

УДК 661.935

### РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТАНОВОК КОРОТКОЦИКЛОВОЙ АДСОРБЦИИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Е.И. Акулинин, Д.С. Дворецкий**

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор Н.Ц. Гатапова*

**Ключевые слова и фразы:** концентратор кислорода; математическое моделирование; обогащение воздуха кислородом; оптимальное проектирование; процесс короткоциклового адсорбции; тепло- и массообменные процессы.

**Аннотация:** Рассмотрена задача разработки портативного концентратора кислорода на основе энергосберегающих установок короткоциклового адсорбции, математического моделирования и оптимизации тепло- и массообменных процессов адсорбции. Сформулирована и решена задача оптимального проектирования энергосберегающей адсорбционной установки портативного концентратора кислорода для медицинских целей.

**Обозначения:**  $A$  – множество вариантов аппаратурно-технологического оформления;  $B$  – множество адсорбентов;  $V_T$  – параметр уравнения теории объемного заполнения микропор,  $K^{-2}$ ;  $c_{O_2}^{вых}$  – концентрация кислорода на выходе из установки, % об.;  $C_{pa}$  – теплоемкость адсорбента,  $Дж \cdot (кг \cdot K)^{-1}$ ;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр адсорбера, м;  $d_3$  – эквивалентный диаметр каналов, м;  $E_0$  – характеристическая энергия адсорбции,  $Дж \cdot моль^{-1}$ ;  $H$  – высота адсорбера, м;  $M$  – масса адсорберов, кг;  $M_K$  – масса концентратора, кг;  $k_p$  – коэффициент давления;  $P_{адс}$  – давление адсорбции, Па;  $P_{дес}$  – давление десорбции, Па;  $Q$  – производительность установки,  $м^3 \cdot с^{-1}$ ;  $W_0$  – предельный адсорбционный объем,  $см^3 \cdot г^{-1}$ ;  $\varepsilon_2$  – относительный объем вторичных пор,  $м^3 \cdot м^{-3}$ ;  $\varepsilon_3$  – пористость,  $м^3 \cdot м^{-3}$ ;  $\tau_{ц}$  – длительность цикла, с;  $\theta$  – коэффициент обратной промывки;  $\zeta_{N_2}$  – коэффициент аффинности по азоту;  $\rho_a$  – плотность адсорбента,  $кг \cdot м^{-3}$ ;  $N$  – потребляемая мощность, Вт.

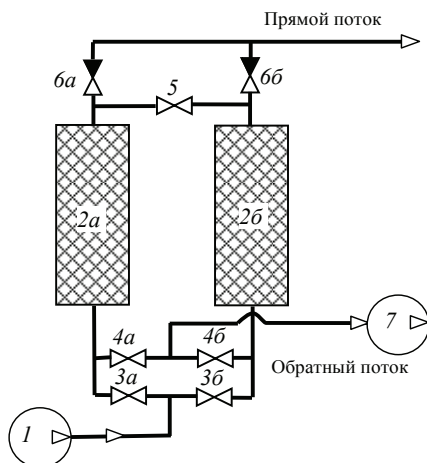
---

Акулинин Е.И. – аспирант кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии»; Дворецкий Д.С. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии», e-mail: topt@topt.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

## Введение

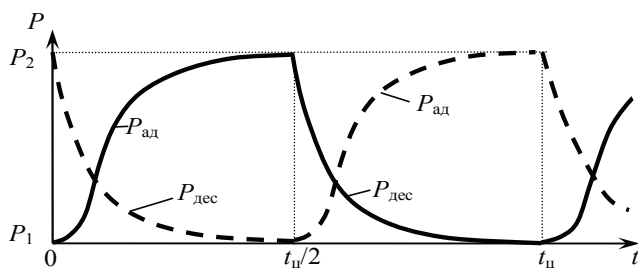
Интенсивное развитие техники и технологии короткоцикловой адсорбции позволило вплотную подойти к созданию высокоэффективных и одновременно достаточно простых и дешевых энергосберегающих установок по обогащению воздуха кислородом. Из проведенного нами литературно-патентного обзора следует, что из набора альтернативных вариантов технологических схем процесса обогащения воздуха кислородом наиболее экономичной, простой и надежной является двухадсорберная схема (рис. 1) с вакуумной десорбцией [1–4].

