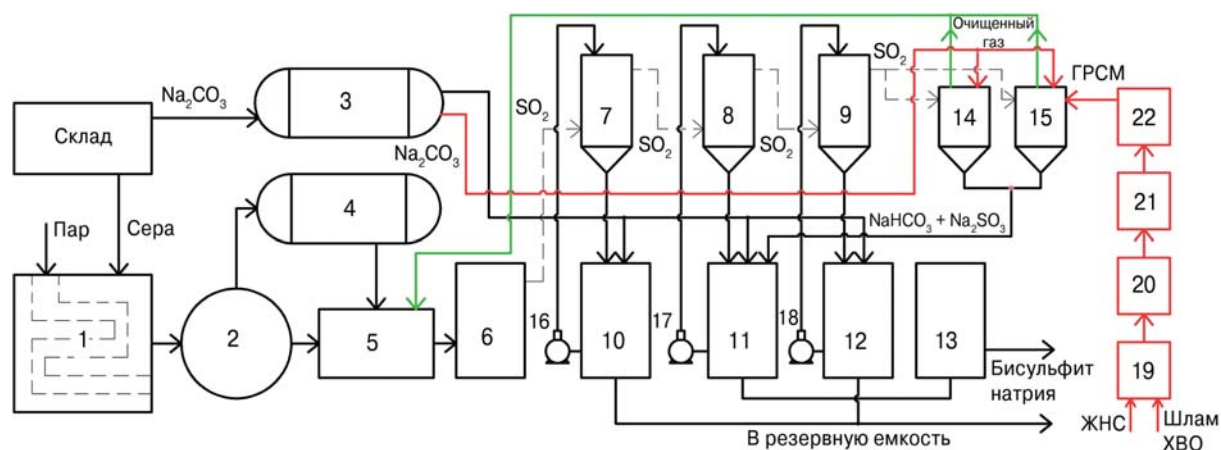


Рис. 6. Модернизированная технологическая схема процесса производства бисульфита натрия:

1 – плавилка серы; 2 – отстойник; 3 – напорная емкость содового раствора; 4 – напорная ёмкость серы; 5 – циклонная печь; 6 – башня охлаждения; 7 – абсорбер I ступени; 8 – абсорбер II ступени; 9 – абсорбер III ступени; 10 – циркуляционный сборник; 11 – циркуляционный бисульфитный сборник; 12 – санитарный сборник; 13 – сборник готовой продукции; 14, 15 – брызгоуловитель; 16–18 – центробежный насос; 19 – тарельчатый гранулятор; 20 – муфельная печь; 21 – бункер охлаждения и хранения готового сорбента; 22 – бункер подачи сорбента

Fig. 6. Modernized sodium bisulfite production process flow diagram:

1 – sulfur smelter; 2 – sump; 3 – soda solution gravity tank; 4 – sulfur gravity tank; 5 – cyclone furnace; 6 – cooling tower; 7 – first stage absorber; 8 – II stage absorber; 9 – III stage absorber; 10 – circulation collector; 11 – circulating bisulfite collector; 12 – sanitary collector; 13 – finished products collector; 14, 15 – spray trap; 16–18 – centrifugal pump; 19 – disc granulator; 20 – muffle furnace; 21 – bunker for cooling and storage of the finished sorbent; 22 – sorbent feed hopper

Таблица 1. Сравнение моделей изотерм адсорбции SO₂ ГPCM

Table 1. Comparison of SO₂ GRSM adsorption isotherm models

Параметры модели		Значение
Уравнение	Константа	
Модель Ленгмюра		
$A = a_m K_L C_e / (1 + K_L C_e)$	K_L	0,0089
	a_m	46,95
	R^2	0,954
Модель Фрейндлиха		
$A = K_F C_e^{1/n}$	K_F	1,71
	$1/n$	0,518
	R^2	0,992
Модель БЭТ		
$C_e/[A(C_s - C_e)] =$ $= 1/(a_m K_{БЭТ}) +$ $+ (K_{БЭТ} - 1)C_e/(a_m K_{БЭТ} C_s)$	$K_{БЭТ}$	-0,095
	a_m	9,52
	R^2	0,894
Модель Редлиха-Петерсона		
$A = K_R C_e / (1 + \alpha C_e^\beta)$	K_R	8,55
	α	0,327
	β	0,976
	R^2	0,948

таты модельного опыта описываются уравнениями регрессии, которые были получены методом наименьших квадратов.

