

УДК 622.867.322:614.894

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ФИЛЬТРА НА ДИНАМИКУ СОРБЦИИ ВРЕДНОЙ ПРИМЕСИ

С. Г. Ехилевский, д.т.н., профессор, Е.П. Потапенко

УО «Полоцкий государственный университет», г. Полоцк, Республика Беларусь

Исследовано влияние ненулевых начальных условий на формирование квазистационарного профиля концентрации CO_2 в протекающем через регенеративный патрон воздухе и распределение связанного углерода в толще кислородсодержащего продукта. Получены уравнения в частных производных, описывающие кинетику сорбции и баланс молекул углекислого газа. Развита итерационная процедура их решения, положенная в основу сколь угодно точного численного экспериментирования. Смоделированы процессы, развивающиеся в регенеративном патроне при десорбции связанного углерода из частично или полностью отработанного патрона.

Введение

В классической постановке при математическом моделировании сорбции углекислого газа в изолирующих дыхательных аппаратах пользуются стационарными краевыми и нулевыми начальными условиями [1-3]. Это означает неизменность режима фильтрации и отсутствие связанного углерода в толще кислородсодержащего продукта в момент включения шахтера или горноспасателя в аппарат. В работе [4] соответствующие результаты обобщены на случай переменной концентрации молекул CO_2 на входе в фильтр, что позволило адекватно смоделировать аппараты с круговой схемой воздухопроводной части [5] и неоднородно снаряженными регенеративными патронами [6]. Однако остаются реальные ситуации, моделирование которых требует учета начальной загрязненности регенеративного патрона. Например, после изменения физической нагрузки шахтера заново формируется структура работающего слоя хемосорбента. И происходит это на фоне уже имеющегося распределения связанного углерода, отражающего особенности динамики сорбции в предыдущем режиме эксплуатации аппарата. Аналогичная ситуация возможна и при реверсе воздушного потока [7].

Чтобы адекватно моделировать описанные ситуации необходимо обобщить развитый в [3, 4] формализм на случай ненулевой и неоднородной начальной загрязненности регенеративного патрона. Решению этой задачи посвящена данная публикация.

Основная часть

Рассмотрим плоско-параллельное течение воздуха через кислородсодержащий продукт. Если скорость фильтрации v постоянна, то эволюция объемной концентрации W молекул CO_2 в токе воздуха и плотности связанного углерода U описывается уравнениями (7), (8) работы в [4] отражающими баланс молекул углекислого газа и кинетику сорбции

$$-vW'_x = (W + U)_t' \quad (1)$$

$$U'_t = \beta(W - \gamma U), \quad (2)$$

где t – время, x – координата, растущая в направлении течения, а β и γ – феноменологические постоянные, характеризующие скорость и ресурс реакции. После формирования квазистационарного распределения W первым слагаемым в правой части (1) можно пренебречь (подробнее см. получение (10) в [4])

$$-vW'_x = U'_t. \quad (3)$$

Подставив (2) в (3), получим

$$-vW'_x = \beta(W - \gamma U). \quad (4)$$

Чтобы сделать дальнейшее описание универсальным и не зависящим от вида аппарата и режима его эксплуатации, перепишем уравнения (1), (2) в терминах введенных в [3] обезразмеренных переменных

$$\xi = \beta x / v, \quad \tau = \beta \gamma t, \quad (5)$$

и приведенных концентраций

$$\omega = W / W_0, \quad u = \gamma U / W_0, \quad (6)$$

где W_0 – некоторая постоянная, имеющая размерность объемной концентрации и задающая характерный масштаб ее изменения в рассматриваемой задаче. В результате, уравнения (4), (2) примут вид

$$-\omega'_\xi = \omega + u, \quad (7)$$

$$u'_\tau = \omega - u. \quad (8)$$

Воспользовавшись линейностью (8) выразим в общем виде $u(\xi, \tau)$ через $\omega(\xi, \tau)$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \left(u(\xi, 0) + \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau \right), \quad \tau \geq 0 \quad (9)$$

где $u(\xi, 0)$ - начальная загрязненность патрона.

