
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 661.965

ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АДсорбЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, И. В. Маркин, С. И. Дворецкий, С. А. Скворцов

Тамбовский государственный технический университет

Поступила в редакцию 14.02.2019 г.

Аннотация. Выполнены численные исследования влияния изменения температуры, состава и давления исходной газовой смеси на чистоту, степень извлечения и температуру продукционного водорода в широком диапазоне изменения времени цикла «адсорбция – десорбция» и давления на стадии адсорбции, связи производительности установки короткоциклового безнагревной адсорбцией с чистотой получаемого продукта. Сформулирована и решена задача адаптивной оптимизации процесса адсорбционного разделения газовой смеси и получения водорода с максимальной концентрацией, разработано алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы адаптивного управления.

Ключевые слова: короткоцикловая безнагревная адсорбция, цеолитовый адсорбент, синтез-газ, водород, диоксид углерода, изотерма адсорбции, кинетика, динамика, математическое моделирование, оптимизация, управление.

Annotation. Numerical researches of the influence of temperature, composition and pressure in the initial gas mixture on the purity, recovery and temperature of hydrogen production in a wide range of the “adsorption – desorption” cycle time and pressure at the adsorption stage were performed. The relationships of the PSA unit productivity and the product purity have been identified. The adaptive optimization problem of the process of gas mixture adsorption separation and hydrogen producing with the maximum concentration was formulated and solved. The algorithmic and the software of the automated adaptive control system was developed.

Keywords: pressure swing adsorption, zeolite adsorbent, synthesis gas, hydrogen, carbon dioxide, adsorption isotherm, kinetic, dynamic, mathematical modeling, optimization, control.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач в области очистки и адсорбционного разделения газовых смесей является получение водорода из водородсодержащих технологических потоков (газов конверсии и окисления углеводородов, нефтезаводских газов, синтез-газа и др.) [1–3]. Особенностью адсорбционного получения водорода является тот факт, что в смесях водородсодержащих газов сопутствующие водороду компоненты (преиму-

щественно диоксид и оксид углерода) имеют более высокие значения адсорбционной селективности [1]. Водород находит широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря высокой химической активности, исключительной легкости и большому количеству тепла, выделяемого при горении. Основным потребителем газа – предприятия нефтепереработки и нефтехимии, в других отраслях промышленности водород используется и как основное сырье, и как вспомогательный материал, и как топливо.

В работах [4–10] представлены результаты численных исследований влияния режимных переменных (давления, температу-

© Акулинин Е. И., Дворецкий Д. С., Маркин И. В., Дворецкий С. И., Скворцов С. А., 2019

ры, расхода исходной смеси) на динамику и эффективность адсорбционного разделения двух- (H_2-CO_2), трех- (H_2-CO_2-CO), четырех- ($H_2-CO_2-CO-CH_4$), пяти- ($H_2-CO_2-CO-CH_4-N_2$) и шести- ($H_2-CO_2-CO-H_2O-Ar-N_2$) компонентных смесей и концентрирования водорода с использованием активного угля и металло-органических соединений в качестве адсорбентов. В работах [4, 5] методом вычислительного эксперимента изучены особенности функционирования десятиадсорберной установки с вакуумной регенерацией и четырехадсорберной установки КБА с металло-органическим адсорбентом нового типа, установлена возможность извлечения водорода с чистотой 99,981 об. % при степени извлечения 81,6 % [4] и 99,9 об. % при степени извлечения 48,05 % [6], соответственно. В работах [8, 9] представлены результаты численных исследований влияния количества стадий выравнивания давлений, их последовательности и использования комбинаций различных слоев адсорбентов на чистоту и степень извлечения водорода из двухкомпонентной смеси (H_2-CH_4) в установке короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА). Установлено, что использование шестиадсорберной установки с двумя операциями выравнивания давлений обеспечивает наилучшее сочетание чистоты продукционного водорода (~99 об. %) при достижении степени извлечения ~83 %.

