

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
АДСОРБЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СИСТЕМЕ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ УСЛОВНО-ЗАМКНУТОГО
ОБЪЕМА**

**В.Г. Матвейкин, С.Б. Путин,
С.А. Скворцов, С.С. Толстошеин**

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

Рецензент д-р физ.-мат. наук, профессор С.М. Дзюба

Ключевые слова и фразы: концентрирование углекислого газа; математическое моделирование; параметрическая идентификация; циклические адсорбционные процессы.

Аннотация: Разработана математическая модель процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения условно-замкнутого объема, которая позволяет изучать протекающие в ней процессы для различных состояний функционирования системы и быть пригодной для применения ее в составе системы управления процессом. Показаны особенности алгоритма расчета уравнений математической модели, а также решена задача идентификации неизвестных параметров.

Условные обозначения: a – концентрация газовой компоненты в адсорбенте, кг/кг; A – коэффициент вязкостного сопротивления зернистого слоя; b – параметр изотермы, м³/кг; B – инерционный коэффициент сопротивления зернистого слоя; c – концентрация газовой компоненты в воздушном потоке, кг/м³; D – эффективный коэффициент продольного перемешивания, м²/с; E – невязка материального баланса; G – объемный расход исходной газовой смеси в нормальных условиях, нм³/с; L – длина слоя адсорбента, м; N_k – порядок степенного ряда; n_k – количество адсорбируемых компонентов в газовой

Матвейкин Валерий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление», ТамбГТУ, заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «Росхимзащита»; Путин Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ТамбГТУ, заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «Росхимзащита»; Скворцов Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; Толстошеин Сергей Серафимович – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», e-mail: stolstoshein@yandex.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

смеси; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); S – площадь поперечного сечения адсорбера, м²; T – абсолютная температура, К; $T_{ан}$ – температура адсорбента при н.у., К; w – линейная скорость потока, м/с; $Oxyz$ – прямоугольная система координат в адсорбере; β – кинетический коэффициент адсорбции, с⁻¹; ΔH – тепловой эффект адсорбции, Дж/моль; Δz – шаг сетки по длине; $\Delta \tau$ – шаг сетки по времени; δ – нормирующая величина, (кг·м)/м³; ε – порозность слоя; λ – теплопроводность вещества, Вт/(м·К); μ – динамическая вязкость газовой смеси, Па·с; ρ – насыпная плотность адсорбента, кг/м³; τ – время процесса, с; A – адсорбер; B – вентилятор; K – клапан; Π – парогенератор.

Индексы: 0 – начальное значение; 1 – углекислый газ; 2 – вода; а – адсорбент; в – вентилятор; вх – вход; вых – выход; п – парогенератор; пт – перепуск; су – система управления; з – заданная величина; max – максимальное значение; ∞ – предельное значение; * – равновесное значение.

На современном этапе развития человечества особенно актуальными становятся вопросы освоения сред с экстремальными для него условиями обитания, что требует разработки новых поколений технических систем, обеспечивающих жизнедеятельность человека во время его длительного автономного пребывания в замкнутых пространствах, когда отсутствует возможность пополнения расходуемых продуктов обеспечения жизнедеятельности.

Одной из важнейших в системе жизнеобеспечения (**СЖО**) является подсистема обеспечения физиологических норм дыхания человека. Подсистема строится по замкнутому принципу, реализуемому концентрированием углекислого газа в потоке, отбираемом из среды обитания. Наиболее эффективный и целесообразный способ концентрирования углекислого газа основывается на использовании циклических адсорбционных процессов, которые по своей сути являются сложной системой массообменных, тепловых, гидромеханических и химических процессов.

Разработана математическая модель процесса адсорбции углекислого газа, пригодная для проведения имитационных исследований, а также решения задач управления в широком диапазоне входных воздействий. Технологическая схема процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в СЖО приведена на рис. 1.

