

Исследование адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарности

© 2024. Ф. В. Юсубов¹, д. т. н., профессор,

И. А. Алиев¹, к. т. н., доцент,

С. Н. Гулиева², к. т. н., доцент,

¹Азербайджанский технический университет,

AZ1073, Азербайджан, г. Баку, проспект Г. Джавида, д. 25,

²Азербайджанский государственный университет

нефти и промышленности,

AZ1010, Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, д. 20,

e-mail: yusfax@mail.ru

Исследовано влияние начальной концентрации, скорости и температуры адсорбтива на адсорбционное разделение газовых смесей (CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2S). В качестве модельной использовалась смесь газов с объёмной концентрацией компонентов: N_2 – 5%, H_2S – 5%, CO_2 – 5% и CH_4 – 85%. В качестве адсорбента использовали гранулы клиноптилолита неправильной формы. Получены изотермы адсорбции CO_2 при разных температурах (293, 313 и 323 К), которые свидетельствовали о том, что с увеличением температуры адсорбируемость CO_2 уменьшается. Вид изотерм соответствует Лэнгмюровским. Экспериментально изучены выходные кривые адсорбции газовых смесей в зависимости от скорости потока газа и различных начальных концентраций CO_2 . Исследованы выходные кривые адсорбции компонента CO_2 при различных скоростях потока газа: 20, 50, 80 мл/мин. С уменьшением скорости потока газа равновесное время увеличивается. Получены выходные кривые в зависимости от начальных концентраций CO_2 (5, 10 и 20%). Определено, что с уменьшением начальных концентраций CO_2 , время равновесия тоже увеличивается. Установлено, что компоненты газовых смесей сорбируются в сторону уменьшения: $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 \rightarrow \text{N}_2$. Полученная система уравнений модели, описывающая адсорбционное разделение газовых смесей в неподвижном слое адсорбента, представляет полную математическую модель рассматриваемого процесса в нестационарных условиях. Полученные закономерности процесса адсорбции газовых смесей свидетельствуют о том, что процесс происходит в условиях нестационарности. Предложенные модели оптимального проектирования промышленных адсорберов можно использовать для адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарного их протекания.

Ключевые слова: адсорбция, газовая смесь, нестационарность, математическая модель.

Study of adsorption separation of gas mixtures under non-stationary conditions

© 2024. F. V. Yusubov¹ ORCID: 0000-0002-3496-8947^{*}

I. A. Aliyev¹ ORCID: 0000-0002-2716-9696^{*}

S. N. Guliyeva² ORCID: 0000-0001-5631-6563^{*}

¹Azerbaijan Technical University,

25, G. Javid avenue, Baku, Azerbaijan, AZ1073,

²Azerbaijan State University of oil and industry,

20, Azadliq avenue Baku, Azerbaijan, AZ1010,

e-mail: yusfax@mail.ru

The influence of the initial concentration, rate and temperature of adsorption on the adsorption separation of gas mixtures (CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2S) is investigated. Components: N_2 – 5%, H_2S – 5%, CO_2 – 5% and CH_4 – 85%. And as an adsorbent granule of clinoptilolite of irregular shape were used. Isothermal adsorption of CO_2 was obtained at different temperatures (293, 313, and 323 K). The obtained isotherms of CO_2 adsorption showed that with an increase in temperature, the adsorption of CO_2 decreased. The type of isotherms corresponds to Langmuir. The output curves of gas mixture adsorption depending on the gas flow rate and various main components of CO_2 were also experimentally studied. The output curves of the adsorption of the CO_2 component were studied at various gas flow rates of 20, 50, and 80 mL/min. Equilibrium time increases with a decrease in the gas flow rate. Output curves were also obtained depending on the initial CO_2 concentrations of 5%, 10% and 20%. It was determined that with a decrease in the initial concentration of CO_2 , the equilibrium time also increases. Gas mixture components sorbed downwards: $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 \rightarrow \text{N}_2$. The resulting system

of model equations describing the adsorption separation of gas mixtures in a fixed adsorbent layer represents a complete mathematical model of the process under unsteady conditions. The obtained regularities of the process of adsorption of gas mixtures testify to the fact that the process takes place under non-stationary conditions. The proposed models for the optimal design of industrial absorbers can be used for adsorption separation of gas mixtures in the conditions of their unsteady flow.

Keywords: adsorption, gas mixture, non-stationary, mathematical model.

Защита окружающей среды от загрязнений вредными выбросами промышленности является глобальной проблемой. Известно, что адсорбционные процессы становятся доступными для многих химико-технологических процессов выделения целевых компонентов из смесей, очистки сточных вод и отходящих газов от токсичных веществ, осушки газов и т. д. [1, 2].

