

УДК 622.867.322

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ

ЕХИЛЕВСКИЙ СТЕПАН ГРИГОРЬЕВИЧ,

д.т.н. наук, профессор,

Полоцкий государственный университет

ПОТАПЕНКО ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ

начальник ООТ

ПУ «Полоцкгаз» УП «Витебскоблгаз»

Аннотация. Для увеличения защитного действия дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде необходимо задействовать ресурс мертвого слоя хемосорбента и предотвратить спекание гранул кислородсодержащего продукта под действием экзотермического тепла. Это достигается более быстрым импульсным пропусканием выдыхаемого воздуха через лобовые слои хемосорбента и его медленной фильтрацией через остальную часть регенеративного патрона. С помощью численных экспериментов определена оптимальная для предотвращения спекания гранул координата скачка скорости фильтрации воздушного потока. Полученные результаты подтверждают эффективность рассматриваемых усовершенствований конструкции и способствуют увеличению их защитного ресурса.

Ключевые слова: изолирующий дыхательный аппарат, регенерация воздуха, кислородсодержащий продукт, экзотермическое тепло, динамика хемосорбции.

IMPROVEMENT OF ISOLATING BREATHING EQUIPMENT ON CHEMICALLY BOND OXYGEN

**Stepan Grigorievich Ekhilevskiy,
Evgeniy Pavlovich. Potapenko**

Abstract. To increase the protective effect of devices using chemically bound oxygen, it is necessary to use the resource of the dead layer of chemisorbent and prevent the sintering of granules of the oxygen-containing respiratory product under the influence of exothermic heat. This is achieved by faster pulsed passage of exhaled air through the frontal layers of the chemisorbent and its slow filtration through the rest of the regenerative cartridge. With the help of numerical experiments, the coordinate of the jump in the filtration rate of the air flow, which is optimal for preventing the sintering of granules, has been determined. The results obtained confirm the effectiveness of the considered design improvements and contribute to an increase in their protective resource.

Key words: self-contained breathing apparatus, regeneration of air, oxygen-containing product, exothermic heat, dynamics of chemisorption.

Изложим причины неэффективного использования защитного ресурса регенеративного патрона и способ их устранения. Лимитирующей стадией хемосорбции углекислого газа является диффузия его молекул внутрь гранул кислородсодержащего продукта. Наибольшему риску подвергаются расположенные на входе в регенеративный патрон лобовые слои кислородсодержащего продукта [1,2].

Вторая причина неэффективного использования защитного ресурса это мертвый слой хемосор-

бента. Даже при отсутствии спекания гранул, полностью химически связанный кислород прореагирует, лишь когда все 4 % углекислого газа в выдыхаемом человеком воздухе начнут беспрепятственно преодолевать регенеративный патрон. Очевидно, это происходит позже времени наступления критического 1,5 % проскока CO_2 , по достижении которого заканчивается срок защитного действия дыхательного аппарата, ибо начинается отравление углекислым газом. Не прореагировавшие к этому моменту молекулы надпероксида калия расположены в основном в замыкающих слоях кислородсодержащего продукта [3]. Их количество и характеризуется толщиной мертвого слоя хемосорбента, который мог бы получиться из гранул, образованных только из таких (не прореагировавших) молекул.

Предотвращать спекание гранул и истончать их мертвый слой можно внесением изменений в конструкцию дыхательного аппарата, обеспечивающих более быстрое протекание выдыхаемого воздуха через наиболее нагруженные лобовые слои гранул и замедление фильтрации в конце регенеративного патрона. Первое сокращает время контакта реагентов, обеспечивая проникновение углекислого газа вглубь регенеративного патрона и способствует более равномерному распределению источников экзотермического тепла. Второе компенсирует снижение концентрационного напора в замыкающих слоях кислородсодержащего продукта увеличением времени пребывания в них молекул CO_2 .