Исходная газовая смесь, состоящая из воздуха, паров воды и углекислого газа, вентилятором B подается через регулируемый клапан K_9 на вход концентратора. Через клапан K_{13} исходная смесь поступает в адсорбер A_1 , где начинает вытеснять «горячую» паровую среду, которая далее через клапан K_8 подается в адсорбер A_2 . В адсорбере A_2 происходит вытеснение «холодной» среды, которая последовательно через клапаны K_{25} и K_7 поступает на выход концентратора. После этого происходит переключение клапанов: закрываются клапаны K_{13} и K_8 , открытыми становятся клапаны K_{21} , K_{12} , K_{14} и по-прежнему открыты K_{25} , K_7 . Исходная газовая

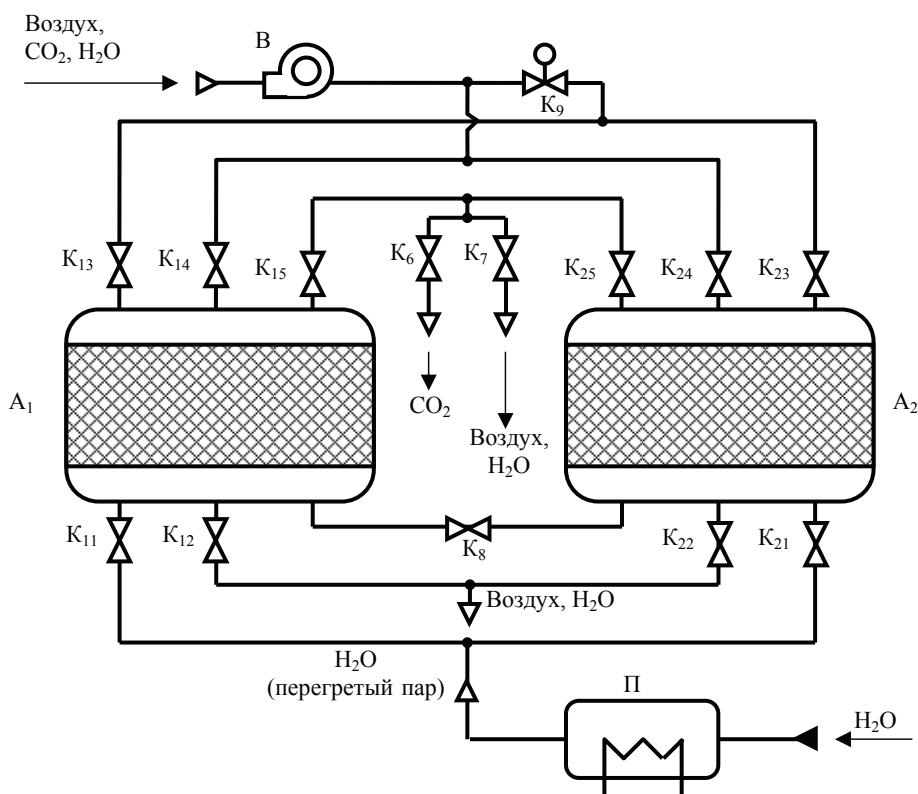


Рис. 1. Технологическая схема процесса концентрирования углекислого газа

смесь через клапан K_{14} начинает поступать в адсорбер A_1 , где происходит селективное поглощение углекислого газа и воды. Через клапан K_{12} на выход концентратора поступает очищенная от углекислого газа газовая смесь воздуха и воды. Одновременно с этим в адсорбер A_2 через клапан K_{21} подается перегретый пар. Адсорбент в A_2 принимает тепло перегретого пара, вследствие чего начинается процесс десорбции углекислого газа в лобовом слое. Повышение парциального давления углекислого газа в последующих, менее нагретых, слоях приводит к его адсорбции. В слое возникает сорбционный фронт углекислого газа, который начинает перемещение к концевому слою адсорбента. На выход адсорбера A_2 через клапан K_{25} и K_7 поступает газовая смесь, состоящая преимущественно из воздуха и воды. Этот процесс (выделение воздуха) заканчивается в тот момент, когда сорбционный