Подставив (9) в (7), получим уравнение для определения ω

$$-\omega'_{\xi}(\xi, \tau) = \omega(\xi, \tau) - e^{-\tau} \left[u(\xi, 0) + \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau \right], \quad \tau \geq 0. \quad (10)$$

Его решение будем искать в виде ряда

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n, \quad (11)$$

где $f_n(\tau)$ - неизвестные функции, подлежащие дальнейшему определению. Чтобы найти $f_n(\tau)$ подставим (11) и разложение начальной загрязненности в уравнение (10). Выполнив после этого почленное дифференцирование и интегрирование, приравняем коэффициенты при одинаковых степенях ξ

$$f_{n+1}(\tau) = u_{\xi}^{(n)}(0, 0) + \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau - f_n(\tau), \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (12)$$

Рекуррентное соотношение (12) позволяет по известному $f_0(\tau)$ последовательно вычислить все $f_n(\tau)$ до какого угодно номера. Согласно (11) $f_0(\tau)$ связано со значением $\omega(0, \tau)$ приведенной концентрации углекислого газа на входе в поглощающий слой. Положив в (11) $\xi = 0$, получим:

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau) \quad (13)$$

Соотношения (6), (9), (11) – (13) позволяют с любой требуемой точность вычислить концентрацию углекислого газа в регенерируемом воздухе и распределение связанного углерода в толще кислородсодержащего продукта при наличии произвольной начальной загрязненности патрона и переменной концентрации молекул CO_2 на входе в фильтр.

В частности, при отсутствии начальной загрязненности $u(\xi, 0) = 0$ и постоянной концентрации сорбтива на входе в фильтр $\omega(0, \tau) = 1$ с помощью (9), (11) – (13) получается известный результат (см. (10) в [3] и (21) в [5] при $\alpha = 1$)

$$u1(\xi, \tau1 + \tau) \equiv u(\xi, \tau), \quad (14)$$

$$u1(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left(1 - e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right). \quad (15)$$

Тестом на правильность новой теории может служить следующее рассуждение. Выберем момент времени $\tau1$ в (15) качестве начального для соотношений (9), (11) – (13). В этом случае в качестве $u(\xi, 0)$ в (9), (10) следует подставить $u1(\xi, \tau1)$. При этом

$$u_{\xi}^{(n)}(0, 0) = u1_{\xi}^{(n)}(0, \tau1) = \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} C_n^k \left(1 - e^{-\tau1} \sum_{m=0}^k \frac{\tau1^m}{m!} \right), \quad (16)$$

в чем можно убедиться непосредственно, где C_n^k - числа сочетаний из n объектов по k .

Дальнейшее описание эволюции приведенной концентрации можно осуществлять как с помощью формул (14), (15) так и с помощью (9), (11) – (13) с $\omega(0, \tau) = 1$ в (13), так как на входе в продукт поддерживается постоянная концентрация CO_2 . При этом, очевидно, что в соответствие с изложенным, для любых положительных ξ и τ должны выполняться тождества:

$$\omega1(\xi, \tau1 + \tau) \equiv \omega(\xi, \tau), \quad u1(\xi, \tau1 + \tau) \equiv u(\xi, \tau), \quad (17)$$

т.к. оба формализма описывают одну и ту же задачу динамики сорбции, что и подтверждают выполненные в MathCAD расчеты.

Поскольку при получении (9), (11) – (13) не использовалось ограничение $\omega \geq u$, с помощью развитого формализма можно моделировать процесс десорбции CO_2 или очистки отработанного фильтра. В такой постановке:

$$u(\xi, 0) = 1 = u_{\xi}^{(0)}(0, 0), \quad u_{\xi}^{(n)}(0, 0) = 0, \quad n \neq 0, \quad (18)$$

а на вход фильтра поступает чистый воздух $\omega(0, \tau) = 0$, что согласно (13) означает:

$$f_0(\tau) = 0, \quad (19)$$

Подставив (18), (19) в (12), (13) получим, выполнив интегрирование по τ

$$f_n(\tau) = - \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^{n-k} C_{n-1}^k \frac{\tau^k}{k!}. \quad (20)$$

На рисунках 1, 2 представлены построенные с помощью (9), (11), (18), (20) зависимости приведенной концентрации CO_2 и плотности связанного углерода как функции координаты для различных моментов времени. Видно, что в процессе фильтрации происходит загрязнение чистого воздуха и вымывание связанного углерода. По мере освобождения лобовых слоев ф

