

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В УБЕЖИЩАХ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ

Юлия Ревякина

Национальная академия природоохранного и курортного строительства
Адрес: Украина, 95493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181. e-mail: www.napks.edu.ua

Аннотация. В статье представлена математическая модель тепломассопереноса в процессе регенерации воздуха, осуществляемого в установках РУ-150/6 в режиме герметизации.

Ключевые слова: регенерация воздуха, убежище, математическая модель, тепломассоперенос, регенеративная установка, супероксид.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексные исследования процесса регенерации воздуха, осуществляемого в регенеративных установках РУ-150/6, факторов, влияющих на характер его протекания, и вопросов управления указанным процессом в герметично замкнутом объеме, должны проводиться на основе адекватной математической модели.

Решение данной задачи невозможно без моделирования процесса регенерации, основанного на явлении хемосорбции, которое в данном случае описывается системой уравнений тепломассопереноса при определении начальных и граничных условий режима герметизации [9, 10].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Используемые в настоящее время в защитных сооружениях фильтровентиляционные комплекты ФВК-1 и ФВК-2 для обеспечения второго и третьего режимов вентиляции в соответствии с требованиями СНИП II-11-77* являются морально устаревшими, а их основные элементы сняты с производства, что не позволяет решать задачи оснащения вновь строящихся, реконструируемых и эксплуатируемых убежищ.

Производство регенеративной части комплектов, состоящих из установок РУ-150/6 или "Устройства-300", осуществляемое ранее ОАО "Заря" и ОАО "ЭХМЗ", прекращено.

Вышесказанное актуализирует задачи разработки средств регенерации воздуха защитных сооружений, обладающих высокими защитными свойствами и обеспечивающих требуемые условия обитания укрываемых [8].

Однако процессы, протекающие при регенерации воздушной среды герметизированных помещений убежищ, характеризуются высокой сложностью вследствие присутствия множества малоизученных факторов, а также значительной стоимости натуральных экспериментов в реальных защитных сооружениях [6]. Поэтому математическое моделирование процессов, имеющих место при регене-

рации воздуха, представляется наиболее перспективным при решении проблемы повышения эффективности работы существующих установок.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Динамике сорбционных процессов посвящено достаточно много литературы [4, 7]. Однако число работ, касающихся исследования вопросов собственно динамики хемосорбции, существенно ограничено [5, 6]. Особенно это касается поглощительных процессов, протекающих в регенеративных установках РУ-150/6 и характеризующихся одновременным выделением кислорода и большого количества тепла [1, 2].

Литературы, в которой бы освещались вопросы повышения эффективности использования регенеративных патронов в существующих устройствах не обнаружено.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка математической модели тепломассопереноса, протекающего при регенерации воздуха для исследования и повышения эффективности процессов восстановления газового состава в герметично замкнутом объеме убежищ гражданской защиты.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Решение поставленных задач проводилось с помощью методов физического и математического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Процесс регенерации воздуха, осуществляемый в установках РУ-150/6, с участием надпероксидных регенеративных продуктов основан на явлении хемосорбции, сопровождающегося выделением тепла при химической реакции. Процесс хемо-

сорбции в этом случае будет описываться системой уравнений тепломассопереноса.

Математическое описание динамики сорбции представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных для каждого поглощаемого/выделяемого вещества.

На основании анализа экспертных сведений и экспериментальных данных [3, 6] при формировании системы уравнений математической модели ПРВ в соответствии с возможностями практического расчета примем ряд допущений:

- в реакторах СКЗ происходит поглощение только диоксида углерода и восстановление только кислорода, поглощение других веществ из воздуха помещений пренебрежимо мало;

- воздух, поступающий на вход регенеративного элемента, является ньютоновской несжимаемой жидкостью (т. е. для плотности воздуха можно принять $\partial \rho / \partial t = \partial \rho / \partial x = 0$); подвижная фаза несжимаема;

- переходные режимы (запуск регенеративного элемента в работу) непродолжительны, а основное время регенеративный элемент работает при малом изменении теплофизических параметров, что позволяет считать протекающий в реакторах СКЗ процесс регенерации воздуха изотермическим;

- движение воздуха внутри регенеративного элемента - осевое со средней линейной скоростью ω , определяемой по расходу вентилятора и сечению элемента;

- реакторы СКЗ являются реакторами диффузионного типа, т.е. помимо основного направления газового потока в реакторе присутствует диффузионное перемешивание по длине (радиальное перемешивание не рассматривается, поскольку имеет место в случае малого отношения длины к диаметру и большой поперечной неравномерности скоростей потоков).