Уравнения регрессии сведены в табл. 1, в которой приведены значения показателей достоверности аппроксимации, показывающие соответствие теоретической зависимости реальному распределению.

На основании величины коэффициента корреляции (R^2) был сделан вывод, что описание опытных результатов по адсорбции оксида серы гранулированным сорбционным материалом наиболее адекватно описывается моделью сорбции Фрейндлиха.

Гранулированный шлам имеет высокую пористость, что особенно важно при использовании его адсорбционных свойств в режиме пропускания газа. В табл. 2 представлена сравни-

тельная характеристика ГPCM с промышленными адсорбентами, применяемыми в технологиях газоочистки.

Низкая стоимость адсорбционного материала на основе шлама химводоочистки, доступность, возможность регенерации позволяют использовать его для очистки газовых выбросов с минимальными затратами и наибольшей эффективностью.

На базе проведенных исследований предложена модернизация существующей технологической схемы очистки газовых выбросов в производстве бисульфита натрия на АО "Химический завод им. Л.Я. Карпова" в г. Менделеевске. Технология производства бисульфита натрия (NaHSO_3) оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду, так как при его производстве выбросы в атмосферу SO_2 составляют порядка 18,5 т/год. Объем выпускаемого бисульфита натрия составляет около 3700 т/год.

Для снижения концентрации оксида серы в газовых выбросах технологической схемы производства бисульфита натрия предлагается брызгоуловитель модернизировать в абсорбер с загрузкой в него ГPCM. Для непрерывной работы системы очистки газовых выбросов в производстве бисульфита нат-

Таблица 2. Характеристика промышленных адсорбентов и ГPCM

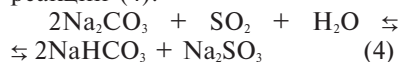
Table 2. Characteristics of industrial adsorbents and GRSM

Характеристика	Активированный уголь (СКТ-1)	Силикагель (ШСМГ)	Цеолит (NaA)	ГPCM
Удельная поверхность, м ² /г	600–1700	400–770	750–800	700–750
Размер гранул, мм	1,0–5,0	2,0–7,0	2,0–5,0	0,5–2,5
Насыпная плотность, кг/м ³	420	400–500	650	560
Адсорбционная емкость по SO ₂ , кг/кг	0,30–0,60	0,20–0,35	0,25–0,45	0,12–0,20
Эффективность адсорбции по SO ₂ , %	до 99,9	до 99,7	до 99,4	до 99,9
Прочность на истирание, %	70	80	98	79
Стоимость 1 кг сорбента, руб.	100	60	150	13,2

рия АО "Химический завод им. Л.Я. Карпова" предлагается включить в неё схему производства ГРСМ с загрузкой его в адсорбер (рис. 6).

Для схемы производства ГРСМ подобрано стандартное технологическое оборудование.

Регенерация адсорбента осуществляется в замкнутом цикле с возвратом SO_2 в схему производства бисульфита натрия. Очищенные газы возвращаются в циклонную печь. Расплавленная сера самотеком подается в пневматическую серную форсунку, где происходит распыление расплавленной серы горячим сжатым воздухом. Регенерация начинается с подачи в адсорбер кальцинированной соды (Na_2CO_3) из напорной емкости содового раствора. Концентрация Na_2CO_3 составляет 250–280 г/дм³. Время промывания составляет 0,5 ч. Кальцинированная сода реагирует с оксидом серы с образованием бикарбоната и сульфита натрия по реакции (4):



Полученный раствор направляется в циркуляционный бисульфитный сборник, где осуществляется последующее

образование бисульфита натрия. ГРСМ просушивают подаваемым в адсорбер свежим газом.

Таким образом, при регенерации ГРСМ SO_2 из адсорбера возвращается в цикл производства бисульфита натрия. Количество оксида серы составляет около 18,5 т/год, что может привести к экономии материальных ресурсов при производстве бисульфита натрия.

Модернизация схемы очистки отходящих газов позволяет довести очистку газовых выбросов от SO_2 до 99,9 % и решает частично проблему утилизации многотоннажного отхода энергетики — карбонатного шлама химводоочистки Набережночелнинской ТЭЦ.

Выполнен расчет экономического эффекта и предотвращенного экологического ущерба в результате природоохранной деятельности от деградации почв, земель и снижения выбросов SO_2 в атмосферный воздух на рассматриваемой территории. Общий предотвращенный экологический ущерб составит 248,407 тыс. руб./год. Экономический эффект составит 162,4 тыс. руб./год, срок окупаемости 4,5 года.

