

**ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИМ
ПРОЦЕССОМ АДСОРБЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ
ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ**

**В. Г. Матвейкин¹, С. А. Скворцов¹,
Е. И. Акулинин², С. И. Дворецкий²**

*Кафедры: «Информационные процессы и управление» (1);
«Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; ipu@ahp.tstu.ru*

Ключевые слова: воздух; динамика; изотерма адсорбции; кинетика; кислород; короткоцикловая безнагревная адсорбция; математическая модель; оптимизация; управление; цеолитовый адсорбент.

Аннотация: Поставлена и исследована задача оптимизации (в смысле определения максимума степени извлечения кислорода) процесса обогащения воздуха кислородом в двухадсорберной установке короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) с учетом выполнения требований по чистоте кислорода, производительности установки и ресурсосбережению гранулированного адсорбента. Разработаны алгоритм и двухуровневая система адаптивного управления процессом обогащения воздуха кислородом, реализация которых обеспечит автоматический контроль возмущающих воздействий, оперативное решение задачи оптимизации (на верхнем уровне) и коррекцию заданий программному задатчику и регуляторам автоматической системы управления (на нижнем уровне). Использование адаптивной оптимизации в системе управления позволит повысить значение степени извлечения кислорода в установке КБА в среднем на 10 % (по сравнению с использованием традиционной системы управления без адаптивной оптимизации) при выполнении требуемых ограничений по чистоте кислорода, ресурсосбережению гранулированного адсорбента и производительности установки.

Обозначения

a_k – величина сорбции k -го компонента в адсорбенте, моль/м ³ ;	c_p^a, c_p^g – удельные теплоемкости адсорбента и газовой смеси соответственно, Дж/(кг К);
a_k^* – концентрация адсорбата на поверхности раздела фаз или равновесная текущей величине концентрации c_k адсорбтива в газовой фазе, моль/м ³ ;	D_a, d_{gr} – диаметры слоя и гранул адсорбента соответственно, м;
\mathbf{b} – вектор параметров изотермы сорбции;	G^{in} – расход атмосферного воздуха в питание установки КБА, л/мин;
c_k – мольная концентрация k -го компонента газовой смеси, моль/м ³ ;	G^{out} – расход на выходе продукционной линии установки КБА, л/мин;

G_1^{out} – расход газовой смеси, обедненной кислородом, на отводной линии установки КБА;	y^{out} – состав на выходе продукционной линии установки КБА;
h_k^{ads} – теплота адсорбции k -го компонента газовой смеси, Дж/моль;	y_1^{out} – состав газовой смеси, обедненной кислородом, на отводной линии установки КБА;
M_g – молярная масса газовой смеси, кг/моль;	α – коэффициент теплоотдачи от поверхности гранул адсорбента к потоку газовой смеси, Вт/(К·м ²);
$P_{ads}^{in}, P_{des}^{in}$ – давление на стадиях адсорбции и десорбции соответственно;	L – высота (длина) слоя адсорбента, м;
R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);	β_k – эффективный коэффициент массопереноса k -го компонента, отнесенный к концентрации адсорбата (кинетический коэффициент);
Q – производительность установки КБА, л/мин;	ε – коэффициент порозности адсорбента с учетом пористости гранул, м ³ /м ³ ;
S_{ud} – коэффициент удельной поверхности гранул адсорбента, м ² /м ³ ;	γ – тип адсорбента;
$t_{ц}, t_{пц}$ – продолжительность цикла и полуцикла «адсорбция – десорбция» периодических стадий адсорбционного обогащения воздуха кислородом соответственно, с;	λ_a, λ_g – коэффициенты теплопроводности адсорбента и газовой смеси соответственно, Вт/(м·К);
$t_{уст}$ – время выхода установки на установившийся режим, с;	χ – коэффициент обратного потока обогащенного кислородом воздуха;
$t_{ф}$ – время функционирования, с;	ε_0 – порозность слоя адсорбента без учета пористости частиц, м ³ /м ³ ;
P^{out} – давление на продукционном выходе установки КБА, Па;	v_g – скорость воздуха, м/с;
P_1^{out} – давление на линии отвода газовой смеси, обедненной кислородом, Па;	ρ_a – плотность адсорбента, кг/м ³ ;
T_a, T_g, T_{OC} – температуры адсорбента, воздуха и окружающей среды соответственно, К;	ρ_g – молярная плотность газовой смеси, моль/м ³ ;
T_g^{out} – температура на выходе продукционной линии установки КБА, К;	μ_g – динамическая вязкость газовой смеси, Па·с;
U_{OC} – состав воздуха окружающей среды;	ς – коэффициент сферичности гранул адсорбента;
	σ – форма адсорбента;
	ψ_{K_i} – закон открытия i -го регулирующего клапана;
	η – степень извлечения кислорода, %.

Введение

В последние десятилетия все более распространенным становится использование циклических адсорбционных процессов для разделения газовых смесей и концентрирования целевых продуктов (короткоцикловая безнагревная адсорбция (КБА)), которые не предполагают наличия внешнего источника тепла [1, 2].