С учетом принятых допущений динамика процесса регенерации воздуха, протекающего в регенеративном элементе, будет описываться системой следующих уравнений: уравнение материального баланса, уравнение кинетики сорбции и уравнение изотермы сорбции [3].

Для вывода уравнения материального баланса рассмотрим элементарный объем регенеративного вещества длиной dx площадью поперечного сечения dS .

Количество вещества (диоксида углерода или кислорода), вносимого в элементарный объем потоком воздуха через площадь dS за время dt , составляет $\omega C dS dt$, а потоком, вызванным продольной турбулентной диффузией

$$D \frac{\partial}{\partial x} \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) dS dt,$$

где ω - линейная скорость воздуха; C - концентрация вещества в газовой фазе; D - коэффициент продольной диффузии.

Количество вещества, вышедшего с воздушным потоком, равно:

$$\omega \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) dS dt;$$

с диффузионным потоком -

$$D \frac{\partial C}{\partial x} dS dt.$$

Изменение концентрации веществ в элементарном объеме вызовет изменение концентрации вещества в адсорбенте и подвижной фазе. В адсорбенте оно будет равно $\frac{\partial a}{\partial t} dS dt dx$, в потоке $\frac{\partial C}{\partial t} dS dt dx$, где a - концентрация вещества в регенеративном веществе.

В соответствии с законом сохранения массы разность между входящими и выходящими потоками будет составлять изменение количества вещества в рассматриваемом элементарном объеме (рис. 1), т. е.

Изменение = Приход вещества - Расход вещества

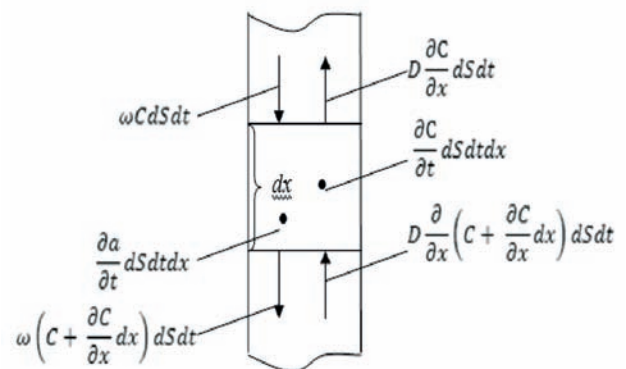


Рис. 1. Элементарный объем
Fig. 1. Elementary volume

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial t} dS dt dx + \frac{\partial C}{\partial t} dS dt dx = & \left(\omega C dS dt + D \frac{\partial}{\partial x} \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) dS dt \right) - \\ & - \left(\omega \left(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) dS dt + D \frac{\partial C}{\partial x} dS dt \right). \end{aligned} \quad (1)$$

В результате преобразований получаем:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \omega \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (2)$$

Скорость сорбции $\frac{\partial a}{\partial t}$ определяется из уравнения кинетики сорбции, которое показывает количество поглощаемого вещества из газового потока в единицу времени единицей объема поглотителя, в общем случае имеет вид [3, 6]:

$$\frac{da}{dt} = \beta(C - C^*),$$

где β – коэффициент массообмена; C – текущая

$$\Psi_i^j(t, x) = -\frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t} = \begin{cases} \beta_i^{O_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(\frac{a_i^{O_2}(t, x)}{a_{i0}^{O_2}} \right), \text{выделение;} \\ -\beta_i^{CO_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(1 - \frac{a_i^{CO_2}(t, x)}{a_{i0}^{CO_2}} \right), \text{поглощение.} \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, система уравнений динамики сорбции будет описываться уравнениями (2) - (3).