В работе [11] методом вычислительного эксперимента исследованы зависимости чистоты извлекаемого углекислого газа из 9-и компонентной газовой смеси с использованием активного угля и установлено, что использование семи адсорберов установки КБА (вместо трех или четырех адсорберов) позволяет повысить чистоту продукционного углекислого газа с 95,1 об. % до 98,9 об. % при снижении степени извлечения от 90,2 % до 86,1%. В работах [12, 13] исследуются математические модели динамики циклического адсорбционного процесса извлечения CO_2 из двухкомпонентной газовой смеси (CO_2-N_2) на цеолите 13X, сформулирована и исследована задача оптимального проектирования установок вакуум-напорного и фракционного вакуум – напорного типов по комплексному критерию – отношение энергозатрат установки к чистоте продукционного диоксида углерода. Показано, что данные установки обеспечивают извлечение диоксида углерода с чистотой ~90 об. % и ~72 об. %, соответственно.

Целью работы является применение метода математического моделирования для исследования системных связей и закономерностей циклического процесса адсорбционного разделения синтез-газа и повышения эффективности функционирования установки КБА при концентрировании водорода.

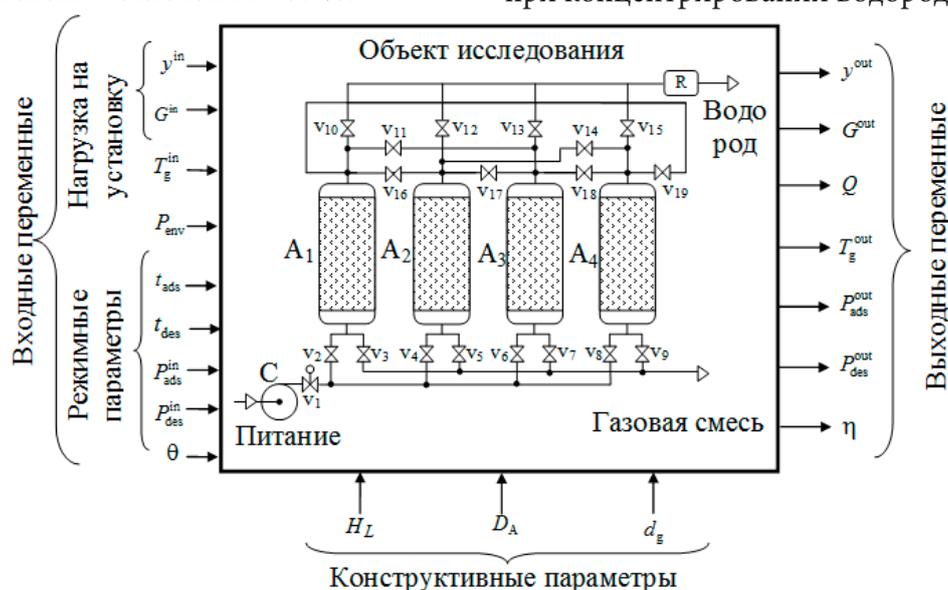


Рис. 1. Схема 4-адсорберной установки КБА для концентрирования водорода как объекта моделирования: A_1-A_4 – адсорберы, v – управляемые клапаны, R – ресивер

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДСОРБЦИОННОГО ПРОЦЕССА С ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Технологический процесс концентрирования водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси реализуется в четырехадсорберной установке КБА с гранулированным синтетическим цеолитом СаА (рис. 1) [13, 14]. Установка предназначена для извлечения водорода с концентрацией до 99,99 % из синтез-газа.

Исходная газовая смесь (синтез-газ) подается в установку после осушки с избыточным давлением $P^{\text{in}} = 21 \times 10^5$ Па и температурой $T_g^{\text{in}} = 30$ °С. Подъем давления в адсорберах $A_1 \div A_4$ производится открытием управляемых клапанов (v2, v4, v6 и v8), через которые газ подводится к слою насыпного гранулированного адсорбента СаА. Продукционный водород выводится из адсорберов через управляемые клапаны (v10, v12, v13 и v15) и направляется потребителю через ресивер R. Противоточная регенерация адсорбента в адсорберах производится открытием клапанов (v11, v14, v16 и v18), через которые обогащенная водородом газовая смесь подводится к слою адсорбента для десорбции адсорбтива (преимущественно CO_2 и CO), а через клапаны v3, v5, v7 и v9 производится отвод газовой смеси из десорбера.