Принцип работы двухадсорберной схемы с вакуумной десорбцией (см. рис. 1) заключается в циклическом чередовании осуществления процессов адсорбции и десорбции азота в параллельно работающих адсорберах. В результате обеспечивается непрерывный поток воздуха, обогащенного кислородом, на выходе из установки. На входе в установку поток газовой смеси компрессором 1 подается в адсорбер 2а, заполненный адсорбентом. Процесс адсорбции азота осуществляется адсорбентом полойно при нарастании давления от  $P_1$  до  $P_2$  на отрезке времени от 0 до  $t_{ц}/2$  (на рис. 2 зависимость  $P_{ад}(t)$ ), обогащая при этом газозвудушную смесь кислородом (прямой поток на выходе из установки). Процесс адсорбции



**Рис. 1. Схема установки короткоцикловой адсорбции:**

1 – компрессор; 2а, 2б – адсорберы; 3а, 3б, 4а, 4б – управляемые клапаны; 5 – дросселирующий вентиль; 6а, 6б – обратные клапаны; 7 – вакуум-насос



**Рис. 2. Циклограмма работы установки короткоцикловой адсорбции**

азота в слое адсорбента протекает с выделением тепла, которое накапливается в слое и используется для его последующей регенерации наряду с противоточной промывкой.

Часть прямого потока газозвушной смеси дросселируют до пониженного давления, создаваемого вакуум-насосом 7 с помощью вентиля 5, и направляют противотоком в адсорбер 2б для промывки – десорбции азота из адсорбента при понижении давления от величины  $P_2$  до 0 на отрезке времени от  $t_{ц}/2$  до  $t_{ц}$  (см. рис. 2 зависимость  $P_{дес}(t)$ ). В результате адсорбент в адсорбере 2б регенерируется.

При закрытии клапанов 3а и 4б и открытии клапанов 3б и 4а адсорберы установки короткоцикловой адсорбции меняют назначение: в адсорбере 2а осуществляется десорбция азота, а в адсорбере 2б – адсорбция азота и обогащение воздуха кислородом. При обратном действии клапанов цикл повторяется.

Перейдем к постановке задачи аппаратурно-технологического оформления процесса обогащения воздуха кислородом в установке короткоцикловой адсорбции.

### Постановка задачи и алгоритм оптимального проектирования энергосберегающих адсорбционных установок

Задача оптимального проектирования установки короткоцикловой адсорбции (по критерию приведенных затрат (ПЗ)) формулируется следующим образом: для двухадсорберной схемы и типа аппаратурного оформления  $a \in A$  адсорбционной установки при заданных значениях производительности  $Q_{зад}$  и концентрации кислорода  $c_{O_2}^{вых}$  на выходе из установки требуется определить конструктивные параметры (тип  $b \in B$  адсорбента, высоту слоя  $H$  адсорбента, диаметр  $D_{вн}$  адсорбера) и режимные переменные (значения давлений  $P_{ад}$ ,  $P_{дес}$ , длительность цикла  $\tau_{ц}$ , коэффициент обратной промывки  $\theta$ ), при которых достигается минимум приведенных затрат на создание установки. Математическая постановка задачи имеет вид:

$$ПЗ(a, b, H, D_{вн}, P_{ад}, P_{дес}, \tau_{ц}, \theta) \rightarrow \min_{a, b, H, D_{вн}, P_{ад}, P_{дес}, \tau_{ц}, \theta} \quad (1)$$

при связях в форме уравнений математической модели нестационарного процесса обогащения воздуха кислородом [5, 6] и ограничениях:

$$\begin{aligned} Q(a, b, H, D_{вн}, P_{ад}, P_{дес}, \tau_{ц}, \theta) &= Q_{зад}; \\ c_{O_2}^{вых}(a, b, H, D_{вн}, P_{ад}, P_{дес}, \tau_{ц}, \theta) &\geq [c_{O_2}^{вых}]_{зад}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$M(a, b, H, D_{вн}, P_{ад}, P_{дес}, \tau_{ц}, \theta) \leq \hat{M};$$

$$k_p \leq \hat{k}_p; \quad H \leq \hat{H}; \quad D_{вн} \leq \hat{D},$$

где  $\hat{k}_p, \hat{H}, \hat{D}_{вн}$  – максимально допустимые значения коэффициента давления и габаритов адсорберов установки.