Короткоцикловые процессы адсорбционного разделения смесей газов широко применяют в промышленности для извлечения водорода, обогащения воздуха кислородом, безнагревной осушки газов, разделения углеводородов, концентрирования диоксида углерода, извлечения метана и т.п. Одной из актуальных задач в области адсорбционного разделения является обогащение воздуха кислородом. Типичными

веществами, сопутствующими кислороду, являются азот, аргон и диоксид углерода. Особенностью адсорбционного концентрирования кислорода является тот факт, что азот имеет более высокие значения адсорбционной селективности и является более сорбируемым компонентом.

Анализ многочисленных работ зарубежных и российских ученых в области адсорбционного разделения многокомпонентных газовых смесей и концентрирования целевого продукта (водорода, кислорода, азота, углекислого газа и др.), оптимизации режимных переменных технологического процесса, управления и автоматизации позволил определить место данной статьи среди других работ, ее актуальность и перспективность.

Цель работы – разработка алгоритма оптимизации и системы автоматического управления циклическим адсорбционным процессом обогащения воздуха кислородом, обеспечивающих поддержание максимальной степени извлечения кислорода при выполнении требований технологического регламента по чистоте кислорода, производительности установки и ресурсосбережению гранулированного адсорбента.

Анализ процесса концентрирования кислорода методом адсорбционного разделения воздуха как объекта управления

Анализ процесса адсорбционного разделения воздуха в двухадсорберной установке позволил определить (рис. 1):

– в качестве управляющих переменных $\mathbf{u}(t)$: $t_{\text{ц}}$; $P_{\text{ads}}^{\text{in}}(t)$, $P_{\text{des}}^{\text{in}}(t)$; или законы $\psi_{K_1}(t)$, $\psi_{K_4}(t)$, $t \in [0; 0,5t_{\text{ц}}]$, $\psi_{K_2}(t)$, $\psi_{K_3}(t)$, $t \in [0,5t_{\text{ц}}; t_{\text{ц}}]$ открытия регулирующих «впускных» K_1 , K_2 и «сбросных» K_3 , K_4 клапанов; коэффициент χ обратного потока обогащенного кислородом воздуха, подаваемого на регенерацию адсорбента параллельного адсорбера через клапан K_5 ;

– в качестве возмущающих воздействий $\mathbf{z}(t)$, $t \in [0, t_{\text{ф}}]$: $y_{\text{OC}}, T_{\text{OC}}, B_{\text{OC}}$; P^{out} на отрезке времени $[0, t_{\text{ф}}]$; $P_1^{\text{out}} = B_{\text{OC}}$, то есть $\mathbf{z} = \{y_{\text{OC}}, T_{\text{OC}}, B_{\text{OC}}, P^{\text{out}}, P_1^{\text{out}}\}$;

– нагрузка по сырью G^{in} ;

– выходные переменные установки КБА $(y^{\text{out}}, G^{\text{out}}, T_{\text{г}}^{\text{out}}, Q, \eta, y_1^{\text{out}}, G_1^{\text{out}})$.

Будем считать, что существенные изменения возмущающих воздействий $\mathbf{z}(t)$, $t \in [0, t_{\text{ф}}]$ происходят в моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots$ и далее на интервалах времени $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots$ значения возмущений не изменяются. Причем, на данных интервалах времени намного превышают отрезок времени $[0, t_{\text{ст}}]$, на котором, собственно, и осуществляется решение задачи оптимизации неустановившихся режимов работы установки КБА, вызванных возмущением $\mathbf{z}(t)$ в момент времени t_i . В этом случае возмущения $\mathbf{z}(t)$, $t \in [0, t_{\text{ф}}]$ на интервале времени $[0, t_{\text{ф}}]$ удобно представлять в форме кусочно-постоянных функций $z(t_i) = z^i = \text{const}$, $i = 1, 2, 3, \dots$. Аналогично, непрерывные функции управлений $\psi_{K_1}(t)$, $\psi_{K_4}(t)$, $t \in [0; 0,5t_{\text{ц}}]$, $\psi_{K_2}(t)$, $\psi_{K_3}(t)$, $t \in [0,5t_{\text{ц}}; t_{\text{ц}}]$ на отрезке времени $[0, t_{\text{ц}}]$ будем аппроксимировать кусочно-постоянными функциями:

$$\psi_1^j(t) = \psi_{K_1}^{j,i} = \psi_{K_1}(t_j, z^i), \quad \psi_4^j(t) = \psi_{K_4}^{j,i} = \psi_{K_4}(t_j, z^i), \quad t_j \in [0; 0,5t_{\text{ц}}], \quad j = \overline{1, m};$$

$$\psi_2^j(t) = \psi_{K_2}^{j,i} = \psi_{K_2}(t_j, z^i), \quad \psi_3^j(t) = \psi_{K_3}^{j,i} = \psi_{K_3}(t_j, z^i), \quad t_j \in [0,5t_{\text{ц}}; t_{\text{ц}}], \quad j = \overline{1, m}.$$

