# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ АДСОРБЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

# М. Х. Х. Альруйшид<sup>1</sup>, Б. С. Дмитриевский<sup>1</sup>, А. А. Терехова<sup>1</sup>, А. А. Ишин<sup>2</sup>, С. А. Скворцов<sup>3</sup>

Кафедра «Информационные процессы и управление» (1), terehova.aa@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; ООО «Энерготехпроект» (2), Тамбов, Россия; ООО «Инновационные химические технологии и продукты» (3), г. Тамбов, Россия

**Ключевые слова:** адсорбент; адсорбция; математическая модель; система управления; цеолит.

Аннотация: Рассмотрена структура математической модели шестиадсорберной установки для концентрирования водорода. Предложена адаптивная система оптимального управления технологическим процессом. Приведены результаты имитационных расчетов динамических режимов работы системы.

Обозначения							
D <sub>z</sub> – коэффициент продольной диффу-	<i>v</i> <sub>g</sub> – линейная скорость газа, м/с;						
зии, м <sup>2</sup> /с;	<i>w</i> – величина сорбции, моль/кг;						
a – удельная поверхность гранул, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> ;	<i>w<sup>p</sup></i> – равновесная величина сорбции,						
<i>b</i> <sub><i>k</i></sub> – эмпирические параметры изотермы;	моль/кг;						
с – концентрация компоненты газовой	β <sub>ℓ</sub> – кинетический коэффициент 1/с.						
смеси, моль/м;	$\Delta H$ – тепловой эффект сорбнии						
$c_{ps}, c_{vg}$ – удельные теплоемкости твер-	Лж/моль.						
дои и газовои фаз соответственно, Пу/(кг К):	$\Delta n = n = 0$						
d – лиаметр гранул частиц алсорбцион-	$\varepsilon_s \varepsilon_s$ – порозности слоя сороента, отн. ед.,						
ного слоя, м;	соответственно осз учета и с учетом по-						
К - коэффициент теплопередачи «газо-							
вая фаза – твердая фаза», Дж/(м <sup>2</sup> с);	$\Lambda_{gz}$ – коэффициент теплопроводности,						
Кс-коэффициент теплопередачи «газо-	Вт/(м К);						
вая фаза-окружающая среда», Дж/(м <sup>2</sup> с);	µ – коэффициент динамической вязко-						
<i>М</i> – молярная масса, кг/моль;	сти газовой смеси, Па с;						
<i>n</i> – число компонент газовой смеси;	ρ, ρ <sub>s</sub> – плотности соответственно газо-						
$T_c, T_g, T_s$ – температуры, К, соответст-	вой смеси, моль/м <sup>3</sup> , и твердой фазы,						
венно окружающеи среды, газовои и твердой фаз.	кг/м <sup>3</sup>						
n ibopgon was,							

## Введение

С ростом глобального энергопотребления и ужесточением мер по защите окружающей среды становится неизбежным курс на дальнейшее развитие зеленой энергетики. Водород в настоящее время считается наиболее перспективным

Transactions TSTU. 2022. Том 28. № 1. ISSN 0136-5835.

и экологически чистым энергоносителем в XXI веке благодаря высокой энергоемкости. Он широко используется во многих областях, таких как нефтехимическая промышленность, металлургическая отрасль, космонавтика и др.

Количество чистого водорода в природе мало, что обуславливает необходимость его промышленного производства. Метод паровой конверсии метана (англ. Steam Methane Reforming (SMR)) остается одним из самых экономичных способов производства водорода. Однако водород, произведенный в ходе SMR-процесса, содержит ряд примесей других газов. Для извлечения водорода из газовой смеси используются преимущественно безнагревные адсорбционные системы – короткоцикловая безнагревная адсорбция (КБА) (англ. Pressure Swing Adsorption (PSA)). Адсорбенты, применяемые при очистке водорода: кальциевый и натриевый цеолиты, активный уголь и пр.

Цель работы – предложить эффективную систему управления процессом адсорбционного извлечения водорода из газового потока SMR-процесса, обеспечивающую решение задачи управления в условиях неконтролируемых возмущений.