Решение уравнений математической модели нестационарного процесса обогащения воздуха кислородом осуществляется методом Гира в программной среде MatLab [7]. Сформулированная задача (1), (2) относится к классу задач нелинейного программирования, для решения которой будем использовать метод последовательного квадратичного программирования [7]. Схема алгоритма оптимального проектирования энергосберегающей адсорбционной установки представлена на рис. 3.

В блоке 1 формулируются исходные данные [5] и разрабатывается техническое задание на проектирование энергосберегающей адсорбционной установки.

В блоке 2 осуществляется выбор структуры установки короткоцикловой адсорбции и аппаратурно-технологического оформления процесса обогащения воздуха кислородом из множества  $A$ . Множество  $A$  вариантов аппаратурно-технологического оформления включает следующие возможные схемы установок: 1) без выравнивания давления между адсорберами и с выравниванием давления; 2) одноадсорберные и многоадсорберные; 3) напорные, с вакуумной десорбцией, вакуум-напорные; 4) типы адсорберов: колонные, с развернутой шихтой и т.д.

В блоке 3 осуществляется выбор типа адсорбента  $b$  из множества  $B$ . Множество  $B$  включает следующие типы и формы адсорбентов различной структуры: силикагели, активные угли, цеолиты, активный оксид алюминия и т.д.; гранулированный, блочный, рулонный, сотовый, соответственно.

В блоке 4 решается задача оптимизации (1), (2) для выбранных типов аппаратурно-технологического оформления  $a^{(v)} \in A$  и адсорбента  $b \in B$ .

В результате решения задачи оптимизации определяются оптимальные значения конструктивных параметров  $H^{(v)}$ ,  $D_{\text{вн}}^{(v)}$  и режимных переменных  $P_{\text{ад}}^{(v)}$ ,  $P_{\text{дес}}^{(v)}$ ,  $\tau_{\text{ц}}^{(v)}$ ,  $\theta^{(v)}$  установки короткоцикловой адсорбции.

В блоке 5 осуществляется проверка выполнения требований технического задания (**ТЗ**) для выбранного типа аппаратурно-технологического оформления  $a^{(v)}$ . В случае, если требования технического задания выполняются, осуществляется переход к блоку 7, в противном случае – к блоку 6.

В блоке 7 проверяется выполнение условия: «Рассматривается начальный вариант аппаратурного оформления (**АО**), то есть  $v = 0$ ?». Если «Да», то переходим к блоку 8, в противном случае – к блоку 9.

В блоке 8 выбирается новый вариант АО  $a^{(v+1)}$  и вновь решается задача оптимизации (1), (2) в блоке 4.

В блоке 6 осуществляется проверка выполнения условия: «Множество типов адсорбентов  $B$  исчерпано?». Если «Да», то переходим к блоку 10, в противном случае – к блоку 3.

В блоке 9 осуществляется попарное сравнение альтернативных вариантов аппаратурного оформления  $a^{(v)}$  и  $a^{(v-1)}$  по величине приведенных затрат (**ПЗ**). Если  $\text{ПЗ}^{(v)} < \text{ПЗ}^{(v-1)}$ , то принимаем в качестве оптимального варианта  $a^*$  установки короткоцикловой адсорбции вариант  $a^{(v)}$ , то есть  $a^* = a^{(v)}$ . При этом минимальные приведенные затраты составляют  $\text{ПЗ}^* = \text{ПЗ}(a^{(v)})$ . Если  $\text{ПЗ}^{(v)} > \text{ПЗ}^{(v-1)}$ , то вариант  $a^{(v)}$  далее не рассматривается, а минимальные приведенные затраты составляют  $\text{ПЗ}^* = \text{ПЗ}a^{(v-1)}$ .