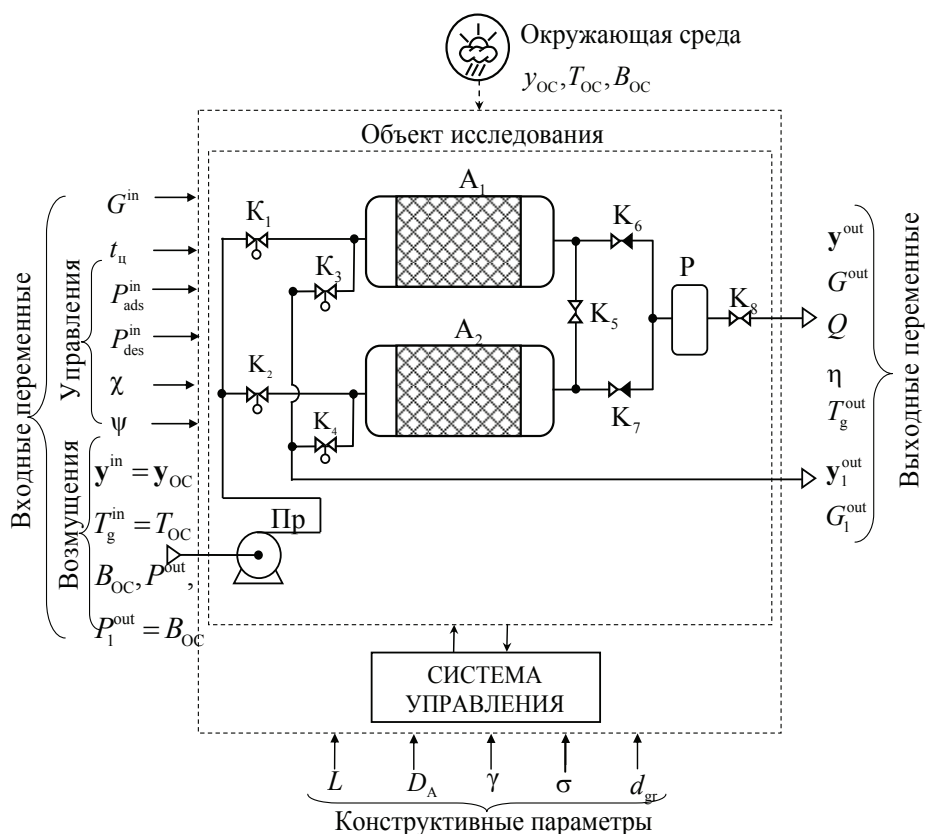


Рис. 1. Схема двухадсорберной установки КБА для концентрирования кислорода:

A – адсорбер; B_{OC} – барометрическое давление воздуха окружающей среды;

K_i – i -й клапан; Пр – побудитель расхода; P – ресивер

При математическом описании процесса обогащения воздуха кислородом в установке КБА принимали следующие допущения: 1) атмосферный воздух является трехкомпонентной газовой смесью (содержит 1 – O_2 с концентрацией 20,3 – 20,8 об. %; 2 – N_2 с концентрацией 78,2 об. %; 3 – Ar и другие примеси с концентрацией 1,0 – 1,5 об. %) и рассматривается как идеальный газ, что вполне допустимо при давлении в адсорбере до $200 \cdot 10^5$ Па [3]; причем концентрации аргона и других примесей в газовой смеси не изменяются при обогащении воздуха кислородом; 2) диаметр и высота насыпного слоя цеолитового адсорбента NaX составляли 0,05 и 0,5 м соответственно; диаметр гранул – 2 мм, коэффициент пористости гранул $\sim 0,394$ и диаметр транспортных пор $\sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; 3) геометрические размеры адсорбционного слоя считали постоянными в течение заданного срока эксплуатации $\sim 10^5$ ч [4, 5]; 4) слой адсорбента представляет собой сплошную среду с коэффициентом порозности ϵ , учитывающим пористость гранул; 5) адсорбционное равновесие (изотерма адсорбции) описывается уравнением Ленгмюра–Фрейндлиха; 6) десорбционные ветви изотерм адсорбции O_2 , N_2 на цеолите NaX совпадают с адсорбционными [6, 7]; 7) температура воздуха в ресивере равна температуре воздуха на выходе из адсорбера, тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы.

В соответствии с принятыми допущениями математическое описание циклического процесса адсорбционного разделения воздуха и концентрирования кислорода в установке КБА включает следующие уравнения [8].

1. Уравнения покомпонентного (для $O_2 - k = 1$; $N_2 - k = 2$) материального баланса в потоке газовой смеси по высоте слоя адсорбента

$$\frac{\partial c_k(x,t)}{\partial t} + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{\partial a_k}{\partial t} + \frac{\partial(v_g c_k(x,t))}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1) первое слагаемое описывает скорость накопления k -го компонента смеси в газовой фазе; второе – скорость накопления k -го компонента в адсорбенте; третье – конвективный перенос вещества в слое адсорбента.

2. Уравнение кинетики адсорбции:

$$\frac{\partial a_k}{\partial t} = \beta_k (a_k^* - a_k), \quad k = 1, 2. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой описание кинетики адсорбции для смешанно-диффузионной области массопереноса адсорбтива (O_2 , N_2) через границу раздела фаз.

Кинетические коэффициенты β_k определялись путем решения регуляризованной экстремальной задачи идентификации с использованием экспериментальных данных, полученных методом физического моделирования установки КБА в лабораторных и опытно-промышленных условиях: $\beta_{O_2} = 5,776 \text{ с}^{-1}$; $\beta_{N_2} = 1,925 \text{ с}^{-1}$.