При построении математической модели процесса теплопереноса в системах патрон-продукт рассмотрим нестационарное температурное поле в регенеративном патроне цилиндрической формы (рис. 2) [2].

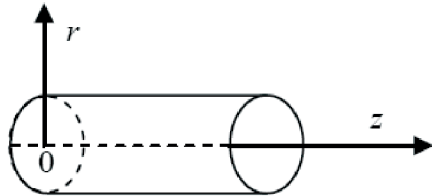


Рис. 2. К постановке краевой задачи теплопереноса в цилиндрическом патроне
Fig. 2. By setting a boundary value problem of heat transfer in regenerative cylinder-shaped

$$(c_3 \rho_3) \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial \tau} = -\frac{2\bar{\alpha}}{R_0} [\bar{T}(z, \tau) - T_c] - w c^T \rho^T \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial z} + q_V(z, \tau), \quad (4)$$

$$z > 0, \tau > 0;$$

$$\bar{T}(z, 0) = \bar{T}_0 \quad (5)$$

$$\bar{T}(0, \tau) = \bar{T}_{вх}(\tau), \quad (6)$$

где $c_3 \rho_3, c^T \rho^T$ - эффективная объемная теплоемкость шихты и объемная теплоемкость газа, соответственно; w - средняя по сечению скорость газа, м/с; q_V - объемная мощность внутренних источников

концентрация поглощаемого вещества в потоке газа; C^* – равновесная концентрация, равная текущей величине сорбции.

Для упрощения математической модели предположим, что изменение давления потока воздушной смеси в реакторах СКЗ не оказывает существенного влияния на ПРВ, реакторы имеют постоянное поперечное сечение, являются однослойными и включают только один вид сорбента (хемосорбента). При этом численное решение математической модели при проведении вычислительного эксперимента будет осуществляться с использованием уравнения кинетики сорбции на примере уравнения типа бимолекулярной реакции:

Для упрощения расчетов принимается ряд допущений [1, 2]:

- перенос теплоты вдоль оси z за счет теплопроводности пренебрежимо мал по сравнению с переносом теплоты за счет конвективного движения газа;
- температурное поле симметрично относительно координаты z ;
- объемная мощность внутренних источников тепла зависит только от продольной координаты z и времени;
- в связи с относительно малыми размерами частиц регенеративного продукта (шихты) температура проходящего газа равна температуре шихты.

Для двумерного нестационарного температурного поля в регенеративном патроне цилиндрической формы с учетом сформулированных допущений уравнение переноса теплоты запишется в виде

тепла; R_0 - радиус обечайки патрона, м; \bar{T}_0 - начальная температура; $\bar{T}_{вх}$ - температура во входном сечении шихты; T_c - температура среды; $\bar{\alpha}$ - скорректированное значение коэффициента теплообмена,

позволяющее использовать среднеинтегральное значение температуры $\bar{T}(z, \tau)$, вычисляемое по формуле

$$\bar{T}(z, \tau) = \int_0^{R_0} T(r, z, \tau) r dr / \int_0^{R_0} r dr = \frac{2}{R_0^2} \int_0^{R_0} T(r, z, \tau) r dr;$$

$q_V(z, \tau)$ - мощность внутренних источников тепла, которая при хемосорбции прямо пропорциональна скорости химической реакции

$$q_V(z, \tau) = H_{\Sigma} \frac{\partial a}{\partial \tau}. \quad (7)$$

При известных значениях суммарного теплового эффекта химической реакции H_{Σ} , сопровождающих процесс регенерации воздуха, а также по полученным экспериментальным значениям

$q_V(z, \tau)$ можно по формуле (7) вычислить скорость поглощения реагента $\partial a / \partial \tau$.

Таким образом, в виде уравнений (4) - (7) представлена математическая модель теплопереноса в регенеративном патроне цилиндрической формы.