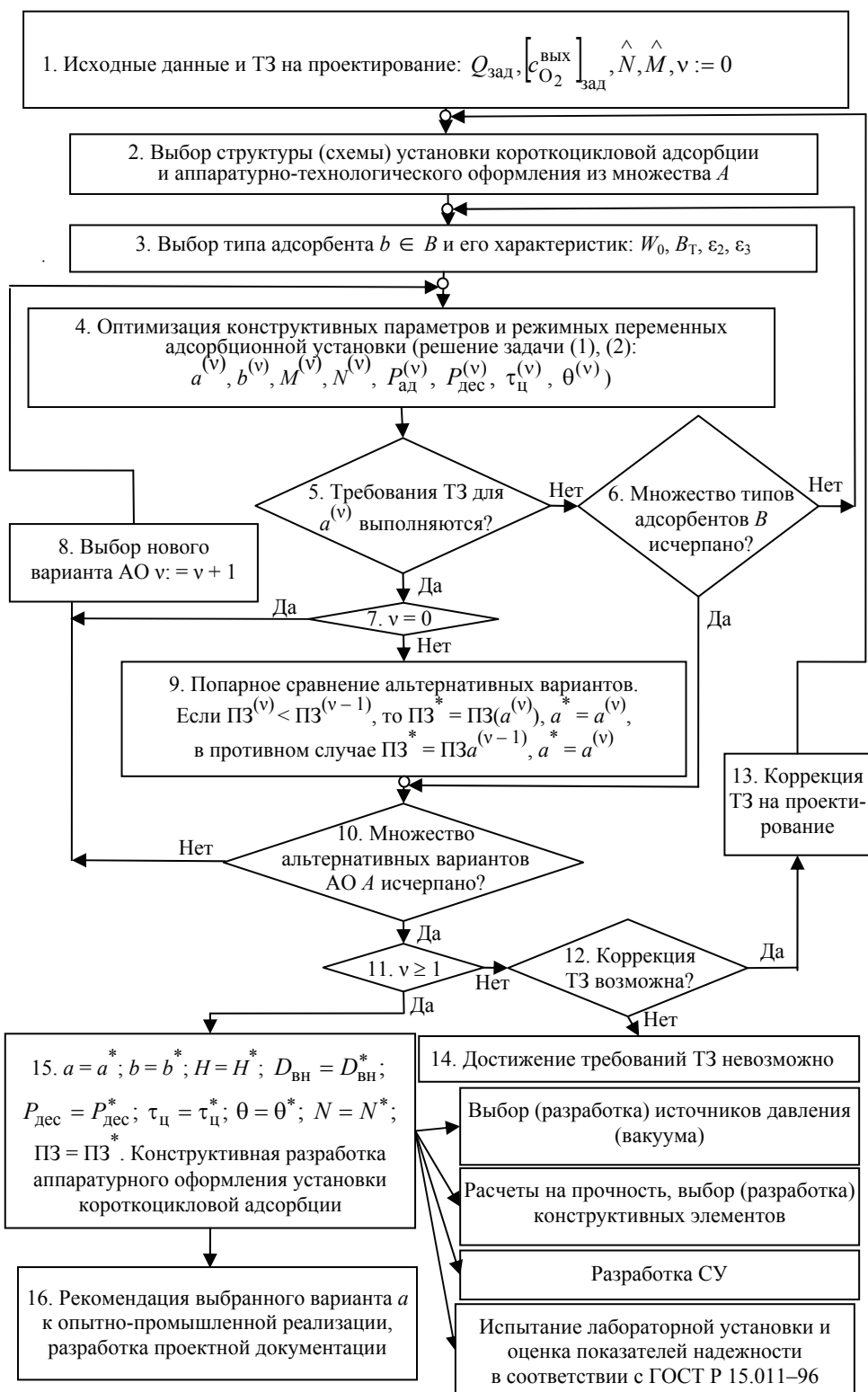


Рис. 3. Схема алгоритма оптимального проектирования энергосберегающих адсорбционных установок

В блоке 10 осуществляется проверка выполнения условия: «Множество  $A$  альтернативных вариантов исчерпано?». Если «Да», то переходим к блоку 11, в противном случае – к блоку 8.