Величина адсорбции a_k^* , равновесная текущей концентрации адсорбтива c_k в потоке на внешней поверхности гранул, рассчитывается по уравнению изотермы Ленгмюра–Фрейндлиха [9, 10]

$$a_k^* = \frac{b_{1,k} c_k \exp(b_{2,k}/T_a)}{1 + \sum_{j=1}^2 b_{3,j} c_j \exp(b_{4,k}/T_a)} + \frac{b_{5,k} c_k \exp(b_{6,k}/T_a)}{1 + \sum_{j=1}^2 b_{3,j} c_j \exp(b_{4,k}/T_a)}, \quad k = 1, 2.$$

3. Уравнение, описывающее распространение тепла в потоке газовой смеси по длине x адсорбента:

$$c_p^g \rho_g \frac{\partial T_g(x,t)}{\partial t} + c_p^g \rho_g v_g \frac{\partial T_g(x,t)}{\partial x} - \frac{\alpha}{\varepsilon} S_{ud} [T_a(x,t) - T_g(x,t)] = 0, \quad 0 < x < L, \quad (3)$$

где $S_{ud} = (1-\varepsilon) \frac{6}{d_{gr}}$.

В уравнении (3) первое слагаемое описывает накопление тепла в газовой фазе; второе – конвективную составляющую переноса тепла; третье – теплоотдачу от газовой фазы к твердой (адсорбенту).

4. Уравнение, описывающее изменение температуры в адсорбенте

$$c_p^a \rho_a \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial t} + \alpha S_{ud} [T_a(x,t) - T_g(x,t)] - \sum_k h_k^{ads} \frac{\partial a_k(x,t)}{\partial t} = \lambda_a \frac{\partial^2 T_a(x,t)}{\partial x^2}. \quad (4)$$

В уравнении (4) первое слагаемое описывает энтальпию твердой фазы (адсорбента); второе – теплоотдачу от твердой фазы (адсорбента) к газовой; третье – выделение теплоты сорбции компонентов газовой смеси; четвертое – теплопроводность в адсорбенте по координате x .

5. Уравнение Эргуна, связывающее изменение давления и скорости газовой смеси по длине адсорбента [11]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \left(\frac{150(1-\varepsilon_0)^2}{(d_{gr}\zeta)^2 \varepsilon_0^2} \mu_g v_g + 1,75 M_g \rho_g \frac{(1-\varepsilon_0)}{d_{gr}\zeta \varepsilon_0} v_g^2 \right), \quad (5)$$

где уравнение состояния идеального газа имеет вид: $P(x,t) = R T_g(x,t) \sum_k c_k(x,t)$.

Начальные и граничные условия для уравнений (1) – (5), формулы для расчета коэффициентов математической модели приведены в работе [8], поэтому в данной статье не приводятся.

Объемный расход потока, направляемого в ресивер Р (см. рис. 1), определялся как $G^{out} = G_{ads}^{out} - G_{des}^{in}$, где $G_{des}^{in} = \chi G_{ads}^{out} \frac{P_{des}}{P_{ads}}$ – объемный расход потока, обогащенного кислородом, направляемого на десорбцию преимущественно O_2 , N_2 и отвод в атмосферу.

Таким образом, уравнения (1) – (5) с начальными и граничными условиями представляют собой математическое описание циклических процессов адсорбции – десорбции, осуществляемых в адсорберах A_1 , A_2 установки КБА (см. рис. 1). Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями использовали метод конечных элементов в программной среде MATLAB.

Далее концентрации кислорода и азота будем обозначать через $y = (y_1, y_2)$ об. %. Проверка адекватности математической модели проводилась по результатам независимых экспериментов, то есть отличных от экспериментальных данных, использованных для идентификации модели. Рассогласование расчетных по модели и экспериментальных данных оценивали по формуле

$$\delta_{max} = \max_{i=1,d} \frac{|y_{1,i}^{out,e} - y_1^{out}(t_{ads,i})|}{y_{1,i}^{out,e}},$$

где $y_{1,i}^{out,e}$, $y_1^{out}(t_{ads,i})$ – экспериментальное и расчетное значения концентрации кислорода в продукционном потоке на выходе установки КБА в i -м опыте, об. %, $i = \overline{1,d}$, d – число экспериментальных точек; $t_{ads,i}$ – продолжительность стадии адсорбции в i -м опыте, с.

Максимальная относительная погрешность δ_{max} рассогласования расчетных y_1^{out} и экспериментальных $y_1^{out,e}$ данных на стадии адсорбции не превышает 13,2 % (рис. 2), что позволяет с приемлемой для практики точностью использовать математическую модель для технологического расчета, оптимизации и управления процессом обогащения воздуха кислородом методом адсорбционного разделения газовой смеси.

