

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ МЕТОДОМ КОРОТКОЦИКЛОВОЙ АДСОРБЦИИ

Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; topt@topt.tstu.ru*

Ключевые слова: адсорбционные свойства; азот; кинетика; кислород; короткоцикловая безнагревная адсорбция; обогащение воздуха кислородом; тепло- и массоперенос; цеолитовый адсорбент.

Аннотация: Представлены теоретические (с использованием двухмерной математической модели циклических адсорбционных процессов) и экспериментальные исследования адсорбционных, структурных и аэродинамических свойств цеолитовых адсорбентов (на основе цеолитов NaX и LiLSX), кинетики адсорбции – десорбции азота, системных закономерностей, связей и особенностей протекания тепло- и массообменных процессов, сопровождающих процессы адсорбции – десорбции азота и оказывающих определяющее влияние на скорость и экономичность их осуществления в установках короткоцикловой безнагревной адсорбции, а также на увеличение концентрации продукционного кислорода. Дано описание расчетных формул для коэффициентов многомерной математической модели, физико-химических и адсорбционных свойств блочных цеолитовых адсорбентов, граничных условий для многомерной задачи моделирования процесса обогащения воздуха в установке короткоцикловой безнагревной адсорбции. Методом математического моделирования изучены зависимости концентрации кислорода на выходе установки короткоцикловой безнагревной адсорбции от технологических условий осуществления процесса: длительности цикла, высоты блока адсорбента, величины коэффициента обратного потока.

Обозначения

a_{N_2} – концентрация азота в адсорбенте, м ³ /кг;	w, w_0 – соответственно скорость и фиктивная скорость газовоздушного потока, м/с;
B – параметр уравнения теории объемного заполнения микропор;	V – объем адсорбера, м ³ ;
$c_{O_2}^{вых}$ – концентрация кислорода на выходе из установки, % об.;	ε_2 – относительный объем вторичных пор;
d_r, d_b – диаметры гранул соответственно адсорбента и каналов в блочном адсорбенте, мм;	ε_3 – пористость, м ³ /м ³ ;
D – диаметр адсорбера, м;	$\rho_{ист}, \rho_{каж}$ – соответственно истинная и кажущаяся плотности, кг/м ³ ;
H – высота слоя (блока) адсорбента, м;	θ – величина превышения обратного потока;
g – ускорение свободного падения м/с ² ;	σ_ϕ – удельная поверхность фильтрации, м ² /м ³ ;
K – проницаемость среды;	τ – длительность цикла, с;
N – число циклов адсорбции – десорбции;	ψ – степень извлечения воздуха, обогащенного кислородом, %;
ΔP – перепад давлений в слое, Па/м;	η – кинематическая вязкость воздуха, м ² /с;
$Q_{вых}$ – производительность установки, м ³ /с;	Ω – коэффициент полезного действия установки, %.
W_0 – предельный адсорбционный объем, м ³ /кг;	

Развитие метода короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) осуществляется по пути снижения удельного энергопотребления и уменьшения массогабаритных показателей технологического оборудования, что достигается за счет использования новых блочных цеолитовых адсорбентов с улучшенными адсорбционными характеристиками и сокращения длительности цикла адсорбции – десорбции [1 – 3]. В Научно-образовательном центре ТГТУ – ОАО «Корпорация «Росхимзащита» «Новые химические технологии» проведены экспериментальные и теоретические исследования системных связей и закономерностей процесса обогащения воздуха кислородом методом КБА, адсорбционных, структурно-механических и аэродинамических свойств гранулированных адсорбентов на основе цеолитов NaX и LiLSX (с диаметром гранул $d_f = 0,7; 0,5; 0,28$ мм) и блочных цеолитовых адсорбентов (с эквивалентным диаметром пор $d_s = 0,33; 0,26; 0,20$ мм).

Исследование свойств блочных цеолитовых адсорбентов, изготовленных в опытно-промышленных условиях ОАО «Корпорация «Росхимзащита», осуществлялось построением изотерм адсорбции – десорбции азота при 20 °С объемным методом [4] для образцов, прокаленных при 550 °С в течение 8 ч (рис. 1, а).

