

РАЗРАБОТКА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АДСОРБИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

С. А. Скворцов, А. А. Ишин

Тамбовский государственный технический университет

Поступила в редакцию 26.09.2016 г.

Аннотация. В статье описывается экстремальная адаптивная система управления процессом адсорбционного получения водорода, и приводятся результаты имитационных расчетов динамических режимов работы системы.

Ключевые слова: адсорбция, регенерация, адаптивная система управления.

Annotation. In work the extreme adaptive control system for adsorptive hydrogen-production process is described and the results of numerical imitating calculations of dynamic operating modes of the system are given.

Keywords: adsorption, regeneration, adaptive control system.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особую значимость приобретают вопросы, связанные с получением чистых и концентрированных газов. В этой связи одной из актуальных задач является выделение концентрированного водорода из газовых смесей [1]. В последние десятилетия для получения чистых газов успешно используются адсорбционные методы, которые позволили существенно снизить капитальные затраты, предложив принципиально новый подход к технологии газового разделения.

Для осуществления процесса адсорбционного получения водорода из промышленных водородсодержащих смесей разработано множество технологических схем. На рис. 1 представлена 4-адсорберная установка, использующая в качестве адсорбента синтетический цеолит СаА. Установка работает по напорной схеме. Исходная смесь H_2 - CO_2 - CO подается под давлением 21 ± 2 бар. Состав смеси: $H_2 - 65 \pm 2\%$; $CO_2 - 34 \pm 2\%$; $CO - 1 \pm 0,5\%$ (мол.); температура 30 ± 5 °C. Продукционный водород направляется к потребителям через ресивер Р. Регенерация адсорбента осуществляется противоточно продуционным

газом при пониженном давлении. Сброс продувочного газа производится в атмосферу. Порядок переключения клапанов в установке определяет последовательность технологических стадий процесса в адсорберах A_1 - A_4 , представленную в табл. 1.

Для эффективного ведения данного технологического процесса необходима система управления, обеспечивающая поддержание максимальной чистоты продукционного газа при выполнении технологических ограничений.

МЕТОДИКА

При разработке системы управления используется математическая модель процесса адсорбции, представленная следующими основополагающими уравнениями:

Уравнение покомпонентного материального баланса:

$$\frac{\partial(\nu_r c_k)}{\partial z} + \frac{\partial c_k}{\partial \tau} + \left(\frac{1 - \varepsilon_{\text{общ}}}{\varepsilon_{\text{общ}}} \right) \frac{\partial w_k}{\partial \tau} - D_{z,k} \frac{\partial^2 c_k}{\partial z^2} = 0, \quad k = \overline{1, n_k} \quad (1)$$

Уравнение изотермы сорбции (уравнение Ленгмюра-Фрейндлиха для многокомпонентной смеси):