Основная идея изобретения (патент 23426 Украина, А 62 В 7/08 «Изолирующий дыхательный аппарат», авторы – С. Г. Ехилевский, В. В. Пак, Э. Г. Ильинский) заключается в том, чтобы через скоростные участки пропускать воздух импульсно (порция, пауза, порция и т. д.). Это позволяет совместить сохранение расхода воздуха с уменьшением скорости его течения при переходе из передних слоев сорбента в замыкающие. Дыхательный аппарат (рис. 1) включает в себя шланг выдоха 1, регенеративный патрон с сорбентом углекислого газа, разделенный по ходу течения выдыхаемого воздуха на два последовательно соединенных объема 2 и 3, дыхательный мешок, который состоит из упругой емкости избыточного давления 4 с клапаном выдоха 5, соединяющей первый и второй объемы сорбента, и отдельной упругой емкости недостаточного давления 6, расположенной перед шлангом вдоха 7 с клапаном вдоха 8 и лицевую часть 9.

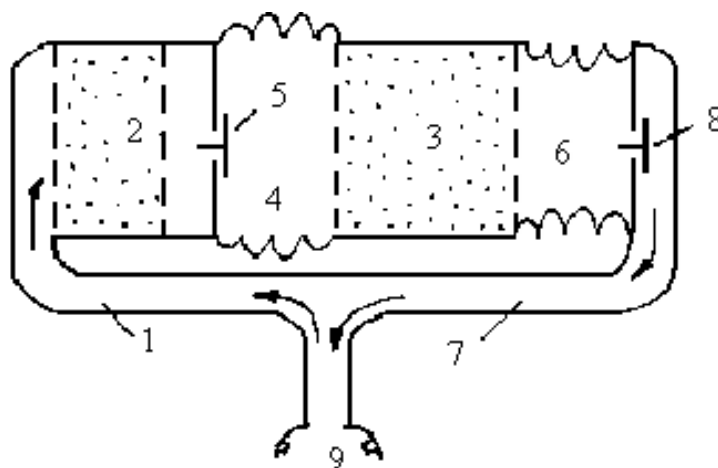


Рис. 1. Респиратор с разной скоростью фильтрации воздуха через лобовые и замыкающие слои кислородсодержащего продукта

Воздух, проходящий через первый объем сорбента 2 только на выдохе, попадает через клапан выдоха 5 в упругую емкость выдоха 4. Перепад давления между ней и упругой емкостью вдоха 6 непрерывно фильтрует воздух через второй объем сорбента 3. Последнее обеспечено упругостью обеих емкостей дыхательного мешка. Из емкости вдоха 4 через клапан вдоха 8 воздух по шлангу вдоха 7 попадает в легкие, после чего цикл замыкается.

Поскольку вдох и выдох примерно равны по длительности, в объеме сорбента 2 скорость течения воздуха в момент выдоха примерно вдвое больше скорости установившегося течения воздуха

в объеме сорбента 3. При этом, благодаря отсутствию пульсации давления скорость фильтрации воздуха в объеме сорбента 3 оказывается ниже, чем в неразрезанном патроне.

Чтобы обосновать координату разрезания патрона и оценить снижение мощности источников экзотермического тепла в лобовых слоях кислородсодержащего продукта потребуется математическая модель динамической сорбционной активности при наличии скачка скорости фильтрации регенерируемого воздуха. Очевидно, концентрация углекислого газа на входе во вторую часть патрона медленно возрастет по мере постепенной отработки поглотительного ресурса первой части. Это позволяет воспользоваться развитой в [4] концепцией квазистационарного профиля концентрации углекислого газа в задаче динамики сорбции при наличии нестационарного граничного условия на входе в поглощающий слой.

