

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АДСОРБЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Д.С. Беляев, С.Б. Путин, С.А. Скворцов

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов

Рецензент С.И. Дворецкий

**Ключевые слова и фразы:** автоматизация технологических процессов; математическое моделирование технологических процессов.

**Аннотация:** Разрабатывается система управления процессом адсорбционного разделения газовой смеси по методу короткоциклового безнагревной адсорбции с использованием методов математического моделирования химико-технологических процессов.

**Обозначения:**  $F$  – флегмовое число;  $G$  – расход газовой смеси;  $i$  – счетчик адсорберов;  $N_A$  – общее количество адсорберов в схеме;  $p$  – парциальное давление;  $P$  – давление газовой смеси;  $\Delta$  – величина отклонения текущего значения от заданного;  $\tau$  – время;  $c_{MCK}$  – концентрация кислорода в продуктовом потоке;  $c$  – вектор концентраций газовых компонент в смеси. **Аббревиатура:** А – адсорбер; БСК – более сорбируемый компонент; Д – дроссель (дюза); ДПД – датчик парциального давления; ДР, ДД – датчик расхода, давления; ИМ – исполнительный механизм; К, К\* – управляемые клапаны; КО – клапан обратный; МСК – менее сорбируемый компонент; ПЗ – программный задатчик; Р – регулятор; ЭЗ – элемент задержки. **Индексы:** зад – величина задания регулятору; пит – исходная газовая смесь; потр – потребитель; прод – продукционная смесь; проц – время процесса; пц – полуцикл работы клапанов;  $O_2$  – кислород.

На современном уровне развития мировой промышленности широкое распространение получили газоразделительные установки, работающие по принципу короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА). Основными областями применения технологии КБА являются: химическая и нефтехи-

---

Беляев Д.С. – аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования» ТамбГТУ; Скворцов С.А – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы в управлении» ТамбГТУ; Путин С.Б. – кандидат технических наук, первый заместитель директора, заместитель директора по науке ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов.

мическая промышленность, сталеплавильная индустрия, энергетика, медицина, военная техника.

Установки адсорбционного разделения газовых смесей способны поглощать значительный спектр различных веществ, в том числе и ядовитых, которые не могут отделить угольные фильтры и системы с температурной регенерацией. В промышленном производстве системы КБА с успехом применяются для удаления углекислого газа, монооксида углерода, метана, этана, паров нефти и закиси азота. Эти установки также используются для разделения воздуха на кислород и азот. Они способны работать непрерывно в течение многих лет без ухудшения технологических показателей процесса. При их работе отсутствуют выделение газов с запахом и термическое разложение, так как при регенерации не используется наружный источник тепла. На систему не влияют условия высокой относительной влажности, даже выше 80 %. Характеристики адсорбентов не ухудшаются при длительном хранении. Сорбент не пропитывается и не представляет опасности для окружающей среды. Системы КБА не зависят от химических реакций, они могут предназначаться и использоваться для любого из химических агентов в любом сочетании, также могут включать индикаторы неисправностей и аппаратуру для эффективного контроля и управления.

Наиболее широкое распространение установки КБА получили для производства азота и кислорода из воздуха. К 2000 году более половины произведенного в мире кислорода было получено с применением технологии адсорбционного разделения воздуха, также наблюдается ежегодный прирост потребления азота и кислорода.

Рассмотрим технологическую схему процесса разделения газовой смеси с использованием  $N_A$  – адсорберной установки КБА (рис. 1).

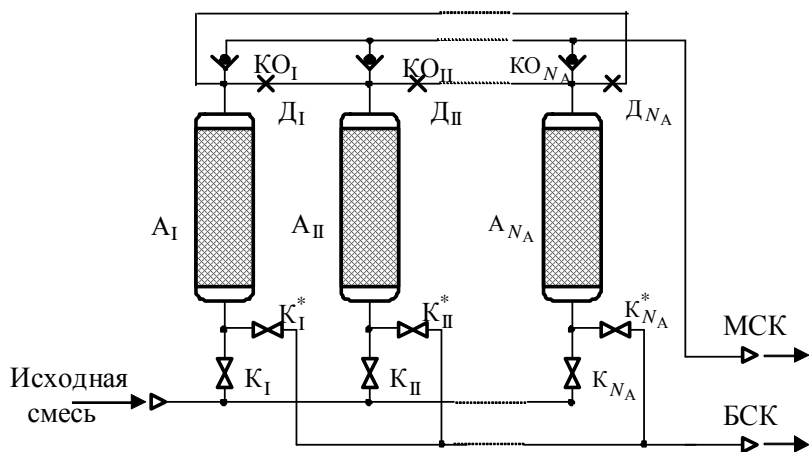


Рис. 1. Технологическая схема процесса разделения газовой смеси по методу КБА

Разделяемая газовая смесь подается в  $i$ -й адсорбер при открытом клапане  $K_i$  ( $i = 1, N_A$ ). В момент времени, когда открыты клапаны  $K_i$ , кла-