#### Теоретическая часть

Рассмотрим схему шестиадсорберного газоразделительного модуля для извлечения водорода из продукционного газа (рис. 1) [1]. Функционирование адсорберов обеспечивается периодическим открытием/закрытием запорной арматуры. Исходная газовая смесь поступает в адсорберы  $A_1, ..., A_6$  через клапаны  $K_{1,1}$ , К2.1, ..., К6.1 соответственно. В установке используется двухслойный адсорбент активный уголь и СаА. Продукт выводится из адсорбционного модуля через К1.2, К22, ..., К62. Через запорную арматуру К13, К23, ..., К63 сбрасывается продувочный газ из колонн. Оставшаяся запорная арматура необходима для перепуска газа между колоннами. Каждый адсорбер проходит ряд стадий адсорбционного процесса согласно программе на рис. 2 [1].



Рис. 1. Шестиадсорберный модуль концентрирования водорода

Этон	Адсорбер						
Jian	A1	A2	A3	A4	A5	A6	
1	АД	ВД1'	ВД3'	СБ	ВДЗ	ВД1	
2	АД/ПВ	ПД'	ВД2'	Р	ПР	ВД2	
3	АД			ВД4'	ВД4'		
4	ВД1	АД	ВД1'	ВДЗ'	СБ	ВДЗ	
5	рπэ	АД/ПД	пπ,	ВД2'	Р	ПР	
6	БД2	АД	пд		ВД4'	ВД4'	
7	ВДЗ	ВД1	АД	ВД1'	ВД3'	СБ	
8	ПР	ВД2	АД/ПД	пд'	ВД2'	Р	
9	ВД4'		АД			ВД4'	
10	СБ	ВДЗ	ВД1	АД	ВД1'	ВД3'	
11	Р	ПД	ВД2 <u>АД/ПД</u> АД	рπэ	АД/ПД	пл,	рπ <b>э</b> ,
12	ВД4'	ВД4'		пд	БД2		
13	ВД3'	СБ	ВДЗ	ВД1	АД	ВД1'	
14	рπ <b>э</b> ,	Р	ПД	рπэ	АД/ПД	пд'	
15	БД2	ВД4'	ВД4'	БД2	АД		
16	ВД1'	ВД3'	СБ	ВДЗ	ВД1	АД	
17	пп,	рл2,	Р	ПР	рπэ	АД/ПД	
18	пд	БД2	ВД4'	ВД4'	БД∠	AД	

Рис. 2. Программа технологического процесса адсорбционной очистки водорода в шестиадсорберном модуле: АД – адсорбция; ВД – выравнивание давления (перепуск газа); ПР – продувка; СБ – сброс;

АД – адсороция, БД – выравнивание давления (перепуск газа), пр – продувка, СБ – сорос,

Р – регенерация; ПД – подъем давления (знак « ' » указывает на адсорбер, принимающий газ на стадии выравнивания и подъема давления)

Для математического описания процессов, протекающих в каждой колонне, выполним привязку прямоугольной системы координат Охуг (рис. 3) и зададимся следующими допущениями [2]:

- слой адсорбента состоит из гранул одного размера;
- сорбционные свойства адсорбента постоянны;
- конвективный массоперенос происходит только по оси Oz;
- коэффициенты диффузии и массопередачи постоянны;
- термодиффузии в газовой и твердой фазах постоянны;
- влияние стенок адсорбера на теплообмен пренебрежимо мало;
- исходная газовая смесь рассматривается как идеальный газ.



Рис. 3. Система координат Охуг в адсорбере

Transactions TSTU. 2022. Том 28. № 1. ISSN 0136-5835.

Запишем следующее математическое описание с учетом представленных выше допущений.

Уравнения связи для плотности газа и концентраций компонент газовой фазы:

– материальный баланс [3]

$$\frac{\partial (v_g c_k)}{\partial z} + \frac{\partial c_k}{\partial \tau} + \left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s}\right) \frac{\partial w_k}{\partial \tau} - D_{zk} \frac{\partial^2 c_k}{\partial z^2} = 0;$$
(1)

- кинетика адсорбции [4]

$$\frac{\partial w_k}{\partial \tau} = \beta_k \left( w_k^{\rm p} - w_k \right). \tag{2}$$