В связи с этим особую актуальность приобретает изучение адсорбционных процессов в неподвижном слое адсорбента. Однако остаётся нерешённым целый ряд проблем. В частности, недостаточно исследован процесс газофазной адсорбции с переменными начальными концентрациями, скоростями потока и температурами в неподвижном слое адсорбента [3–5].

Как известно, одним из основных факторов, влияющих на адсорбционное разделение, является природа сырья. Надо отметить, что в промышленных условиях часто используется сырьё из различных месторождений, вследствие чего в нём меняется концентрация, скорость потока и температура адсорбируемых веществ [6].

Цель исследования – математическое моделирование процесса газофазной адсорбции с переменными начальными концентрациями,

скоростями потока и температурами в неподвижном слое адсорбента.

Объекты и методы исследования

Схема экспериментальной установки адсорбции газовых смесей показана на рисунке 1. В качестве модельной газовой смеси использована смесь газов с объёмной концентрацией компонентов: N_2 – 5%, H_2S – 5%, CO_2 – 5% и CH_4 – 85%. Перепад давления в адсорбционном слое поддерживается на уровне 20 кПа.

В качестве адсорбента использовали гранулы клиноптилолита неправильной формы светло-серого или жёлто-серого цвета, с размером пор не более 7,2 нм. Отношение Si/Al для клиноптилолита равно 4,2–5,3.

Характеристика природного клиноптилолита (месторождение Ай-Даг) приведена в таблице.

Газовые смеси в разных соотношениях компонентов CH_4 , H_2S , CO_2 и N_2 пропускали через неподвижный слой клиноптилолита при давлении 0,0–0,35 МПа и температуре 293, 313, 323 К.

В неподвижном слое клиноптилолита происходит адсорбция CH_4 , H_2S , CO_2 и N_2 . На

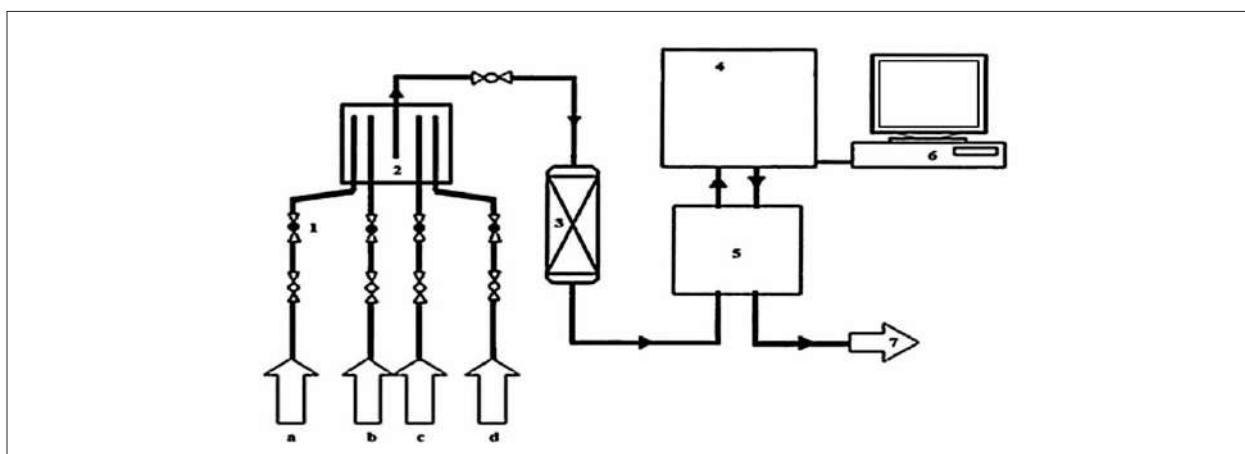


Рис. 1. Схема экспериментальной установки адсорбции газовых смесей: 1 – игольчатый вентиль; 2 – смеситель газов; 3 – адсорбер с неподвижным слоем; 4 – хроматограф (Rubotherm Series IsoSORP SA); 5 – шестигранный клапан; 6 – компьютер; 7 – выход газов (a – H_2S ; b – CO_2 ; c – CH_4 ; d – N_2)

Fig. 1. Scheme of the experimental installation of adsorption of gas mixtures: 1 – needle valve; 2 – gas mixer; 3 – adsorber with a fixed bed; 4 – chromatograph (Rubotherm Series IsoSORP SA); 5 – six-sided valve; 6 – computer; 7 – gas outlet (a – H_2S ; b – CO_2 ; c – H_2S ; d – N_2)

