

УДК 661.333.504.5

Зинченко М.Г., к.техн.н., профессор, Пономаренко Е.Д., доцент, Горбунов К.А.,
к.техн.н., профессор, Горбунова О.А., старший преподаватель

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ ОТ СУЛЬФИДА ВОДОРОДА

Ключевые слова: кальцинированная сода, сульфид водорода, адсорбенты, удельная адсорбционная емкость

Вступление. Заводы, производящие кальцинированную соду аммиачным способом, сбрасывают относительно небольшие объемы вредных газов, среди которых особую опасность представляют оксид углерода и сульфид водорода. Валовые количества этих компонентов небольшие, но из-за расположения содовых заводов в регионах, пересыщенных химическими предприятиями, и значительного фонового загрязнения концентрации, в частности, сульфида водорода в селитебной зоне и на границах санитарных зон заводов оказываются выше нормы ПДК. Расчеты нормативов предельно допустимых выбросов показывают, что концентрация сероводорода в газовых выбросах должна быть снижена со 150–500 до 50–80 мг/м³. В случае необходимости каталитического дожигания оксида углерода концентрация H₂S должна быть еще ниже – менее 0,2 мг/м³ [1]. Как показывает анализ литературных источников, для столь тонкой очистки может быть рекомендован метод адсорбции.

Анализ состояния проблемы, последних достижений и публикаций

Процессы очистки газов от сульфида водорода основаны на высокой избирательности адсорбции этого компонента технологического газа промышленными адсорбентами.

При выборе метода очистки от сульфида водорода нужно иметь в виду присутствие в газах содового производства другого «кислого» компонента – диоксида углерода, удаление которого с технико-экономической точки зрения нецелесообразно. В этой связи поглотитель сульфида водорода должен обладать высокой избирательностью сорбции целевого компонента (H₂S) в присутствии диоксида углерода.

Сульфид водорода, уловленный из газов, в зависимости от метода очистки выделяется в виде элементарной серы или концентрированного газа, который каталитически перерабатывают в серную кислоту и элементарную серу. С экономической точки зрения более целесообразна переработка H₂S в элементарную серу, которая является дефицитным продуктом [2].

В качестве адсорбентов для улавливания сульфида водорода используется широкий спектр пористых минеральных поглотителей. Наиболее распространенными в промышленной практике являются активированные угли, цеолиты, модифицированные силикагели; широкое применение находят хемосорбенты [2, 3].

Очистка цеолитами. Цеолиты NaA, CaA являются эффективными сорбентами, отличающимися высокой адсорбционной способностью и селективностью по отношению к сульфиду водорода. Процесс можно проводить в присутствии CO₂, который хоть

и сорбируется вместе с сульфидом водорода, но значительно легче десорбируется. На начальной стадии очистки из загрязненного газа извлекаются как сульфид водорода, так и CO_2 . Затем сульфид водорода вытесняет из сорбента диоксид углерода, и содержание последнего в выходящем из адсорбера газе начинает возрастать. В то же время сульфид водорода продолжает количественно поглощаться вплоть до момента проскока.

Наилучшими адсорбционными и эксплуатационными свойствами обладают цеолиты типа CaA [3, 4]. Цеолиты типа NaA отличаются низкой скоростью поглощения и десорбции сернистых соединений. Цеолит NaX катализирует реакцию окисления сульфида водорода с образованием элементарной серы, дезактивирующей адсорбент, однако это свойство не исключает возможность его применения для сероочистки газов.

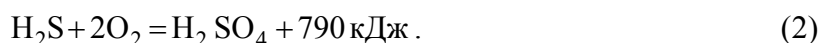
Цеолиты применяют для тонкой очистки газа при исходной концентрации H_2S 2–0,2 г/м³, при этом остаточная его концентрация не превышает 0,2 мг/м³. Цеолиты намного дороже всех остальных адсорбентов, поэтому обязательна их регенерация. Ее можно осуществлять потоком инертного газа или очищенным газом при 300–500° С; предложена также регенерация паром [5].