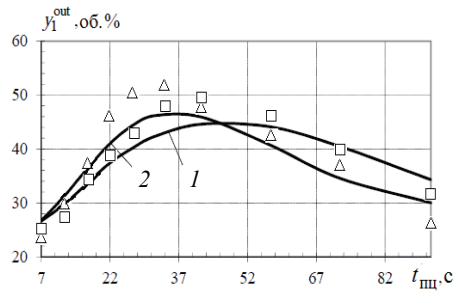


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные по модели зависимости концентрации продукционного кислорода при давлении на выходе компрессора:

1 – $2,7 \cdot 10^5$ Па ; 2 – $3,7 \cdot 10^5$ Па ; $t_{пц} = 0,5 t_{ц}$;

Δ , \square – эксперимент; — – расчет по модели

Постановка задачи оптимизации режимных параметров процесса обогащения воздуха кислородом

Сформулируем задачу оптимизации циклических режимов работы установки КБА при разделении атмосферного воздуха и концентрировании кислорода: при фиксированных значениях возмущающих воздействий и нагрузки по сырью $\underline{y}_1^{\text{in}} \leq y_1^{\text{in}} \leq \bar{y}_1^{\text{in}}$, $\underline{G}^{\text{in}} \leq G^{\text{in}} \leq \bar{G}^{\text{in}}$ требуется определить управления \mathbf{u}^* – продолжительность цикла $t_{\text{ц}}^*$ «адсорбция – десорбция», степени открытия $\psi_1^{j*} = \psi_{K_1}^{j,i*}$, $\psi_4^{j*} = \psi_{K_4}^{j,i*}$ на отрезке времени $[0; 0,5t_{\text{ц}}]$ и $\psi_2^{j*} = \psi_{K_2}^{j,i*}$, $\psi_3^{j*} = \psi_{K_3}^{j,i*}$ на отрезке времени $[0,5t_{\text{ц}}; t_{\text{ц}}]$ впускных K_1, K_2 и сбросных клапанов K_3, K_4 такие, что среднее значение степени извлечения (концентрирования) кислорода η на отрезке времени $[0, t_{\text{уст}}]$ достигает максимума, то есть

$$I(\mathbf{u}^*, \mathbf{z}^i) = \frac{1}{t_{\text{уст}}} \int_0^{t_{\text{уст}}(\mathbf{u}^*)} \eta(\mathbf{u}^*, \mathbf{z}^i) dt = \max_{\mathbf{u}=(t_{\text{ц}}, \psi_1^{j,i}, \psi_3^{j,i}, \psi_2^{j,i}, \psi_4^{j,i}, j=\overline{1,m})} \frac{1}{t_{\text{уст}}} \int_0^{t_{\text{уст}}(\mathbf{u})} \eta(\mathbf{u}, \mathbf{z}^i) dt \quad (6)$$

при связях (1) – (5) с начальными и граничными условиями и ограничениях:

– на «установившееся» значение концентрации продукционного кислорода

$$y_{1,\text{зад}}^{\text{out}} - y_{1,\text{уст}}^{\text{out}}(u, z^i) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots; \quad (7)$$

– производительность установки

$$Q_{\text{зад}} - Q(\mathbf{u}, \mathbf{z}^i, y_{1,\text{уст}}^{\text{out}}) \leq 0; \quad (8)$$

– скорость газовой смеси в «лобовом» слое адсорбента

$$\max_{t \in [0, t_{\text{ц}}]} \left| v_g(u, z^i) \right| - v_g^+ \leq 0; \quad (9)$$

– перепад давления в слое адсорбента

$$\begin{aligned} \max_{t \in [0; 0,5t_{\text{ц}}]} P_{\text{ads}}^{\text{out}}(\mathbf{u}, \mathbf{z}^i, L, t) - P_{\text{ads}}^{\text{in}}(\mathbf{u}, \mathbf{z}^i, 0, t) &\leq \Delta P_{\text{ads}}^+; \\ \max_{t \in [0,5t_{\text{ц}}; t_{\text{ц}}]} P_{\text{des}}^{\text{out}}(\mathbf{u}, \mathbf{z}^i, L, t) - P_{\text{des}}^{\text{in}}(\mathbf{u}, \mathbf{z}^i, 0, t) &\leq \Delta P_{\text{des}}^+; \end{aligned} \quad (10)$$

– расход атмосферного воздуха в питании установки КБА

$$\max_{t \in [0; 0,5t_{\text{ц}}]} G^{\text{in}}(t) \leq G^{\text{in}+}; \quad (11)$$

– управления

$$t_{\text{ц}} \leq t_{\text{ц}} \leq \bar{t}_{\text{ц}}; \quad (12)$$

$$0 \leq \psi_{\lambda}^{j,i} \leq 1, \lambda = \overline{1,4}; j = \overline{1,m}; \quad (13)$$

$$\underline{P}_{\text{ads}}^{\text{in}} \leq P_{\text{ads}}^{\text{in}} \leq \bar{P}_{\text{ads}}^{\text{in}}, \quad (14)$$

где $Y_{1,зад}^{out}$ – заданное значение концентрации кислорода в продукционном потоке воздуха; $Q_{зад}$ – заданное значение производительности (расхода продукционного потока воздуха при концентрации $Y_{1,зад}^{out}$ кислорода) установки КБА; v_g^+ – максимально допустимое значение скорости газовой смеси в слое адсорбента; $\Delta P_{ads}^+, \Delta P_{des}^+$ – максимально допустимые значения перепада давления в адсорбционном слое на стадиях адсорбции и десорбции; $t_{ц}, \bar{t}_{ц}$ – минимальное и максимальное значения продолжительности цикла «адсорбция – десорбция»; $\underline{P}_{ads}^{in}, \bar{P}_{des}^{in}$ – минимальное и максимальное допустимые давления на стадии адсорбции соответственно.

