

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА АДсорбЦИИ ДИОКСИДА СЕРЫ ИЗ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРОИЗВОДСТВА БИСУЛЬФИТА НАТРИЯ

Л. А. Николаева, Э. М. Хуснутдинова

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Республика Татарстан, Россия

Рецензент д-р техн. наук, доцент И. Г. Шайхиев

Ключевые слова: адсорбер периодического действия; гранулированный сорбционный материал; диоксид серы; карбонатный шлам; механизм адсорбции; модификация.

Аннотация: Предложено очищать газовые выбросы промышленных предприятий от диоксида серы адсорбционным методом. В качестве адсорбционного материала использован отход энергетики – шлам химводоочистки Казанской ТЭЦ-1. Представлен его химический состав. Проведены экспериментальные исследования нового сорбционного материала на основе отхода энергетики для очистки газа от диоксида серы. Получены кинетическая зависимость и изотерма процесса адсорбции. Изучен механизм процесса адсорбции диоксида серы сорбционным материалом при разных температурах. Определены свободная энергия Гиббса, дифференциальная теплота и энергия активации адсорбции. Проведен расчет экономического и экологического эффектов модернизации технологической схемы очистки газовых выбросов от диоксида серы линии производства бисульфита натрия АО «Химический завод им. Л. Я. Карпова».

Введение

С развитием промышленности большое внимание уделяется ее экологической безопасности, а именно проблеме очистки газовых выбросов и вторичное использование отходов производства. Повышенные требования к значениям предельно-допустимых концентраций вредных веществ в газовых выбросах требует более эффективных и экологичных способов их очистки.

Николаева Лариса Андреевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология воды и топлива»; Хуснутдинова Эльвира Мусавировна – соискатель кафедры «Технология воды и топлива», e-mail: gr-088@mail.ru, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Республика Татарстан, Россия.

Одной из экологических проблем предприятий химической и нефте-химической промышленности является очистка газовых выбросов от диоксида серы SO_2 . Диоксид серы относится к III классу опасности и входит в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (по распоряжению от 08.07.2015 г. № 1316-р).

На промышленных предприятиях в процессе деятельности образуются многочисленные разновидности отходов минерального и органического происхождения. Отходы производства отличаются однородностью состава, что делает целесообразным их повторное использование в промышленном масштабе. В условиях истощения и исчерпания природных ресурсов, загрязнения природной среды в настоящее время промышленные отходы рассматриваются как крупный источник вторичных материальных ресурсов [1]. Согласно Указу Президента РФ от 19.04.2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» и 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», становится актуальной необходимость принятия мер по обеспечению безопасного обращения с отходами производства.

Для очистки газовых выбросов от диоксида серы применяют абсорбционные, адсорбционные, каталитические, термические и конденсационные методы [2, 3]. Одним из эффективных способов очистки выбросов от диоксида серы является адсорбция на микропористых сорбентах. К такому сорбенту относится и многотоннажный отход энергетики – карбонатный шлам химводоочистки (ХВО) природной воды [4, 5]. Карбонатный шлам образуется на электростанциях в осветлителях при протекании физико-химических процессов коагуляции и известкования. Использование его в технологиях очистки газовых выбросов может быть одним из приоритетных направлений, поскольку ежегодно происходит увеличение объемов карбонатных шламов, требующих утилизации.

Материалы и методы исследований

Объекты исследования – гранулированный сорбционный материал (ГРСМ), разработанный на основе карбонатного шлама ХВО Казанской теплоэлектростанции-1 (КТЭЦ-1), модельная газовая среда с концентрацией $0...5500 \text{ мг/м}^3$. Использована модельная лабораторная установка, включающая реакционную колонку с неподвижным слоем ГРСМ. Применены рекомендованные в ведомственно-экологическом контроле методы фотометрического, фотоколориметрического, йодометрического анализа. Для определения удельной поверхности гранул ГРСМ использовался порометр «Сорби-М».

Результаты и их обсуждение

На промышленных предприятиях идет разработка методов снижения выбросов вредных веществ с помощью использования отходов производства. Таким отходом производства является карбонатный шлам ХВО КТЭЦ-1.