Очистка газов активным углем состоит в адсорбции сульфида водорода на поверхности угля и последующем окислении H_2S кислородом воздуха до элементарной серы. Активный уголь одновременно является адсорбентом и катализатором окисления поглощенного сульфида водорода в адсорбированной фазе [6]. При этом адсорбционно-каталитические свойства углей используют, чтобы не только очистить газ, но и получить товарный продукт – серу:



Каталитические свойства сорбента усиливают путем нанесения на его поверхность других веществ – катализаторов окисления сульфида водорода например, йода. При этом степень извлечения сульфида водорода может достигать 99,5 %. Наиболее эффективен для очистки газа от сульфида водорода специально разработанный рекуперационный активный уголь марки AP-B. Образующаяся на поверхности и в объеме пор сорбента элементарная сера снижает его активность, поэтому периодически проводят регенерацию угля. Для этого серу вымывают из сорбента специальным растворителем. Далее промытый уголь очищают от растворителя, сушат. При этом возникает проблема рекуперации растворителя, а также проблема очистки газовых выбросов от паров растворителя. Однако при очистке газов с малым (до 1 г/м³) содержанием сульфида водорода целесообразно отказаться от экстракции серы из угля. [6, 7].

Трудность использования активного угля для решения задачи сероочистки заключается в том, что при улавливании сульфида водорода углем в присутствии кислорода основная реакция преобразования адсорбата в элементарную серу сопровождается побочным сильно экзотермическим процессом образования серной кислоты:



При этом возникает опасность возгорания угля. Образовавшуюся серную кислоту нейтрализуют газообразным аммиаком.

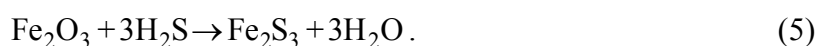
Для регенерации насыщенного серой угля обычно применяют водный раствор сульфида аммония, который при взаимодействии с серой превращается в многосернистый аммоний:



Отработанный раствор разлагают острым паром с выделением серы чистотой 99,9 %:



Очистка поглотителями на основе оксидов железа. Сульфид водорода в этом процессе поглощается оксидом железа (Fe_2O_3), нанесенным на деревянную стружку. Оксид железа реагирует с сульфидом водорода, образуя сульфид железа



Регенерация поглотителя осуществляется продувкой воздухом. Сульфид железа окисляется до Fe_2O_3 ; при этом образуется сера, которая откладывается на поверхности адсорбента:



Обычно регенерацию проводят периодически, продувая слой поглотителя потоком воздуха. Каждая загрузка поглотителя может быть регенерирована несколько раз, но после каждой регенерации очистка газа от сульфида водорода ухудшается и в конце концов возникает необходимость в замене слоя новым поглотителем [7]. Установка, состоящая из двух колонн (диаметр 0,4 м, высота 1,5 м), обеспечивает непрерывную очистку $60 \text{ м}^3/\text{сутки}$ газа. Когда в одной колонне идет процесс поглощения H_2S , другая продувается воздухом с целью регенерации адсорбента.

Важным преимуществом метода является простота конструкции и низкое гидравлическое сопротивление аппаратуры для очистки газов. Недостатком является громоздкость оборудования, трудоемкость его обслуживания, значительные капитальные затраты.

Избирательное поглощение сульфида водорода может быть достигнуто с помощью хемосорбентов. Хемосорбционные методы основаны на способности соединений серы, прежде всего H_2S , при высоких температурах вступать в химическое взаимодействие с оксидами многих металлов – кальция, железа, цинка, марганца, титана и других – с образованием сульфидов.

Общими требованиями [8] к хемосорбентам для улавливания H_2S из технологических газов являются:

- высокая сероёмкость, то есть поглощение максимального количества сульфида водорода;
- механическая прочность;
- ограниченная возможность побочных реакций с компонентами технологического газа;
- доступность и дешевизна;
- исключение образования карбонатов за счет CO_2 , содержащегося в газах.

Самыми распространенными хемосорбентами очистки газов от сульфида водорода являются хемосорбенты на основе оксида цинка [2, 7–9].

Реакции ZnO с соединениями серы описываются уравнением:



При 350–400 °С основная реакция поглощения H₂S при отсутствии паров воды и водорода практически необратима. Пары воды являются продуктом реакции, поэтому они оказывают влияние на равновесие этой реакции тем больше, чем выше температура [9].

Высокотемпературные цинкооксидные поглотители на основе ZnO нашли промышленное применение при сероочистке природного газа [8]. Они высокоактивны к H₂S и не взаимодействуют с другими компонентами газа. Однако исходная начальная концентрация H₂S в газе при их использовании невысока (до 150÷200 ppm), поскольку только в этом случае установки с применением ZnO могут работать непрерывно в течение 0,5–4 лет без регенерации. За этот период поглотитель отработает примерно 93 % своей полной сероёмкости; после чего отработанный хемосорбент, содержащий около 25 % масс. серы, утилизируют и заменяют. Объём поглотителя в реакторах определяется транспортабельными габаритами аппаратов и, как правило, не превышает 120 м³. Диапазон применяемых объёмных скоростей газа – от 600 до 2000 ч⁻¹ [10].

