

УДК 622.867.322

РЕВЕРС ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ДЫХАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ С КРУГОВОЙ СХЕМОЙ ВОЗДУХОВОДНОЙ ЧАСТИ

ПОТАПЕНКО ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧзам. начальника тех. Инспекции
УП «Витебскоблгаз»**ГОЛУБЕВА ОКСАНА ВАЛЕРЬЕВНА**кандидат физ.-мат. наук, доцент
Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой*Научный руководитель: Степан Григорьевич Ехилевский
д.т.н, профессор**Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой*

Аннотация: предложенные выкладки позволяют моделировать работу изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с круговой схемой воздухопроводной части после реверса воздушного потока. В работе сформулированы рекомендации по выбору момента изменения направления фильтрации.

Ключевые слова: изолирующий дыхательный аппарат, кислородсодержащий продукт, динамика хемосорбции, реверс воздушного потока.

REVERSE OF THE AIR FLOW IN A BREATHING APPARATUS ON CHEMICALLY BOUND OXYGEN WITH A CIRCULAR CIRCUIT OF THE AIR DUCT

**Potapenko Evgeniy Pavlovich,
Golubeva Oksana Valeryevna,
Ekhilevskiy Stepan Grigorievich**

Abstract: the proposed calculations make it possible to simulate the operation of an insulating breathing apparatus on chemically bound oxygen with a circular circuit of the air duct after the reverse of the air flow. The paper formulates recommendations for choosing the moment of changing the direction of filtration.

Key words: insulating breathing apparatus, oxygen-containing product, chemisorption dynamics, air flow reversal.

В данной работе будет рассмотрен рабочий процесс самоспасателя с круговой схемой воздухопроводной части после изменения режима его эксплуатации, обусловленного реверсом воздушного потока, фильтруемого через регенеративный патрон [1]. Регенеративный самоспасатель работает следующим образом. Выдыхаемый воздух из лицевой части 1 через дыхательный шланг 2, поступает в переключатель 3 направления газовоздушного потока, благодаря которому существует возможность с помощью рукоятки 4 менять направление движения регенерируемого воздуха. Если клапан выдоха 6 находится в правой части переключателя 3, то выдыхаемый воздух через правый шланг дыхательного мешка 10 поступает в подпружиненный мешок выдоха 7, создавая в нем избыточное давление и через правый шланг 11 движется в регенеративный патрон 9, в котором, благодаря кислородсодержащему продукту 12, происходит регенерация воздуха. Противопылевые фильтры 13 очищают поток от мелких частиц кислородсодержащего продукта. Далее газовоздушный поток направляется через левый шланг 11 регенеративного патрона в левый подпружиненный мешок вдоха 7, снабженный клапаном избыточного давления 8. Далее регенерированный воздух идет в левый шланг 10, через клапан вдоха 5 в переключатель 3 и сквозь дыхательный шланг 2 попадает в лицевую часть 1. При достижении порогового проскока CO_2 , происходит срабатывание левого датчика углекислого газа 14, после чего необходимо с помощью рукоятки 4 поменять направление движения газовоздушного потока на противоположное. Это обеспечит более равномерное распределение источников экзотермического тепла [2], и предотвратит спекание гранул кислородсодержащего продукта. Принципиальное отличие такого технического решения от аппарата с маятниковой схемой воздухопроводной части – отсутствие вредного пространства, занятого воздухом, который возвращается на вдох, так и не вступив в контакт с активной (не выработанной) частью регенеративного патрона. Подпружинивание мешков выдоха и вдоха демпфирует скачки давления, что обеспечивает равномерность скорости фильтрации и снижает сопротивление дыханию. Второй датчик CO_2 необходим в респираторах, когда может потребоваться повторный реверс воздушного потока.

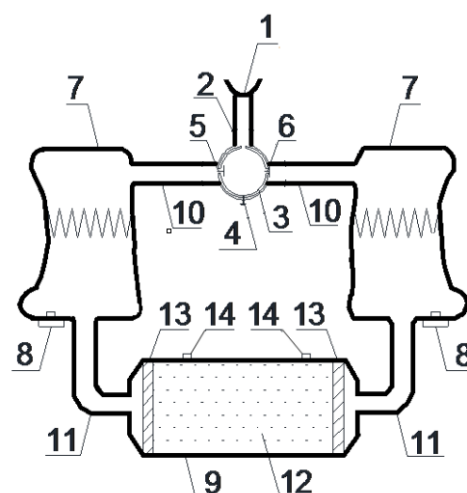


Рис. 1. Дыхательный аппарат с реверсом воздушного потока

Для ее моделирования динамики сорбции воспользуемся предложенным в [3] формализмом:

$$-\omega_{\xi}'(\xi, \tau) = \omega(\xi, \tau) - e^{-\tau} \left[u(\xi, 0) + \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau \right], \quad (1)$$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \left(u(\xi, 0) + \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau \right), \quad (2)$$

где $\omega(\xi, \tau)$ и $u(\xi, \tau)$ приведенные объемные концентрации молекул CO_2 и связанного углерода соответственно, ξ и τ - безразмерные координата и время, связанные с глубиной проникновения в фильтр x и продолжительностью работы аппарата t соотношениями

$$\xi = \beta x / v, \quad \tau = \beta \gamma t, \quad (3)$$

в которых v – скорость фильтрации, а β и γ - феноменологические постоянные [4], характеризующие скорость и ресурс реакции по связыванию CO_2 .