Изотерма сорбции описывается уравнением Ленгмюра для многокомпонентной газовой смеси [5]

$$w_{k}^{p} = \frac{\left(b_{1,k} - b_{2,k}T_{s}\right)b_{3,k}e^{b4,k/T_{s}}P_{k}}{1 + \sum_{j} b_{3,j}e^{b4,j/T_{s}}P_{j}}.$$
(3)

Уравнение сохранения импульса представлено уравнением Эргуна [6]

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -150 \frac{1-\varepsilon}{d^2 \varepsilon^2} \mu v_g - 1,75 M \rho \frac{1-\varepsilon}{d\varepsilon} v_g^2.$$
(4)

Тепловой баланс для газовой фазы [7]

$$v_g c_{vg} \rho \frac{\partial T_g}{\partial z} + \varepsilon c_{vg} \rho \frac{\partial T_g}{\partial \tau} - \lambda_{gz} \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} - Ka \left( T_g - T_s \right) + \frac{4K_c}{2r} \left( T_g - T_c \right) = 0.$$
 (5)

Уравнение теплового баланса для твердой фазы [7]

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} + \sum_{k=1}^n \left( \Delta H_k \frac{\partial w_k}{\partial \tau} \right) - Ka \left( T_g - T_s \right) = 0.$$
(6)

Решение уравнений модели (1) – (7) проводилось методом прямых. Уравнения в частных производных преобразуются в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), решаемую методом Рунге-Кутты четвертого порядка [8].

Для разработки системы управления рассмотрим технологический процесс адсорбционного извлечения водорода как объект управления (рис. 4).



Управляющие воздействия

Рис. 4. Анализ технологического процесса как объекта управления (ОУ)

К входным переменным адсорбционного процесса относятся:

- состав исходной смеси 
$$y^{Bx} = (y^{H_2}_{Bx}; y^{CO_2}_{Bx}; y^{CO_2}_{Bx}; y^{CH_4}_{Bx}; y^{N_2}_{Bx});$$

- температура исходной смеси  $T^{BX}$ ;
- давление на входе адсорбционного модуля Р<sup>вх</sup>;
- давление на продукционном выходе адсорбционного модуля *Р*<sup>прод</sup>;
- давление на сбросном выходе адсорбционного модуля Р сбр;
- положение клапана на входе адсорбционного модуля ψ<sub>7</sub>;
- длительность адсорбционной стадии  $\tau_{adc}$ .

К выходным переменным относятся:

- состав продукционной газовой смеси  $y^{\text{прод}} = \left(y_{\text{прод}}^{\text{H}_2}; y_{\text{прод}}^{\text{CO}_2}; y_{\text{прод}}^{\text{CO}}; y_{\text{прод}}^{\text{CH}_4}; y_{\text{прод}}^{\text{N}_2}\right);$
- температура продукционной газовой смеси *Т*<sup>прод</sup>;
- расход продукционной газовой смеси (производительность) G<sup>прод</sup>;
- расход исходной газовой смеси G<sup>вх</sup>;

- давление адсорбции Р<sup>адс</sup>;

степень извлечения целевого газа η.

Особенностью рассматриваемого технологического процесса является большое количество запорной арматуры на соединительных трубопроводах адсорберов, переключение которой должно производиться в определенной последовательности. Нарушение заданной последовательности приведет к падению качественных показателей процесса и необходимости аварийной блокировки адсорбционного модуля. Таким образом, автоматизация программно-логического управления является важной составляющей разрабатываемой системы управления.

Кроме задачи программно-логического управления в данном технологическом процессе требуется регулирование рабочего давления водородсодержащей газовой смеси, поступающей на очистку в адсорбер. Необходимость регулирования давления адсорбции связана с возможными неконтролируемыми колебаниями давления поступающего в установку газа, а также со сложным характером протекания адсорбционного процесса, в котором важную роль играет давление в адсорбере. Регулирование давления газа проводится с помощью регулирующей запорной арматуры.

Другим важным параметром адсорбционного процесса является время адсорбционного цикла, от которого в значительной степени зависят качественные показатели адсорбционного процесса. Основным этапом адсорбционного цикла является стадия адсорбции. Время цикла может изменяться в широких пределах с помощью программного задатчика.