Отечественные таблетированные поглотители ГИАП-10 и ГИАП-10-2, выпускаемые ТОВ "Хімтехнологія", эффективны при малых (до 1500 ч⁻¹) объёмных скоростях газа, температуре 350–390 °С и умеренной концентрации сернистых соединений (до 100 мг/м³ при н.у.). Их фактическая сероёмкость составляет 20–24 % по массе, или 0,2÷0,24 г/г. Благодаря большой насыпной плотности каждая загрузка характеризуется продолжительным сроком эксплуатации.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для извлечения сульфида водорода из технологических газов содового производства, имеющих низкую исходную концентрацию H₂S, целесообразно использовать адсорбенты, распространенные в практике промышленной очистки газов (активный уголь, цеолиты, силикагели, хемосорбенты). Определить наиболее эффективный адсорбент для условий содового производства возможно только путем экспериментальных исследований.

Цель работы: выбрать наиболее сероёмкий и относительно дешёвый адсорбент для очистки хвостовых газов содового производства от сульфида водорода. Определить удельную адсорбционную ёмкость выбранного адсорбента – основную расчётную величину, используемую при проектировании адсорберов.

Основная часть работы. В качестве поглотителей исследовались: цеолит марки СаА, силикагели марок КСМГ та ШСМГ, активный уголь марки АР-В, а также окисно-цинковая поглотительная масса ГИАП-10.

Исследования проводились в режиме неподвижного слоя с использованием искусственной газовой смеси, идентичной по концентрации компонентов составу отходящих газов колонн содовых заводов (6 % об. O₂ и 90 мг/м³ H₂S). Температурный режим принимался оптимальным для каждого поглотителя: 350–400 °С для ГИАП-10; 22–25 °С для остальных адсорбентов.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

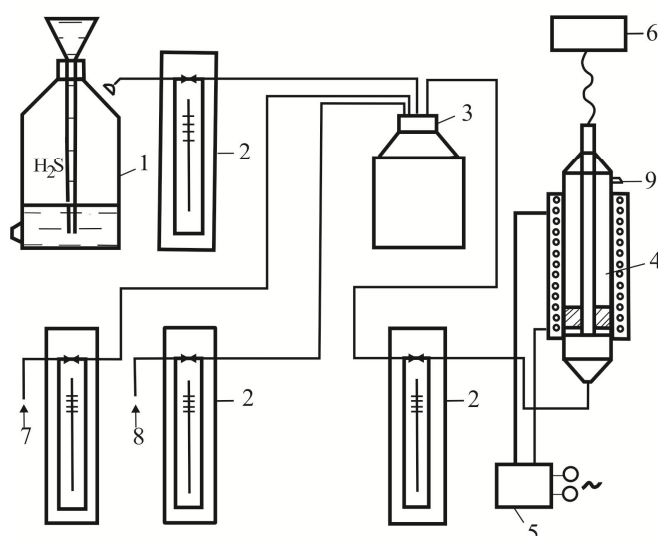


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для дослідження адсорбції сульфіда водорода
 1 – газометр с H₂S; 2 – реометри; 3 – смеситель; 4 – реактор с електрообогревом;
 5 – автотрансформатор; 6 – потенціометр; 7 – воздух;
 8 – азот; 9 – очищенный газ (на анализ)

Сульфид водорода из газометра, азот и воздух через расходомеры направлялись в смеситель 3, далее в стеклянный реактор (4) диаметром 20 мм, высотой 250 мм. Температура в реакторе поддерживалась с помощью электрообогрева и контролировалась хромель – алюмелевой термопарой, опущенной в слой адсорбента. Высота слоя в реакторе в опытах со всеми адсорбентами была 8 см. Скорость газа в расчете на полное сечение реактора составляла 0,05 м/с. Сравнение адсорбентов проводилось по времени от начала подачи газа до появления сульфида водорода на выходе из поглотителя (время защитного действия). В качестве индикатора наличия H₂S использовали полоску бумаги, пропитанную двухпроцентным раствором ацетата свинца, которая начинает темнеть в присутствии следов этого газа.