Таблица / Table

Характеристика природного клиноптилолита / Characterization of natural clinoptilolite

| Показатель / Indicator | Клиноптилолит / Clinoptilolite |
|--|--|
| Насыпная плотность, г/см ³ / Bulk density, g/cm ³ | 0,65–0,7 |
| Содержание клиноптилолита: более % Clinoptilolite content: more than % | 76–80 |
| Пористость, % / Porosity, % | 29,4–50 |
| Межзерновая пористость: не менее % Intergranular porosity: not less than % | 40 |
| Водостойкость: не менее % / Water resistance: not less than % | 95 |
| Виброизнос: не более % / Vibration wear: no more than % | 1 |
| Термоустойчивость, °С / Thermal stability, °С | 650 |
| Механическая прочность гранул на раздавливание: не менее кг на гранулу / Mechanical crushing strength of granules: not less than kg per granule | 8 |
| Обменная ёмкость по NH ₄ ⁺ : не менее мг-экв/г Exchange capacity for NH ₄ ⁺ : not less than mg-eq/g | 0,70–2,5 |
| Стандартные фракции: (выход целевой фракции не менее 85%) мм Standard fractions: (target fraction yield not less than 85%) mm | 3–5 |
| Влагоёмкость в статических условиях при относительной влажности воздуха 1,0%: не менее мг/см ³ Moisture capacity under static conditions at relative humidity 1.0%: not less than mg/cm ³ | 60 |
| Внешний вид / Appearance | гранулы неправильной формы irregular granules |
| Цвет / Color | светло-серый, жёлто-серый light gray, yellow gray |
| Размеры полостей, Е / Cavity sizes, E | 4,0–7,2 |

скорость газовой смеси оказывают влияние гидравлическое сопротивление слоя адсорбента, а также другие факторы, связанные с массообменом между газовым потоком и цеолитом. Слой цеолита постепенно насыщается компонентами газовой смеси.

После полного насыщения цеолита адсорбер переключают на режим десорбции. Корреляционная связь между переменными X и Y устанавливается на основе статистических методов анализа. Используются уровни значимости P=0,05.

Коэффициент детерминации полученных кривых составляет R²=0,94–0,99. Коэффициент детерминации для модели с константой принимает значения от 0 до 1. Чем ближе значение коэффициента к 1, тем сильнее зависимость.

При оценке регрессионных моделей это интерпретируется как соответствие модели данным.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов после обработки данных в виде изотерм адсорбции изобра-

жены на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, изотермы адсорбции H₂S, CO₂, CH₄, и N₂ имеют нелинейный характер и отличаются лишь величинами адсорбции.

Эксперименты проводили до получения равновесных величин адсорбции H₂S, CO₂, CH₄, и N₂ природными клиноптилолитами.

Также получены изотермы адсорбции CO₂ при разных температурах: 293, 313 и 323 К (рис. 3).

Полученные изотермы адсорбции CO₂ свидетельствуют о том, что с увеличением температуры величины адсорбируемости уменьшаются (рис. 3). Изотермы адсорбции соответствуют типу изотермы Ленгмюра. Изотермы адсорбции разных компонентов газовых смесей (H₂S, CO₂, CH₄, и N₂) получены при температуре 313 К [7–13]:

$$C = C_m \cdot b \cdot P / (1 + b \cdot P).$$

Экспериментально также изучены выходные кривые адсорбции в зависимости от скорости потока газа при различных концентрациях компонента CO₂. На рисунке 4 показаны выходные кривые адсорбции компонента