Шлам ХВО – природная сырая и устойчивая смесь определенного химического состава, которая зависит от химического состава сырой воды. Химический состав шлама ХВО КТЭЦ-1 следующий: кальцит CaCO_3 – 72 %, брусит $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – 9 %, портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 1 %, кварц SiO_2 – 0,5 %, остальные прочие вещества – 17,5 %. Шлам ХВО КТЭЦ-1 имеет следующие технические характеристики: насыпная плотность – 560 кг/м^3 ; суммарный объем пор – 0,375 $\text{см}^3/\text{г}$; радиус рабочей фракции 0,05...1,40 мм; влажность шлама – 3 %, зольность – 89 % [4]; содержание органического углерода – 11 %, гуминовых веществ – 12 %. Количество последних определено от общей массы образца, которое выявлено методом газовой хромато-масс-спектрографии [6, 7]. Именно значительная удельная поверхность шлама, наличие на ней большого числа активных центров обуславливают его сорбционные свойства.

В технологиях очистки газовых выбросов промышленных предприятий применяют адсорберы с зернистой загрузкой. Поэтому для уменьшения гидравлического сопротивления в слое, через который пропускаются газовые выбросы, адсорбенты изготавливают в виде гранул. В работе предлагается модифицировать отход энергетики – шлам ХВО в гранулы. Для получения гранул мелкодисперсный шлам с размером частиц 0,01...0,09 мм смешивается с жидким натриевым стеклом при массовом и объемном соотношении 2 : 1 соответственно, подобранным экспериментальным путем [8, 9]. При меньшем соотношении происходит неполное пропитывание шлама жидким натриевым стеклом, адсорбционная емкость падает, и при последующем обжиге гранулы осыпаются. При большем соотношении адсорбционная емкость увеличивается незначительно, и происходит перерасход связующего. Далее смесь доводится до однородной массы окатыванием. Полученные гранулы выдерживаются в муфельной печи в течение 3 часов [10, 11]. Температура обработки варьируется в пределах 100...450 °С с шагом 50 °С. Охлаждение проводится до комнатной температуры в эксикаторе. Новый сорбционный материал получил название гранулированный сорбционный материал и аббревиатуру ГРСМ. Гранулы имеют размер 1...3,5 мм, характеризуются прочностью на истирание – 78 %, средней гидрофильностью.

Для исследования сорбционных свойств ГРСМ в газовой среде, приближенной по составу к выходящим газам, использовалась созданная на кафедре «Технология воды и топлива» ФГБОУ ВО «Казанского государственного энергетического университета» модельная установка с неподвижным слоем ГРСМ (рис. 1).

Реакционная колонка изготовлена из нержавеющей стали, что обеспечивает ее стойкость к агрессивным средам. Подвод и отвод газовой смеси осуществлялись соответственно с помощью штуцеров 13, 3. Подводящий штуцер 13 с помощью резьбового соединения объединен с распылителем 10, что обеспечивает равномерное распределение газов по слою ГРСМ 8, размещенного на сетке 9. Сетка 9 над слоем ГРСМ препятствует выносу частиц. Для нагрева колонки использовался термостат с электронагревателем 6. Температура газовой среды составляла 50 °С, которая контролировалась термопарой типа хромель-капель.

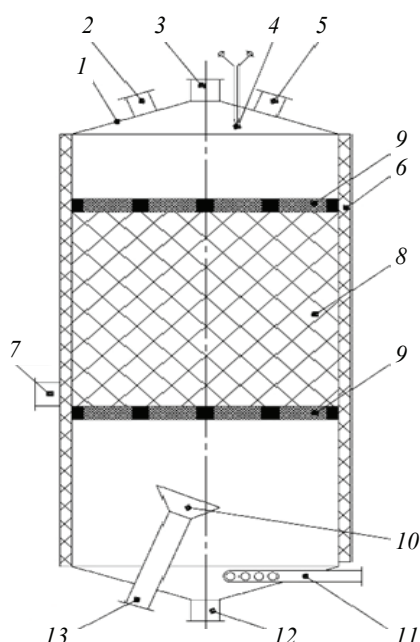
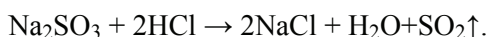


Рис. 1. Реакционная колонна с неподвижным слоем ГPCM:

1 – корпус; 2, 3 – штуцеры отвода адсорбтива и очищенного газа соответственно; 4 – термомпара; 5, 7 – люки для загрузки и выгрузки адсорбента соответственно; 6 – электронагреватель; 8 – слой ГPCM; 9 – стальная сетка с отверстиями диаметром не более 1 мм; 10 – распылитель; 11, 13 – штуцеры подвода пара и газовой смеси соответственно; 12 – патрубок отвода конденсата