В блоке 11 осуществляется проверка выполнения условия: «Хотя бы один вариант аппаратурного оформления удовлетворяет требованиям ТЗ, то есть  $v \geq 1$ ?». Если «Да», то переходим к блоку 15, в противном случае – к блоку 12.

Поскольку не было получено ни одного варианта аппаратурно-технологического оформления, удовлетворяющего требованиям ТЗ, то в блоке 12 осуществляется проверка выполнения условия: «Коррекция ТЗ возможна?». Если «Да», то в блоке 13 осуществляется изменение ТЗ и осуществляется переход к блоку 2, в противном случае – к блоку 14.

В блоке 15 осуществляется конструктивная разработка аппаратурного оформления портативного концентратора кислорода.

В блоке 16 конструктивная разработка оптимального варианта портативного концентратора кислорода рекомендуется к опытно-промышленной реализации, и разрабатывается проектная документация на изготовление.

### **Пример оптимального проектирования энергосберегающей установки короткоцикловой адсорбции медицинского концентратора кислорода**

С использованием предложенного алгоритма оптимального проектирования энергосберегающей установки короткоцикловой адсорбции (см. рис. 3) осуществляется разработка портативного медицинского концентратора кислорода. Техническое задание на проектирование портативного медицинского концентратора кислорода включает следующие требования: производительность концентратора –  $Q_{\text{зад}} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , концентрация кислорода на выходе из аппарата –  $\left[ c_{\text{O}_2}^{\text{ВЫХ}} \right]_{\text{зад}} \geq 90 \%$ ; масса адсорберов  $M$  установки, отношение давления адсорбции  $P_{\text{ад}}$  к давлению десорбции  $P_{\text{дес}}$ , высота слоя адсорбента  $H$  и диаметр адсорбера  $D_{\text{вн}}$  не должны превышать максимально допустимых значений:  $\hat{M} = 0,6 \text{ кг}$ ,  $k_p = P_{\text{ад}}/P_{\text{дес}} = 3$ ;  $\hat{H} = 0,4 \text{ м}$ ;  $\hat{D}_{\text{вн}} = 0,1 \text{ м}$ , соответственно.

В качестве альтернативных вариантов аппаратурно-технологического оформления рассматривались адсорбер колонного типа; двухадсорберная схема без выравнивания давлений между адсорберами; двухадсорберная схема с выравниванием давлений; четырехадсорберная схема с выравниванием давлений и пятиадсорберная схема с двумя операциями выравнивания давлений. Для каждого варианта анализировались следующие схемы организации процесса обогащения воздуха кислородом: напорная; с вакуумной десорбцией; вакуум-напорная. Всего оценивались 12 вариантов аппаратурно-технологического оформления и два типа адсорбента: гранулированный и блочный (NaX и LiLSX).

Результаты оптимального (по критерию приведенных затрат) проектирования адсорбционной установки медицинского концентратора кислорода с использованием предложенного алгоритма (см. рис. 3) представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты проектирования портативного  
медицинского концентратора кислорода**

Наименование	Вариант аппаратного оформления установки, характеристики адсорбента, оптимальные значения конструктивных параметров и режимных переменных
Установка	Двухадсорберная установка с вакуумной десорбцией
Адсорбент	Блочный на основе цеолита LiLSX, $E_0 = 16800 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ; $\varepsilon_2 = 0,394$ ; $B_T = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ ; $\zeta_{N_2} = 1$ ; $W_0 = 0,126 \text{ см}^3\cdot\text{г}^{-1}$ ; $\rho_a = 660 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ; $d_s = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-3}$
Конструктивные параметры	$H^* = 0,18 \text{ м}$ ; $D_{\text{вн}}^* = 0,035 \text{ м}$
Режимные переменные	$P_{\text{ад}}^* = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; $P_{\text{дес}}^* = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; $\theta^* = 1,45$ ; $\tau_{\text{ц}}^* = 1,6 \text{ с}$ ; расход исходной газовой смеси $Q_{\text{исх}}^* = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}$
Технико-экономические показатели	$P_3^* = 48050 \text{ руб.}$ ; $M^* = 0,4 \text{ кг}$ ; $N^* = 76 \text{ Вт}$