Окончательное формирование математической модели процесса теплопереноса в герметично замкнутом объеме заключается в сведении в единую систему уравнений рассмотренных выше математических описаний процессов, протекающих при регенерации воздуха:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \omega \frac{\partial C}{\partial x}. \\ \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t} = \begin{cases} \beta_i^{O_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(\frac{a_i^{O_2}(t, x)}{a_{i0}^{O_2}} \right), \text{ выделение;} \\ -\beta_i^{CO_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(1 - \frac{a_i^{CO_2}(t, x)}{a_{i0}^{CO_2}} \right), \text{ поглощение;} \end{cases} \\ i=1, \dots, n, j=1, 2; \\ (c_3 \rho_3) \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial \tau} = -\frac{2\bar{\alpha}}{R_0} [\bar{T}(z, \tau) - T_c] - w c^r \rho^r \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial z} + q_V(z, \tau), \\ z > 0, \tau > 0; \\ \bar{T}(z, 0) = \bar{T}_0; \\ \bar{T}(0, \tau) = \bar{T}_{вх}(\tau), \\ q_V(z, \tau) = H_{\Sigma} \frac{\partial a}{\partial \tau}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Полученная система уравнений (8) представляет собой математическое описание выделительно-погложительных процессов, протекающих при восстановлении газового состава воздуха убежищ гражданской защиты в режиме герметизации, с одновременным учетом теплопереноса.

ВЫВОДЫ

Таким образом, построена математическая модель процесса теплопереноса, протекающего при регенерации воздуха в установках РУ-150/6 в условиях герметизации. Данная модель позволяет решать широкий круг задач, в том числе проведения имитационных исследований, постановки и решения задач управления, разработки алгоритмов и систем управления в убежищах

гражданской защиты при восстановлении газовой среды в режиме изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабанов П., Кримштейн А., Пономарев С., 2008.: Исследование кинетики поглощения углекислого газа и влаги регенеративными веществами путем определения мощности внутренних источников тепла// Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – Том 14, № 3, 503 – 512.
2. Балабанов П., Пономарев С., Трофимов А., 2008.: Математическое моделирование теплопереноса в процессе хемосорбции// Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – Том 14, № 2, 334 – 341.
3. Дворецкий С., Матвеев С., Путин С., Туголуков Е., 2008.: Основы математического модели-

рования и оптимизации процессов и систем очистки и регенерации воздуха: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та. – 324.

4. Дубинин М., 1932.: Физико-химические основы сорбционной техники. – М. – Л.: Гос. хим.-тех. издательство. – 382.

5. Мищенко С., Балабанов П., Кримштейн А., Пономарев С., 2010.: Динамика хемосорбции регенеративными веществами на основе супероксидов щелочных металлов и поглотителей// Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. - Том 16, № 4, 870 – 881.

6. Путин С., 2008.: Математическое моделирование и управление процессом регенерации воздуха. – М.: Машиностроение. – 176.

7. Серпионова Е., 1969.: Промышленная адсорбция газов и паров. – М.: «Высшая школа». – 415.

8. Усов В., Матвеев С., Филиппова Т., Акулинина Г., 2009.: Комплекс средств регенерации и очистки воздуха от химически опасных веществ на базе изделия РВ-150, фильтров-поглотителей с блочным сорбирующим материалом и предфильтров с повышенной эффективностью и пылеемкостью // Материалы Рос. науч. конф. Стратегия развития научно-

производственного комплекса РФ в области разработки и производства систем жизнеобеспечения и защиты человека в условиях химической и биологической опасности. – Тамбов: Издательский дом ТГУ им. Державина, 158 – 159.

9. Vdovenko S., Wojchenko S., Cherniak L., Badakh V., 2010.: Ecological aspects of torch gases utilization at petroleum refinery// MOTROL. - №12D, 66 – 71.

10. Стоянов В. и др. , 2010.: Исследование процессов регенерации воздуха герметичных помещений защитных сооружений// MOTROL. - №12С, 171 – 180.

MATHEMATICAL MODELING OF MASS AND HEAT TRANSFER DURING AIR REGENERATION

Summary. The paper studied the mathematical model of mass and heat transfer during process of air regeneration which takes place in sealed rooms of shelters.

Key words: air regeneration, shelter, mathematical model, mass and heat transfer, regenerative installation, superoxide.