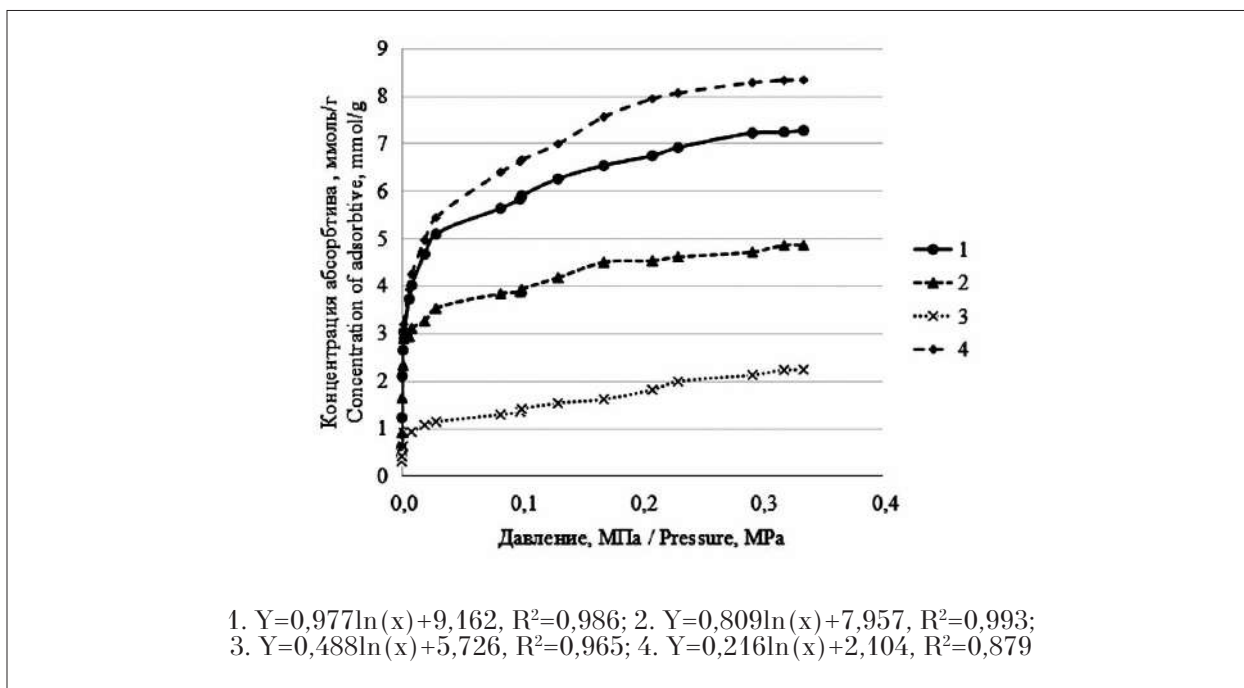


Рис. 2 Изотермы адсорбции для компонентов газовых смесей при 313 К: 1 – H₂S; 2 – CO₂; 3 – CH₄; 4 – N₂
Fig. 2 Adsorption isotherms for components of gas mixtures at 313 K: 1 – H₂S; 2 – CO₂; 3 – CH₄; 4 – N₂

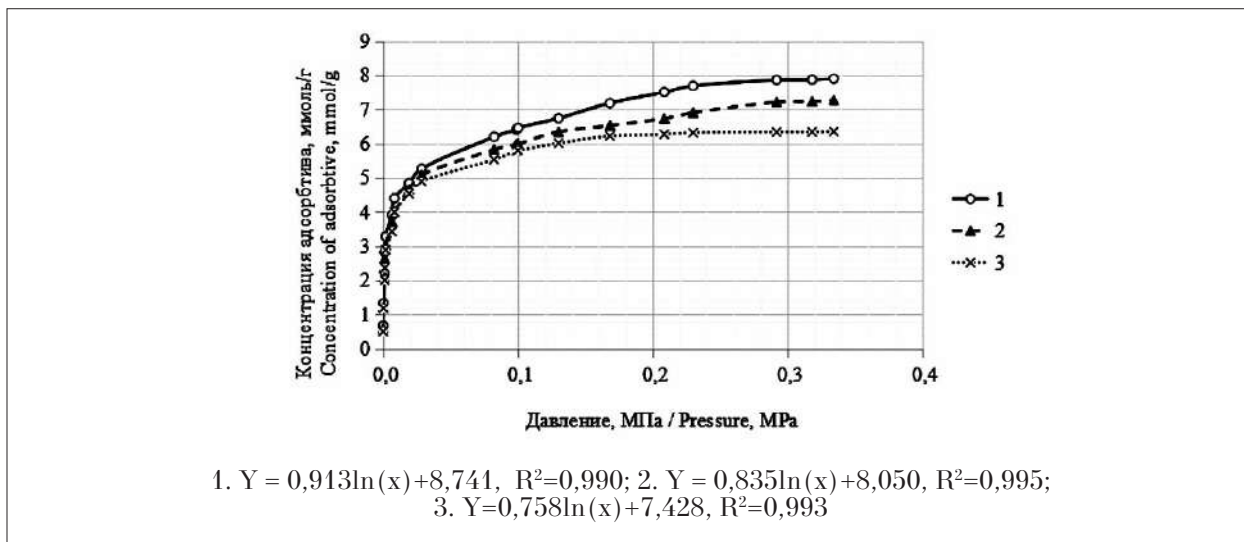


Рис. 3. Изотермы адсорбции CO₂ при температурах: 1 – 293 К; 2 – 313 К; 3 – 323 К
Fig. 3. CO₂ adsorption isotherms at different temperatures: 1 – 293 К; 2 – 313 К; 3 – 323 К

CO₂ при различных скоростях потока газа: 20, 50 и 80 мл/мин.