Таким образом, управляющими воздействиями для рассматриваемого адсорбционного процесса являются:

– длительность стадии адсорбции тадс;

 – степень открытия регулирующей арматуры на трубопроводе подачи исходной смеси ψ<sub>7</sub>.

Определение задачи управления может быть дано следующим образом:

В установленных диапазонах возмущающих воздействий необходимо определить вектор допустимых управлений  $u = (\psi_7, \tau_{adc})$ , при котором целевая функция достигает максимума

$$\Phi(\boldsymbol{u}^{*}) = \max_{\boldsymbol{u} = \{\psi_{7}, \tau_{a,ac}\}} \eta^{H_{2}}(\boldsymbol{u}) = \max_{\boldsymbol{u} = \{\psi_{7}, \tau_{a,ac}\}} \left\{ \begin{array}{l} \int_{0}^{\tau_{k}} y_{\text{прод}}^{H_{2}}(\boldsymbol{u}) G_{\text{прод}}(\boldsymbol{u}) d\tau \\ \int_{0}^{\tau_{k}} y_{\text{Bx}}^{H_{2}}(\boldsymbol{u}) G_{\text{Bx}}(\boldsymbol{u}) d\tau \end{array} \right\}$$
(7)

и выполняются следующие ограничения:

$$\underline{y_{\text{npod}}^{\text{H}_2}} \le y_{\text{npod}}^{\text{H}_2};$$
(8)

$$\underline{\eta^{\mathrm{H}_2}} \le \eta^{\mathrm{H}_2}; \tag{9}$$

$$\underline{G}^{\mathrm{BX}} \le G^{\mathrm{BX}} \le G^{\mathrm{BX}}; \tag{10}$$

$$P^{\mathrm{adc}} \le P^{\mathrm{BX}} \tag{11}$$

при выполнении уравнений связи математической модели (1) – (7).

Управление адсорбционным процессом концентрирования водорода может осуществляться системами управления различных типов. Для практического решения задачи предлагается применение адаптивной системы управления.

Выбор адаптивной системы позволит повысить качество управления при изменениях параметров объекта и отклонениях возмущений от расчетных значений [9]. Поскольку необходимо поддержание максимума целевой функции, то система управления должна обеспечивать автоматическую оптимизацию качества управления. Структурная схема системы управления представлена на рис. 5.

Алгоритмом управления предусматривается двухмодельный комплекс с эталонной и замещающей моделью в контуре управления. Эталонная модель процесса применяется на верхнем уровне, в то время как замещающая модель функционирует в контроллере на нижнем уровне системы управления.

Алгоритм предусматривает постоянный контроль возмущений. При выходе величины возмущения из допустимого диапазона решается задача условной оптимизации с помощью замещающей модели ТП на нижнем уровне системы.



## Рис. 5. Структурная схема системы управления:

ПЗ – программный задатчик; ЛЭ – логический элемент; Д – датчик; Р – регулятор; ИМ – исполнительный механизм; К – клапан

Обеспечивается периодическая реидентификация замещающей модели с использованием эталонной модели ТП, необходимая в связи с дрейфом характеристик адсорбентов (параметров зернистого слоя). С заданной периодичностью производятся расчеты по эталонной модели с учетом изменившихся характеристик адсорбентов и производится повторная идентификация замещающей модели, в результате чего данная модель приводится в соответствие с изменившимися характеристиками.

Значение давления адсорбции *Р*<sup>адс</sup> используется для задания уставки ПИДрегулятора давления. Задача оптимизации решается методами безусловной многомерной оптимизации с применением аппарата штрафных функций. Для решения задачи используется метод Нелдера-Мида.

Таким образом, алгоритм управления обеспечивает выполнение задач:

- поиска оптимума принятого критерия качества;
- расчета величины оптимального давления Р<sup>адс</sup>;
- расчета величины оптимального времени стадии адсорбции тадс;
- расчет неизмеряемых величин;
- расчета оптимального режима переключения клапанов.

### Результаты

Для анализа функционирования адаптивной системы управления рассмотрим реакции системы на скачкообразные изменения возмущений в установившемся режиме работы установки.