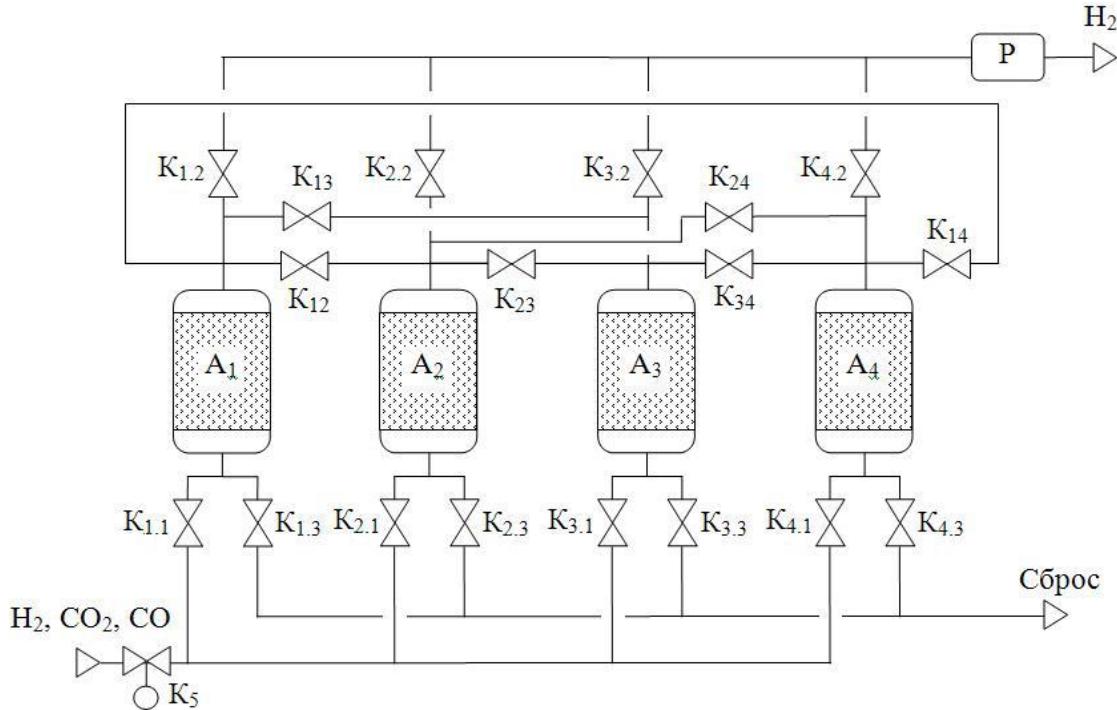


Рис. 1 – Технологическая схема 4-адсорберной водородной установки: A_1 - A_4 – адсорбера, K – управляемые клапаны, P – ресивер

Таблица 1

Стадии адсорбционного процесса получения водорода в 4-адсорберной установке:
 АД – адсорбция, ВД – выравнивание давления (перепуск газа), СБ – сброс газа,
 Р – регенерация, ПД – подъем давления

| A_1 | АД | | ВД1 | ВД2 | СБ | Р | ВД3 | ВД4 | ПД |
|-------|-----|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A_2 | ВД4 | | ПД | | АД | | ВД1 | ВД2 | СБ |
| A_3 | СБ | | Р | ВД3 | ВД4 | ПД | АД | | ВД1 |
| A_4 | ВД1 | | ВД2 | СБ | Р | ВД3 | ВД4 | ПД | АД |

$$w_k^p = \frac{(b_{1,k} - b_{2,k} T_{\text{адс}}) b_{3,k} e^{b_{4,k}/T_{\text{адс}}} c_k^{(b_{5,k} + b_{6,k}/T_{\text{адс}})}}{1 + \sum_j b_{3,j} e^{b_{4,j}/T_{\text{адс}}} c_j^{(b_{5,j} + b_{6,j}/T_{\text{адс}})}}, \quad k = \overline{1, n_k} \quad (2)$$

Уравнение кинетики сорбции:

$$\frac{\partial w_k}{\partial \tau} = \frac{F_k^2 - F_k^1}{2} \operatorname{tg} h(\theta \cdot (v_r - v_r^{\text{кр}})) + \\ + F_k^1 + \frac{F_k^2 - F_k^1}{2}, \quad k = \overline{1, n_k}, \quad (3)$$

где $F_k^1 = \beta_k^1 (c_k - c_k^p)$; $F_k^2 = \beta_k^2 (w_k^p - w_k)$; θ – коэффициент сглаживания; $v_r^{\text{кр}}$ – критическая скорость газовой смеси, определяющая переход от F_k^1 к F_k^2 .

Уравнение перепада давления в слое адсорбента (уравнение Эргуна):

$$\frac{\partial P_r}{\partial z} = - \left(\frac{150(1-\varepsilon)^2}{(2r_q \psi)^2 \varepsilon^3} \mu_r v_r + 1,75 M_r \rho_r \frac{(1-\varepsilon)}{2r_q \psi \varepsilon^3} v_r^2 \right). \quad (4)$$

Уравнение теплового баланса для газовой фазы:

$$-c_{vr} v_r \rho_r \frac{\partial T_r}{\partial z} - \varepsilon c_{vr} \rho_r \frac{\partial T_r}{\partial \tau} + \lambda_{r,z} \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} + \\ + K \cdot f_u (T_r - T_{\text{адс}}) + \frac{4K_c}{d} (T_r - T_c) = 0. \quad (5)$$

Уравнение теплового баланса для твердой фазы:

$$\begin{aligned}
 -\rho_{\text{адс}} c_{p \text{ адс}} \frac{\partial T_{\text{адс}}}{\partial \tau} + \sum_{k=1}^{n_k} (c_{p \text{ сорб}} w_k) \frac{\partial T_{\text{адс}}}{\partial \tau} + \\
 + \sum_{k=1}^{n_k} \left(\Delta H_k \frac{\partial w_k}{\partial \tau} \right) + \lambda_{\text{адс},z} \frac{\partial^2 T_{\text{адс}}}{\partial z^2} + \\
 + K \cdot f_q (T_g - T_{\text{адс}}) = 0. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Все дифференциальные уравнения дополняются соответствующими начальными и граничными условиями.