Критерий оптимальности (6) и ограничения (7) – (10) вычисляются через решение уравнений динамики (1) – (5) до наступления нового стационарного периодического режима работы установки КБА. Ограничение максимального значения скорости потока воздуха в «лобовом» слое адсорбента (9) необходимо учитывать при решении задачи оптимизации для предохранения гранулированного адсорбента от разрушения вследствие аэродинамического удара при резком (скачкообразном) открытии регулирующих клапанов $K_1 - K_4$.

Сформулированная аргументная задача оптимизации (6) – (14) относится к классу задач нелинейного программирования, для решения которой будем использовать метод последовательного квадратичного программирования [12].

Разработка алгоритма и системы управления циклическим адсорбционным процессом обогащения воздуха кислородом

Для управления циклическим адсорбционным процессом концентрирования кислорода в установке КБА разработана двухуровневая система управления, в которой на нижнем уровне находятся: контроллер, измерительные преобразователи, исполнительные механизмы; на верхнем уровне: SCADA-система на персональном компьютере.

При разработке алгоритма управления короткоцикловым процессом концентрирования кислорода будем считать, что возмущающие воздействия \mathbf{z}^j являются измеримыми в моменты времени t_i и действуют в течение интервала времени $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 0, 1, 2, \dots$. Алгоритмом управления предусматривается непрерывный контроль текущих значений возмущений $\mathbf{z}^i = \{y_{OC}^i, T_{OC}^i, B_{OC}^i, P^{out,i}\}$ и при их отклонении от номинальных значений осуществляется решение задачи оптимизации (6) – (14) методом последовательного квадратичного программирования. Результатом решения задачи оптимизации являются: оптимальное значение продолжительности цикла $t_{ц}^*$ и законы оптимального изменения степени открытия клапанов $K_1, K_4 - \psi_1^{j*} = \psi_{K_1}^{j,i*}, \psi_4^{j*} = \psi_{K_4}^{j,i*}, j = \overline{1, m}$ на отрезке времени $[0; 0,5t_{ц}]$ и $K_2, K_3 - \psi_2^{j*} = \psi_{K_2}^{j,i*}, \psi_3^{j*} = \psi_{K_3}^{j,i*}$ на отрезке времени $[0,5t_{ц}; t_{ц}]$. Далее на основании рассчитанного оптимального управления производится пересчет циклограммы переключений клапанов $K_1 - K_4$. Программно-логическое управление клапанами реализуется посредством программного задатчика.

Пусть при $t_i = 1600$ с в окружающей среде скачкообразно изменяется температура T_{OC} от номинального значения 293 до 323 К, а также состав воздуха: концентрация кислорода y_1^{in} скачкообразно уменьшается от 20,8 до 20,3 об. %, концентрация примесей y_3^{in} увеличивается от 1,0 до 1,5 об. %. Для этих условий оптимальными управлениями \mathbf{u}^* являются $t_{ц}^* = 31$ с, $\psi_1^{j*} - \psi_4^{j*}$, $j = \overline{1, 10}$ (рис. 3).

Из анализа графиков на рис. 4 следует, что ограничение по ресурсосбережению адсорбента – скорости газовой смеси в «лобовом слое» ($v_g \leq 0,08$ м/с при $x = 0$) выполняется.

Анализ других результатов показывает, что при адаптивной оптимизации режимов функционирования установки КБА степень извлечения кислорода увеличивается в среднем на 9,6 % и выполняются ограничения по чистоте кислорода $y_1^{out} \geq 39$ об. % и производительности установки $Q \geq 2$ нл/мин (табл. 1).

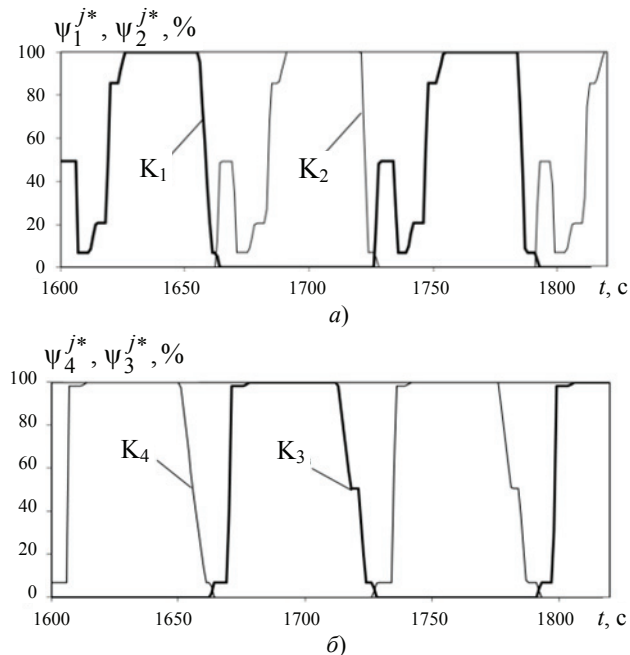


Рис. 3. Динамика степени $\psi_1^{j*}, \psi_2^{j*}, \psi_4^{j*}, \psi_3^{j*}$ открытия впускных K_1, K_2 (а) и сбросных K_3, K_4 (б) клапанов