паны  $K_i^*$  закрыты. Исходная смесь, поступает в адсорбер  $A_i$ , заполненный адсорбентом, который селективно поглощает один (несколько) из компонентов исходной газовой смеси. Через обратный клапан  $KO_i$  выходит смесь концентрированная МСК. Часть смеси насыщенной МСК дросселируется до атмосферного давления в дросселях  $D_i$  и противоточно выводится в адсорберы, у которых открыты клапаны  $K_i^*$ . Взаимодействие смеси МСК с адсорбентом, насыщенным БСК, в течение предшествующей стадии адсорбции, приводит к десорбции БСК и регенерации адсорбента. Через клапаны  $K_i^*$  сбрасывают смесь БСК. Переключение каждого клапана осуществляется через равные промежутки времени  $\tau_{\text{пц}}$ .

Проведенный анализ процесса, как объекта управления, позволяет охарактеризовать различные каналы «вход-выход» с позиции управления и возмущения, в результате чего для управления концентрацией кислорода в продуктивном потоке  $c_{\text{МСК}}$  наиболее предпочтительными являются флегмовое число  $F$  и время полуцикла  $\tau_{\text{пц}}$ .

Проводится *классификация режимов функционирования установок адсорбционного разделения* по диапазону концентраций целевых компонентов в продукционных потоках и по эффективности использования ресурса. В рамках первой классификации выделены: нормальное состояние – концентрации компонентов в продукционной и сбросовой газовой смеси изменяются в заданных диапазонах; критическое состояние – концентрации компонентов выходят за границы допустимых диапазонов; идеальное состояние – концентрации компонентов изменяются не более чем на малую величину, относительно заданных характеристик выходов.

Вторая классификация формирует три состояния: нормальное состояние – обеспечивается изменение величин технологического процесса в заданных диапазонах; идеальное состояние – режимы, при которых поддерживаются априори наилучшие (оптимальные) значения выходных переменных; критическое состояние – определяется режимами, при которых значения выходных переменных выходят из диапазонов, определяемых технологическими ограничениями.

Проводится *классификация задач управления процессом адсорбционного разделения*. В данной классификации выделены пять задач: 1) задачи, относящиеся к поддержанию среднезаданных концентраций целевых компонентов в выходных потоках; 2) задачи по поддержанию концентраций целевых компонентов в заданных диапазонах; 3) задачи по изменению концентраций по заданному закону; 4) задачи по эффективному использованию ресурсов системы; 5) комбинированные задачи, возникающие при совместном решении задач классов 1) – 4).

Для решения задач управления была разработана математическая модель процесса адсорбционного разделения воздушной смеси по методу КБА [1, 3].

С учетом проведенных исследований сформулирована следующая задача управления.

Необходимо в заданном диапазоне возмущающих воздействий найти такой вектор управления  $\mathbf{U} = \{\tau_{\text{пц}}, F\}$ , при котором выполняется условие

$$I = \left( \frac{1}{\tau_{\text{проц}}} \int_0^{\tau_{\text{проц}}} p_{\text{O}_2}(\mathbf{U}) d\tau - p_{\text{O}_2\text{ср}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $p_{\text{O}_2}$ ,  $p_{\text{O}_2\text{ср}}$  – фактическое и среднезаданное значение (физиологическая норма человека  $\approx 22000$  Па) парциального давления кислорода в продукционной газовой смеси.

С учетом ограничений:

– на отклонение фактического значения  $p_{\text{O}_2}$  от физиологической нормы \*

$$\underline{p_{\text{O}_2}} \leq p_{\text{O}_2} \leq \overline{p_{\text{O}_2}}; \quad (2)$$

– производительность установки по продукционной смеси

$$\underline{G_{\text{МСК}}} \leq G_{\text{МСК}} \leq \overline{G_{\text{МСК}}}; \quad (3)$$

– потребление исходной газовой смеси

$$\frac{1}{\tau_{\text{проц}}} \int_0^{\tau_{\text{проц}}} G_{\text{пит}} d\tau < \overline{G_{\text{пит}}} \quad (4)$$

и выполнение соответствующих уравнений связи в виде математической модели [1, 3].