Выводы

Изучен процесс адсорбции модельной газовой смеси, содержащей SO_2 ГРСМ. Представлена кинетическая зависимость процесса адсорбции оксида серы ГРСМ. Показано изменение сорбционной емкости ГРСМ по отношению к оксиду серы в зависимости от размера частиц его фракций. Построена изотерма адсорбции SO_2 ГРСМ.

Рассчитаны оптимальные характеристики адсорбера периодического действия с неподвижным слоем гранулированного сорбционного материала.

На базе проведенных исследований предложено усовершенствование существующей технологической схемы очистки газовых выбросов на АО "Химический завод им. Л.Я. Карпова".

Выполнен расчет экономического и экологического эффекта модернизации технологической схемы очистки газовых выбросов от оксида серы в производстве бисульфита натрия АО "Химический завод им. Л.Я. Карпова". Общий предотвращенный экологический ущерб составит 248,407 тыс. руб./год, а экономический эффект составит 162,4 тыс. руб./год.

Литература

1. Белов П.С., Голубева И.А., Низова С.А. Экология производства химических продуктов из углеводородов нефти и газа. Учебник для вузов. М., Химия, 1991. 256 с.
2. Денисова В.В. Промышленная экология. Учеб. пособие. Ростов-на-Дону, Феникс, 2011. 720 с.
3. Альтшулер В.С., Гаврилова А.А. Высокотемпературная очистка газов сернистых соединений. М., Наука, 1969. 151 с.
4. Николаева Л.А. Адсорбционная очистка промышленных сточных вод модифицированным карбонатным шламом. Дисс. ... д-ра техн. наук: 03.02.08. Казань, 2016. 267 с.
5. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. A study of the absorption of nitrogen oxides from the boiler flue gases. Thermal Engineering. 2018. Vol. 65. Iss. 8. P. 575–579.
6. Пат. 117420 РФ. Система очистки сточных вод от нефтепродуктов. Л.А. Николаева, Е.Н. Бородай. Заявлено 10.01.2012. Опубликовано. 27.06.2012. Бюл. № 18.
7. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. Purification of gas emissions of chemical industry enterprises by carbonaceous cutting. Ecology and Industry of Russia. 2018. Vol. 22. No 8. P. 14–18.
8. Семакина О.К., Якушева Ю.С., Шевченко А.А. Выбор способа гранулирования адсорбентов из отходов производства. Фундаментальные исследования. 2013. № 8–3. С. 720–725.

References

1. Belov P.S., Golubeva I.A., Nizova S.A. Ekologiya proizvodstva khimicheskikh produktov iz uglevodorodov nefiti i gaza. Uchebnik dlya vuzov. M., Khimiya, 1991. 256 s.
2. Denisova V.V. Promyshlennaya ekologiya. Ucheb. posobie. Rostov-na-Donu, Feniks, 2011. 720 s.
3. Al'tshuler V.S., Gavrilova A.A. Vysokotemperaturnaya oshistka gazov sernistykh soedinenii. M., Nauka, 1969. 151 s.
4. Nikolaeva L.A. Adsorbtsionnaya oshistka promyshlennykh stochnykh vod modifitsirovannym karbonatnym shlamom. Diss. ... d-ra tekhn. nauk: 03.02.08. Kazan', 2016. 267 s.
5. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. A study of the absorption of nitrogen oxides from the boiler flue gases. Thermal Engineering. 2018. Vol. 65. Iss. 8. P. 575–579.
6. Pat. 117420 RF. Sistema oshistki stochnykh vod ot nefteproduktov. L.A. Nikolaeva, E.N. Borodai. Zayavleno 10.01.2012. Opublikovano. 27.06.2012. Byul. № 18.
7. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. Purification of gas emissions of chemical industry enterprises by carbonaceous cutting. Ecology and Industry of Russia. 2018. Vol. 22. No 8. P. 14–18.
8. Semakina O.K., Yakusheva Yu.S., Shevchenko A.A. Vybor sposoba granulirovaniya adsorbentov iz otkhodov proizvodstva. Fundamental'nye issledovaniya. 2013. № 8–3. S. 720–725.

Л.А. Николаева – д-р техн. наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, e-mail: larisani16@mail.ru • Э.М. Хуснутдинова – соискатель, КГЭУ, e-mail: rr-088@mail.ru

L.A. Nikolaeva – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), e-mail: larisani16@mail.ru • E.M. Khusnutdinova – Applicant, KSPEU, e-mail: rr-088@mail.ru