Газовая среда в течение экспериментов имела следующий состав: O_2 – 4 – 5,7 %; N_2 – 75 – 78 %; H_2O – 3 %. Оставшуюся часть объема газовой смеси составлял CO_2 . При сорбции диоксида серы, концентрация изменялась в диапазоне 0...5500 мг/м³. Расход газов, приведенный к нормальным условиям, составлял 4×10^{-4} м³/с [12]. Диоксид серы получали в лабораторных условиях по реакции



Результаты исследования сорбционных свойств ГPCM по отношению к диоксиду серы показали, что адсорбционная емкость ГPCM реализуется в течение первых минут контакта и по истечению 16 минут достигает 140 мг/г по диоксиду серы. Адсорбционная емкость составляет 14 % по массе. На рисунке 2 представлена кинетическая зависимость изменения сорбционной емкости ГPCM от времени.

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. 3, а. Изотерма адсорбции соответствует изотерме Ленгмюра L-типа. Выпуклая форма изотермы подтверждает эффективную физическую адсорбцию. Изотерму адсорбции лучше всего описывает уравнение Фрейндлиха $A = 2,11C^{0,54}$ ($R_2 > 0,99$) (рис. 3, б).

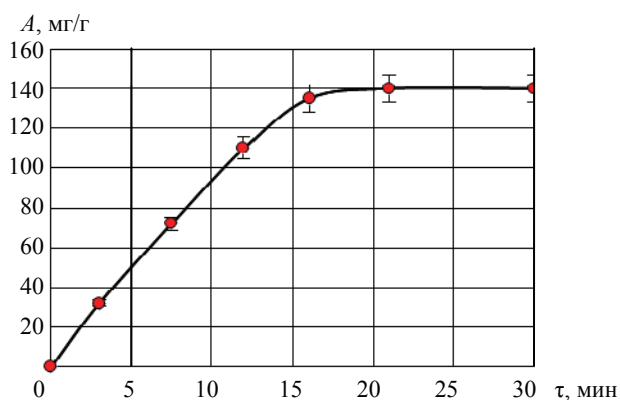


Рис. 2. Кинетическая кривая адсорбции ГPCM диоксида серы

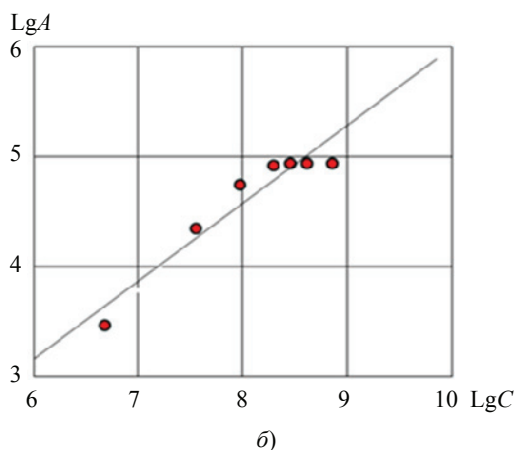
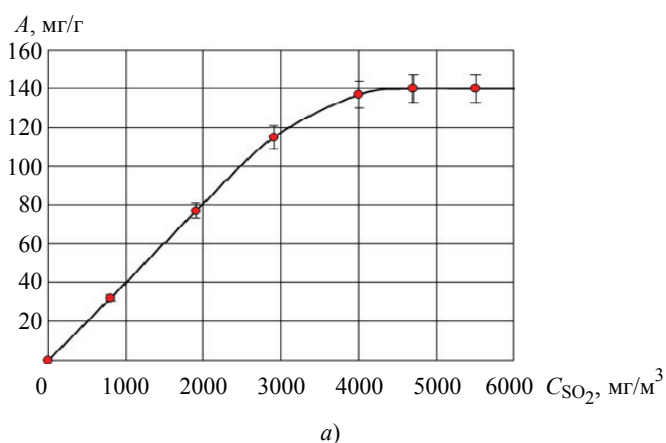


Рис. 3. Изотерма адсорбции SO₂ гранулированным сорбционным материалом (a) и ее вид в логарифмических координатах (б)

Для изучения механизма процесса адсорбции SO₂ ГPCM исследован процесс в статических условиях при разных температурах, К (293, 313, 323, 333). На рисунке 4 показаны соответственно изотермы и изостеры адсорбции по диоксиду серы (при сорбции диоксида серы, концентрация изменялась в диапазоне 0...5500 мг/м³).