Для разработки системы управления необходимо рассмотреть технологический процесс как объект управления. Для этого среди переменных процесса выделим входные и выходные координаты. Входными переменными для процесса адсорбционного получения водорода являются:

- состав исходной газовой смеси $\mathbf{y}_{\text{вх}} = (y_{\text{вх}}^{\text{H}_2}, y_{\text{вх}}^{\text{CO}_2}, y_{\text{вх}}^{\text{CO}})$;
- температура исходной газовой смеси $T_{\text{вх}}$;
- давление на входе установки $P_{\text{вх}}$;
- давление на производционном выходе установки $P_{\text{прод}}$;
- давление на сбросном выходе установки $P_{\text{сбр}}$;
- степени открытия клапана подачи исходной смеси ψ_5 ;
- длительность стадии адсорбции $\tau_{\text{адс}}$.

Выходными переменными для процесса адсорбционного получения водорода являются:

- состав продукции газовой смеси $\mathbf{y}_{\text{прод}} = (y_{\text{прод}}^{\text{H}_2}, y_{\text{прод}}^{\text{CO}_2}, y_{\text{прод}}^{\text{CO}})$;
- температура продукции газовой смеси $T_{\text{прод}}$;
- расход продукции газовой смеси (производительность) $G_{\text{прод}}$;
- давление адсорбции $P_{\text{адс}}$.

При выборе управляющих воздействий из числа входных переменных должна быть предусмотрена возможность непосредственного изменения параметра в достаточных пределах. Кроме того, необходимо учитывать влияние выбранной переменной на предшествующие и последующие стадии технологического процесса.

С учетом указанных замечаний, а также экспертной информации, в качестве управляющих воздействий выбираются:

- степень открытия клапана подачи исходной смеси ψ_5 ;
- длительность стадии адсорбции $\tau_{\text{адс}}$.

Задача управления технологическим процессом адсорбционного получения водорода формулируется следующим образом: необходимо в заданном диапазоне возмущающих воздействий (состав исходной газовой смеси