Как видно из рисунка 4, с увеличением времени адсорбции резко увеличивается безразмерная величина C/C₀ до равновесной величины 1. С уменьшением скорости потока газа равновесное время увеличивается.

На рисунке 5 показаны выходные кривые в зависимости от начальных концентраций CO₂: 5, 10 и 20%.

Как следует из рисунка 5, с уменьшением начальной концентрации CO₂ время равновесия тоже увеличивается. Эти явления вполне соответствуют закономерностям массообменных процессов (газ–твёрдое тело) [14–18].

Из рисунков 4 и 5 видно, что крутизна кривых C/C₀=f(τ) изменяется только в зависимости от скорости газового потока, а от зависимости начальной концентрации CO₂

остаётся почти неизменной. В обоих случаях зависимость от времени контакта изменяется в широких пределах. Это свидетельствует о том, что процесс адсорбции компонентов газовых смесей протекает в условиях нестационарности [19].

Получены соответствующие уравнения зависимости $C/C_0=f(\tau)$ для компонента CO_2 при

различных скоростях потока газа и значениях начальных концентраций, а также изотермы адсорбции при 313 К. Ранее авторами предложено математическое описание процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента, который состоит из уравнений адсорбируемого вещества сплошной фазы и уравнений кинетики [20]. Дифференциальное уравне-

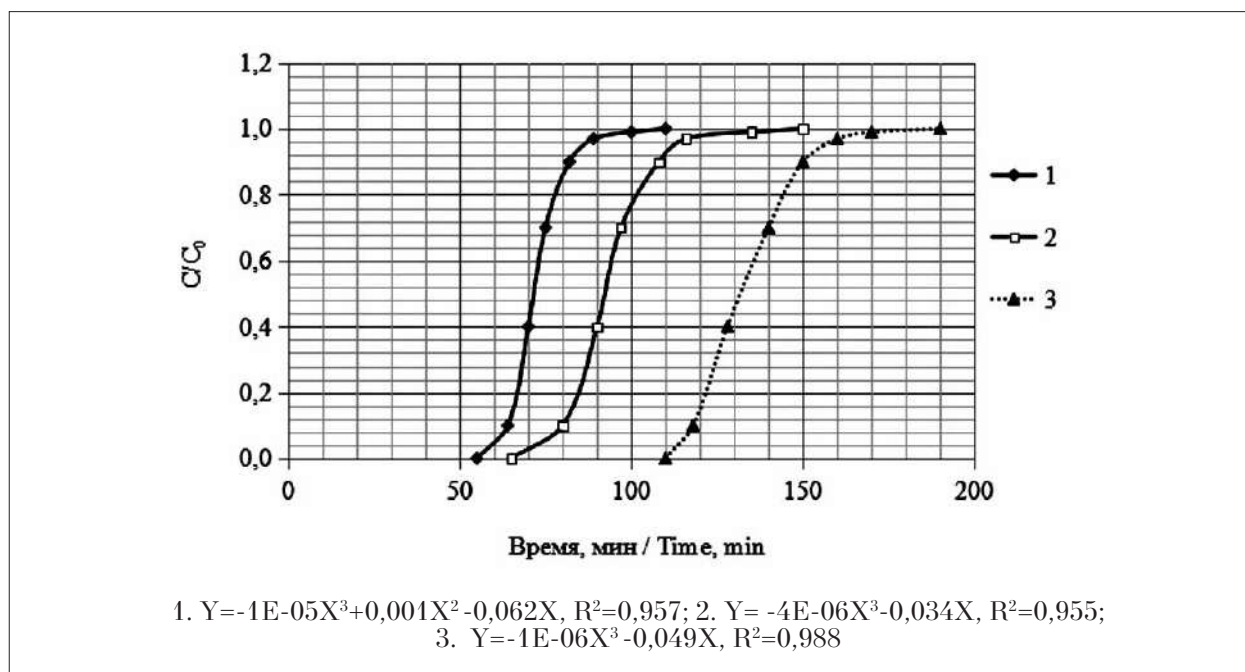


Рис. 4. Выходные кривые адсорбции компонента CO_2 при различных скоростях потока газа: 1 – 80 мл/мин; 2 – 50 мл/мин; 3 – 20 мл/мин

Fig. 4. Output curves of the adsorption of the CO_2 component at various gas flow rates: 1 – 80 mL/min; 2 – 50 mL/min; 3 – 20 mL/min