Обработка полученных данных проводилась посредством линейризации изотерм адсорбции в специальных координатах теории объемного заполнения микропор (рис. 1, б) [5]. Снятые изотермы наилучшим образом описывались уравнением Дубинина–Радушкевича, которое является частным случаем уравнения Астахова–Дубинина при $n = 2$ [6]. С использованием линейризованных изотерм для каждого образца вычислены значения пористости ε_3 , предельного адсорбционного объема W_0 , кинетического параметра B , относительного объема вторичных пор ε_2 , усредненные значения которых приведены в табл. 1. Для определения истинного и кажущегося значений плотности адсорбента использовался пикнометрический метод [4].

Аэродинамическое сопротивление ΔP и эквивалентный диаметр каналов пор адсорбента d_s определялись методом фильтрации с использованием формулы Козени–Кармана для блочных цеолитовых адсорбентов с $H = 0,2$ м при величине объемного расхода воздуха $Q_{\text{вых}} = 33,4 \cdot 10^{-5}$ м³/с [7]. Результаты представлены в табл. 2.

Расходно-напорные характеристики для гранулированного и блочного цеолитового адсорбентов, полученные с использованием установки КБА для измерения перепада давлений в слое адсорбента [8], представлены на рис. 2.

Анализ характера зависимостей позволяет сделать вывод, что при $w \leq 0,3$ м/с перепад давлений $\Delta P \sim w$, а при $w \geq 0,3$ м/с $\Delta P \sim w^2$. В ходе экспериментальных иссле-

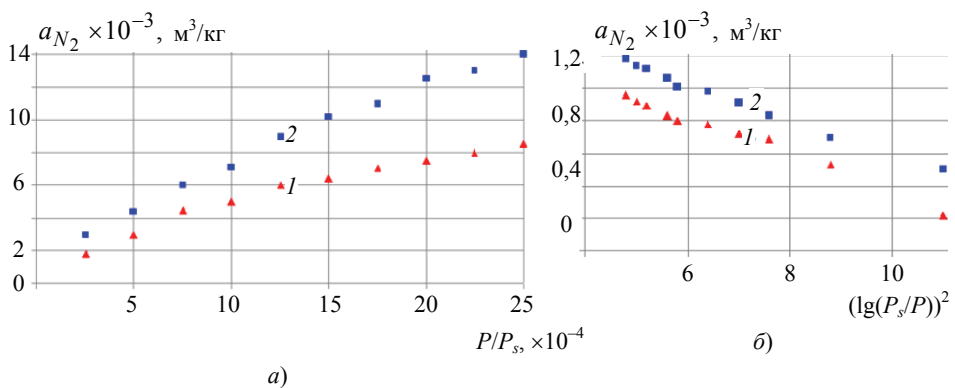


Рис. 1. Изотермы адсорбции азота при 20 °С образцами блоков с цеолитом типа X (а) в координатах уравнения Дубинина–Радушкевича (б): 1 – NaX; 2 – LiX

Таблица 1

**Физико-химические и адсорбционно-структурные свойства
гранулированных и блочных адсорбентов на основе цеолитов типа X**

Тип	$\rho_{\text{ист}}, \text{кг/м}^3$	$\rho_{\text{каж}}, \text{кг/м}^3$	$\varepsilon_3, \text{м}^3/\text{м}^3$	$W_0 \times 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$B \times 10^6, \text{град}^{-2}$	$\varepsilon_2, \text{м}^3/\text{м}^3$
NaX, гранулы	2140	643,5	0,703	0,084	1,3	0,409
NaX, блоки		648,3				0,406
LiLSX, гранулы	2120	666,5	0,708	0,126	1,28	0,412
LiLSX, блоки		663,5	0,703			0,406

Таблица 2

**Аэродинамическое сопротивление и эквивалентный диаметр
каналов пор блочного адсорбента типа X**

№ образца	$d_6, \text{м}$	$\Delta P \times 10^5, \text{Па}$	$K \times 10^{-12}$	$\sigma_{\phi}, \text{м}^2/\text{м}^3$	$\varepsilon_2, \text{м}^3/\text{м}^3$
1	0,33	0,07	239,5	18 400	0,406
2	0,26	0,10	162,4	23 300	
3	0,20	0,19	83,4	30 510	

дований установлено, что наиболее адекватное описание зависимости перепада давлений в слое адсорбента (гранулированного и блочного) обеспечивается при использовании зависимости Эргуна [7].