Из полученных данных (таблица 1) видно, что поглотитель ГИАП-10 резко выделяется среди прочих своей адсорбционной емкостью.

Таблица 1– Результаты определения времени защитного действия адсорбентов

Марка адсорбента	Время защитного действия, мин.	
	Среднее	СКО*
СаА	40	2,3
ШСМГ	48	2,8
КСМГ	20	1,6
АР-В	105	4,7
ГИАП-10	$2,6 \times 10^4$	$1,3 \times 10^3$

* СКО – средне квадратичное отклонение

Дальнейшие эксперименты по выбору оптимальных условий процесса адсорбции сульфида водорода проводились с поглотителем ГИАП-10.

Исследования процесса адсорбции сульфида водорода с поглотителем ГИ-АП-10. Удельная адсорбционная емкость Y выбранного адсорбента определяется как

$$Y = M / V, \quad (8)$$

где M – масса компонента А газовой смеси, V – объем адсорбента.

Известно [2], что масса M компонента А газовой смеси, адсорбированного поглотителем, определяется по формуле

$$M = \int_0^{\tau_n} C \cdot G \cdot d\tau, \quad (9)$$

где τ – время, τ_n – время окончания процесса, C – концентрация компонента в смеси, G – расход смеси.

Примем постоянными C и G . После интегрирования уравнение (9) принимает вид

$$M = C \cdot G \cdot \tau_n \quad (10)$$

Предполагается, что адсорбционная емкость Y и соответственно масса M компонента газовой смеси, является линейной функцией температуры t :

$$Y(t, \beta_0, \beta_1) = \beta_0 + \beta_1 t, \quad (11)$$

где β_0, β_1 — неизвестные параметры.

Для подтверждения этого предположения был поставлен однофакторный эксперимент. Было проведено 5 опытов в диапазоне температур 300–400 °С с тремя параллельными измерениями при температуре 350 °С.

Значение времени τ_n в формулах (9), (10) заранее не было известно. Для его определения необходимо было запустить экспериментальную установку и ждать появления проскока газа H_2S . Однако первый же опыт пришлось прекратить через 36 часов из-за неудачного выбора факторов. С другой стороны, слишком малое время процесса $\tau_n < 20$ минут не позволяет успеть сделать замеры концентрации адсорбтива. Заранее точно установить определенную концентрацию адсорбтива в опыте сложно. Можно лишь приблизительно задать соотношение расходов адсорбтива и инерта, взять пробу и затем произвести анализ концентрации адсорбтива в пробе. Время этого анализа и составляло около 20 мин. Поэтому длительность эксперимента была кратной этому времени.

Для оптимального сокращения длительности опытов была использована «ускоряющая» стратегия. Если концентрацию C периодически увеличивать в процессе эксперимента, то время τ_n должно наступить быстро. В этом случае интегрирование уравнения (9) дает следующую формулу для расчета массы адсорбтива:

$$M = G \cdot \sum_{i=1}^n C_i \cdot (\tau_i - \tau_{i-1}), \quad (12)$$

где τ_{i-1} , τ_i – время начала и конца процесса адсорбции, в котором концентрация компонента C_i постоянна; $\tau_0 = 0$.

Изменение концентрации адсорбтива (C , об %), подаваемого в адсорбционную колонку, во времени (τ , мин) для каждого с 1-го по 5-ый номера опытов представлена на рис. 2. Точки в конце линий соответствуют появлению проскока адсорбента на выходе из реактора. Это позволило сократить время каждого опыта.

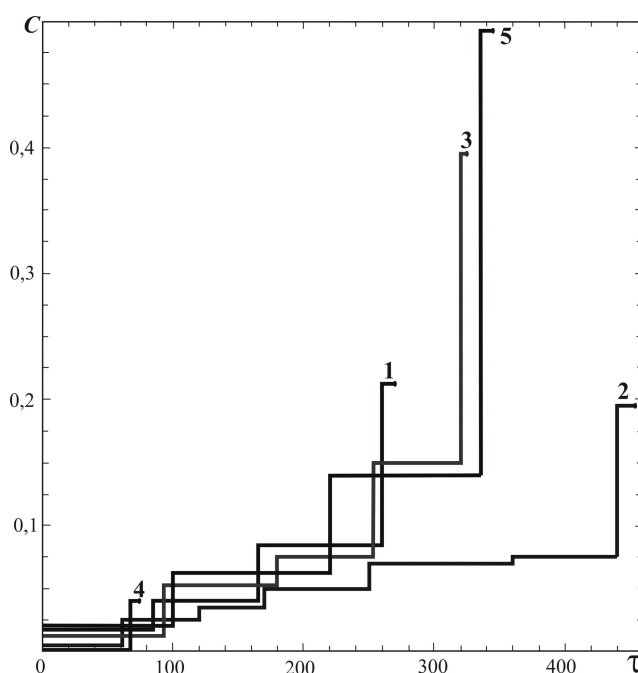


Рисунок 2 – Изменение концентрации адсорбтива (C , об %), подаваемого во времени (τ , мин)