Универсальность полученных в [4] соотношений достигается описанием процесса регенерации воздуха в терминах обезразмеренных и приведенных величин. Что позволяет моделировать изолирующие средства защиты дыхания в различных режимах их эксплуатации, определяемых уровнем физической нагрузки человека. Выберем в качестве характерного масштаба объемной концентрации молекул CO_2 W ее максимальное значение W_0 на входе в регенеративный патрон. Тогда, согласно [4], приведенная концентрация молекул CO_2 $\omega = W/W_0$, как функция обезразмеренных переменных, связанных с обычными временем t и расстоянием от входа в поглощающий слой x формулами:

$$\begin{aligned}\xi(x) &= \beta x / v; \\ \tau(t) &= \beta \gamma t,\end{aligned}\quad (2)$$

определяется соотношениями:

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\xi-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n; \quad (3)$$

$$f_{n+1}(\tau) = \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau; \quad (4)$$

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau); \quad (5)$$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau, \quad (6)$$

где v – скорость фильтрации воздуха; γ и β – феноменологические постоянные, характеризующие ресурс хемосорбции и ее скорость [5]; u – использованная доля ресурса хемосорбента.

Полагая, что уровень физической нагрузки человека не меняется и на вход в регенеративный патрон поступает постоянная концентрация CO_2 ($\omega(0, \tau) = 1$), с помощью (2)–(6) получим величину проскока CO_2 и долю отработанного хемосорбента для патрона без скачка скорости фильтрации

$$\omega_0(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right]; \quad (7)$$

$$u_0(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left(1 + e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right). \quad (8)$$

Самоспасатели предназначены для покидания опасной зоны людьми, оказавшимися в чрезвычайной ситуации, что не предполагает значительной физической нагрузки и не приводит к значительному выделению экзотермического тепла пропорционального количеству выдыхаемого в единицу времени углекислого газа. Поэтому предотвращение спекания гранул кислородсодержащего продукта в первую очередь актуально в респираторах с большим сроком защитного действия, предназначенных для горноспасателей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, сотрудников МЧС, аварийно-газовой службы, пожарных, занятых эвакуацией пострадавших и минимизацией последствий чрезвычайной ситуации.

Между тем величина мертвого слоя хемосорбента, расположенного в замыкающей части фильтра, практически не зависит от обезразмеренной длины регенеративного патрона. Поэтому его доля в общем количестве химически связанного кислорода велика в аппаратах с небольшим сроком защитного действия.

В свете изложенного максимальный эффект, от предложенных в патенте 23426 изменений конструкции дыхательного аппарата, будет в респираторах со средним сроком защитного действия и тяжелым режимом эксплуатации (с высоким уровнем физической нагрузки человека). Таким требованиям удовлетворяет изолирующий дыхательный аппарат на химически связанном кислороде РХС [2]. Он снаряжен 2400 г кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия. Согласно экспериментальным данным плотность упаковки гранул кислородсодержащего продукта слабо зависит от объема регенеративного патрона и примерно равна 930 г/л [5]. Значит, объем регенеративного патрона РХС составляет $2400/930 = 2,58$ л. При этом на пустоты между гранулами приходится около трети объема регенеративного патрона $2,58/3 = 0,86$ л. По этим каналам выдыхаемый воздух обтекает гранулы, а внутрь их пор молекулы CO_2 попадают по законам молекулярной диффузии.

В десятом (тяжелом) режиме физической нагрузки модели рабочего процесса в РХС соответствует обезразмеренная длина $\eta = 7,5$ [5]. При этом горноспасатель потребляет около 60 л воздуха в минуту осуществляя 30 вдохов-выдохов. То есть объем каждого выдоха примерно равен 2 л.

Чтобы мало влиять на среднее время пребывания молекул CO_2 в первой части регенеративного патрона, часть выдоха, остающаяся между двумя выдохами в первой части патрона должна быть на порядок меньше общего объема одного выдоха. То есть общий объем пустот первой части не должен превышать 0,2 л, что соответствует обезразмеренной длине первой части $\zeta = 7,5 \cdot 0,2/0,86 = 1,74$, ибо обезразмеренная длина при постоянной скорости фильтрации пропорциональна объему регенеративного патрона или (при данной плотности упаковки гранул) объему пустот между ними. В связи с изложенным, первую часть регенеративного патрона в дальнейшем будем называть короткой.