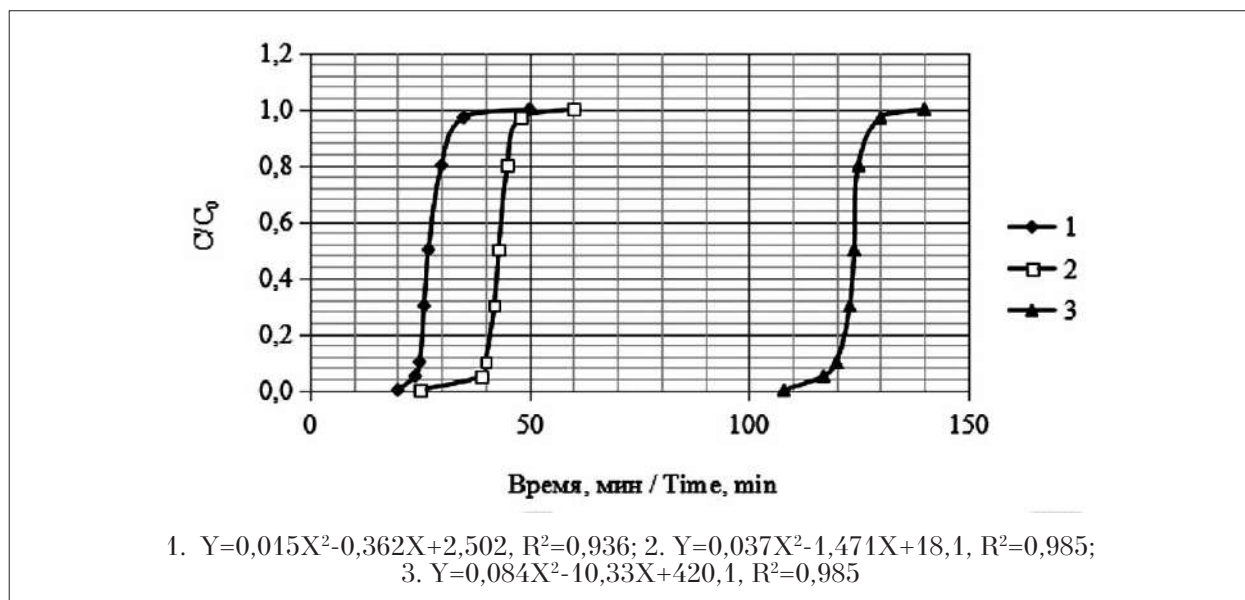


Рис. 5. Выходные кривые в зависимости от начальных концентраций CO_2 : 1 – 20%; 2 – 10%; 3 – 5%

Fig. 5. Output curves as a function of initial CO_2 concentrations: 1 – 20%; 2 – 10%; 3 – 5%

ние баланса адсорбируемого вещества можно представить в виде:

$$\frac{\partial(a+C)}{\partial t} + \vartheta \frac{\partial C}{\partial X} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}, \quad (1)$$

Граничные и начальные условия для уравнения (1):

$$\text{при } X=0, C=C_0, a=a_0, \quad (2)$$

$$\text{при } t=0, C=0, a=0, \frac{\partial C}{\partial X} = 0, \quad (3)$$

Уравнение, учитывающее кинетику процесса, можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(C-a), \quad (4)$$

Переменные a и C являются функциями расстояния:

$$\xi = x - \vartheta t, \quad (5)$$

В неподвижном слое связь между a и C описана соотношением Зельдовича:

$$a = \frac{a_0}{c_0} C \quad (6)$$

В результате решения системы уравнений (1–4) получаем:

$$C = C_0 \left(1 - \frac{C}{C_0}\right)^{\frac{b}{b+C_0}} \cdot e^{-\frac{\beta}{4} \frac{C_0}{b+C_0} \xi} \quad (7)$$

где C – концентрация компонента в подвижной фазе, мас. %; a – концентрация адсорбируемого вещества в твёрдой фазе, мас. %; C_m – предельное количество адсорбтива, мас. %; P – давление, МПа; b – константа; X – высота слоя адсорбента, м; t – время, с; D_e – эффективный коэффициент продольной диффузии, также и конвективное перемешивание вдоль адсорбера, м²/с; ϑ – линейная скорость потока, м/с; a_0 – начальная концентрация адсорбата, мас. %; C_0 – начальная концентрация адсорбтива, мас. %; β – константа кинетики процесса, с⁻¹; ξ – расстояние, м. Индексы: 0 – начальное значение; e – эффективный; m – предельное значение.