Результаты эксперимента позволили определить значение адсорбционной емкости Y (12) в каждом опыте и представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные зависимости адсорбционной емкости Y , г/см³ от температуры t , °С

$t, ^\circ\text{C}$	x	300	350	350	350	400
$Y, \text{г/см}^3$	y	0,16	0,58	1,125	1,25	3,125

Данные эксперимента (таблица 2), предполагая линейную зависимость адсорбционной емкости Y от температуры (11), аппроксимировали линейной функцией $f(x, \beta_0, \beta_1)$. Это означает, что результаты измерений можно представить в виде зависимости $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$, где β_0, β_1 – неизвестные параметры регрессии, а ε_i – случайные величины, характеризующие погрешности эксперимента. Предполагается [12], что ε_i – независимые нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием $M(\varepsilon_i) = 0$ и одинаковыми дисперсиями $D(\varepsilon_i) = \sigma^2$.

Оценили параметры β_0, β_1 методом наименьших квадратов, так, чтобы сумма квадратов отклонений значений выбранной для аппроксимации функции от результатов эксперимента была минимальной.

Получили точечные оценки коэффициентов регрессии $b_0 = -9,13$ и $b_1 = -0,03$ параметров β_0, β_1 . Это означает, что регрессионная модель подобрана и имеет вид:

$$\hat{y} = -9.13 + 0.03 \cdot x. \quad (13)$$

Далее оценили качество модели, насколько хорошо модель описывает имеющиеся данные. Для этого используют такую численную характеристику модели, как доверительный интервал для параметра β_1 . Необходимо было установить вероятность того, что линейная связь между данными случайной выборки свидетельствует о линейной связи в генеральной совокупности.

Если постулируется одномерная модель первого порядка, значения отклика $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$ являются нормально распределенными случайными величинами с математическим ожиданием $M[y_i] = \beta_0 + \beta_1 x_i$ и дисперсией $D[y_i] = \sigma^2$. Если постулируемая модель является «истинной», то остаточная дисперсия $s_{\text{ост}}^2$ служит оценкой σ^2 . Оценки b_0 и b_1 являются (в случае правильности модели) несмещенными оценками истинных коэффициентов β_0 и β_1 , то есть $M[b_0] = \beta_0, M[b_1] = \beta_1$ [11, 12].

Значение остаточной дисперсии (остаток относительно регрессии) $s_{\text{ост}}^2 = 0,258$ при числе степеней свободы $f_{\text{ост}} = n - 2 = 3$. Применяя $s_{\text{ост}}^2$ в качестве оценки дисперсии $D[y_i] = \sigma^2$ и используя квантили распределения Стьюдента $t(1 - \alpha/2, n - 2) = 3,182$ с уровнем значимости $\alpha = 0,05$, построили доверительный интервал для коэффициента β_1 :

$$\beta_1 = b_1 \pm t(1 - \alpha/2, n - 2) s_{\text{ост}} \sqrt{\frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} = 0.03 \pm 0.023, \quad (14)$$

где $s_{\text{ост}}$ – среднеквадратичное отклонение.

$$\beta_{1,\text{max}} = 0,03 + 0,023 = 0,053, \beta_{1,\text{min}} = 0,03 - 0,023 = 0,007$$

Используя выражение (14), проверили нулевую гипотезу H_0 (отсутствие линейной связи между переменными x и y) с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ о равенстве нулю коэффициента β_1 ($H_0 : \beta_1 = 0$ против $H_1 : \beta_1 \neq 0$). Так как доверительный интервал не включает нуль, то нулевая гипотеза отвергается и, следовательно, регрессия значима. Такой же результат получаем, сравнивая значение выражения $F = s_{(b_1|b_0)}^2 / s_{\text{ост}}^2 = \frac{4,396}{0,258} = 17,068$ с F – распределением Фишера с одной и $n - 2 = 3$ степенями свободы $F_{kr} = 10,128$. Здесь $s_{(b_1|b_0)}^2$ – средний квадрат, обусловленный регресси-

ей с коррекцией на среднее. Расчетное значение F превышает критическое F_{kr} , следовательно отбрасываем гипотезу H_0 с риском ошибиться не более, чем $\alpha \cdot 100\%$.