фронт углекислого газа достигает концевого слоя адсорбента. В этот момент начинается фаза активного выделения углекислого газа, что сопровождается резким ростом расхода и концентрации углекислого газа на выходе, установка переходит в режим продуцирования углекислого газа. По окончании продуцирования углекислого газа закрываются клапаны K_{12} , K_{14} , K_{21} , K_{25} , K_6 , открываются K_{23} , K_{15} , K_7 , K_8 и происходит перепуск тепла из адсорбера A_2 в адсорбер A_1 . Теперь процесс адсорбции углекислого газа проводится в A_2 , а в адсорбере A_1 осуществляется десорбция углекислого газа. Поочередное переключение адсорберов позволяет получить непрерывный характер процесса.

Анализ подходов к моделированию процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа показал, что целесообразно построение математического описания по модульному принципу, заключающемуся в раздельном математическом описании следующих модулей: вентилятор, клапаны (трубопроводные системы), адсорберы, парогенератор, система энергоснабжения, системы управления, обитаемая среда.

Схема взаимодействия модулей адсорбционного концентрирования углекислого газа представлена на рис. 2.

Процессы, протекающие в адсорберах концентратора углекислого газа, являются определяющими. Поэтому их адекватное математическое описание является приоритетной задачей математического моделирования процесса концентрирования углекислого газа.

Принимаем прямоугольную систему координат $Oxyz$. Поместим ее начало в точке, соответствующей лобовому слою адсорбента, так, чтобы ось Oz совпала с осью цилиндрического корпуса адсорбера, как показано на рис. 3.