Входные переменные в установке КБА включают нагрузку по сырью $x = \{y^{\text{in}}, G^{\text{in}}\}$, $y^{\text{in}}, G^{\text{in}}$ – состав и расход исходной газовой смеси (синтез-газа); режимные параметры (управляющие переменные) $u = \{t_{\text{ads}}, t_{\text{des}}, P_{\text{ads}}^{\text{in}}, P_{\text{des}}^{\text{in}}, \theta\}$, $t_{\text{ads}}, t_{\text{des}}$ – длительность стадий адсорбции и десорбции; $P_{\text{ads}}^{\text{in}}, P_{\text{des}}^{\text{in}}$ – давления на выходе компрессора и на стадии десорбции, соответственно, θ – коэффициент обратного потока (на регенерацию адсорбента), $0 < \theta < 1$; давление P_{env} окружающей среды и температуру T_g^{in} исходной газовой смеси (синтез-газа), поступающей на разделение в адсорберы. В состав выходных переменных входят концентрации y_1^{out} водорода и сопутствующих веществ ($y_2^{\text{out}}, y_3^{\text{out}}$); степень извлечения η ад-

сорбтива (преимущественно диоксида и окиси углерода) и концентрирования водорода; производительность Q установки КБА; температура T_g^{out} , давления $P_{\text{ads}}^{\text{out}}, P_{\text{des}}^{\text{out}}$ и расход G^{out} продукционного водорода.

При математическом моделировании процесса разделения синтез-газа и концентрирования водорода принимались следующие допущения: 1) синтез-газ (1- водород H_2 , 2- диоксид углерода CO_2 , 3- окись углерода CO с концентрациями 65 ± 2 , 34 ± 2 и $1 \pm 0,5$ об. %, соответственно) является трехкомпонентной газовой смесью (концентрация других веществ (примесей) не превышает 0,001 об. %) и рассматривается как идеальный газ, что вполне допустимо при давлении в адсорбере до 200×10^5 Па [15]; 2) диффузия адсорбтива (преимущественно CO_2 , CO) и распространение тепла в газовой и твердой фазах осуществляются только в аксиальном направлении движения потока газовой смеси в адсорбере (по высоте адсорбента); 3) в качестве адсорбентов используется гранулированный цеолит СаА с диаметром гранул 1,6 мм и коэффициентом пористости $\sim 0,375$ [16]; 4) адсорбционное равновесие (изотерма адсорбции) описывается уравнением Ленгмюра-Фрейндлиха [1, 14]; 5) десорбционная ветвь изотермы адсорбции H_2 , CO_2 , CO на цеолите СаА совпадает с адсорбционной [2]; 6) температура газа в ресивере R равна температуре газа на выходе из адсорбера, тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы.

В соответствии с принятыми допущениями математическое описание процесса разделения трехкомпонентной газовой смеси (синтез-газа) и концентрирования водорода включает следующие уравнения [14]: 1) покомпонентного материального баланса компонентов (H_2 , CO_2 , CO) в потоке газовой фазы с учетом продольного перемешивания в слое адсорбента (нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа); 2) кинетики адсорбции-десорбции (нелинейное дифференциальное уравнение в обыкновенных производных); 3) распространения тепла в газовой и твердой фазах с учетом конвективной составляющей и теплопроводности (нелиней-

ные дифференциальные уравнения в частных производных параболического типа); 4) изменения скорости потока газовой смеси (нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных) и давления газовой смеси (дифференциальное уравнение Эргуна в обыкновенных производных) по высоте адсорбента.

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями [14] использовали различные методы: метод конечных элементов в программной среде Matlab и метод прямых, в соответствии с которым производные по пространственной координате заменяли конечно-разностными формулами, а решение краевой задачи (системы дифференциальных уравнений в обыкновенных производных) находили методом Рунге – Кутты 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага вдоль некоторого семейства прямых.

Анализ точности математических моделей процессов адсорбционного разделения газовых смесей и воздуха проводили с использованием относительной погрешности рассогласования расчетных по модели y_1^{out} и экспериментальных значений $y_1^{out,e}$ концентрации продукционного водорода в «установившемся состоянии» (после 10–15 циклов функционирования установки КБА). Максимальная погрешность рассогласования $\delta_{max} = \max_t \left(\left| y_1^{out}(t) - y_1^{out,e}(t) \right| / y_1^{out,e}(t) \right) 100\%$ не превышала 11,5 %, что позволило использовать математическую модель для численного исследования системных связей и закономерностей циклического процесса адсорбционного разделения синтез-газа, оптимизации и управления этим процессом.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АДсорбЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