Поскольку данная формула предназначена для расчета удельного сопротивления слоя с размерами частиц более 1 мм, корректировались величины коэффициентов перед вторым членом уравнения и при расчете использовались следующие формулы:

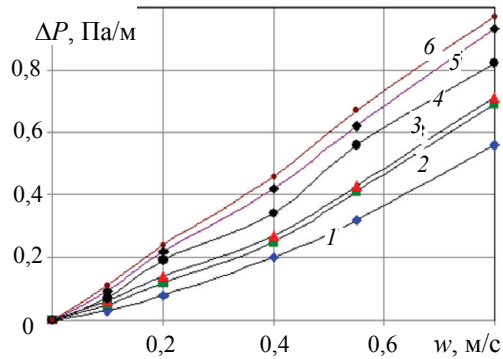
– блочный адсорбент

$$\Delta P = 150 \frac{(1 - \varepsilon_2)^2 \eta w_0}{\varepsilon_2^3 d_3} H + 1,54 \frac{1 - \varepsilon_2 \rho g w_0^2}{\varepsilon_2^3 d_3}; \quad (1)$$

– гранулированный адсорбент

$$\Delta P = 150 \frac{(1 - \varepsilon_2)^2 \eta w_0}{\varepsilon_2^3 d_{\Gamma}} H + 2,15 \frac{1 - \varepsilon_2 \rho g w_0^2}{\varepsilon_2^3 d_{\Gamma}}. \quad (2)$$

Результаты экспериментальных исследований зависимостей концентрации кислорода на выходе установки КБА $c_{\text{O}_2}^{\text{вых}}$ от производительности установки Q , степени извлечения воздуха ψ и коэффициента полезного действия Ω представлены на рис. 3.



**Рис. 2. Расходно-напорные характеристики
цеолитовых адсорбентов, мм:**
гранулированного: 1 – 0,7; 3 – 0,5; 6 – 0,28;
блочного: 2 – 0,33; 4 – 0,26; 5 – 0,20

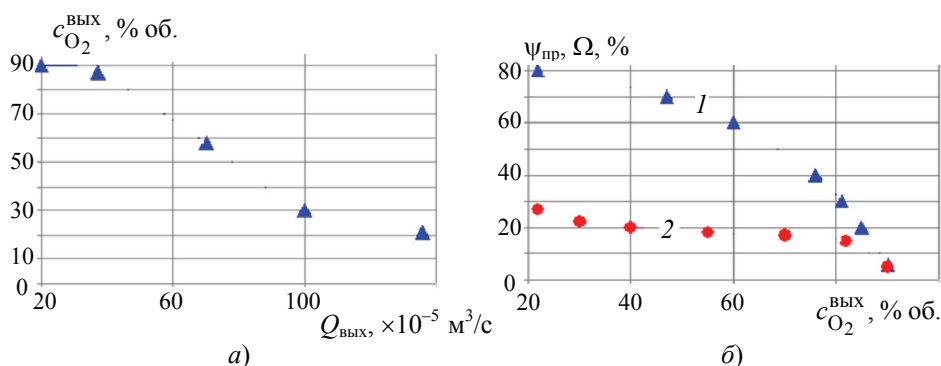


Рис. 3. Зависимости концентрации кислорода от производительности установки короткоциклового адсорбции (а) и степени извлечения кислорода (1) и коэффициента полезного действия установки (2) от концентрации кислорода на выходе (б)

Анализ зависимостей показывает, что концентрация кислорода на выходе из установки $c_{O_2}^{ВЫХ}$ при увеличении производительности установки $Q_{ВЫХ}$, снижается до минимального значения, равного концентрации кислорода в окружающем воздухе, из-за не выполнения условия по обеспечению необходимой величины превышения обратного потока θ [9, 10].

Характер кривых, представленных на рис. 3, б, позволяет заключить, что уменьшение $c_{O_2}^{ВЫХ}$ при увеличении Ω объясняется большей скоростью заполнения азотом адсорбционной емкости адсорбента. Увеличение концентрации кислорода на выходе из установки при уменьшении степени извлечения ψ объясняется обеспечением более глубокой десорбции азота из слоя адсорбента обратным потоком и заполнением адсорбера избыточным кислородом, полученным на стадии адсорбции. При этом, чем выше величина удельной производительности $q = Q/V$, тем ниже расположены кривые 1 и 2 по отношению к оси абсцисс.