На рисунке 6, a, показаны переходные процессы в системе при ступенчатом изменении состава исходного газа – повышении доли CO<sub>2</sub> до 33,9 %. Рассматривается колебание концентрации CO<sub>2</sub> как основной примеси в исходном газе. Увеличение количества примесей в потоке приводит к падению степени извлечения и чистоты водорода. Система управления в данном примере позволяет поддерживать максимально возможную степень извлечения продукта в изменившихся условиях, не допуская снижения производительности установки ниже установленного уровня. При отсутствии системы управления происходит значительное снижение качества очистки.

На рисунке 6,  $\delta$ , представлены переходные процессы в системе при ступенчатом изменении уменьшении доли CO<sub>2</sub> в исходном газе до 11,3 %. Сокращение количества CO<sub>2</sub> в потоке способствует повышению степени извлечения водорода без воздействий со стороны системы управления. Реакция системы управления в данном случае позволяет дополнительно повысить степень извлечения водорода путем увеличения продолжительности стадии адсорбции с учетом заданного минимального уровня чистоты продукта. Давление адсорбции ограничивается давлением на входе модуля. Рост чистоты исходного газа способствует росту производительности модуля.

На рисунке 6, *в*, приведены переходные процессы при скачкообразном подъеме давления на сбросном выходе модуля до 0,1 МПа. Увеличение сбросного давления обуславливает снижение интенсивности процесса адсорбции; система управления компенсирует падение степени извлечения уменьшением времени стадии адсорбции, обеспечивая минимально допустимую производительность установки. Давление адсорбции ограничивается давлением на входе модуля.



Рис. 6. Изменение концентрации продукционного водорода при скачкообразных росте до 33,9 % (*a*) и снижении до 11,3 % (*б*) доли CO<sub>2</sub> в исходном газе и росте давления до 0,1 МПа на сбросном выходе модуля (*в*): I - CY; 2 - 6e3 CY

При отсутствии системы управления наблюдается значительное снижение качества очистки. В таблице 1 приведены результаты сравнительного анализа качества адсорбционной очистки водорода с применением системы управления и в неуправляемом режиме.

	Функция			
Исследуемое возмущение	при использовании системы управления	в неуправляемом режиме	ΔΦ, %	
Poct $y_{CO_2}^{BX}$ 22,6 – 33,9 %	39,33	34,16	5,17	
Падение у <sub>CO2</sub> <sup>вх</sup> 22,6-11,3 %	76,58	74,69	1,89	
Рост Р <sub>сбр</sub> 00,1 МПа	53,81	51,15	2,66	

## Сравнительный анализ работы модуля

#### Заключение

Таким образом, предложена адаптивная система управления для адсорбционного процесса концентрирования водорода из газового потока SMR-процесса. Создано алгоритмическое обеспечение системы управления, предусматривающее динамическое изменение настроечных параметров системы и интеграцию комплекса из двух математических моделей процесса адсорбции водорода в контур управления. Проведены имитационные исследования, подтвердившие эффективность представленной системы.

#### Список литературы

1. Пат. WO2012096812 CША, МПК B01D 53/047. Six Bed Pressure Swing Adsorption Process Operating in Normal and Turndown Modes / Baksh M., Simo M. – Опубл. 19.07.2012.

2. Васильев, А. С. Математическое моделирование процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси / А. С. Васильев, А. А. Ишин, С. А. Скворцов // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 3 (53). – С. 37 – 45.

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

4. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – 2-е изд., перераб., доп. – М. : Химия, 1984. – 512 с.

5. Layered two- and Four-Bed PSA Processes for H<sub>2</sub> Recovery from Coal Gas / S. Ahn, Y. You, D. Lee [et. al.] // Chemical Engineering Science. – 2012. – Vol. 68, Issue 1. – P. 413 – 423. doi:10.1016/j.ces.2011.09.053

6. Мартыненко, О. Г. Справочник по теплообменникам. В 2-х томах / О. Г. Мартыненко, А. А. Михалевич, В. К. Шикоз. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 318 с.

7. Suzuki, M. Adsorption Engineering / M. Suzuki. - Kodansha, Tokyo, 1990. - 295 p.

8. Турчак, Л. И. Основы численных методов / Л. И. Турчак, П. В. Плотников. – М. : Физматлит, 2003. – 301 с.

9. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Выща шк., 1989. – 431 с.