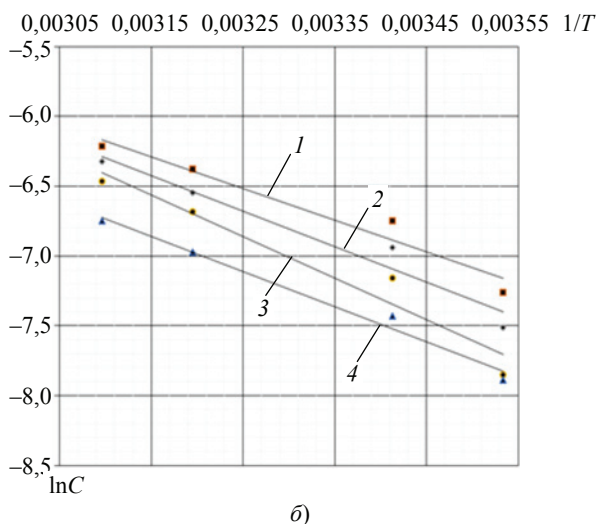
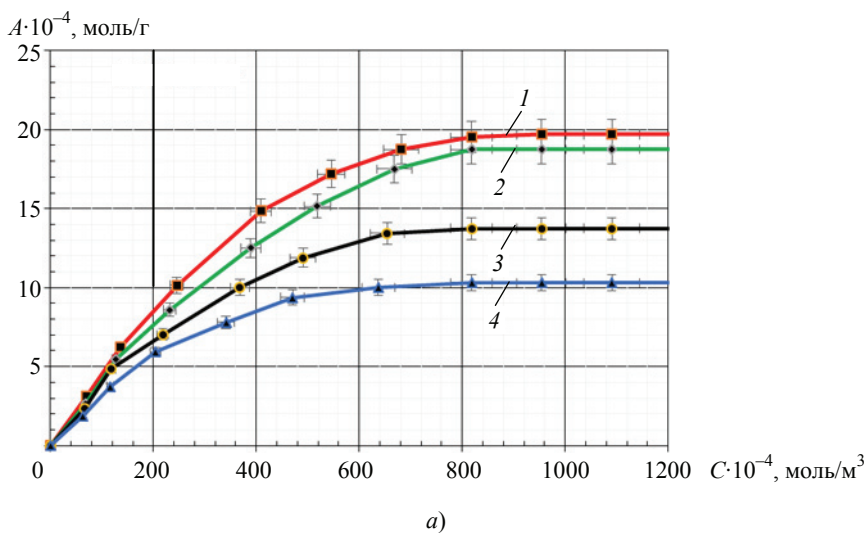


Рис. 4. Изотермы (а) и изостеры (б) адсорбции SO_2 ГPCM при разных температурах, К: 1 – 293; 2 – 313; 3 – 323; 4 – 333

Изостеры показывают взаимосвязь равновесных температур и концентраций при постоянной емкости сорбента. Повышение температуры приводит к уменьшению адсорбционной емкости по SO_2 , что характерно для экзотермического процесса и свидетельствует о физической природе сил. По уравнению Клаузиуса–Клайперона определена дифференциальная теплота адсорбции

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

где C – равновесная концентрация диоксида 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

$$Q = -R \frac{\Delta \ln C}{\Delta(1/T)}. \quad (2)$$

По углам наклона изостер, в соответствии с уравнением (2), рассчитывали дифференциальные теплоты адсорбции диоксида серы гранулами ГРСМ. Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показывает, что с увеличением адсорбции диоксида серы величина дифференциальной теплоты адсорбции увеличивается.

Определена энергия Гиббса процесса адсорбции 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 с повышением температуры изменяются незначительно и подтверждают самопроизвольное протекание адсорбции SO_2 ГРСМ.

Изучена кинетика процесса адсорбции SO_2 ГРСМ. Получены кинетические кривые при разных температурах в зависимости от времени адсорбции t (рис. 5). Для определения констант скорости адсорбции использованы кинетические уравнения.