На основании выбранных оптимальных характеристик осуществляем конструктивную разработку аппаратно-технологического оформления портативного медицинского концентратора кислорода. Для создания лабораторной установки медицинского концентратора кислорода осуществляем выбор: вакуум-напорного компрессора типа РУТС (1 шт.) [8]; миниатюрных электромагнитных трехходовых клапанов (2 шт.); обратных клапанов (3 шт.); дросселирующего вентиля (1 шт.); регулировочного вентиля (1 шт.) [9]; блока управления и индикации (1 шт.) [10]. С учетом веса выбранных устройств, масса концентратора кислорода составляет  $M_k = 2,19 \text{ кг}$ . Далее планируется разработка проектной документации для изготовления опытной партии портативных медицинских концентраторов и проведения испытаний на соответствие эксплуатационных характеристик концентратора европейским и российским стандартам.

### Заключение

По сравнению с существующими мировыми аналогами технико-экономические показатели спроектированного медицинского концентратора кислорода (масса и энергопотребление) снижены на 25 и 20 %, соответственно. При этом на 40 % уменьшилась стоимость портативного медицинского концентратора кислорода производительностью  $0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ .

#### *Список литературы*

1. Кёпсель, К. Применение технологии короткоциклового адсорбции для получения азота и кислорода из воздуха / К. Кёпсель // Техн. газы. – 2001. – № 1. – С. 29–33.
2. Кёпсель, К. Разновидности установок для производства технического кислорода из воздуха с использованием короткоциклового адсорбции / К. Кёпсель // Техн. газы. – 2001. – № 4. – С. 33–37.

3. Кёпсель, К. Основные направления совершенствования установок короткоциклового адсорбции для производства азота / К. Кёпсель // Техн. газы. – 2003. – № 1. – С. 37–42.

4. Современные тенденции по уменьшению энергозатрат кислород-добывающих установок короткоциклового безнагревной адсорбции / Е.И. Акулинин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 597–601.

5. Математическое моделирование процесса обогащения кислородом воздуха в установке короткоциклового адсорбции / Е.И. Акулинин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 341–355.

6. Моделирование процесса короткоциклового адсорбции в портативных дыхательных аппаратах / Е.И. Акулинин [и др.] // Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития) в 3 т. Т. 2 : сб. тр. III межд. науч.-техн. конф., Воронеж, 24–25 сентября / Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж, 2009. – С. 355–358.

7. Дьяконов, В.В. Математические пакеты расширения MATLAB : Спец. справ. / В.В. Дьяконов, В.А. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.

8. Исследовано в России [Электронный ресурс] : сайт компании BLM synergie. – Режим доступа : <http://www.blms.ru>. – Загл. с экрана.

9. Исследовано в России [Электронный ресурс] : каталог товаров ООО «Техимпорт». – Режим доступа : <http://www.tehimport.ru.htm>. – Загл. с экрана.

10. Исследовано в России [Электронный ресурс] : сайт ООО «Сканти Рус», официального дистрибьютор фирмы Texas Instruments в России и странах СНГ. – Режим доступа : <http://www.scanti.ru.htm>. – Загл. с экрана.

---

## **Development and Designing Energy-Saving Devices for Short-Cycle Adsorption on the Basis of Mathematical Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes**

**E.I. Akulinin, D.S. Dvoretzky**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key word and phrases:** enrichment of air with oxygen; heat and mass transfer processes; optimal designing; oxygen concentrator; mathematical modeling; short-cycle adsorption process.

**Abstract:** The paper studies the problem of designing a portable oxygen concentrator on the basis of energy-saving devices for short-cycle adsorption, mathematical modeling and optimization of heat and mass transfer processes of adsorption. The task of optimal designing of energy-saving adsorption device of portable oxygen concentrator for medical purposes is formulated and solved.

---

© Е.И. Акулинин, Д.С. Дворецкий, 2010