Поскольку вдох и выдох примерно равны по длительности 2 л воздуха преодолевают вход в первую часть патрона за 1 с. Суммарный объем пустот между находящимися в ней гранулами равен $0,86 \cdot \zeta/\eta$ литрам. Из непрерывности воздушного потока следует, что при расходе 2 л/с время пребывания молекул воздуха в первой части патрона $\frac{0,86 \cdot \zeta/\eta}{2} = 0,43 \cdot \zeta/\eta$ секунд. Последняя часть выдоха объемом $0,86 \cdot \zeta/\eta$ литра остается в первой части патрона еще на 1 с (время вдоха). То есть среднее время пребывания молекул воздуха в первой части патрона равно

$$\frac{(2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta) 0,43 \cdot \zeta/\eta + (1 + 0,43 \cdot \zeta/\eta) 0,86 \cdot \zeta/\eta}{2}, \quad (9)$$

где $2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta$ – объем первой части выдоха, не остающейся в короткой части регенеративного патрона на время вдоха.

Чтобы использовать модель (2)–(6) с равномерной скоростью фильтрации (когда в единицу времени при начальной сорбционной емкости кислородсодержащего продукта поглощается одинаковое количество молекул CO_2) единицу во вторых скобках в (9) нужно заменить на время регенерации остатка выдоха, стоящего на месте в короткой части патрона во время вдоха. Для вычисления этого времени нужно количество молекул CO_2 , оставшихся в остановившемся воздухе, умножить на время поглощения первой порции молекул CO_2 (равное времени движения в патроне последней части выдоха $0,43 \cdot \zeta/\eta$) и разделить на величину этой порции

$$0,43 \cdot \zeta/\eta \cdot \frac{\int_0^{\zeta} e^{-\alpha \xi} d\xi}{\int_0^{\zeta} (1 - e^{-\alpha \xi}) d\xi} = 0,43 \cdot \zeta/\eta \cdot f(\alpha \zeta). \quad (10)$$

При получении (10) учтено, что согласно (7) в начале работы регенеративного патрона спад концентрации CO_2 происходит по экспоненциальному закону, в котором $\alpha \approx 0,5$, ибо скорость фильтрации через короткую часть патрона V при одинаковой продолжительности выдоха и вдоха примерно вдвое выше, чем скорость v в неразрезанном патроне

$$\frac{x\beta}{V} = \frac{x\beta}{v} \cdot \frac{v}{V} = \xi \cdot \frac{v}{V} = \xi \cdot \alpha. \quad (11)$$

С учетом изложенного, время пребывания последней части выдоха в короткой части регенеративного патрона следует положить равным $f(\alpha\zeta) \cdot 0,43 \cdot \zeta/\eta + 0,43 \cdot \zeta/\eta$ секунд. При этом согласно (9)–(11)

$$\frac{(2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta) 0,43 \cdot \zeta/\eta + (f(\alpha\zeta) \cdot 0,43 \cdot \zeta/\eta + 0,43 \cdot \zeta/\eta) 0,86 \cdot \zeta/\eta}{2} \quad (12)$$

– среднее время пребывания молекул воздуха в короткой части регенеративного патрона.

Для получения аналогичного показателя в неразрезанном патроне следует положить $\zeta = \eta$, убрать α , и, с учетом частичного демпфирования скачков скорости фильтрации упругостью шлангов вдоха-выдоха, в ε раз ($1 < \varepsilon < 2$) увеличить время протекания данной молекулы воздуха через патрон

$$\varepsilon \cdot \frac{(2 - 0,86) 0,43 + (f(\eta) \cdot 0,43 + 0,43) 0,86}{2}. \quad (13)$$