Таблица 1

**Дифференциальные теплоты адсорбции
растворенного диоксида серы ГРСМ**

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

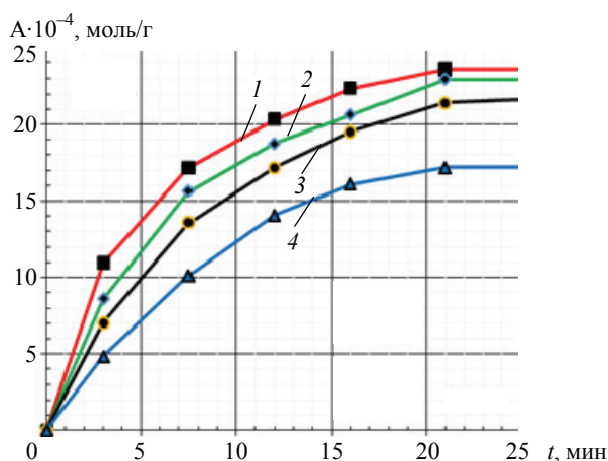


Рис. 5. Кинетические зависимости адсорбции SO_2 ГРСМ при разных температурах, К:
1 – 293; 2 – 313; 3 – 323; 4 – 333

Показано, что с повышением температуры константы скорости адсорбции уменьшаются, что характерно для неактивированной адсорбции:

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

При адсорбции не все молекулы SO_2 могут проникнуть в поры и адсорбироваться, а только те, которые обладают избытком энергии – энергии активации, поэтому при высоких температурах скорость адсорбции увеличивается. Рассчитана энергия активации $E_a = 14,7$ кДж/моль адсорбции по уравнению Аррениуса. Результаты расчета представлены на рис. 6. Значение кажущейся энергии активации свидетельствует о протекании физической адсорбции.

Проведенные исследования позволили получить следующие технологические характеристики модифицированного отхода энергетики ГPCM: адсорбционная емкость по SO_2 – 140 мг/г, суммарный объем пор – 0,450 см³/г, удельная поверхность – 720 м²/кг, прочность на истирание – 78 %. Эффективность очистки газа от SO_2 ГPCM составила 99,9 %.

Гранулированный сорбционный материал имеет высокую пористость, что особенно важно при использовании его адсорбционных свойств в режиме пропускания газа. Низкая стоимость ГPCM на основе шлама ХВО, доступность, возможность регенерации позволяют его использовать для очистки газовых выбросов промышленных предприятий с минимальными затратами и наибольшей эффективностью.

На базе проведенных исследований предложена модернизация существующей технологической схемы очистки газовых выбросов линии производства бисульфита натрия на АО «Химический завод им. Л. Я. Карпова» в г. Менделеевске. Основные источники выбросов диоксида серы на данном заводе следующие: цех по производству гипосульфитных солей, производства сульфитных солей, катализатора дегидрирования легких парафиновых углеводородов и плит из экструдированного пенополистирола.

Технология производства бисульфита натрия $NaHSO_3$ оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду, так как в данном случае выбросы в атмосферу SO_2 составляют порядка 325 т/г. Объем выпускаемой продукции бисульфита натрия составляет около 1750 т/г.

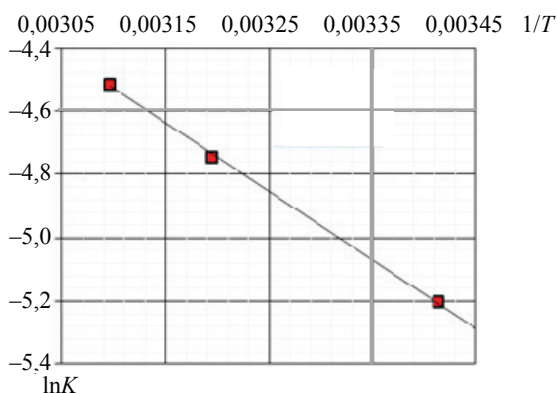


Рис. 6. Графический метод расчета энергии активации процесса адсорбции SO_2 ГPCM

На рисунке 7 представлена действующая технологическая схема производства бисульфита натрия со схемой очистки газовых выбросов от диоксида серы.