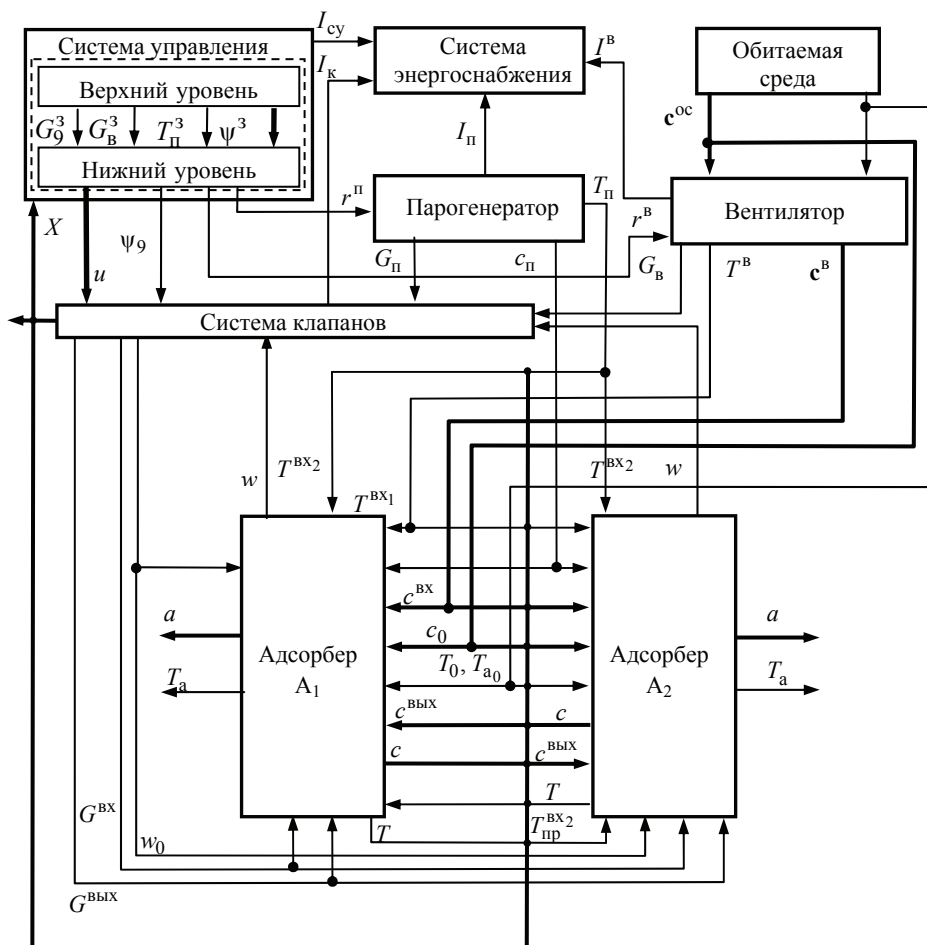


Рис. 2. Структурная схема модульной математической модели системы адсорбционного концентрирования углекислого газа

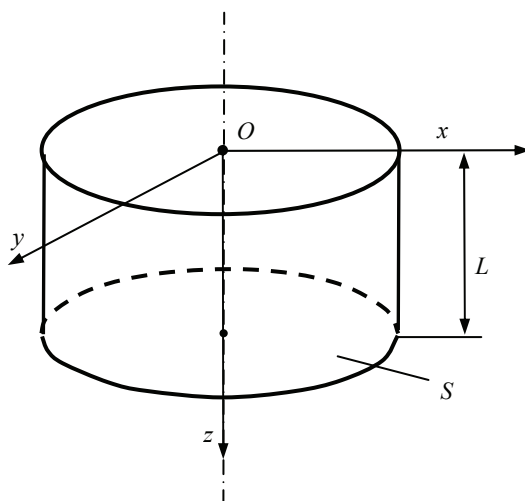


Рис. 3. Схема привязки системы координат в адсорбере

При разработке математического описания процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа принимаем следующую систему допущений [1]:

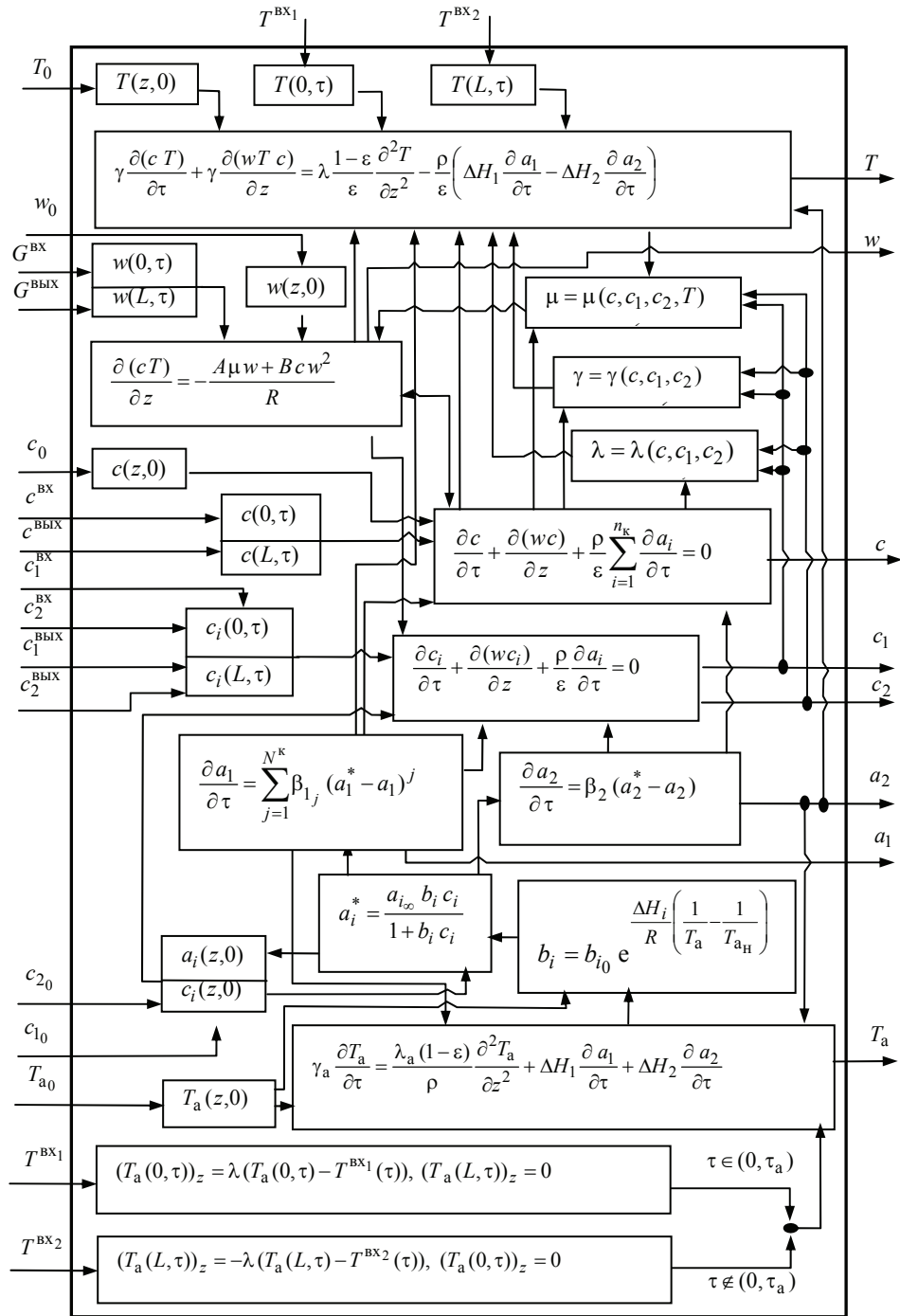
- 1) процесс адсорбции углекислого газа изотермичен;
- 2) физические характеристики исходной газовой смеси соответствуют характеристикам сухого воздуха;
- 3) влияние влажности на динамическую активность адсорбента по углекислому газу пренебрежимо мало;
- 4) перепад общего давления по длине зернистого слоя адсорбента отсутствует;
- 5) скорость процессов массопереноса вдоль продольной оси Oz слоя значительно превышает скорость процессов массопереноса вдоль поперечных осей;
- 6) разделяемая газовая смесь обладает свойствами идеального газа;
- 7) влияние пристеночных эффектов в сорбционном слое на профиль скорости газовой смеси мало.

В соответствии с принятыми допущениями рассмотрим построение математического описания модуля «Адсорбер», структура которого представлена на рис. 4.

Кинетика адсорбции является одним из самых малоизученных разделов адсорбционной технологии [2]. Уравнение кинетики адсорбции рассмотрим в виде

$$\frac{\partial a_1}{\partial \tau} = \sum_{j=1}^{N^k} (\beta_{1j} (a^* - a))^j. \quad (1)$$

Такое представление уравнений кинетики отличается от известных из литературы дополнительной степенью свободы по отношению к воспроизводимости экспериментальных данных и позволяет проводить исследование динамики неравновесного процесса адсорбции вдали от состояния равновесия.