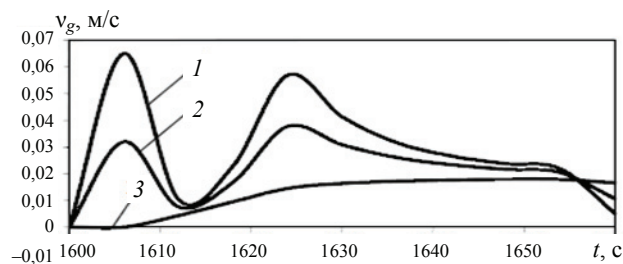


Рис. 4. Динамика скорости воздуха в слое адсорбента при скачкообразном возмущении по температуре окружающей среды (293 ... 323 К):
1 – $x = 0$; 2 – $x = L/2$; 3 – $x = L$

Таблица 1

**Сравнительный анализ работы установки с адаптивной оптимизацией (+)
в системе управления и без адаптивной оптимизации (-)**

Показатели установки КБА	Оптимальные значения для номинального режима	Случайные значения возмущений					
		$T_{OC} = 233 \text{ К}$		$T_{OC} = 323 \text{ К}$		$T_{OC} = 323 \text{ К}$ $y_1^{in} = 20,3 \%$	
		-	+	-	+	-	+
η^* , %	41,5	30,9	40,3	33,1	42,2	31,7	41,9
y_1^{out*} , об. %	39,0	58,7	39,0	25,5	39,0	23,2	39,0
G^{out*} , нл/мин	2,16	1,71	2,12	4,35	2,20	4,41	2,18

Заключение

С использованием методов теории автоматического управления, системного анализа и математического моделирования получены новые научные результаты для проектирования автоматизированных процессов короткоциклового адсорбции и систем управления ими с учетом выполнения требований технологического регламента по степени извлечения и чистоте кислорода, производительности установки КБА и сбережению гранулированного цеолитового адсорбента от разрушения.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ.

Список литературы

1. Шумяцкий, Ю. И. Промышленные адсорбционные процессы: учебное пособие для студентов химико-технологических специальностей вузов / Ю. И. Шумяцкий. – М. : КолосС, 2009. – 184 с.
2. Ruthven, D. M. Pressure Swing Adsorption / D. M. Ruthven, S. Farooq, K. S. Knaebel. – University of New Brunswick Fredericton, NB, Canada. – VCH Publishers, Inc, 1994. – 352 p.
3. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 496 с.
4. Акулов, А. К. Моделирование разделения бинарных газовых смесей методом адсорбции с колеблющимся давлением : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 : защищена 22.02.96 : утв. 08.11.96 / Акулов Аркадий Клавдиевич. – СПб., 1996. – 304 с.
5. Акулинин, Е. И. Исследование процессов тепло- и массообмена при обогащении воздуха кислородом методом короткоциклового адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 411 – 419.
6. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 592 с.
7. Modelling the Process of Air Oxygenation by Nitrogen Adsorption in a Pressure Swing Adsorption Unit / E. I. Akulinin [et al.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 182 – 196.

8. Васильев, А. С. Оптимизация и управление циклическим процессом адсорбционного концентрирования кислорода : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Васильев Александр Сергеевич. – Тамбов, 2018. – 160 с.

9. Farooq, S. Numerical Simulation of a Pressure Swing Adsorption Oxygen Unit / S. Farooq, D. M. Ruthven, H. A. Boniface // Chemical Engineering Science. – 1989. – Vol. 44, No. 12. – P. 2809 – 2816.

10. Versatile Process Simulator for Adsorptive Separations / R. Kumar [et al.] // Chemical Engineering Science. – 1994. – Vol. 49, No. 18. – P. 3115 – 3125.

11. Белоглазов, И. Н. Основы расчета фильтрационных процессов / И. Н. Белоглазов, В. О. Голубев. – М. : Издательский дом «Руда и Металлы», 2002. – 210 с.

12. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике. В 2-х кн. Кн. 2 / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгдел : пер. с англ. : В. Я. Алтаева, В. И. Моторина. – М. : Мир, 1986. – 320 с.

Optimization and Control over the Cyclic Process of Adsorption Enrichment of Air with Oxygen

V. G. Matveykin¹, S. A. Skvortsov¹, E. I. Akulinin², S. I. Dvoretzky²

*Departments of Information Processes and Control (1),
Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries(2),
TSTU, Tambov, Russia; ipu@ahp.tstu.ru*

Keywords: air; dynamics; adsorption isotherm; kinetics; oxygen; short cycle adsorption; mathematical model; optimization; control; zeolite adsorbent.

Abstract: The paper investigates optimization of the process of air enrichment with oxygen (i.e. determination of the maximum degree of oxygen extraction) in a dual-adsorption plant for pressure swing adsorption (PSA), taking into account the requirements for oxygen purity, installation efficiency and resource-saving granular adsorbent. An algorithm and a two-level system of adaptive control of air enrichment with oxygen have been developed; their implementation will provide automatic control of disturbing influences, promptly solving the optimization problem (at the upper level) and correcting tasks for the program generator and regulators of the automatic control system (at the lower level). The use of adaptive optimization in the control system will increase the value of the degree of oxygen extraction in the PSA plant by an average of 10 % (compared to the traditional control system without adaptive optimization) while fulfilling the required limitations on oxygen purity, resource saving of the granular adsorbent and plant capacity.