Теоретические исследования системных связей и закономерностей процесса обогащения воздуха кислородом проводились с использованием двумерной математической модели динамики процессов тепло- и массообмена, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа, описывающую диффузию веществ (азота, кислорода) и распространение тепла по двум направлениям (вдоль движения газовой смеси по высоте адсорбента и в поперечном направлении) [11].

С использованием разработанной двумерной математической модели были изучены зависимости концентрации кислорода на выходе установки КБА от технологических условий осуществления процесса: τ , H , θ , ΔP с использованием гранулированного $d_r = 0,5$ мм и блочного $d_b = 0,2$ мм цеолитовых адсорбентов на основе цеолита LiLSX. Результаты представлены на рис. 4, 5.

Из анализа графиков следует: 1) при $\tau = 3$ с и использовании блочного цеолитового адсорбента максимальная концентрация $c_{O_2}^{ВЫХ}$ составляет 91 % об.; увеличение H более 0,2 м и соотношения $H/D > 8$ нецелесообразно из-за значительного увеличения аэродинамического сопротивления ΔP и падения концентрации кислорода на выходе из установки $c_{O_2}^{ВЫХ}$. Расчеты показывают, что используемые при обогащении воздуха кислородом блочные адсорбенты позволяют снизить аэродинамическое сопротивление ΔP до 35 % и повысить концентрацию кислорода на выходе установки КБА $c_{O_2}^{ВЫХ}$ на 6 – 8 % по сравнению с использованием в установке КБА слоя гранулированного цеолитового адсорбента одинаковой высоты.

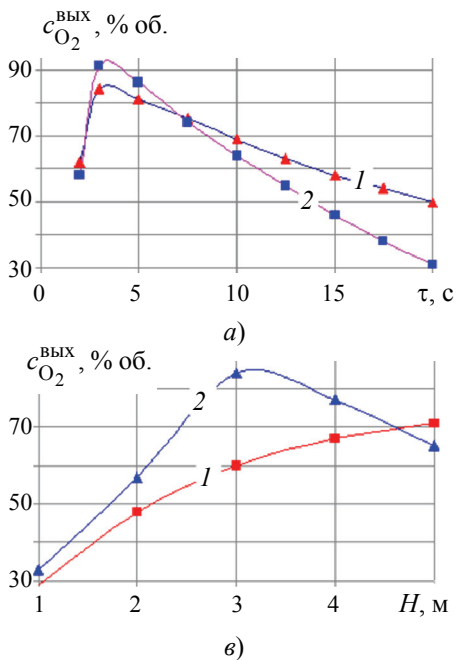


Рис. 4. Зависимость концентрации кислорода на выходе из установки от длительности цикла (а), коэффициента обратной промывки (б), высоты блока (в):
 а – $H = 0,15$ м; $\theta = 2,7$; б – $H = 0,15$ м; $\tau = 10$ с;
 в – $\theta = 2,7$; $\tau = 5$ с; 1 – гранулированный адсорбент; 2 – блочный адсорбент

Анализ процесса выделения теплоты в ходе проведенных расчетов (рис. 6) позволяет заключить, что тепловой фронт (штриховые линии) движется медленнее, чем концентрационный (сплошные линии). Следовательно, накопленная теплота остается в слое и используется для последующей десорбции азота в отходящий поток, что обеспечивает регенерацию адсорбента. Поскольку наибольшее количество адсорбированного азота сосредоточено в лобовом слое адсорбента (см. рис. 5), то и основное количество теплоты выделяется именно там, а часть размывается конвективным потоком по слою. Накопление тепла в слое приводит к нагреванию адсорбента до тех пор, пока количество тепла, отдаваемое в окружающую среду за счет теплопередачи через стенку адсорбера, не станет равно количеству тепла, накапливаемого в слое.

Для достижения максимальной концентрации кислорода, равной 90,7 %, требуется $N = 18$ циклов, а на устойчивый режим работы установка выходит после 60 циклов (рис. 7). При этом наблюдается снижение концентрации кислорода $c_{O_2}^{ВЫХ}$ в среднем на 2 % об. за счет нагревания адсорбента.

