

*Г. А. Чернов\**

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
НА ОБОГАЩЕНИЕ ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ  
В ИНДИВИДУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ  
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

При проектировании индивидуальных систем жизнеобеспечения возникает задача обеспечения их эффективной работы в различных внешних и внутренних условиях, что обусловлено наличием неопределенности в исходных данных. При проектировании взаимодействующих с окружающей средой индивидуальных систем жизнеобеспечения, в частности, установок по обогащению воздуха кислородом, необходимо учитывать, что в зависимости от условий работы, концентрация кислорода в атмосферном воздухе может изменяться от 19 до 23%, величина предельного адсорбционного объема адсорбента может изменяться от партии к партии до 30%, температура окружающего воздуха

---

\* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, доцента кафедры «ТОПХП» ФГБОУ ВПО «ТГТУ» Е. И. Акулинина.

может варьироваться от 0 до 40 °С. Кроме того, в зависимости от применяемой формулы, значение коэффициента массоотдачи может изменяться в пределах до 50% от номинального значения.

При изучении влияния условий окружающей среды на величину концентрации кислорода на выходе из установки по обогащению воздуха кислородом будем использовать математическую модель, включающую [1]:

1) уравнение диффузии азота

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \frac{\partial a_i(t)}{\partial t} = -w \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_g(x) \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация азота в газовой фазе, моль/м<sup>3</sup>;  $a$  – концентрация азота в твердой фазе, моль/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_i$  – пористость слоя адсорбента;

2) уравнение изменения концентрации азота в  $i$ -м слое адсорбента

$$V_{ai} \left( \frac{\partial a_i(t)}{\partial t} \right) = \beta S_{ai} \left( a_i^*(\bar{c}_i(t), \bar{T}_{gi}(t)) - c_i(t) \right), \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где  $S_{ai}$  – площадь твердой фазы в  $i$ -м слое адсорбента, м<sup>2</sup>;  $V_{ai}$  – объем  $i$ -го слоя адсорбента, м<sup>3</sup>;

$$\bar{c}_i(t) = (c(x_i, t) + c(x_{i+1}, t)) / 2;$$

3) уравнение изменения скорости газозвушной смеси по высоте адсорбента

$$-\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{M_{N_2}}{\rho_{N_2}} \left( \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{\partial a_i(t)}{\partial t}, \quad (3)$$

где  $w$  – скорость газового потока, м/с;  $M_{N_2}$  – молярная масса азота, г/моль.

Начальные условия для уравнений (1) – (3) имеют вид:  
при  $t = 0$

$$a_i(0) = 0, \quad c(x, 0) = c_0, \quad w(x, 0) = w_0, \quad 0 \leq x \leq H; \quad (4)$$

при  $t = n \times t_{\Pi}, n = 1, 2, \dots$

$$a_i(t) = a_i^{\text{дес}}(t_{\Pi}), \quad c(x, t) = c^{\text{дес}}(x, t_{\Pi}), \quad (5)$$

$$w(x, t) = w^{\text{дес}}(x, t_{\Pi}), \quad 0 \leq x \leq H;$$

– для десорбционного процесса  
при  $(n - 1/2)t_{ц}, n = 1, 2, \dots$

$$a_i^{\text{дес}}(t) = a_i(t_{ц} / 2), \quad c^{\text{дес}}(x, t) = c(x, t_{ц} / 2),$$

$$w^{\text{дес}}(x, t) = w(x, t_{ц} / 2), \quad 0 \leq x \leq H. \quad (6)$$

Граничные условия для адсорбционного процесса при  $(n - 1)t_{ц} \leq t \leq (n - 1/2)t_{ц}, n = 1, 2, \dots$  и десорбционного процесса при  $(n - 1/2)t_{ц} < t \leq nt_{ц}, n = 1, 2, \dots$  принимались следующими:

– для адсорбционного процесса  
при  $x = 0$

$$c^{\text{ад}}(0, t) = c_{\text{вх}}, \quad w^{\text{ад}}(0, t) = w_{\text{вх}}, \quad (7)$$

при  $x = H$

$$\frac{\partial c(H, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial w(H, t)}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

– для десорбционного процесса  
при  $x = 0$

$$\frac{\partial c(H, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial w(H, t)}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

при  $x = H$

$$c^{\text{дес}}(H, t) = c(H, t_{\text{ад}}), \quad w(H, t) = w(H, t_{\text{ад}}). \quad (10)$$

Коэффициенты математической модели рассчитывались по формулам, приведенным в [2].