Рассматриваемая задача не может быть решена в представленном виде [2], так как не известны заранее: характер потребления продукционной смеси (интенсивность дыхания)  $G_{\text{МСК}}(\tau)$ ; характер изменения барометрического давления  $P_{\text{БСК}}(\tau)$ ; характер изменения давления на выходе смеси концентрированной кислородом  $P_{\text{потр}}(\tau)$ ; вектор концентраций, разделяемой газовой смеси  $\mathbf{c}_{\text{пит}}(\tau)$ . Поэтому исходная задача декомпозирована на две – внешнюю и внутреннюю.

*Внешняя задача.* Необходимо найти такую величину времени полуцикла  $\tau_{\text{пц}}$ , при некоторых наиболее вероятных  $\widehat{G}_{\text{МСК}}(\tau)$ ,  $\widehat{P}_{\text{БСК}}(\tau)$ ,  $\widehat{P}_{\text{потр}}(\tau)$ ,  $\widehat{\mathbf{c}}_{\text{пит}}(\tau)$  и заданном значении  $\widehat{F}$ , чтобы выполнялись условия (1) – (4) при уравнениях связи в виде математической модели [1, 3].

*Внутренняя задача.*

Для  $G_{\text{МСК}}(\tau) = \widehat{G}_{\text{МСК}}(\tau) + \Delta G_{\text{МСК}}(\tau)$ ,  $P_{\text{БСК}}(\tau) = \widehat{P}_{\text{БСК}}(\tau) + \Delta P_{\text{БСК}}(\tau)$ ,  $P_{\text{потр}}(\tau) = \widehat{P}_{\text{потр}}(\tau) + \Delta P_{\text{потр}}(\tau)$ ,  $\mathbf{c}_{\text{пит}}(\tau) = \widehat{\mathbf{c}}_{\text{пит}}(\tau) + \Delta \mathbf{c}_{\text{пит}}(\tau)$  и найденного значения  $\tau_{\text{пц}}$  необходимо найти  $\Delta \widehat{F}$ , корректирующее решение внешней задачи такой, что выполняется условие (5).

\*

Здесь и далее знаки верхнего и нижнего подчеркивания означают верхний и нижний пределы изменения величины соответственно.

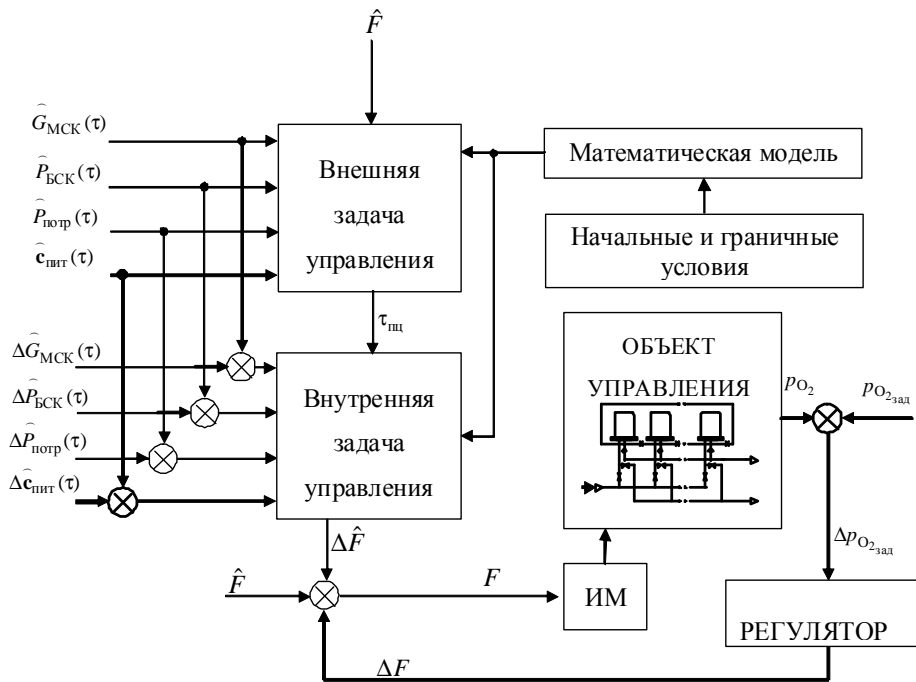


Рис. 2. Функционально-структурная схема решения общей задачи управления

$$I = \left( \frac{1}{\tau_{\text{проц}}} \int_0^{\tau_{\text{проц}}} p_{\text{O}_2}(F) dt \quad p_{\text{O}_2, \text{сп}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

с учетом ограничений (1) – (4).

На рис. 2 изображена функционально-структурная схема решения общей задачи управления.

Для реализации режимов выбрана жесткая активная система управления (двухуровневая СУ) (рис. 3).