На рис. 2 представлен график зависимости степени извлечения η адсорбтива (диоксида и окиси углерода) от длительности t_{ads}

стадии адсорбции при отношении $t_{des} / t_{ads} = 0,5$, температуре $T_g^{in} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ и концентрации CO_2 в исходной газовой смеси $y_2^{in} = 25, 34$ и 45 об. %, соответственно. Графики на рис. 2 имеют экстремальный характер, а максимальная степень извлечения η для всех значений y_2^{in} достигается примерно при $t_{ads} \approx 100$ с. Так, при рабочей концентрации $y_2^{in} = 34$ об. % в питании установки КБА степень концентрирования водорода η составляет 62 %, а при концентрациях $y_2^{in} = 25$ и $y_2^{in} = 45$ об. % – $\eta = 65$ и $\eta = 51\%$, соответственно. Максимальная концентрация водорода при рабочей концентрации $y_2^{in} = 34$ об. % в питании установки КБА достигается в интервале давлений $P_{ads}^{in} \in [1 \div 1,5]$ МПа и равна $y_1^{out} = 99,1\%$ об., при концентрации $y_2^{in} = 25$ об. % – $[1,5 \div 2,5]$ МПа и равна $y_1^{out} = 99,7\%$ об., при концентрации $y_2^{in} = 45\%$ об. – $P_{ads}^{in} = 0,75$ МПа и равна $y_1^{out} = 98,5\%$ об. (на рисунке не показано).

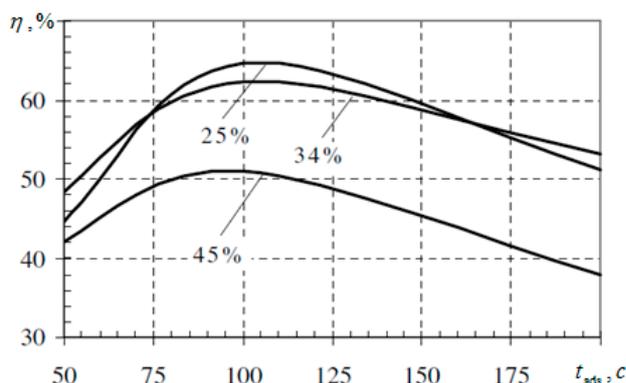


Рис. 2. Зависимость степени извлечения η адсорбтива (диоксида и окиси углерода) и концентрирования водорода от длительности стадии адсорбции t_{ads}

Анализ динамики изменения чистоты y_1^{out} продукционного водорода при значениях продолжительности стадии адсорбции $t_{ads} = 70, 100$ и 150 с (на рисунке не показано) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением t_{ads} происходит снижение чистоты y_1^{out} в стационарном периодическом режиме работы установки КБА вследствие теплового эффекта процесса адсорбции и роста температуры адсорбента. Так, при рабочей концентрации $y_2^{in} = 34$ об. % диоксида углерода в питании установки КБА и продолжительности стадии адсорбции $t_{ads} = 70$ с концентрация

продукционного водорода составляет $y_1^{out} = 99,7$ об. %, при $t_{ads} = 100$ с – $y_1^{out} = 99,0$ об. % и при $t_{ads} = 150$ с – $y_1^{out} = 97,0$ об. %.

Численный анализ динамических свойств процесса концентрирования водорода методом короткоциклового безнагревной адсорбции при разделении синтез газа позволил установить наиболее опасные возмущения (состав, температуру и давление исходной водородсодержащей смеси в питании установки КБА) и наиболее эффективные режимные (управляющие) переменные (давления P_{ads}^{in} , P_{des}^{in} на стадиях адсорбции и десорбции, продолжительность t_{ads} стадии адсорбции), оказывающие максимальное влияние на выходные переменные и показатели эффективности функционирования четырехадсорберной установки КБА.

ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ АДСОРБЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

Сформулируем аргументную задачу оптимизации режимов функционирования установки КБА, в которой требуется определить режимные параметры (управления) $u^* = \{t_{ads}^*, P_{ads}^{in*}, P_{des}^{in*}\}$ такие, что среднее значение чистоты y_1^{out} продукционного водорода на отрезке времени $[0, t_{st}]$, соответствующем выводу установки КБА на стационарный периодический режим работы, достигает максимального значения, т. е.

$$I(u^*) = \left(\frac{1}{t_{st}} \int_0^{t_{st}} y_1^{out}(u^*) dt \right) = \max_{u = \{t_{ads}, P_{ads}^{in}, P_{des}^{in}\}} \left(\frac{1}{t_{st}} \int_0^{t_{st}} y_1^{out}(u) dt \right) \quad (1)$$

при связях в форме уравнений математической модели динамики процесса адсорбционного разделения газовой смеси и концентрирования водорода [5] и ограничениях на степень извлечения η адсорбтива (диоксида и окиси углерода) и концентрирования водорода

$$\eta_{зад} - \eta(u) \leq 0, \quad (2)$$

производительность установки КБА

$$Q_{зад} - Q(u) \leq 0 \quad (3)$$

скорость газовой смеси в «лобовом» слое адсорбента

$$\max_{t \in [t_{ads}, t_{des}]} |v_g(u)| \leq v_g^+, \quad (4)$$

перепад давления в слое адсорбента на стадиях адсорбции и десорбции

$$\Delta P_{ads} = \max_{t \in [0, t_{ads}]} P_{ads}^{out}(u, L) - P_{ads}^{in}(u, 0) \leq \Delta P_{ads}^+,$$

$$\Delta P_{des} = \max_{t \in [t_{ads}, t_{des}]} P_{des}^{out}(u, 0) - P_{des}^{in}(u, L) \leq \Delta P_{des}^+ \quad (5)$$

и условия физической реализуемости управления (режимных параметров)

$$u_j^- \leq u_j \leq u_j^+, \quad j = 1, 2, \quad (6)$$

где $t_{ци}$ – продолжительность цикла «адсорбция-десорбция», v_g^+ – максимально допустимое значение скорости газовой смеси в слое адсорбента; ΔP_{ads}^+ , ΔP_{des}^+ – максимально допустимые значения перепада давления в адсорбционном слое адсорбера на стадиях адсорбции и десорбции; u_j^- , u_j^+ – нижняя и верхняя границы диапазона изменения j -го режимного параметра (управляющего воздействия) u_j .

Сформулированная задача оптимизации (1)–(6) относится к классу задач нелинейного программирования, для решения которой использовали метод последовательного квадратичного программирования [17]. В качестве номинального (рабочего) режима функционирования установки КБА при разделении синтез-газа и концентрировании водорода принимали следующие значения технологических параметров: $y_2^{in} = 34$ % об., $G^{in} = 20,4 \times 10^{-3}$ м³/с, $T_g^{in} = 30$ °С, $t_{ads} = 42,5$ с, $P_{ads}^{in} = 15,8 \times 10^5$ Па, $t_{des}/t_{ads} = 0,5$, $\theta = 0,515$.

Оперативное решение задачи оптимизации (1)–(6) и управления процессом адсорбционного получения водорода осуществляется в 2-х уровневой системе управления, осуществляющей непрерывный контроль за текущими значениями возмущающих воздействий. При их отклонении от номинальных значений на верхнем уровне системы решалась задача оптимизации (1)–(6) и определялись текущие оптимальные значения $u^* = \{t_{ads}^*, P_{ads}^{in*}, P_{des}^{in*}\}$, поступающие в качестве заданий ПИД-регулятору давления и программному задатчику циклограммы переключения отсечных клапанов.

На рис. 3, 4 представлены графики переходных процессов в установке КБА, полученные при ступенчатом уменьшении (рис. 3) и увеличении (рис. 4) концентрации y_2^{in} диоксида углерода в питании установки, при наличии адаптивной оптимизации и без адаптивной оптимизации в системе управления.