В предложенной постановке $u(\xi, 0)$ - известная начальная загрязненность патрона, влияние которой на динамику сорбции и является целью настоящего исследования.

Решение (1) будем искать в виде ряда

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n, \quad (4)$$

где $f_n(\tau)$ - неизвестные функции, подлежащие дальнейшему определению. Чтобы найти $f_n(\tau)$ подставим (4) и разложение начальной загрязненности в ряд Маклорена в уравнение (1). Выполнив после этого почленное дифференцирование и интегрирование, приравняем коэффициенты при одинаковых степенях ξ

$$f_{n+1}(\tau) = u_{\xi}^{(n)}(0,0) + \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau - f_n(\tau). \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

Рекуррентное соотношение (5) позволяет по известному $f_0(\tau)$ последовательно вычислить все $f_n(\tau)$ до какого угодно номера. Согласно (4) $f_0(\tau)$ связано со значением $\omega(0, \tau)$ приведенной концентрации углекислого газа на входе в поглощающий слой. Положив в (4) $\xi = 0$, получим

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau). \quad (6)$$

Соотношения (6), (2), (4) – (6) позволяют с любой требуемой точностью 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 ($u(\xi, 0) = 0$) соотношения (2), (1) примут вид

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau, \quad (7)$$

$$-\omega_{\xi}'(\xi, \tau) = \omega(\xi, \tau) - e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau. \quad (8)$$

Выполнив в (8) интегрирование по частям, получим

$$-\omega_{\xi}'(\xi, \tau) = e^{-\tau} \left[\omega(\xi, 0) + \int_0^{\tau} e^{\tau} d_{\tau} \omega(\xi, \tau) \right]. \quad (9)$$

При $\tau = 0$ из (9) следует

$$\omega(\xi, 0) = \omega(0, 0) e^{-\xi}. \quad (10)$$

С учетом этого обстоятельства решение (9) удобно искать в виде

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

выделив $e^{-\xi}$ в качестве множителя. Благодаря чему исчезает последнее слагаемое в (5)

$$f_{n+1}(\tau) = \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau. \quad (12)$$

При $\xi = 0$ из (11) следует условие (6), которое при постоянной концентрации сорбтива на входе в фильтр ($\omega(0, \tau) = 1$) примет вид

$$f_0(\tau) = e^{\tau}. \quad (13)$$

Решением рекуррентного соотношения (12), (13) является

$$f_n(\tau) = e^{\tau} - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!}. \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (14)$$

Подставив (13), (14) в (11) получим зависимость концентрации CO_2 от времени и координаты при нулевой начальной загрязненности патрона и постоянной концентрации CO_2 на входе в него

$$\omega l(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right]. \quad (15)$$

С помощью (7) найдем соответствующую (15) приведенную загрязненность патрона

$$u l(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left(1 + e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right). \quad (16)$$

Пусть реверс воздушного потока происходит в момент времени τ_1 , что приводит к задаче динамики сорбции (1) – (6) с начальной загрязненностью

$$u(\xi, 0) = u l(\eta - \xi, \tau_1) = 1 - e^{-\tau_1} \left(1 + e^{-\eta + \xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau_1^k}{k!} \right), \quad (17)$$

где η – безразмерная (см. (3)) длина патрона ($0 \leq \xi \leq \eta$).

Для развития рекуррентной процедуры (5) потребуются найденные с помощью (17) производные по ξ начальной загрязненности на входе в патрон $u_{\xi}^{(m)}(0, 0)$ ($m = 1, 2, \dots$). Займемся их получением:

$$\begin{aligned} u_{\xi}'(\xi, 0) &= -e^{-\tau_1 - \eta} \left[e^{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau_1^k}{k!} - e^{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^{n-1}}{(n-1)!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau_1^k}{k!} \right] = \\ &= e^{-\tau_1 - \eta + \xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^{n+1}}{(n!)^2} \frac{1}{(n+1)} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} u_{\xi}''(\xi, 0) &= e^{-\tau_1 - \eta} \left[e^{\xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n \tau_1^{n+1}}{(n!)^2} \frac{1}{(n+1)} - e^{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^{n-1} \tau_1^{n+1}}{(n-1)! n!} \frac{1}{(n+1)} \right] = \\ &= e^{-\tau_1 - \eta + \xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n \tau_1^{n+1}}{(n!)^2} \left[\frac{1}{n+1} - \frac{\tau_1}{(n+1)(n+2)} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Обозначим