На основе проведённых экспериментов определены изотермы адсорбции (H₂S, CO₂, CH₄, N₂). Изотермы адсорбции соответствуют Лэнгмюровским [21–23]. Также выявлены выходные кривые адсорбции в зависимости от скоростей газа и начальных концентраций в газовой смеси. Соответственно получены

уравнения в общем виде $C/C_0=f(\tau)$. Полученные уравнения $C/C_0=f(P)$ и $C/C_0=f(\tau)$ учитывают нестационарность процесса адсорбции газовых смесей [24–26].

Выявлено, что величины адсорбции разных компонентов газовых смесей для природного клиноптилолита месторождений Ай-Даг согласуются с физико-химическими свойствами изученных компонентов газовых смесей и сорбируются в сторону уменьшения: H₂S → CO₂ → CH₄ → N₂.

Коэффициенты уравнений найдены на основе системы «Matlab» в среде «Optimization Toolbox» [22]. Так, например, для компонента CO₂ (при 313 К) скорости газового потока 80 мл/мин и начальной концентрации CO₂, C₀=5% получены следующие уравнения, учитывающие нестационарность:

$$C = C_m \cdot \frac{0,237 \cdot P}{1 + 0,237 \cdot P}$$

$$C = C_m \cdot 0,237 \cdot P / (1 + 0,237 \cdot P) \quad (8)$$

$$C/C_0 = 1E - 05 \cdot \tau^3 + 0,0028 \cdot \tau^2 - 0,105 \cdot \tau + 1,135 \quad (9)$$

$$C/C_0 = 6E - 05 \cdot \tau^4 - 0,008 \cdot \tau^3 + 0,387 \cdot \tau^2 - 7,887 \cdot \tau + 57,58 \quad (10)$$

Заключение

Защита окружающей среды от загрязнений вредными выбросами промышленности является глобальной проблемой, решение которой связано с созданием экологически чистых производств.

С этой целью разработана модель оптимального проектирования промышленных адсорберов для адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарного их протекания.

На основании проведённых нами исследований адсорбционного разделения газовых смесей (H₂S, CO₂, CH₄, N₂) установлено, что компоненты газовых смесей сорбируются в сторону уменьшения: H₂S → CO₂ → CH₄ → N₂.

Полученная нами ранее система уравнений модели [20] и 1–7, описывающая адсорбционное разделение газовых смесей в неподвижном слое адсорбента, совместно с уравнениями 8–10 представляет полную математическую модель рассматриваемого процесса в нестационарных условиях.

Предложенные модели оптимального проектирования промышленных адсорберов можно использовать для адсорбционного раз-

деления газовых смесей в условиях нестационарного их протекания.