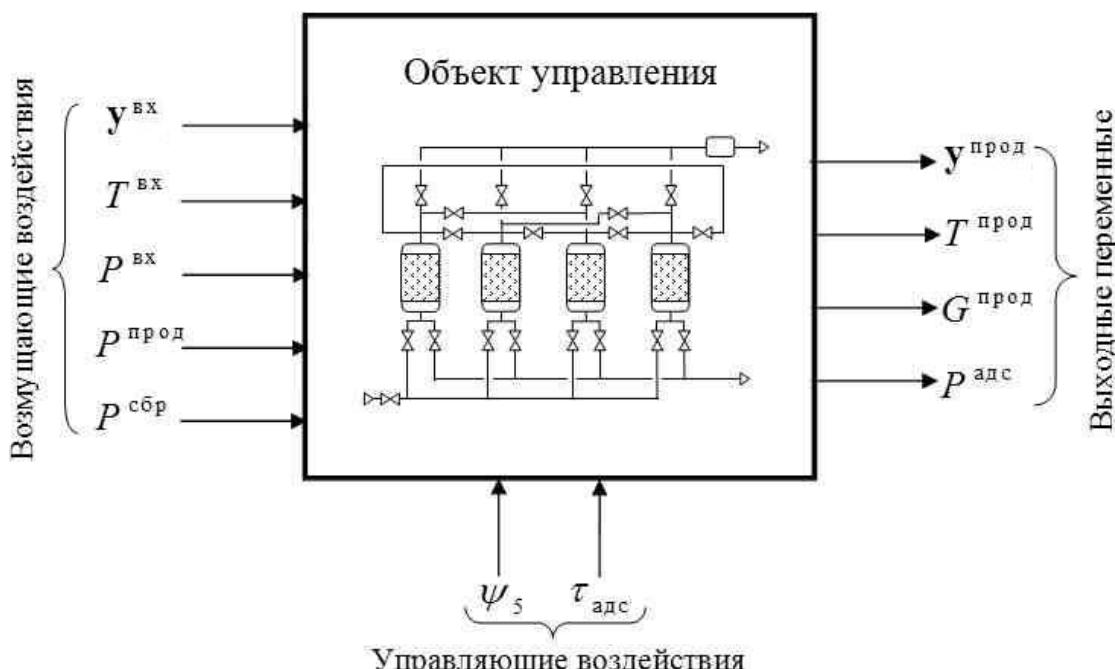


Рис. 2. Анализ технологического процесса как объекта управления

$\mathbf{y}^{\text{вх}} = (y_{\text{вх}}^{\text{H}_2}, y_{\text{вх}}^{\text{CO}_2}, y_{\text{вх}}^{\text{CO}})$, температура исходной газовой смеси $T^{\text{вх}}$, давление на входе установки $P^{\text{вх}}$, давление на продуционном выходе установки $P^{\text{прод}}$, давление на сбросном выходе установки $P^{\text{сбр}}$) найти такой вектор допустимых управлений $\mathbf{u} = (\psi_5, \tau_{\text{адс}})$, при котором целевая функция:

$$\Phi = \left(\frac{1}{\tau} \int_{\tau_k - \tau}^{\tau_k} y_{\text{прод}}^{H_2}(\mathbf{u}) d\tau \right) \rightarrow \max \quad (7)$$

и выполняются ограничения, накладываемые на следующие технологические параметры:

– концентрацию продуционного водорода $y_{\text{прод}}^{\text{H}_2}$:

$$y_{\text{прод}}^{\text{H}_2} \leq \bar{y}_{\text{прод}}^{\text{H}_2} \quad (8)$$

– расход продуционной газовой смеси $G^{\text{прод}}$:

$$\underline{G}^{\text{прод}} \leq G^{\text{прод}} \leq \bar{G}^{\text{прод}} \quad (9)$$

– давление адсорбции $P^{\text{адс}}$:

$$P^{\text{адс}} \leq P^{\text{вх}} \quad (10)$$

Алгоритм управления ТП может быть реализован с помощью множества различных систем управления (СУ). Поэтому при выборе одной СУ невозможно гарантировать то, что не существует другой системы, по каким-либо показателям лучше выбранной. При этом сам процесс проектирования регламентирован временем разработки. Таким образом, возникает задача формирования множества структур СУ из бесконечного, в общем случае, множества вариантов. В условиях ограниченного времени данная задача не имеет решения. Для практического решения необходимо ограничиться рассмотрением тех структур СУ, выбор которых является наиболее рациональным, и которые нашли широкое применение при автоматизации подобных процессов.

Одним из наиболее целесообразных вариантов системы управления для рассматриваемого процесса является *адаптивная СУ*. Параметры установки адсорбционного получения водорода подвержены изменениям в ходе процесса адсорбции; значения возмущений, которые представлены нерегулируемыми параметрами исходной газовой смеси, поступающей на разделение, в ходе процесса также

меняются случайным образом. Использование адаптивной СУ позволяет повысить качество управления процессом при изменении параметров управляемого объекта и отклонениях значений возмущающих воздействий от принятых при расчете системы [2]. Согласно поставленной задаче управления, необходимо поддерживать априори неизвестное максимальное значение заданной целевой функции, что обуславливает применение системы *экстремального* адаптивного управления, реализующей автоматическую оптимизацию качества управления. Предполагается разработка самонастраивающейся адаптивной СУ с изменяемыми настроочными параметрами и постоянной структурой, работающей по принципу управления по возмущению с эталонной моделью технологического процесса в контуре управления.

Алгоритм управления предполагает непрерывный контроль за текущими значениями возмущающих воздействий. При отклонении возмущения от априори заданного значения, превышающем некоторую малую величину ε , алгоритмом предусматривается решение задачи условной оптимизации. Алгоритм предусматривает фильтрацию случайных колебаний возмущений. Задача условной оптимизации решается с помощью эталонной модели технологического процесса, в результате чего определяются оптимальные значения настроочных параметров СУ – времени шага адсорбции $\tau_{\text{адс}}$ и давления адсорбции $P^{\text{адс}}$, обеспечивающие экстремум заданной целевой функции для текущих значений возмущающих воздействий при выполнении заданных ограничений. На основании полученного значения $\tau_{\text{адс}}$ пересчитывается циклографма работы клапанов $K_{1,1}-K_{4,1}$, $K_{1,2}-K_{4,2}$, $K_{1,3}-K_{4,3}$, K_{12} , K_{23} , K_{34} , K_{13} , K_{14} , K_{24} . Практическая реализация циклографмы переключений осуществляется с помощью программного задатчика. Оптимальное давление адсорбции $P^{\text{адс}}$ поступает в качестве уставки в регулятор давления адсорбции. Для регулирования $P^{\text{адс}}$ используется одноконтурная замкнутая САР с регулятором в обратной связи. В подсистеме регулирования $P^{\text{адс}}$ могут быть использованы непрерывные П-, ПИ-, ПИД-регуляторы; использование