Если упругости шлангов нет (во время вдоха опорожняется дыхательный мешок, а воздух в патроне стоит на месте), то $\varepsilon = 1$. В другой предельной ситуации ($\varepsilon = 2$), реализуемой для второй части регенеративного патрона, воздух фильтруется без остановок с 2 раза меньшей скоростью, чем через короткую часть патрона во время выдоха. По этой причине при подсчете времени пребывания молекулы воздуха во второй части патрона нужно в (12) опустить первое слагаемое во вторых скобках, заменить ζ на $\eta - \zeta$ и подставить $\varepsilon = 2$:

$$2 \cdot \frac{(2 - 0,86 \cdot (\eta - \zeta)/\eta) 0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta + (0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta) 0,86 \cdot (\eta - \zeta)/\eta}{2} = 2 \cdot 0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta. \quad (14)$$

В частности, если в (14) положить $\zeta = 0$, получим $2 \cdot 0,43$ – время пребывания молекул в патроне при равномерной безостановочной фильтрации 2 л воздуха за время каждого вдоха-выдоха длящегося 2 с, что согласуется с изложенным в абзаце перед формулой (9).

Таким образом, через короткую часть патрона регенерируемый воздух фильтруется существенно быстрее, а через вторую (длинную) часть незначительно медленнее, чем через неразрезанный патрон. При этом, в терминах обезразмеренных переменных (см. (2)) первая часть патрона становится короче, а ход времени в ней как бы замедляется. Ибо, в соответствии с обоснованным в [6] принципом песочных часов, на вдохе время, с точки зрения патрона как бы замирает, поскольку в него не поступают молекулы CO_2

$$\omega_1(\xi, \tau) = \omega_0(\alpha\xi, \alpha\tau) \quad (0 \leq \xi \leq \zeta), \quad (15)$$

$$u_1(\xi, \tau) = u_0(\alpha\xi, \alpha\tau) \quad (0 \leq \xi \leq \zeta), \quad (16)$$

где ω_1 и u_1 – приведенная концентрация CO_2 и использованная доля ресурса хемосорбента в первой части регенеративного патрона, а α – введенный в (10) параметр, точное значение которого, в соответствии с изложенным (см. (11)–(13)), является корнем трансцендентного уравнения¹

$$\alpha = \frac{(2 - 0,86 \cdot \zeta/\eta) 0,43 \cdot \zeta/\eta + (f(\alpha\zeta) \cdot 0,43 \cdot \zeta/\eta + 0,43 \cdot \zeta/\eta) 0,86 \cdot \zeta/\eta}{\zeta \cdot \varepsilon \cdot \frac{(2 - 0,86) 0,43 + (f(\eta) \cdot 0,43 + 0,43) 0,86}{2}}. \quad (17)$$

Аналогично, с учетом (14) получим ω и u во второй части патрона:

$$\omega_2(\xi, \tau) = \omega(\gamma(\xi - \zeta), \gamma\tau) \quad (\zeta < \xi \leq \eta), \quad (18)$$

$$u_2(\xi, \tau) = u(\gamma(\xi - \zeta), \gamma\tau) \quad (\zeta < \xi \leq \eta), \quad (19)$$

где

$$\gamma = \frac{2 \cdot 0,43 \cdot (\eta - \zeta)/\eta}{\eta - \zeta \cdot \varepsilon \cdot \frac{(2 - 0,86) 0,43 + (f(\eta) \cdot 0,43 + 0,43) 0,86}{2}}, \quad (20)$$

а в качестве граничного условия в (5) при вычислении представленной в (18) $\omega(\xi, \tau)$ должен фигурировать проскок через первую часть патрона

$$\omega(0, \tau) = \omega_1(\zeta, \tau) = \omega_0(\alpha\zeta, \alpha\tau), \quad (21)$$