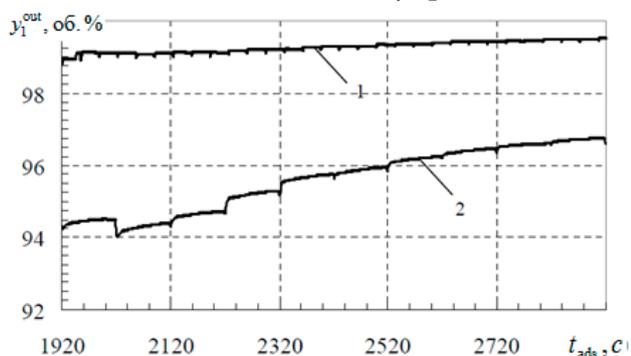


Рис. 3 Переходные процессы в установке КБА при ступенчатом уменьшении содержания CO_2 в питании установки до 25 об. %: 1 – при адаптивной оптимизации; 2 – без адаптивной оптимизации

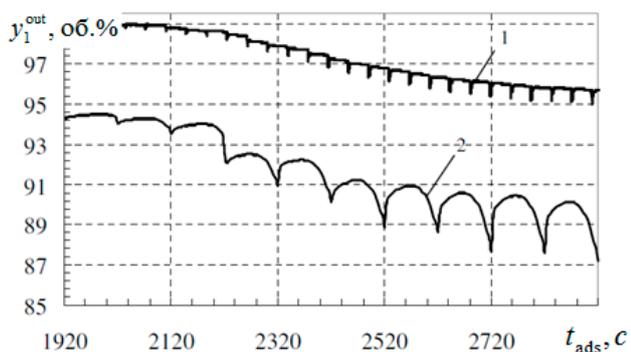


Рис. 4 Переходные процессы в установке КБА при ступенчатом увеличении содержания CO_2 в питании установки до 45 об. %: 1 – при адаптивной оптимизации; 2 – без адаптивной оптимизации

Так, при ступенчатом уменьшении концентрации y_2^{in} от 34 об. % до 25 об. % (рис. 3) в установке КБА протекают переходные процессы и через 10–15 циклов «адсорбция-десорбция» за счет свойств самовыравнивания объекта устанавливается новый стационарный периодический режим функционирования установки КБА с чистотой продукта на уровне 96,5 об. % (кривая 2 на рис. 3). В случае адаптивной оптимизации определяются новые оптимальные технологические параметры $t_{\text{ads}}^* = 34,5$ с; $P_{\text{ads}}^{\text{in}*} = 21 \times 10^5$ Па, $P_{\text{des}}^{\text{in}*} = 1 \times 10^5$ Па,

при реализации которых через 10–15 циклов «адсорбция-десорбция» работы установки КБА достигаются более высокая чистота $y_1^{\text{out}} = 99,7$ % продукционного водорода и производительность установки КБА $Q = 15 \times 10^{-3}$ м³/с.