Недостатки абсорбционной очистки, такие как образование жидких стоков и громоздкость используемого оборудования, решаются модернизацией технологической схемы очистки газовых выбросов. Для снижения концентрации диоксида серы в газовых выбросах технологической схемы производства бисульфита натрия предлагается брызгоуловитель модернизировать в адсорбер (рис. 8, б), где загружен сорбционный материал – ГРСМ. Брызгоуловитель представляет собой фаолитовый цилиндрический аппарат с патрубками входа и выхода и коническим дном (рис. 8, а),

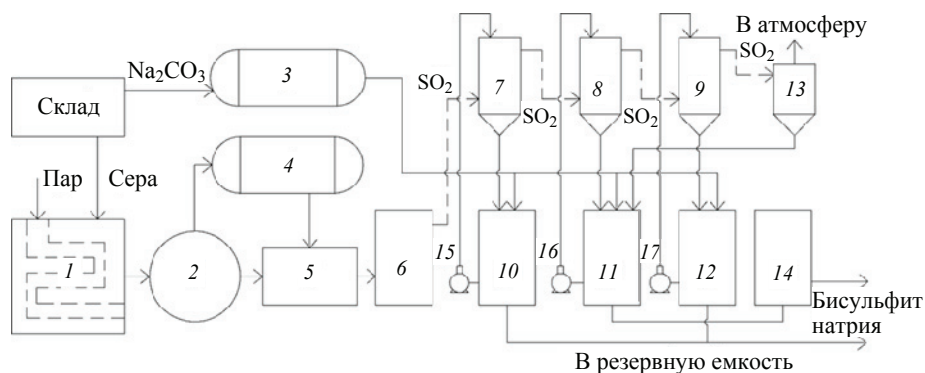


Рис. 7. Технологическая схема процесса производства бисульфита натрия:

1 – плавилка серы; 2 – отстойник; 3, 4 – напорные емкости содового раствора и сернистого газа соответственно; 5 – циклонная печь; 6 – башня охлаждения; 7, 8, 9 – абсорберы I, II, III ступеней соответственно; 10, 11, 12 – циркуляционный, циркуляционный бисульфитный, санитарный сборники соответственно; 13 – брызгоуловитель; 14 – сборник готовой продукции; 15, 16, 17 – центробежные насосы

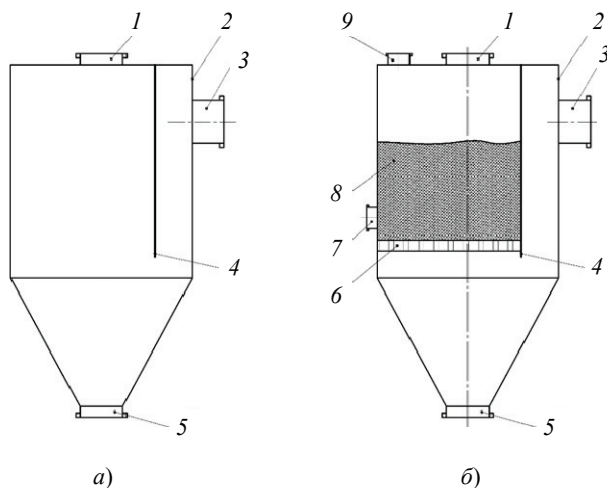


Рис. 8. Фаолитовый брызгоуловитель для производства бисульфита натрия:

а – используемый в настоящее время; б – модернизированный:

1 – штуцер отвода очищенного газа; 2 – фаолитовый корпус; 3 – штуцер подвода газовой смеси; 4 – каплеотбойник; 5 – патрубок отвода конденсата; 6 – стальная сетка с отверстиями диаметром не более 1 мм; 7, 9 – люки для выгрузки и загрузки адсорбента соответственно; 8 – слой ГРСМ

где уносимые брызги раствора отделяются, собираются в корпусе и затем стекают в циркуляционный сборник.

По изотерме диоксида серы рассчитаны оптимальные характеристики адсорбера. Приняты следующие исходные параметры: давление – 4,5 кПа; расход газа на входе – 300 м³/ч; концентрация диоксида серы в газе на входе – 1 %. Рассчитана продолжительность процесса адсорбции и количество ГРСМ на одну загрузку. Характеристики адсорбера представлены в табл. 2.

Непрерывность очистки обеспечивается адсорбером 1 и десорбером 2: в первом происходит адсорбционная очистка газов, во втором – последовательная регенерация ГРСМ, при этом процесс адсорбции совмещают с сушкой и охлаждением поглотителя (рис. 9).