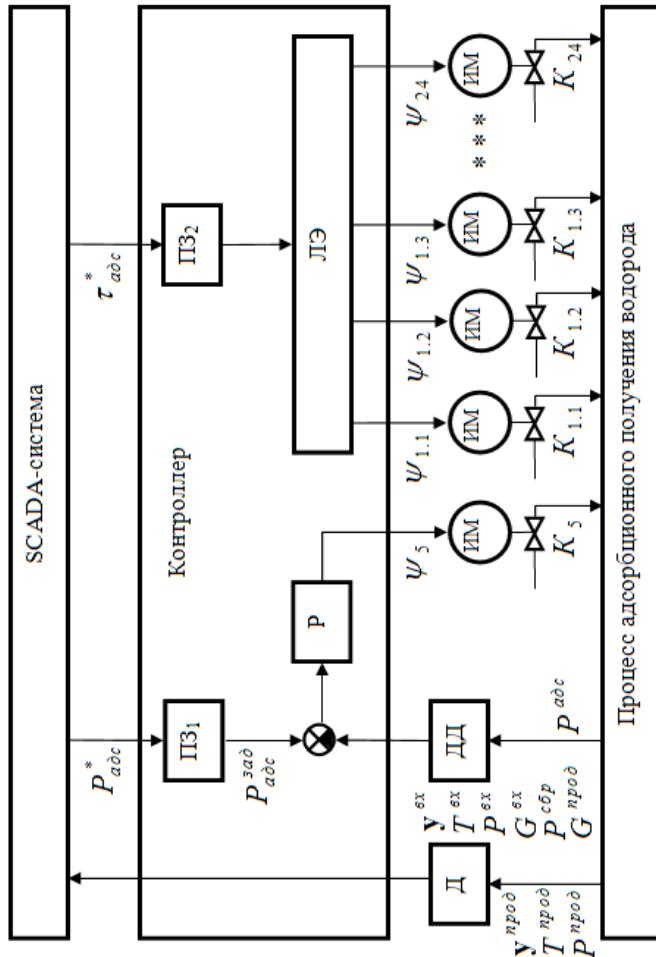


Рис. 3. Структурная схема системы управления: ПЗ – программный задатчик; ЛЭ – логический элемент; Д – датчик; Р – регулятор; ИМ – исполнительный механизм; К – клапан

двуихпозиционных регуляторов в данном случае нецелесообразно, поскольку прерывистый характер поступления исходной газовой смеси не желателен в рассматриваемом ТП. Наилучшие результаты среди непрерывных регуляторов показал ПИД-регулятор. Настроочные параметры регулятора определялись с применением *критерия оптимального модуля*. Данный критерий рекомендуется при расчетах систем с динамическим изменением задания регуляторов, в том числе следящих и адаптивных систем [3]. Переходные процессы в системах, спроектированных с использованием критерия оптимального модуля, отличаются малым перерегулированием и высоким быстродействием, что обусловило его широкое применение [4].

Таким образом, алгоритм управления ТП обеспечивает выполнение следующих функций:

- поиск и поддержание оптимума заданного критерия качества;
- расчет оптимального времени шага адсорбции $\tau_{адс}$;
- расчет оптимальной циклограммы работы клапанов;
- расчет оптимального давления адсорбции $P_{адс}$;
- регулирование давления адсорбции $P_{адс}$.

Задача оптимизации времени шага адсорбции $\tau_{адс}$ и давления адсорбции $P_{адс}$ решается методами безусловной многомерной оптимизации с применением аппарата штрафных функций. Для решения задачи использовался метод покоординатного спуска.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ функционирования системы управления производился в установившемся режиме работы установки при ступенчатом изменении возмущающих воздействий в момент времени 1920 с. В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа работы установки при наличии системы управления и без нее (с жестко заданными неоптимальными настроочными параметрами).