При ступенчатом увеличении доли CO_2 в исходной газовой смеси до 45 об. % без адаптивной оптимизации чистота продукта уменьшается до ~89,5 об. % (кривая 2 на рис. 4), в свою очередь, при адаптивной оптимизации циклических режимов – $t_{\text{ads}}^* = 38$ с, $P_{\text{ads}}^{\text{in}*} = 15,85 \times 10^5$ Па, $P_{\text{des}}^{\text{in}*} = 1 \times 10^5$ Па достигаются более высокие значения чистоты $y_1^{\text{out}} = 95,7$ % об. продукционного водорода и производительности $Q = 11,7 \times 10^{-3}$ м³/с установки КБА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методов системного анализа, математического моделирования и теории автоматического управления получены новые научные результаты, разработано математическое, информационное и алгоритмическое обеспечение системы адаптивной оптимизации и управления установкой КБА, которые могут быть использованы при проектировании новых автоматизированных процессов и адсорбционных технологических установок с циклически изменяющимся давлением для разделения и очистки многокомпонентных газовых смесей с учетом выполнения требований технологического регламента по степени извлечения и чистоте извлекаемого продукта, 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. *Ruthven, D. M.* Pressure swing adsorption / D. M. Ruthven, S. Farooq, K. S. Knaebel. – New York : VCH publisher, 1994. – 352 p.
2. *Кельцев, Н. В.* Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – Москва : Химия, 1984. – 592 с.
3. *Шумяцкий, Ю. И.* Промышленные адсорбционные процессы. / Ю. И. Шумяцкий. – Москва : КолосС, 2009. – 183с.
4. *Lopes Filipe, V. S.* Activated carbon for hydrogen purification by pressure swing adsorption: Multicomponent breakthrough curves and PSA performance / V. S. Lopes Filipe, A. Grande Carlos, E. Rodrigues Alirio // Chemical Engineering Science. – 2011. – V. 66. – P. 303.
5. Heat and mass transfer model of multicomponent adsorption system for hydrogen purification / Xiao Jinsheng [and other] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – V. 30. – P. 1.
6. H₂ purification by pressure swing adsorption using CuBTC / Bruna Silva Solomon Ioan [and other] // Separation and Purification Technology. – 2013. – V. 118. – P. 744.
7. *Milad, Yavary.* The effect of number of pressure equalization steps on the performance of pressure swing adsorption process / Yavary Milad, Ale Ebrahim, Habib, Falamaki Cavus // Chemical Engineering and Processing. – 2015. – V. 87. – P. 35.
8. *Paradias, Dionissios.* Facilitating analysis of trace impurities in hydrogen: Enrichment based on the principles of pressure swing adsorption / Dionissios Paradias, Sheldon Lee, Shabbir Ahmed // Hydrogen Energy. – 2012. – V. 37. – P. 14413.
9. *Kim, Young Jun.* Study on a numerical model and PSA (pressure swing adsorption) process experiment for CH₄/CO₂ separation from biogas / Young Jun Kim, Young Suk Nam, Yong Tae Kang // Energy. – 2015. – V. 91. – P. 732.
10. High-temperature pressure swing adsorption cycle design for sorption – enhanced water-gas shift / Jurrian Boon [and other] // Chemical Engineering Science. – 2015. – V. 122. – P. 219.
11. *Luca, R.* Evaluating pressure swing adsorption as a CO₂ separation technique in coal-fired power plants / R. Luca, B. Olav. // International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015. – V. 39. – P. 1.
12. *Daeho, K.* Optimization of a pressure-swing adsorption process using zeolite 13X for CO₂ sequestration / Ko Daeho, Siriwardane Ranjani, Biegler Lorenz // Industrial & engineering chemistry research. – 2003. – V. 42(2). – P. 339.
13. Пат. 6340382 США, МПК В01D 53/047. Pressure swing adsorption process for the production of hydrogen / Baksh M.S.A., Ackley M.W.; заявитель и патентообладатель: Baksh M.S.A., Ackley M.W. – № 09/373749 ; заявл. 13.08.99; опубл. 22.01.02, Бюл. № 12. – 19 с.
14. Mathematical modeling of hydrogen production process by pressure swing adsorption method / E.I. Akulinin [and other] // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – N. 2. – P.
15. *Кириллин, В. А.* Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейншлин. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2008. – 496 с.
16. Comparative study of zeolite 5A and zeolite 13X in air separation by pressure swing adsorption / E. Shokroo [and other] // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2016. – V. 33(4). – P. 1391–1401.
17. *Реклейтис, Г.* Оптимизация в технике: Кн. 2. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – Москва : Мир, 1986. – 320 с.

Акулинин Евгений Игоревич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Тел.: +7(4752)639442

E-mail: akulinin-2006@yandex.ru

Дворецкий Дмитрий Станиславович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Тел.: +7(4752)637815

E-mail: dvoretsky@tambov.ru

Маркин Илья Владимирович – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Тел.: +7(4752)639442

E-mail: ilya.markin.92@bk.ru

Дворецкий Станислав Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Тел.: +7(4752)637815

E-mail: sdvoretsky@tstu.ru

Скворцов Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Тел.: +7(4752)639187

E-mail: dfoxd@rambler.ru

Akulinin Evgeny Igorevich – Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of «Technological and equipment of food and chemical industries» chair, «Tambov state technical university».

Tel.: +7(4752)639442

E-mail: akulinin-2006@yandex.ru

Dvoretsky Dmitry Stanislavovich – Professor, Head of chair «Technological and equipment of food and chemical industries», «Tambov state technical university»/

Tel.: +7(4752)637815

E-mail: dvoretsky@tambov.ru

Markin Ilya Vladimirovich – Ph.D student of «Technological and equipment of food and chemical industries» chair, «Tambov state technical university».

Tel.: +7(4752)639442

E-mail: ilya.markin.92@bk.ru

Dvoretsky Stanislav Ivanovich – Dr.Sc., Professor, Professor of «Technological and equipment of food and chemical industries» chair, «Tambov state technical university».

Tel.: +7(4752)637815

E-mail: sdvoretsky@tstu.ru

Skvortsov Sergey Aleksandrovich – Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of «Information processes and control» chair, «Tambov state technical university».

Tel.: +7(4752)639187

E-mail: dfoxd@rambler.ru