Оценочное уравнение регрессии $\hat{y} = -9.13 + 0.03 \cdot x$ значимо, так как расчетное значение F -критерия превышает критическое значение ($17,068 > 10,128$). Для коэффициента β_1 получен следующий доверительный интервал: $0,007 < \beta_1 < 0,053$.

Построили с доверительной вероятностью 0,95 интервалы прогноза (доверительный коридор) линии регрессии [13]. В области изменения аргумента выбрали точку x_0 и вычислили прогнозируемое значение отклика по найденному уравнению регрессии $\hat{y}_0 = -9.13 + 0.03 \cdot x_0$. Это точечный прогноз. Определили стандартную ошибку прогноза:

$$\delta_{\hat{y}_0} = \sqrt{s_{\text{ост}}^2 \cdot \left(\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right)}, \quad (15)$$

а также верхнюю и нижнюю границы интервала, накрывающего истинное значение величины \hat{y}_0 с вероятностью $1 - \alpha$.

$$\gamma_{\hat{y}_{0\min}} = \hat{y}_0 - \Delta_{\hat{y}_0}, \quad \gamma_{\hat{y}_{0\max}} = \hat{y}_0 + \Delta_{\hat{y}_0}, \quad (16)$$

где $\Delta_{\hat{y}_0} = t(1 - \alpha / 2, n - 2) \cdot \delta_{\hat{y}_0}$, $t(1 - \alpha / 2, n - 2)$ – квантили распределения Стьюдента для данного уровня значимости α . $\alpha=0,05$.

Прогнозные значения фактора x взяты в диапазоне температур (300 °С–400 °С) с шагом 20 °С. Для каждого прогнозного значения фактора рассчитаны значения $\delta_{\hat{y}}$, $\Delta_{\hat{y}}$, \hat{y} , $\gamma_{\hat{y}_{\min}}$, $\gamma_{\hat{y}_{\max}}$.

Отметим, что все построения имеют физический смысл в области $Y > 0$; при $Y = 0$ находим по формуле (13) $t = 304,3^\circ\text{C}$ – точечную оценку температуры начала процесса адсорбции. Прогнозная оценка значения удельной адсорбционной емкости адсорбента Y , г/см³ при этой температуре с доверительной вероятностью 95 % попадает в доверительный коридор $0 < \hat{y}(304,3^\circ\text{C}) < 1,159 \text{ г/см}^3$, а при $t = 380^\circ\text{C}$ прогнозная оценка значения удельной адсорбционной емкости адсорбента попадает в доверительный коридор $1,142 \text{ г/см}^3 < (\hat{y}(380^\circ\text{C}) = 2,137) < 3,133 \text{ г/см}^3$.

На рисунке 3 приведены графические результаты статистической обработки экспериментальных данных: экспериментальные значения; прогнозируемые значения по уравнению регрессии (13), верхняя и нижняя границы 95 %-ного доверительного коридора.

Выводы. Проведены исследования по выбору наиболее сероёмкого и относительно дешевого адсорбента для очистки хвостовых газов содового производства от сульфида водорода. Исследовались поглотители: цеолит марки СаА, силикагели марок КСМГ та ШСМГ, активный уголь марки АР-В, а также окисно-цинковая поглотительная масса ГИАП-10. Сравнение адсорбентов производилось по времени защитного действия. Наилучший результат достигнут при применении хемосорбента ГИАП-10, кото-

рий был использован в дальнейших исследованиях по определению адсорбционной емкости поглотителя. Получена математическая модель зависимости удельной адсорбционной емкости от температуры $\hat{Y} = -9.13 + 0.03 \cdot t$. Проведен статистический анализ полученного уравнения регрессии. Показано, что уравнение регрессии значимо, построены верхняя и нижняя границы 95 %-ного доверительного коридора. Полученные данные позволяют оценить количество и объем адсорберов, массу разовой загрузки адсорберов и расход адсорбента.