10. Оптимизация и управление циклическим процессом адсорбционного обогащения воздуха кислородом / В. Г. Матвейкин, С. А. Скворцов, Е. И. Акулинин, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 556 – 568. doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568

11. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода / В. Г. Матвейкин, А. А. Ишин, С. А. Скворцов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 548 – 556. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556

# Mathematical Modeling and Optimal Control of the Process of Hydrogen Adsorption Production

M. H. H. Alruyshid<sup>1</sup>, B. S. Dmitrievsky<sup>1</sup>, A. A. Terekhova<sup>1</sup>, A. A. Ishin<sup>2</sup>, S. A. Skvortsov<sup>3</sup>

Department of Information Processes and Control (1), terehova.aa@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia; LLC «EnergoTechProject» (2), Tambov, Russia; LLC Innovative Chemical Technologies and Products (3), Tambov, Russia

**Keywords:** adsorption; adsorbent; zeolite; mathematical model; control system.

**Abstract:** The paper considers the structure of the mathematical model for 6-bed plant for hydrogen production. The adapting optimal control system for technological process is proposed. The results of numerical imitating calculations of dynamic operating modes of the system are given.

## References

1. Baksh M., Simo M. Six Bed Pressure Swing Adsorption Process Operating in Normal and Turndown Modes, U.S, 2012, pat. WO2012096812.

2. Vasil'yev A.S., Ishin A.A., Skvortsov S.A. [Mathematical modeling of the process of obtaining hydrogen by the method of adsorption separation of a gas mixture], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 3 (53), pp. 37-45. (In Russ., abstract in Eng.)

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

4. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology], Moscow: Khimiya, 1984, 512 p. (In Russ.)

5. Ahn S., You Y., Lee D., Kim K., Oh M., Lee C. Layered two- and Four-Bed PSA Processes for H<sub>2</sub> Recovery from Coal Gas, *Chemical Engineering Science*, 2012, vol. 68, issue 1, pp. 413-423, doi:10.1016/j.ces.2011.09.053

6. Martynenko O.G., Mikhalevich A.A., Shikoz V.K. Spravochnik po teploobmennikam. V 2-kh tomakh [Handbook of heat exchangers. In 2 volumes], Moscow: Energoatomizdat, 1987, 318 p. (In Russ.)

7. Suzuki M. Adsorption Engineering, Kodansha, Tokyo, 1990, 295 p.

8. Turchak L.I., Plotnikov P.V. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods], Moscow: Fizmatlit, 2003, 301 p. (In Russ.)

9. Zaytsev G.F. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya* [Theory of automatic control and regulation], Kyiv: Vyshcha shkola, 1989, 431 p. (In Russ.)

10. Matveykin V.G., Skvortsov S.A., Akulinin Ye.I., Dvoretskiy S.I. [Optimization and control of the cyclic adsorption process enrichment of air with oxygen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 556-568. doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Matveykin V.G., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretskiy S.I. [Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and obtaining hydrogen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 548-556, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556 (In Russ., abstract in Eng.)

# Mathematische Modellierung und optimale Steuerung des Adsorptionsprozesses der Wasserstofferzeugung

**Zusammenfassung**: Es ist die Struktur des mathematischen Modells einer 6-Adsorber-Anlage zur Wasserstoffkonzentration betrachtet. Das adaptive System der optimalen Prozesssteuerung ist vorgeschlagen. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen der dynamischen Modi des Systembetriebs sind vorgestellt.

# Modélisation mathématique et commande optimale du processus de l'adsorption de la production d'hydrogène

**Résumé:** Est examinée la structure du modèle-6 mathématique de l'unité d'adsorption pour la concentration d'hydrogène. Est proposé le système adaptatif de la commande optimale du processus. Sont présentés les résultats des calculs simulés des modes du fonctionnement dynamiques du système.

Авторы: Альруйшид Моханад Хилаль Хамиди – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; Дмитриевский Борис Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; Терехова Анастасия Андреевна – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; Ишин Андрей Анатольевич – инженер-проектировщик ООО «Энерготехпроект», Тамбов, Россия; Скворцов Сергей Александрович – генеральный директор ООО «Инновационные химические технологии и продукты», Тамбов, Россия.