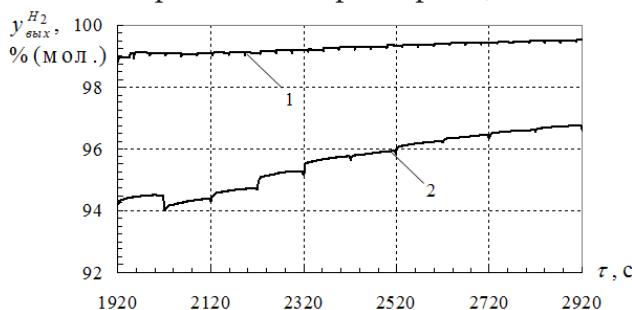


Рис. 4. Переходный процесс изменения концентрации продукта при ступенчатом понижении содержания CO_2 в исходной смеси до 25 % (мол.): 1 – при наличии СУ, 2 – без СУ

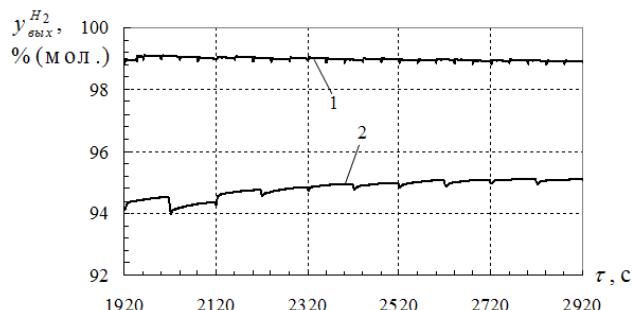


Рис. 5. Переходный процесс изменения концентрации продукта при ступенчатом повышении производственного давления до 3 бар: 1 – при наличии СУ, 2 – без СУ

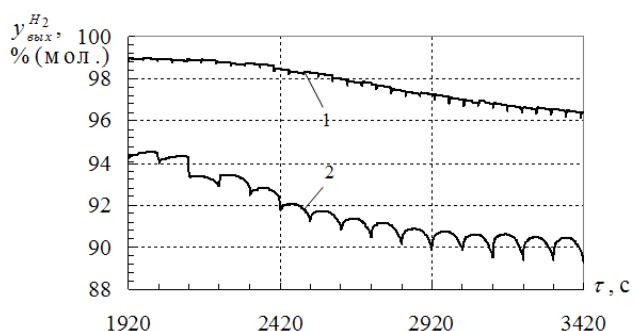


Рис. 6. Переходный процесс изменения концентрации продукта при ступенчатом повышении сбросного давления до 1 бар: 1 – при наличии СУ, 2 – без СУ

Как следует из таблицы, использование разработанной системы управления обеспечивает наивысшие показатели критерия качества для всех указанных возмущений при выполнении технологических ограничений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была разработана экстремальная адаптивная система управления с постоянной структурой и изменяемыми настроочными параметрами для процесса адсорбционного получения водорода, обеспечивающая максимальную чистоту производственного газа в заданном диапазоне возмущающих воздействий при выполнении технологических ограничений.

Результаты сравнительного анализа работы установки при наличии и в отсутствие системы управления

| Исследуемый параметр | Значение целевой функции Φ при наличии СУ, % | Значение целевой функции Φ в отсутствие СУ, % | Прирост целевой функции Φ , % |
|---|---|--|------------------------------------|
| Понижение $y_{вых}^{\text{CO}_2}$ до 25 % | 99,48 | 96,68 | 2,8 |
| Повышение $P^{\text{сбр}}$ до 1 бар | 96,51 | 90,22 | 6,29 |
| Повышение $P^{\text{прод}}$ до 3 бар | 98,92 | 95,09 | 3,83 |
| Повышение $T^{\text{вх}}$ до 50 °C | 98,92 | 94,13 | 4,79 |

Таблица 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумяцкий Ю. И. Промышленные адсорбционные процессы. – М. : КолосС, 2009. – 178 с.
2. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – Киев : Выща школа, 1988. – 432 с.

Скворцов С. А. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», Тамбовский государственный технический университет.

Тел.: 8 (4752) 639187
E-mail: dfoxd@rambler.ru

Ишин А. А. – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», Тамбовский государственный технический университет.

Тел: 8 (4752) 639187
E-mail: andrey-tamboff@yandex.ru

3. Аязян Г. К. Расчет автоматических систем с типовыми алгоритмами регулирования. – Уфа : Изд. Уфим. нефт. ин-та, 1989. – 134 с.

4. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М. : Машиностроение, 1974. – 322 с.

Skvortsov S. A. – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information Processes and Control, Tambov State Technical University.

Tel. : 8 (4752) 639187
E-mail: dfoxd@rambler.ru

Ishin A. A. – postgraduate, Department of Information Processes and Control, Tambov State Technical University.

Tel.: 8 (4752) 639187
E-mail: andrey-tamboff@yandex.ru