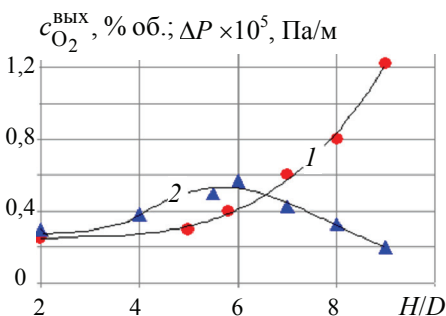


Рис. 5. Концентрация кислорода (1) и аэродинамическое сопротивление слоя (2) в зависимости от отношения высоты к диаметру адсорбера

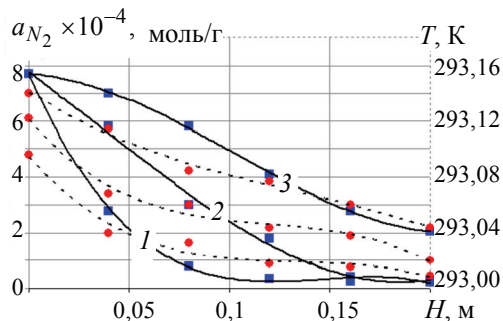


Рис. 6. Движение теплового (---) и адсорбционного (—) фронтов при адсорбции:
 1 – $\tau = 0,1$; 2 – $\tau = 0,5$; 3 – $\tau = 1,0$

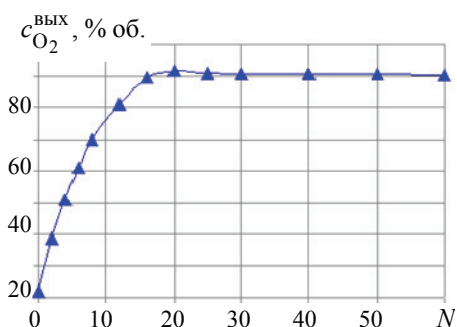


Рис. 7. Концентрация кислорода на выходе из установки короткоциклового адсорбции в зависимости от числа циклов адсорбции – десорбции

Анализ опытных данных и результаты математического моделирования процесса адсорбции азота из газовой смеси на основе теории объемного заполнения микропор, предложенной академиком М. М. Дубининым, позволили сделать следующие выводы: 1) диффузия азота и распространение тепла в блочном адсорбенте осуществляется как в продольном, так и в поперечном направлениях относительно движения потока по высоте адсорбента, при этом лимитирующим процессом обогащения воздуха кислородом при адсорбции азота микропористым цеолитовым адсорбентом является процесс внешней массоотдачи, определяемый коэффициентом массоотдачи и величиной равновесной концентрации азота в адсорбенте; 2) блочные цеолитовые адсорбенты обладают высокими значениями предельного адсорбционного объема $W_0 = 84 \text{ м}^3/\text{кг}$, относительного объема транспортных пор $\varepsilon_2 = 0,406$ и пористости $\varepsilon_3 = 0,703$; 3) максимальная концентрация кислорода на выходе из установки КБА, равная 90,7 % об., достигается при длительности цикла, равном 3,6 с; 4) при длительной работе установки $N > 60$ наблюдается снижение концентрации кислорода в среднем на 2 % об. за счет нагревания адсорбента; 5) блочные адсорбенты позволяют снизить аэродинамическое сопротивление ΔP до 35 % и повысить концентрацию кислорода на выходе установки КБА $c_{O_2}^{\text{вых}}$ на 6 – 8 % по сравнению с использованием слоя гранулированного цеолитового адсорбента, при этом блочный адсорбент обладает достаточно высоким техническим ресурсом $\sim 30000 \text{ ч}$ при его использовании в установках КБА.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 15-48-03172.

Список литературы

1. Основы математического моделирования и оптимизации процессов и систем очистки и регенерации воздуха : учеб. пособие / С. И. Дворецкий [и др.]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 324 с.
2. Современные тенденции по уменьшению энергозатрат кислорододобывающих установок короткоциклового безнагревной адсорбции / Е. И. Акулинин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 597 – 601.
3. Способы получения блочных цеолитовых адсорбентов для осуществления процессов короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин [и др.] // Вестн. Каз. технолог. университета. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 122 – 125.
4. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – М. : Химия, 1984. – 592 с.
5. Исирикян, А. А. Полное описание изотермы адсорбции уравнениями ТОЗМ / А. А. Исирикян, Г. У. Рахматкариев / Изв. Акад. наук СССР. Сер. Хим. – 1988. – № 11. – С. 2644 – 2645.
6. Дубинин, М. М. Адсорбция и пористость / М. М. Дубинин. – М. : Изд-во ВАХЗ, 1972 – 124 с.
7. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Годес. – Л. : Химия, 1968. – 512 с.