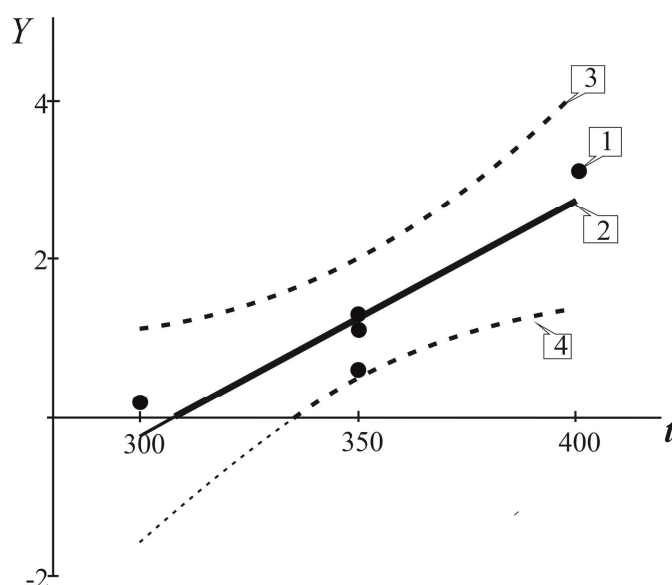


Рисунок 3 – Зависимость удельной адсорбционной емкости Y , г/см³ от температуры t , °C:
 1 – экспериментальные значения, 2 – прогнозируемые значения по уравнению регрессии; 3 – верхняя и 4 – нижняя границы 95 %-ного доверительного коридора

Литература

1. Зінченко М.Г. Вибір адсорбенту для очистки скидних газів содового виробництва від сірководню / М.Г.Зінченко, М.А.Цейтлін //5-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» Збірник матеріалів. 26–29 вересня 2018 Львів, видавництво Львівської політехніки, с.103
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
3. Xie W. Research progress of removal of H₂S from coal gas by dry method /W. Xie, L. Chang, J. Yu, K. Xie // Journal of Chemical Industrial and Engineering (China). – 2006. – Vol. 57. – Iss. 9. – P. 2012–2020.
4. Hartmann, V.L. Gas-solid reaction modeling as applied to the finedesulfurisation of gaseous feedstocks / V.L Hartmann // Chemical Engineering Journal.– 2007. – Vol. 134. – Iss. 1-3. – P. 190–194
5. Zhoy, L. Feasibility study on pressure swing sorption for removing H₂S from natural gas / L. Zhoy, M. Yu, L.M. Zhong, Y.P. Zhou // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59. – Iss. 12. – P. 2401–2406.

6. Сафин Р.Р. Утилизация сероводорода с получением различных серосодержащих соединений / Р.Р. Сафин // Экология промышленного производства. – 2004. – № 1. – С. 59–62.
7. Очистка технологических газов [Текст] / [Семенова Т.А., Лейтес И.Л., Аксельрод Ю.В. и др.] ; Под ред. Семеновой Т.А. и Лейтеса И.Л.– М: Химия, 1977.– 488 с.
8. Лазарев, В.И. Хемосорбционные методы очистки газов от сероводорода и сероорганических соединений / В.И. Лазарев. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1986. – (Промышленная и санитарная очистка газов : обзорная информация). – 44 с.
9. Атрощенко, В.И. Курс технологии связанного азота / В.И. Атрощенко, А.М. Алексеев, А.П. Засорин . – 2-е изд. – Киев: Наукова думка, 1969. –384 с.
10. Справочник азотчика. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1986. – 512 с.
11. Цейтлин Н.А. Проверка гипотез методом доверительных интервалов. / Н.А. Цейтлин // В кн.: Методы математической статистики в основной химии, Труды НИО-ХИМа Харьков 1981 г.
12. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Комп'ютерне моделювання у хімічній технології / Л.Л.Товажнянський, Т.Г.Бабак., О.О.Голубкіна та ін. –Х.: НТУ «ХПІ», 2011.– 606 с.
13. Колемаев В.А. Теория вероятностей и математическая статистика/ Колемаев В.А., Калинина В.Н.– М.: 1997. – 302 с. – (Серия «Высшее образование»)

Bibliography (transliteration)