$$g(2, \tau_1, n) = \frac{1}{n+1} - \frac{\tau_1}{(n+1)(n+2)}, \quad (20)$$

тогда, с учетом (19)

$$\begin{aligned} u_{\xi}'''(\xi, 0) &= e^{-\tau_1 - \eta} \left[e^{\xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n \tau_1^{n+1}}{(n!)^2} g(2, \tau_1, n) - e^{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^{n-1} \tau_1^{n+1}}{(n-1)! n!} g(2, \tau_1, n) \right] = \\ &= e^{-\tau_1 - \eta + \xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n \tau_1^{n+1}}{(n!)^2} g(3, \tau_1, n), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} g(3, \tau_1, n) &= g(2, \tau_1, n) - g(2, \tau_1, n+1) \frac{\tau_1}{n+1} = \\ &= \frac{1}{n+1} - \frac{2\tau_1}{(n+1)(n+2)} + \frac{\tau_1^2}{(n+1)(n+2)(n+3)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Аналогично (21), (22) для четвертой производной получим соотношение

$$u_{\xi}^{(4)}(\xi, 0) = e^{-\tau_1 - \eta + \xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n \tau_1^{n+1}}{(n!)^2} g(4, \tau_1, n), \quad (23)$$

в котором

$$\begin{aligned} g(4, \tau_1, n) &= g(3, \tau_1, n) - g(3, \tau_1, n+1) \frac{\tau_1}{n+1} = \frac{1}{n+1} - \frac{2\tau_1}{(n+1)(n+2)} + \frac{\tau_1^2}{(n+1)(n+2)(n+3)} - \\ &= \frac{1}{n+1} - \frac{3\tau_1}{(n+1)(n+2)} + \frac{3\tau_1^2}{(n+1)(n+2)(n+3)} - \frac{\tau_1^3}{(n+1)(n+2)(n+3)(n+4)}, \end{aligned} \quad (24)$$

что позволяет, с учетом (18), (19), (21), (23), заметить общую закономерность

$$u_{\xi}^{(m)}(\xi, 0) = e^{-\tau 1 - \eta + \xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n \tau 1^{n+1}}{(n!)^2} g(m, \tau 1, n), \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (25)$$

$$g(m, \tau 1, n) = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(-\tau 1)^i C_i^{m-1}}{\prod_{k=0}^i (n+1+k)}, \quad (26)$$

где C_i^l – числа сочетаний из l объектов по i . При получении (26) учтено, что, согласно (18) – (20), (22), (24), числители, складываемых в $g(m, \tau 1, n)$ дробей равны членам биномиального разложения разности $(1 - \tau 1)^{m-1}$.

Будем считать, что после реверса физическая нагрузка человека не изменится. Т.е. объемный расход воздуха, определяющий фигурирующую в (3) скорость фильтрации V , а значит и безразмерная длина патрона η останутся прежними

С помощью формул (17), (25), (26) легко найти фигурирующие в (5) производные

$$u_{\xi}^{(m)}(0, 0) = e^{-\tau 1 - \eta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\eta^n \tau 1^{n+1}}{(n!)^2} g(m, \tau 1, n) \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (27)$$

и

$$u(0, 0) = 1 - e^{-\tau 1} \left(1 + e^{-\eta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\eta^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau 1^k}{k!} \right) \quad (28)$$

соотношения (2), (4), (5) и (6) (с $\omega(0, \tau) = 1$) положены в основу компьютерного моделирования в среде пакета MathCAD рабочего процесса самоспасателя после реверса воздушного потока.

Согласно [4] безразмерные длины регенеративных патронов, в зависимости от защитного ресурса дыхательных аппаратов и режимов их эксплуатации, принимают значения от 3 (самоспасатель ШСС с 925 граммами кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия при объемной вентиляции легких 60 л/мин) до 60 (респиратор РХ-4 с 3700 граммами продукта при объемной вентиляции легких 12 л/мин).

Наиболее низкая эффективность использования защитного ресурса в аппаратах с малым η , что обусловлено большой долей мертвого слоя сорбента [4], остающегося неиспользованным к моменту $\tau_{кр}$ наступления критического проскока CO_2 через регенеративный патрон

$$\omega(\eta, \tau_{кр}) = 1.5\%/4\% = 0.375, \quad (29)$$

где 4% – содержание CO_2 в выдыхаемом человеком воздухе, 1.5% – содержание CO_2 , в возвращающемся на вдох воздухе, вызывающее отравление углекислым газом.