8. Пат. 156866 Российская Федерация, МПК В01D 53/047. Установка короткоциклового адсорбции для обогащения воздуха кислородом / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. А. Чернов; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2015119058/05; заявл. 20.05.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 3 с.

9. Шумяцкий, Ю. И. Адсорбция: процесс с неограниченными возможностями / Ю. И. Шумяцкий. – М. : Высшая школа, 1998. – 78 с.

10. Моделирование процесса обогащения воздуха кислородом путем поглощения азота в установке короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 182 – 196.

11. Моделирование процесса обогащения воздуха кислородом в установке короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин [и др.] // Хим. технология. – 2012. – Т. 13, № 4. – С. 247 – 256.

Research into the Processes of Heat and Mass Transfer in Air Oxygenation by Pressure Swing Adsorption

E. I. Akulinin, D. S. Dvoretzkiy, S. I. Dvoretzkiy

*Department of “Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries”,
TSTU, Tambov, Russia; topt@topt.tstu.ru*

Keywords: adsorption properties; air oxygenation; heat and mass transfer; kinetics; nitrogen; oxygen; pressure swing adsorption; zeolite adsorbent.

Abstract: A theoretical (using a two-dimensional mathematical model of cyclic adsorption processes) and experimental research into adsorption, structural and aerodynamic properties of zeolite adsorbents (based on zeolites NaX and LiLSX) has been carried out, as well as into the kinetics of adsorption-desorption of nitrogen, into system regularities, links, and characteristics of heat and mass transfer processes accompanying the processes of adsorption-desorption of nitrogen, which may influence the speed and efficiency of their implementation in pressure swing adsorption units and increase the concentration of produced oxygen. Design equations for the coefficients of the multi-dimensional mathematical models, physical, chemical and adsorption properties of zeolite adsorbent blocks, and boundary conditions for multi-dimensional modeling of an air oxygenation process in a pressure swing adsorption unit have been specified. Using the method of mathematical modeling, the dependence of oxygen concentration at the outlet of the pressure swing adsorption unit on the technological conditions of the process, such as the duration of the cycle, the height of the adsorbent block, the value of the backflow ratio, has been investigated. Having analyzed the obtained results, we can conclude that the maximum concentration of oxygen at the unit outlet, 90.7 % vol., is achieved when the duration of a cycle is 3.6 s.

References

1. Dvoretzkiy S.I., Matveev S.V., Putin S.B., Tugolukov E.N. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii protsessov i sistem ochistki i regeneratsii vozdukha : ucheb. posobie* [Basics of mathematical modeling and optimization of processes and cleaning systems and air regeneration: studies. benefit], Tambov: Izd-vo Tambov State Technical University, 2008, 324 p. (In Russ.)

2. Akulinin E.I., Dvoretiskii D.S., Simanenkov S.I., Ermakov A.A. [Present-day Trends for Reduction in Energy Expenses of Oxygen Production Units of Short-Cycle Heatless Adsorption], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 597-601. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Akulinin E.I., Gladyshev N.F., Dvoretiskii D.S., Dvoretiskii S.I. [Methods for preparing block the zeolite adsorbent for pressure swing adsorption processes], *Vestn. Kaz. tekhnolog. universiteta* [Vestnik. Kaz. technologist. university], 2015, vol. 18, no. 15, pp. 122-125. (In Russ.)
4. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoi tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology], Moscow: Khimiya, 1984, 592 p. (In Russ.)
5. Icirikyan A.A., Rakhmatkariev G.U. [Full description of the adsorption isotherm equations TOZM], *Izv. akad. nauk SSSR. Ser. Khim* [Proceedings of the Academy of Sciences. Chemistry Series], 1988, no. 11, pp. 2644-2645. (In Russ.)
6. Dubinin M.M. *Adsorbtsiya i poristost'* [Adsorption and porosity], Moscow: Izd-vo VAKhZ, 1972, 124 p. (In Russ.)
7. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym sloem* [Hydraulic and thermal basics of devices with fixed and fluidized granular layer], Leningrad: Khimiya, 1968, 512 p. (In Russ.)
8. Akulinin E.I., Dvoretiskii D.S., Dvoretiskii S.I., Chernov G.A., *Ustanovka korotkotsiklovoi adsorbtsii dlya obogashcheniya vozdukha kislorodom* [Installing the pressure swing adsorption air oxygen enrichment], Russian Federation, 2015, Pat. 156866. (In Russ.)
9. Shumyatskii Yu.I. *Adsorbtsiya: protsess s neogranichennymi vozmozhnostyami* [Adsorption: a process with unlimited possibilities], Moscow: Vysshaya shkola, 1998, 78 p. (In Russ.)
10. Akulinin E.I., Dvoretiskii D.S., Dvoretiskii S.I., Tugolukov E.N. [Simulation of air oxygen enrichment process to install swing adsorption], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 182-196. (In Russ.)
11. Akulinin E.I., Dvoretiskii D.S., Dvoretiskii S.I., Tugolukov E.N. [Simulation of air oxygen enrichment process to install swing adsorption], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Khimicheskaya Tekhnologiya], 2012, vol. 13, no. 4, pp. 247-256. (In Russ.)