References

1. Shumyatskiy Yu.I. Promyshlennyye adsorbtsionnyye protsessy [Industrial Adsorption Processes], Moscow: KolosS, 2009, 184 p. (In Russ.)

2. Ruthven D.M., Farooq S., Knaebel K.S. Pressure Swing Adsorption, VCH Publishers, Inc, 1994, 352 p.

3. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.Ye. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical Thermodynamics], Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2008, 496 p. (In Russ.)

4. Akulov A.K. *PhD Dissertation (Technical)*, St. Petersburg, 1996, 304 p. (In Russ.)

5. Akulinin Ye.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. [Study of the Processes of Heat and Mass Transfer During Air Enrichment with Oxygen by the Method of Short-Cycle Adsorption], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 411-419. (In Russ., abstract in Eng.)
 6. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Basics of Adsorption Technology], Moscow: Khimiya, 1984, 592 p. (In Russ.)
 7. Akulinin E.I., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Tugolukov E.N. Modelling the Process of Air Oxygenation by Nitrogen Adsorption in a Pressure Swing Adsorption Unit, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 182-196. (In Eng., abstract in Russ.)
 8. Vasil'yev A.S. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2018, 160 p. (In Russ.)
 9. Farooq S., Ruthven D.M., Boniface H.A. Numerical Simulation of a Pressure Swing Adsorption Oxygen Unit, *Chemical Engineering Science*, 1989, vol. 44, no. 12, pp. 2809-2816.
 10. Kumar R., Fox V.G., Hartzog D.G., Larson R.E., Chen Y.C., Houghton P.A., Naheiri T. Versatile Process Simulator for Adsorptive Separations, *Chemical Engineering Science*, 1994, vol. 49, no. 18, pp. 3115-3125.
 11. Beloglazov I.N., Golubev V.O. *Osnovy rascheta fil'tratsionnykh protsessov* [Basics of Calculation of Filtration Processes], Moscow: Izdatel'skiy dom «Ruda i Metally», 2002, 210 p. (In Russ.)
 12. Rekleytis G., Reyvindran A., Regsdel K. *Optimizatsiya v tekhnike* [Optimization in Engineering], Moscow: Mir, 1986, 320 p. (In Russ.)
-

Optimierung und Steuerung des zyklischen Prozesses der Adsorptionsbereicherung der Luft mit Sauerstoff

Zusammenfassung: Gestellt und erforscht ist das Optimierungsproblem (im Sinne der Bestimmung des maximalen Grads der Sauerstoffextraktion) des Luftanreicherungsprozesses mit Sauerstoff in einer zwei-Wege-Anlage der Druckwechseladsorption (CBA) im Hinblick auf die Anforderungen an die Sauerstoffreinheit, Arbeitsleistung der Anlage und die Ressourcenschonung des granulierten Adsorptionsmittels. Es ist der Algorithmus und das zweistufige System der adaptiven Steuerung des Prozesses der Anreicherung der Luft mit Sauerstoff entwickelt. Ihre Realisierung stellt die automatische Steuerung der störenden Effekte, die operative Lösung des Problems der Optimierung (auf der obersten Ebene) und die Korrektur der Aufgaben an den Software-Sensor und die Regler des automatischen Steuerungssystems (auf der unteren Ebene) zur Verfügung. Die Nutzung der adaptiven Optimierung im Steuersystem wird ermöglichen, den Wert für den Grad der Sauerstoffextraktion bei der CBA-Anlage durchschnittlich um 10 % zu erhöhen (im Vergleich mit der Verwendung des herkömmlichen Managementsystems ohne adaptive Optimierung), wenn die erforderlichen Einschränkungen für die Reinheit von Sauerstoff, die Ressourceneinsparung des granulierten Absorbers und die Leistung der Anlage erfüllt sind.

Optimisation et contrôle du processus cyclique de l'adsorption de l'oxygène de l'air

Résumé: Est fixée et étudiée la tâche de l'optimisation (en ce qui concerne la détermination du degré maximum d'extraction de l'oxygène) du processus d'enrichissement de l'air en oxygène dans une installation à deux étages d'adsorption à

cycle court sans chauffage (ACS), en tenant compte des exigences de la pureté de l'oxygène, de la productivité de l'installation et de la conservation des ressources de l'adsorbant granulaire. Sont mis au point un algorithme et un système de contrôle adaptatif à deux niveaux pour l'enrichissement de l'air en oxygène ce qui permettra un contrôle automatique des effets perturbateurs, une solution d'optimisation opérationnelle (au niveau supérieur) et une correction des tâches aux réglages programmiques et aux régulateurs du système de contrôle automatique (au niveau inférieur). Grâce à l'optimisation adaptative du système de contrôle, la valeur de l'extraction de l'oxygène dans l'installation ACS est augmentée en moyenne de 10 % (par rapport au système de contrôle traditionnel sans optimisation adaptative), tout en respectant les limites de pureté requises, en économisant les ressources l'adsorbant granulaire et la productivité de l'installation.

Авторы: *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; *Скворцов Сергей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Акулинин Евгений Игоревич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «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, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.