Таблица 2

Характеристики адсорбера

Параметр	Значение
Диаметр, м	0,85
Высота, м	1,7
Удельная поверхность ГРСМ, м ² /кг	720,0
Количество ГРСМ на одну загрузку, кг	47,3
Высота слоя ГРСМ, м	0,91
Продолжительность адсорбции, ч	46,2

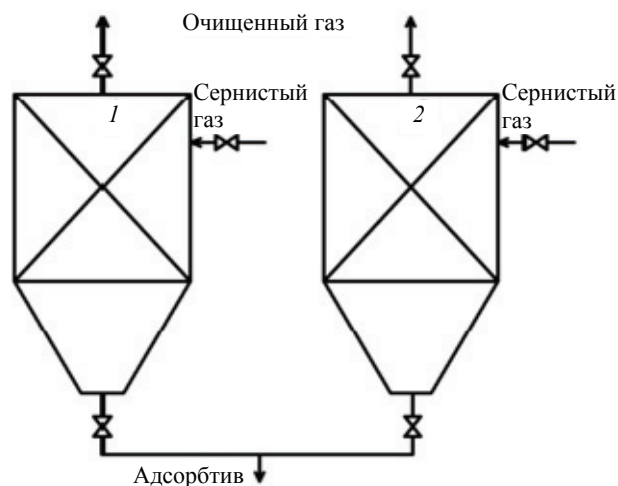


Рис. 9. Схема параллельной работы адсорбера и десорбера

Модернизация схемы очистки отходящих газов позволит довести очистку газовых выбросов от SO₂ до 99,9 % и применить отход производства – карбонатный шлам.

Заключение

Исследован механизм адсорбции диоксида серы модифицированным сорбционным материалом при разных температурах. Изучены кинетические закономерности адсорбционного процесса. Построена изотерма адсорбции, которая соответствует изотерме Ленгмюра L-типа. Выпуклая форма изотермы подтверждает эффективную физическую адсорбцию. Определены свободная энергия Гиббса, дифференциальная теплота и энергия активации адсорбции.

Рассчитаны оптимальные характеристики адсорбера периодического действия с неподвижным слоем ГPCM: диаметр адсорбера, количество ГPCM на одну загрузку, высота слоя ГPCM, продолжительность адсорбции.

Проведены экологический и экономический расчеты модернизации схемы очистки газовых выбросов от диоксида серы методом адсорбции ГPCM на основе карбонатного шлама. Предотвращенный экологический ущерб составит 2,90 тыс. р./год, эффективность очистки газовых выбросов от SO₂ ГPCM – 99,9 %.

Список литературы

1. Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции : учеб. для вузов / В. Я. Рыжкин ; под ред. В. Я. Гиршфельда. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
2. Альтшулер, В. С. Высокотемпературная очистка газов от сернистых соединений / В. С. Альтшулер, А. А. Гаврилова. – М. : Наука, 1969. – 151 с.
3. Ветошкин, А. Г. Теоретические основы защиты окружающей среды : учебное пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во ПГАСА, 2002. – 290 с.
4. Nikolaeva, L. A. Purification of Gas Emissions of Chemical Industry Enterprises by Carbonaceous Cutting / L. A. Nikolaeva, A. N. Khusnutdinov // Ecology & Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22, No. 8. – P. 14 – 18.
5. Николаева, Л. А. Решение экологических проблем промышленных предприятий при очистке газовых выбросов гранулированным шламом / Л. А. Николаева, А. Н. Хуснутдинов // Вода: химия и экология. – 2019. – № 1-2 (118). – С. 83 – 89.
6. Nikolaeva, L. A. A Study of the Absorption of Nitrogen Oxides from the Boiler Flue Gases / L. A. Nikolaeva, A. N. Khusnutdinov // Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 65, No. 8. – P. 575 – 579. doi: 10.1134/S0040601518080049
7. МУК 4.1.1062–2001 Хромато-масс-спектрометрическое определение трудноразлетучих органических веществ в почве и отходах производства и потребления : метод. указания. – Введ. 2001-10-01. – М. : Федер. центр Госсанэпиднадзора, 2001. – 10 с.
8. Пат. 117420U1 Российская Федерация. Система очистки сточных вод от нефтепродуктов / Л. А. Николаева, Е. Н. Бородай ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». – № 2012100491/05U ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 3.
9. Семакина, О. К. Выбор способа гранулирования адсорбентов из отходов производства / О. К. Семакина, Ю. С. Якушева, А. А. Шевченко // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-3. – С. 720 – 725.
10. Влияние термической обработки на сорбционные и каталитические свойства шунгитовых пород / И. О. Крылов, И. Г. Луговская, В. В. Коровушкин, Д. Б. Макеев // Экология и промышленность России. – 2008. – № 10. – С. 24 – 27.

11. Терехова, М. В. Исследование адсорбционных закономерностей анионов на поверхности красного шлама / М. В. Терехова, С. М. Русакова // Изв. Московского гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 1, № 3 (17). – С. 147 – 151.