References

- Keltsev N.V. The basics of adsorption technology. Moskva: Chemistry, 1984. 592 p. (in Russian).
- Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Matveikin V.G. Modeling and optimization of cyclic adsorption enrichment of gas mixtures with hydrogen // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. V. 53. No. 5. P. 781–792. doi: 10.1134/S0040579519040195
- Sarker A.J., Aroonwilas A., Veawab A. Equilibrium and kinetic behaviour of CO₂ adsorption onto zeolites carbon molecular sieve and activated carbons // Energy Procedia. 2017. V. 114. P. 2450–2457. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1394
- Mulgundmath V.P., Jones R.A., Tezel F.H., Thibault J. Fixed bed adsorption for the removal of carbon dioxide from nitrogen: Breakthrough behavior and modelling for heat and mass transfer // Separ. Purific. Tech. 2012. V. 85. P. 17–23. doi: 10.1016/j.seppur.2011.07.038
- Li Y., Yi H., Tang X., Li F., Yuan Q. Adsorption separation of CO₂/CH₄ gas mixture on the commercial zeolites at atmospheric pressure // Chem. Eng. J. 2013. V. 229. P. 50–56. doi: 10.1016/j.cej.2013.05.101
- Song Ch., Kausha Y., Oshizuka M., Fu Q., Tsutsumi A. Conceptual design of a novel pressure swing CO₂ adsorption process based on self-heat recuperation technology // Chem. Eng. Proc. 2015. V. 94. P. 20–28. doi: 10.1016/j.cep.2015.03.008
- Marx D., Joss L., Casas N., Schell J., Mazzotti M. Prediction of non-isothermal ternary gas phase breakthrough experiments based on binary data // Adsorption. 2014. V. 20. P. 493–503. doi: 10.1007/s10450-013-9593-5
- Yi H., Wang Z., Liu H., Tang X., Ma D., Zhao S., Zhang B., Gao F., Zuo Y. Adsorption of SO₂, NO, and CO₂ on activated carbons: equilibrium and thermodynamics // J. Chem. Eng. Data. 2014. V. 59. No. 5. P. 1556–1563. doi: 10.1021/je-4011135
- Perdana I., Creaser D., Ohrman O., Hedlung J. A comparison of NO_x adsorption on Na, H and BaZSM-5 films // App. Cat. 2007. V. 72. No. 1–2. P. 82–91. doi: 10.1016/j.apcatb.2006.09.016
- Silva J.A., Cunha A.F., Schumann K., Rodrigues A.E. Binary adsorption of CO₂/CH₄ in binder less beads of 13X zeolite // Microporous Mesoporous Mater. 2014. V. 187. P. 100–107. doi: 10.1016/j.micromeso.2013.12.017
- Hefti M., Marx D., Joss L., Mazzotti M. Adsorption equilibrium of binary mixtures of carbon dioxide and nitrogen on zeolites ZSM-5 and 13X // Microporous Mesoporous Mater. 2015. V. 215. P. 215–228. doi: 10.1016/j.micromeso.2015.05.044
- Krishna R., Long J.R. Screening metal-organic frameworks by analysis of transient breakthrough of gas mixtures in a fixed bed adsorbed // Phys. Chem. 2011. V. 115. No. 26. P. 12941–12950. doi: 10.1021/jp202203c
- Jang S.Ch., Yang S.I., Oh S.G., Choi D.K. Adsorption dynamics and effects carbon to zeolite ratio of layered beds for multicomponent gas adsorption // Korean J. Chem. Eng. 2011. V. 28. No. 2. P. 583–590. doi: 10.1007/s11814-010-0399-9
- Benjamin S.F., Roberts C.A. Three-dimensional modeling of NO_x and particulate traps using CFD: A porous medium approach // Applied Math. Mod. 2007. V. 31. No. 11. P. 2446–2460. doi: 10.1016/j.apm.2006.10.015
- Casas N., Schell J., Pini R., Mazzotti M. Fixed bed adsorption of CO₂/H₂ mixtures on activated carbon: experiments and modeling // Adsorption. 2012. V. 18. P. 143–161. doi: 10.1007/s10450-012-9389-z
- Pham T.D., Liu Q., Lobo R.F. Carbon dioxide and nitrogen. Adsorption on cation – exchanged SSZ-13 zeolites // Langmuir. 2013. V. 29. No. 2. P. 832–839. doi: 10.1021/la304138z
- Mulgundmath V., Tezel F.H. Optimization of carbon dioxide recovery from flue gas in a TPSA // Adsorption. 2010. V. 16. P. 587–598. doi: 10.1007/s10450-010-9255-9
- Maghsoudi H., Soltanieh M. Simultaneous separation of H₂S and CO₂ from CH₄ by a high silica CHA-type zeolite membrane // Mem. Sci. 2014. V. 470. P. 159–165. doi: 10.1016/j.memsci.2014.07.025
- Pham T.D., Xiong R., Sandler S.I., Lobo R.F. Experimental and computational studies on the adsorption of CO₂ and N₂ on pure silica zeolites // Micro. Meso. Mat. 2014. V. 185. P. 157–166.
- Yusubov F.V., Babaev R.K., Akhundov E.A., Mamedov E.A. Optimization of adsorption processes in the oil and gas industry // Chem. Technol. Fuels Oils. 2012. V. 48. P. 156–161. doi: 10.1007/s10553-012-0352-1
- Hauchhum L., Mahanta P. Carbon dioxide adsorption on zeolites and activated carbon by pressure swing adsorption in a fixed bed // Int. J. Ener. and Envir. Eng. 2014. V. 5. P. 349–355. doi: 10.1007/s40095-014-0131-3
- Potemkin V.G. MATLAB system. Reference manual. Moskva: Dialog-MIFI, 1998. 350 p. (in Russian).
- Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. Numerical study of the dynamics and optimization of the modes of air adsorption separation and oxygen concentration // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. V. 81. No. 1. P. 310–317 (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-310-317
- Dvoretzkiy S.I., Dvoretzkiy D.S., Akulinin E.I., Usachev V.B., Belyaev V.A. Sorption dynamics modeling in cyclic adsorption processes of gas mixture separation // Transactions TSTU. 2023. V. 29. No. 3. P. 425–443 (in Russian). doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.425
- Ding Z., Han Z., Fu Q., Shen Y. Optimization and analysis of the VPSA process for industrial-scale oxygen production // Adsorption. 2018. V. 24. P. 499–516. doi: 10.1007/s10450-018-9956-z
- Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Tomskey K.O. Cleaning gas emissions from CO₂ through trifluoroacetic acid in oil and gas production // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020. V. 331. No. 5. P. 57–63 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2020/5/2636