Задачами нижнего уровня управления являются компенсация высокочастотных возмущений и обработка заданий, выдаваемых верхним уровнем в зависимости от изменений условий функционирования. На нижнем уровне происходит измерение: величины парциального давления кислорода в продукционной смеси  $p_{\text{O}_2}$ ; расхода потребляемой газовой смеси  $G_{\text{прод}}$ ; давления на выходе сбросовой смеси  $P_{\text{БСК}}$ ; давления на выходе продукционной смеси  $P_{\text{потр}}$ . Эти величины передаются на контроллер и на верхний уровень управления. В контроллере происходит вычисление отклонений  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  текущих значений  $p_{\text{O}_2}, G_{\text{прод}}$  от заданных на выходе датчиков ПЗ. По величине ошибки  $\varepsilon_p$  вырабатывает регулирующее воздействие  $x^p$ , которое подается на ИМ соответствующего РО. В ЭЗ управляющее воздействие для 2 и 3 (6 и 7) клапана сдвигается на одну треть и две трети времени полупериода соответственно. Регулирующие органы изменяют соответствующие расходы через дроссели  $G_{\text{д}}$  и расходы через

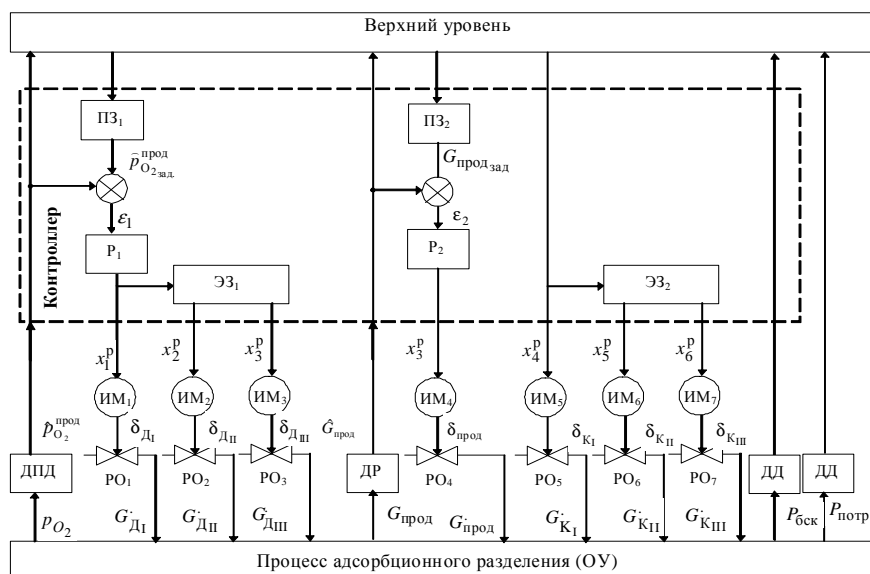


Рис. 3. Структурная схема замкнутой СУ нижнего уровня АСУТП

впускные (сбросовые) клапаны  $G_K$  (точкой обозначена изменяемая величина).

Верхний уровень СУ реализуется с использованием ЭВМ, в которой реализуется эталонная математическая модель объекта управления, и происходит расчет оптимальных заданий регуляторам по данным измерения нижнего уровня.

### Выводы

Применение данной системы управления позволяет обеспечивать требуемые показатели качества переходных процессов в системе автоматического управления при различных режимах функционирования установки адсорбционного разделения.

#### Список литературы

1. Матвейкин, В.Г. Математическое моделирование и управление процессом короткоцикловой безнагревной адсорбции / В.Г. Матвейкин, В.А. Погонин, С.Б. Путин, С.А. Скворцов. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 140 с.
2. Путин, С.Б. Математическое моделирование процесса газоформирования в биотехническом комплексе с использованием процесса адсорбционного разделения воздуха / С.Б. Путин, С.А. Скворцов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 6, № 4. – С. 434–438.
3. Беляев, Д.С. Математическое моделирование процесса адсорбционного разделения газовой смеси при многослойной загрузке шихты / Д.С. Беляев, С.Б. Путин, С.А. Скворцов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 2А. – С. 409 – 420.

## **Development of Control System over the Process of Adsorption Separation of Gas Mixture**

**D.S. Belyaev, S.B. Putin, S.A. Skvortsov**

*Tambov State Technical University;  
“Corporation “Roskhimzashchita”, Tambov*

**Key words and phrases:** automation of operational procedures; mathematical modeling of operational procedures.

**Abstract:** The system of control over the process of adsorption separation of gas mixture by method of short-cycle heatless adsorption through methods of mathematical modeling of chemical and technological processes is under development.

---

© Д.С. Беляев, С.Б. Путин, С.А. Скворцов, 2008