1. Zinchenko M.H., Tseytlin M.A. Vybir adsorbentu dlya ochystky skydnykh haziv sodovoho vyrobnytstva vid sirkovodnyu // 5-y mizhnarodnyy konhress «Zakhyst navkolyshn'oho seredovyshcha. Enerhooshchadnist'. Zbalansovane pryrodokorystuvannya» Zbirnyk materialiv. 26–29 veresnya 2018 [5th international congress "Environmental protection. Energy saving. Balanced Natural Resources» Compilation of materials. September 26-29, 2018] L'viv, L'vivs'ka politekhnik, Publ., p.103
2. Kel'tsev N.V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki – 2-ye izd., pererab. i dop., Moscow, Khimiya Publ., 1984, 592 p.
3. Xie W. Research progress of removal of H₂S from coal gas by dry method /W. Xie, L. Chang, J. Yu, K. Xie // Journal of Chemical Industrial and Engineering (China). – 2006. – Vol. 57. – Iss. 9. – P. 2012–2020.
4. Hartmann, V.L. Gas-solid reaction modeling as applied to the finedesulfurisation of gaseous feedstocks / V.L Hartmann // Chemical Engineering Journal.– 2007. – Vol. 134. – Iss. 1-3. – P. 190–194
5. Zhoy, L. Feasibility study on pressure swing sorption for removing H₂S from natural gas / L. Zhoy, M. Yu, L.M. Zhong, Y.P. Zhou // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59. – Iss. 12. – P. 2401–2406.
6. Safin R.R. Utilizatsiya serovodoroda s polucheniym razlichnykh serosoderzhashchikh soyedineniy // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva, 2004, № 1.pp 59–62.
7. Semenova T.A., Leytes I.L., Aksel'rod YU.V., Markina M.I., Sergeyev S.P., Khar'kovskaya Ye.N. Ochistka tekhnologicheskikh gazov // Pod red. Semenovoy T.A. i Leytesa I.L., Moscow, Khimiya Publ., 1977, 488 p.
8. Lazarev V.I. Khemosorbtsionnyye metody ochistki gazov ot serovodoroda i seroorganicheskikh soyedineniy // Moscow, TSINTIkhimneftemash, Publ., 1986. – (Promyshlennaya i sanitarnaya ochistka gazov : obzornaya informatsiya), 44 p.

9. Atroshchenko V.I., Alekseyev A.M., Zasorin A.P. Kurs tekhnologii svyazannogo azota – 2-ye izd, Kiyev, : Naukova dumka, Publ., 1969, 384 p.

10. Spravochnik azotchika – 2-ye izd., pererab., Moscow, Khimiya Publ., 1986, 512 p

11. TSeytlin N.A. Proverka gipotez metodom doveritelnyih intervalov. // V kn.: Metodyi matematicheskoy statistiki v osnovnoy himii, Trudy NIOHIMa Harkov 1981.

12. Tovazhnyansky L.L, Babak T.H, Holubkina O.O., Ponomarenko E.D., Sataryn A.V. Komp'yuterne modelyuvannya u khimichniy tekhnolohiyi // Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2011, 606 p.

13. Kolemaev V.A. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika/ Kolemaev V.A., Kalinina V.N.– M.: 1997. – 302 p. – (Seriya «Vyisshee obrazovanie»)

УДК 661.333.504.5

Зінченко М.Г., Пономаренко Є.Д., Горбунов К.О., Горбунова О.В.

ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ ВІД СУЛЬФІДУ ВОДНЮ

Проведено дослідження щодо вибору адсорбенту для очищення газових викидів содового виробництва від сульфідів водню. Серед випробуваних адсорбентів найкращими адсорбційними характеристиками відрізняється окисно - цинкова поглинальна маса ГІАП-10. Для цього поглинача експериментально отримана математична модель залежності питомої адсорбційної ємності від температури, визначена максимальна сіркоємність. Отримані дані використані профільною організацією при проектуванні і розрахунку адсорберів для установок очистки викидних газів содового виробництва від сульфідів водню і оксиду вуглецю.

Zinchenko M.G., Ponomarenko E.D., Gorbunov K.O., Gorbunova O.V.

CLEANING OF GAS EMISSIONS OF PRODUCTION OF CALCINATED SODA FROM HYDROGEN SULFIDE

Studies have been conducted on the choice of an adsorbent for the purification of flue gases from soda production from hydrogen sulphide. Among the tested adsorbents, the best adsorption characteristics are the zinc oxide absorption mass GIAP-10. For this absorber, a mathematical model of the dependence of the specific adsorption capacitance on temperature was experimentally obtained, and the maximum sulfur content was determined. The data obtained were used by a specialized organization in the design and calculation of adsorbers for installations for purifying soda gas off-gases from hydrogen sulfide and carbon monoxide.