В связи с изложенным, для проведения численных экспериментов использовано $\eta = 4$, ибо именно в такой ситуации актуальна задача предотвращения спекания гранул, чтобы не усугублять проблему и без того низкой эффективности использования защитного ресурса регенеративного патрона. Согласно (15), (29) такому η соответствует $\tau_{кр} = 2.664$, или (см. (3)) 55.5 минут защитного действия, так как, согласно [4], для кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия $\beta\gamma = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Мощность источников экзотермического тепла максимальна на входе в регенеративный патрон в начале работы дыхательного аппарата, когда максимальный концентрационный напор CO_2 сочетается с низкой загрязненностью кислородсодержащего продукта. В результате послыонного спекания гранул фактический срок защитного действия на 37-67% ниже теоретического [5]. Поэтому реверс нужно совершать в момент $\tau 1$, когда ресурс лобового слоя выработан не более, чем на треть. С помощью (16) из условия $u1(0, \tau 1) = 0.33$ получено $\tau 1 = 0.4$, что соответствует 8.3 минутам. При этом $\omega 1(\eta, \tau 1) = 0.053$, т.е. пороговое значение для срабатывания датчика углекислого газа (рис.1) $4 \cdot 0.053 \approx 0.2\%$. Результаты выполненных с помощью обоснованных параметров численных экспе-

риментов в графической форме представлены на рисунке 2. Видно, что через промежуток времени $\tau - \tau_1 = 0.335$ после реверса воздушного потока загрязненность краев регенеративного патрона выравнивается и оказывается на 43.8% ниже, чем на входе в патрон, работающий без реверса.

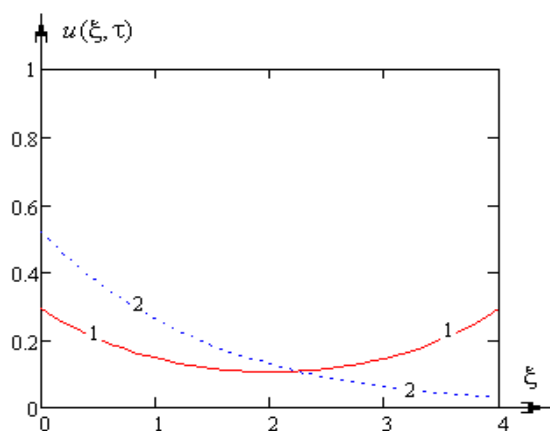


Рис. 2. Обработка ресурса регенеративного патрона в момент времени:
1 – после реверса воздушного потока;
2 – в отсутствии реверса.

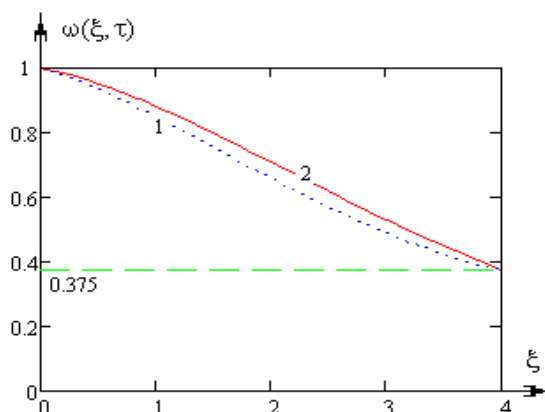


Рис. 3. Критический проскок CO_2 через регенеративный патрона:
1 – после реверса воздушного потока;
2 – в отсутствии реверса.

Таким образом, средняя по времени мощность источников экзотермического тепла наиболее нагруженных слоев кислородсодержащего продукта снижена практически вдвое. Важно, что смягчение теплового режима патрона не повлияло на время наступления критического проскока углекислого газа (рисунок 3). Меньшая выпуклость кривой 1 отражает факт более равномерного использования сорбционного ресурса регенеративного патрона, что предотвращает послойное спекание кислородсодержащего продукта. По этой причине фактический срок защитного действия в патроне с реверсом будет больше, чем в обычном.

Список источников

1. Патент 24003 Беларусь, кл. А 62 В. Регенеративный дыхательный аппарат / С.Г. Ехилевский, Е.П. Потапенко Оpub. 30.04.2023. Бюл. № 2.
2. Welty, J. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer / J. Welty, G. L. Rorrer, D. G. Foster. – Wiley, 2015. – 770 p.
3. Ехилевский С.Г., Потапенко Е.П., Голубева О.В. Влияние начальной загрязненности регенеративного патрона на работу шахтного респиратора на химически связанном кислороде // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – №8. – С. 37-43.
4. Ехилевский С.Г., Пак В.В., Ильинский Э.Г., Конопелько Е.И. Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1998. – №11, с. 108.
5. Ехилевский С.Г., Пак В.В. Об использовании ресурса шахтных респираторов с химически связанным кислородом // Изв. вузов. Горный журнал. – 1996. - № 1. – С. 66 – 71.