12. Nikolaeva, L. A. Research of Sorption Processes using Chemical Water Purification Sludge for Nitrogen and Sulfur Oxides Contained in Smoke Gases Emitted from a Thermal Power Station / L. A. Nikolaeva // Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 60, No. 4. – P. 244 – 247.

References

1. Ryzhkin V.Ya., Girshfel'da V.Ya [Ed.]. *Teplovyye elektricheskiye stantsii: uchebnyk dlya vuzov* [Thermal power plants: a textbook for high schools], Moscow: Energoatomizdat, 1987, 328 p. (In Russ.)

2. Al'tshuler V.S., Gavrilova A.A. *Vysokotemperaturnaya ochistka gazov ot sernistykh soyedineniy* [High-temperature purification of gases from sulfur compounds], Moscow: Nauka, 1969, 151 p. (In Russ.)

3. Vetoshkin A.G. *Teoreticheskiye osnovy zashchity okruzhayushchey sredy: uchebnoye posobiye* [Theoretical foundations of environmental protection: a training manual], Penza: Izdatel'stvo PGASA, 2002, 290 p. (In Russ.)

4. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. Purification of Gas Emissions of Chemical Industry Enterprises by Carbonaceous Cutting, *Ecology & Industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 14-18.

5. Nikolayeva L.A., Khusnutdinov A.N. [Solving the environmental problems of industrial enterprises when cleaning gas emissions with granular sludge], *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology], 2019, no. 1-2 (118), pp. 83-89. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. A Study of the Absorption of Nitrogen Oxides from the Boiler Flue Gases, *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, no. 8, pp. 575-579, doi: 10.1134/S0040601518080049

7. MUK 4.1.1062–2001 *Khromato-mass-spektrometricheskoye opredeleniye trudnole-tuchikh organicheskikh veshchestv v pochve i otkhodakh proizvodstva i potrebleniya: metodicheskkiye ukazaniya* [MUK 4.1.1062–2001 Chromatography-mass spectrometric determination of hard-volatile organic substances in soil and production and consumption wastes: guidelines], Moscow: Federal'nyy tsentr Gossanepidnadzora, 2001, 10 p. (In Russ.)

8. Nikolayeva L.A., Boroday Ye.N. *Sistema ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov* [A system for treating wastewater from oil products], Russian Federation, 2012, Pat. 117420U1. (In Russ.)

9. Semakina O.K., Yakusheva Yu.S., Shevchenko A.A. [Choice of a method for granulating adsorbents from industrial wastes], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Basic research], 2013, no. 8-3, pp. 720-725. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Krylov I.O., Lugovskaya I.G., Korovushkin V.V., Makeyev D.B. [The effect of heat treatment on the sorption and catalytic properties of schungite rocks], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 10, pp. 24-27. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Terekhova M.V., Rusakova S.M. [Research on the adsorption patterns of anions on the surface of red mud], *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State Technical University], 2013, vol. 1, no. 3 (17), pp. 147-151. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Nikolaeva L.A. Research of Sorption Processes using Chemical Water Purification Sludge for Nitrogen and Sulfur Oxides Contained in Smoke Gases Emitted from a Thermal Power Station, *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no. 4, pp. 244-247.

Investigation of the Mechanism of Sulfur Dioxide Adsorption from Gas Emissions of Sodium Bisulfite Production

L. A. Nikolaeva, E. M. Khusnutdinova

*Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia*

Keywords: batch adsorber; granular sorption material; sulfur dioxide; carbonate sludge; adsorption mechanism; modification.

Abstract: It is proposed to purify industrial gas emissions from sulfur dioxide by the adsorption method. Waste from the power industry - sludge from the chemical water treatment of Kazan CHPP-1 - was used as an adsorption material. Its chemical composition is presented. Experimental studies of a new sorption material based on energy waste for gas purification from sulfur dioxide have been carried out. The kinetic dependence and isotherm of the adsorption process are obtained. The mechanism of the process of adsorption of sulfur dioxide by sorption material at different temperatures has been studied. The Gibbs free energy, differential heat, and activation energy of adsorption are determined. The economic and environmental impact of modernization of procedure for cleaning gas emissions from sulfur dioxide in sodium bisulfite production at JSC "Chemical factory named after L.Ya. Karpov" was measured.

© Л. А. Николаева, Э. М. Хуснутдинова, 2020