$A, B, \rho, \varepsilon, \gamma_a, \lambda_a, n_k, R, T_{aH}, S, \Delta H_i, b_{i0}, a_{i\infty}, \beta_{ij}, j=1, N^k, i=1, n_k$

Рис. 4. Структура математического описания модуля «Адсорбер»

Математические описания модулей «Обитаемая среда», «Парогенератор», «Система энергоснабжения», «Система управления», «Вентилятор», «Система клапанов» в общем виде представляют собой следующие функциональные операторы:

$$(c^{oc}, T^{oc}) = M^{oc}(\tau); \quad (2)$$

$$(I_{п}, G_{п}, T_{п}, c_{п}) = M^{п}(r_{п}, T_{п}^{3д}); \quad (3)$$

$$P = M^{сз}(I_{сy}, I_{к}, I_{п}, I_{в}); \quad (4)$$

$$(u, r_{п}, r_{в}) = M^{сy}(X, \tau); \quad (5)$$

$$(I_{в}, G_{в}, T_{в}, c_{в}) = M^{в}(r_{в}, T^{oc}, c^{oc}); \quad (6)$$

$$(G_0, G, w_0, G^{вх}, G^{вых}, I_{к}) = M^{ск}(\psi_0, G_{в}, G_{п}, w, u). \quad (7)$$

Качественный анализ математического описания процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа показал, что система уравнений (см. рис. 4) является «жесткой» и требует разработки специальных алгоритмов ее решения. Разработан алгоритм, реализующий метод адаптивной неявной сетки с автоматическим контролем точности получаемых решений на основе вычисления обобщенного материального баланса технологической схемы. Алгоритм является устойчивым по отношению к заданию исходных данных и обеспечивает высокую скорость расчета.

Недостаток априорной информации о характере протекающих процессов приводит к тому, что существуют параметры процесса, которые невозможно оценить с требуемой точностью, но они входят в математическое описание и выражают количественные характеристики конкретного процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа. К таким параметрам относятся кинетические коэффициенты β_i , $i = \overline{1, N}$. Особенностью решения задачи параметрической идентификации является одновременная идентификация порядка кинетического уравнения (1) и значений кинетических коэффициентов. В качестве экспериментальных данных были использованы зависимости концентраций углекислого газа от времени на выходе из адсорбера для различной производительности по исходной смеси.

В качестве экспериментальных данных используются записи динамики концентрации углекислого газа на выходе из адсорбера. Экспериментальные данные были разделены на две группы. Первая использовалась для решения задачи идентификации, а вторая для проверки адекватности математической модели. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало удовлетворительную точность воспроизведения результатов эксперимента.

На основе разработанной математической модели проведено математическое моделирование процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа, в результате которого определено влияние различных параметров на характер протекания процесса, а именно: расхода, температу-

ры, состава подаваемой газовой смеси, мощности парогенератора и вентилятора, характеристик адсорбционного слоя.

Таким образом, разработана математическая модель процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения условно-замкнутого объема, которая позволяет изучать протекающие в ней процессы для различных состояний функционирования системы и быть пригодной для применения ее в составе системы управления процессом. Данная математическая модель использована в контурах обучения тренажерного комплекса для подготовки персонала космического летательного аппарата.

Список литературы

1. Серпионова, Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е.Н. Серпионова. – М. : Высшая школа, 1969. – 416 с.
2. Шумяцкий, Ю.И. Промышленные адсорбционные процессы / Ю.И. Шумяцкий. – М. : КолосС, 2009. – 183 с.

Mathematical Modelling of the Process of Adsorption Concentration of Carbon Dioxide in the Life-Support System of the Conditional-Closed Volume

V.G. Matveikin, S.B. Putin, S.A. Skvortsov, S.S. Tolstoshein

*Tambov State Technical University, Tambov;
ОАО «Corporation Roskhimzashchita», Tambov*

Key words and phrases: concentration carbonic acid; cyclic adsorptive process; mathematical modeling; parametric identification.

Abstract: The paper presents the mathematical model of adsorption concentration of carbon dioxide into life-support system of conditionally closed volume, which makes it possible to study the processes occurring in it for different states of the system; the model can be applied in the process control system. Specific features of the algorithm for calculating the equations of mathematical models are shown; the problem of parametric identification of unknown parameters is solved.

© В.Г. Матвейкин, С.Б. Путин,
С.А. Скворцов, С.С. Толстошеин, 2011