Forschung der Prozesse des Wärme- und Massenumtausches bei der Bereicherung der Luft vom Sauerstoff von der Methode der kurzzyklischen Adsorption

Zusammenfassung: Es sind die theoretischen (unter Ausnutzung des zweidimensionalen mathematischen Modells der zyklischen Adsorptionsprozesse) und die experimentalen Forschungen der Adsorptions-, Strukturell- und Aerodynamischeigenschaften der Zeolithadsorbens (auf der Grundlage der Zeolithen NaX und LiLSX), der Kinetik der Adsorption-Desorption des Stickstoffes, der Systemgesetzmäßigkeiten, der Beziehungen und der Besonderheiten des Durchfließens der Wärme- und Massenumtauschprozesse angeführt, die die Prozesse der Adsorption – der Desorption des Stickstoffes begleiten und den bestimmenden Einfluss auf die Geschwindigkeit und die Wirtschaftlichkeit ihrer Verwirklichung in den Anlagen der kurzzyklischen nichterwärmenden Adsorption, sowie auf die Vergrößerung der Konzentration des Produktionssauerstoffes beeinflussen. Es ist die Beschreibung der Rechenformeln für die Koeffizienten des multidimensionalen mathematischen

Modells, der physikalisch-chemischen und Adsorptionseigenschaften der Blockzeolithadsorbens, der Randbedingungen für die multidimensionale Aufgabe der Modellierung des Prozesses der Bereicherung der Luft in der Anlage der kurzzyklischen nichterwärmenden Adsorption angegeben. Von der Methode der mathematischen Modellierung sind die Abhängigkeiten der Konzentration des Sauerstoffs auf dem Ausgang der Anlage der kurzzyklischen nichterwärmenden Adsorption von den technologischen Bedingungen der Verwirklichung des Prozesses erlernt: der Dauer des Zyklus, der Höhe des Blocks des Adsorbens, der Größe des Koeffizienten des Rückstroms.

Etude des processus de l'échange de chaleur et de masse lors de l'enrichissement de l'air en oxygène par la méthode d'adsorption du cycle court

Résumé: Sont présentés les modèles théoriques (avec l'emploi du modèle mathématique à deux dimensions des processus cycliques d'adsorption) et les études expérimentales des propriétés des adsorbants structurales et aérodynamiques (à la base des zéolithes NaX et LiLSX), de la cinétique d'adsorption-désorption de l'azote, des régularités systémiques, des liens et des particularités du déroulement des processus de l'échange de chaleur et de masse accompagnant des processus d'adsorption – désorption d'azote et ayant une certaine influence sur la vitesse et l'efficacité de leur mise en œuvre dans les installations du cycle court sans chauffage, ainsi que sur l'augmentation de la concentration de l'oxygène de produit. Sont décrites les formules du modèle mathématique, les propriétés physico-chimiques, les conditions du modèle mathématique. Par la méthode de la modélisation mathématique sont étudiées les dépendances de la concentration de l'oxygène à la sortie de l'installation du cycle court.

Авторы: *Акулинин Евгений Игоревич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Дворецкий Дмитрий Станиславович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техно-сферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