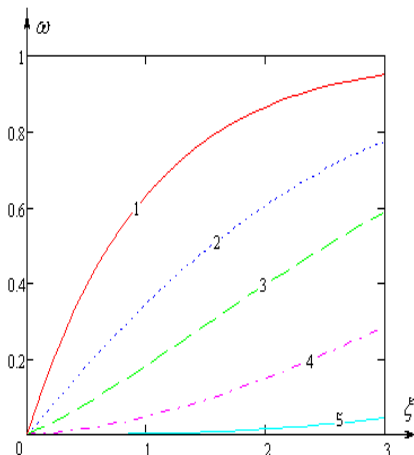


Рисунок 1 – Зависимость приведенной концентрации сорбтива от координаты при регенерации фильтра: 1 - $\tau = 0$; 2 - $\tau = 1$; 3 - $\tau = 2$; 4 - $\tau = 4$; 5 - $\tau = 8$

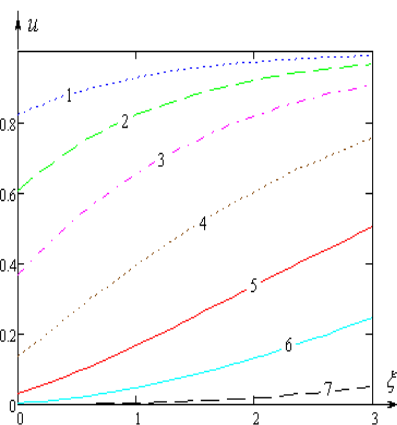


Рисунок 2 – Зависимость загрязненности фильтра от координаты при его регенерации: 1 - $\tau = 0.2$; 2 - $\tau = 0.5$; 3 - $\tau = 1$; 4 - $\tau = 2$; 5 - $\tau = 3.5$; 6 - $\tau = 5.5$; 7 - $\tau = 9$

Заключение

Таким образом, в работе развит формализм, позволяющий математически сколь угодно точно моделировать динамическую сорбционную активность при наличии неоднородной начальной загрязненности фильтра.

Литература

1. А.А.Жуховицкий, Я.Л.Забезинский, А.Н.Тихонов. Поглощение газа из тока воздуха слоем зернистого материала. 1 //Журнал физической химии.- 1945.-19, в.6.- С. 253-261.
2. Кримштейн А.А. Моделирование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанной кислороде/ А.А. Кримштейн, С.В Плотникова, В.И. Конова-лова, Б.В. Путин// ШК. Т.65. – 1992. – №11 – С. 2463 – 2469.

3. Пак В.В., Ехилевский С.Г., Овчаров В.К., Ильинский А.Э. Математическая модель рабочего процесса изолирующего шахтного респиратора // Изв. вузов. Горный журнал. - 1994, В.1. – С. 54-57.

4. Ехилевский С.Г., Ольшаников С.А., Потапенко Е.П. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации CO_2 в регенеративном патроне шахтного респиратора // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. - № 3. – С. 46 – 53.

5. Ехилевский С.Г., Голубева О.В., Ольшаников С.А., Потапенко Е.П. Математическая модель дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с круговой схемой воздухопроводной части // Изв. Донецкого горного института. – 2013. – № 2. – С. 105 – 113.

6. Ехилевский С.Г., Ольшаников С.А. Оптимизация теплового режима шахтного самоспасателя на химически связанном кислороде // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. - № 6. – С. 35 – 42.

7. Патент 47440 Украина, кл. А 62 В. Изолирующий дихальний апарат / С.Г. Ехилевський, В.В. Пак, Е.Г. Ільїнський. Опубл. 15.07.02, Бюл. №7.

Abstract

To study the effect of non-zero initial conditions for the formation of quasi-stationary profile of CO_2 concentration in the flowing air through regenerative cartridge and distribution of fixed carbon in the bulk oxygen-containing product. Obtained partial differential equations describing the kinetics of sorption and the balance of carbon dioxide molecules. Developed an iterative procedure for their solution, forming the basis for arbitrarily accurate numerical experimentation. Modeled processes unfolding in regenerative cartridges during the desorption of bound carbon partially or completely spent cartridge .

УДК 502.633

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

М.П. Симонова-Лобанок, к.с.-х. н., доцент

*УО «Минский государственный высший авиационный колледж»,
г. Минск, Республика Беларусь*

В статье рассмотрены теоретические вопросы сущности процессных систем и практические аспекты ее применения на производственных предприятиях с целью повышения безопасности труда.

Введение

Проблемы безопасности труда на производственных предприятиях затрагивают многие стороны жизни и деятельности трудовых коллективов,