С целью изучения влияния условий окружающей среды на процесс обогащения воздуха кислородом нами были построены допустимые области значений неопределенных параметров, характеризующих условия окружающей среды при следующих ограничениях: концентрация кислорода на выходе из установки КЦА:  $c_{\text{O}_2}^{\text{вых}} \geq [c_{\text{O}_2}^{\text{вых}}]_{\text{зад}}$ , производительность по смеси, обогащенной кислородом на выходе:  $Q \geq Q_{\text{зад}}$ .

Построение допустимых областей значений неопределенных параметров осуществлялось методом сканирования для заданного диапазона неопределенных параметров (табл. 1) при заданных значениях констант модели (табл. 2).

## 1. Исходные данные для расчета

Характеристика	Диапазон изменения
Коэффициент обратной промывки, $\theta$	[1,4÷2,8]
Длительность цикла $\tau_{ц}$ , с	[2÷6]
Предельный адсорбционный объем $W_0$ , $\text{м}^3 \times 10^{-6}/\text{кг}$	[0,155÷0,205]
Концентрация кислорода в исходной смеси $c_{\text{вх}}$ , % об.	[19÷21]
Температура окружающей среды $T$ , °К	[273÷313]
Коэффициент массоотдачи, $\beta$	[1÷10]· $10^{-3}$

Исходные данные, использованные при построении допустимых областей значений неопределенных параметров, представлены в табл. 1. Расчет производился при следующих значениях варьируемых параметров математической модели: коэффициент обратной промывки  $\theta = [1,4 \div 2,8]$ , длительность цикла адсорбции–десорбции  $\tau_{ц} = [2 \div 6]$  с.

Значения неопределенных параметров лежали в следующих пределах: предельный адсорбционный объем,  $W_0 = [0,155 \div 0,205]$ ,  $\text{м}^3 \times 10^{-6}/\text{кг}$ ; концентрация кислорода в исходной смеси,  $c_{\text{O}_2}^{\text{вх}} = [19 \div 21]$ , % об.; температура окружающей среды,  $T = [273 \div 313]$ , °К; коэффициент массоотдачи  $\beta = [1 \div 10] \times 10^{-3}$ .

## 2. Константы модели

Характеристика	Значение
Высота адсорбера $H$ , м	0,3
Диаметр адсорбера $D$ , м	0,035
Относительный объем вторичных пор адсорбента, $\epsilon$	0,394
Эквивалентный диаметр частиц адсорбента $d_p$ , м	$2 \cdot 10^{-4}$
Характеристическая энергия адсорбции $E_0$ , Дж/моль	16 800
Плотность адсорбента $\rho_a$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	660
Концентрация кислорода на выходе из установки $c_{\text{вых}}$ , % об.	90
Производительность по смеси, обогащенной кислородом $Q_{\text{зад}}$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Анализ полученных данных позволяет заключить, что влияние температуры окружающей среды  $T$  на концентрацию кислорода на выходе из установки  $c_{O_2}^{Вых}$  при заданных ограничениях составляет менее 5%, в то время как основное влияние оказывают значения величины предельного адсорбционного объема адсорбента  $W_0$ , концентрации кислорода в исходной смеси  $c_{O_2}^{Вх}$ , коэффициента массоотдачи  $\beta$ .

Полученные результаты исследований в перспективе должны позволить решать принципиально новые задачи при создании индивидуальных систем жизнеобеспечения с гарантированной работоспособностью в широком диапазоне внутренних и внешних условий. В дальнейшем необходимо разработать алгоритм решения задачи оптимизации конструктивных параметров и режимных переменных установки короткоцикловой адсорбции и разработать методологию проектирования индивидуальных систем жизнеобеспечения в условиях неопределенности исходных данных.

### Список литературы

1. Акулинин, Е. И. Разработка и проектирование энергосберегающих установок короткоцикловой адсорбции на основе математического моделирования и оптимизации тепло- и массообменных процессов // Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 4–6(29). – С. 310–317.

2. Моделирование процесса обогащения воздуха кислородом в установке короткоцикловой адсорбции / Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. Н. Туголуков // Химическая технология. – 2012. – № 4. – С. 247–256.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук в области знания «Технические и инженерные науки», № МК-3075.2014.8.*

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых  
и химических производств»  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*