при этом

$$f_0(\tau) = \omega_1(\zeta, \tau) \cdot e^\tau. \quad (22)$$

Для проведения численных экспериментов, полученные при наличии скачка скорости зависимости приведенной концентрации CO₂ в токе воздуха и использованной доли ресурса хемосорбента (см. (15), (16), (18), (19)), были сшиты с помощью функций Хевисайда:

$$\tilde{\omega}(\xi, \tau) = \omega_1(\xi, \tau)\theta(\zeta - \xi) + \omega_2(\xi, \tau)\theta(\xi - \zeta) \quad (\zeta < \xi \leq \eta), \quad (23)$$

$$\tilde{u}(\xi, \tau) = u_1(\xi, \tau)\theta(\zeta - \xi) + u_2(\xi, \tau)\theta(\xi - \zeta) \quad (\zeta < \xi \leq \eta). \quad (24)$$

Поскольку демпфирование скачков скорости в неразрезанном патроне зависит от объема и упругости соединительных шлангов, а также от гидравлического сопротивления регенеративного патрона, были рассмотрены различные ε . Вычисления по формулам (23), (24) выполнялись в среде пакета MathCAD. Результаты расчетов сведены в таблицу и в графической форме представлены на рис. 2, 3.

Таблица 1

ε	ζ	$\partial u_0(0, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}$	$\partial \tilde{u}(0, \tau) / \partial \tau _{\tau=0} = \partial \tilde{u}(\zeta, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}$	$\bar{u}(\tau_k) / \bar{u}_0(\tau_k)$
1,4	0,723	1	0,762	1,065
1,6	0,794	1	0,677	1,029
1,8	0,856	1	0,611	0,993

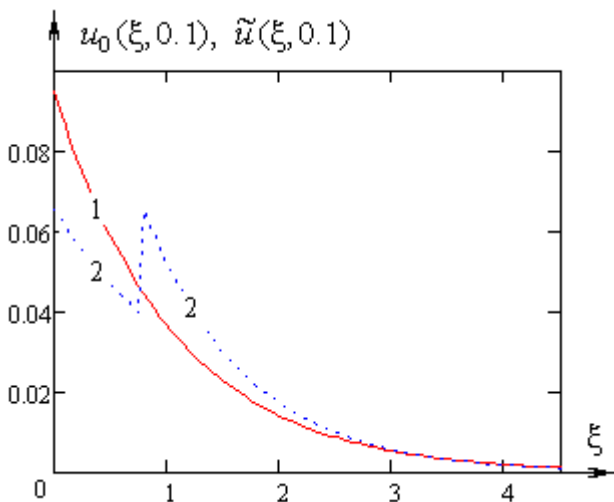


Рис. 2. Распределение связанного углерода в неразрезанном патроне (кривая 1) и в патроне со скачком скорости фильтрации (кривая 2)

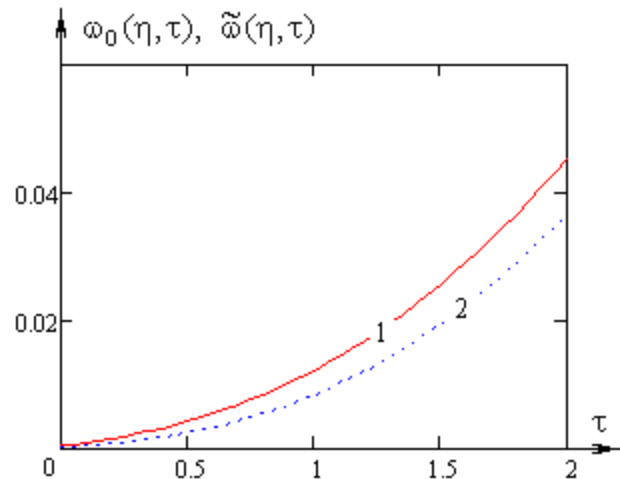


Рис. 3. Эволюция проскока CO₂ через неразрезанный патрон (кривая 1) и со скачком скорости фильтрации (кривая 2)

В частности, для $\varepsilon = 1,6$ видно (см. рис. 2), что в патроне со скачком скорости фильтрации связанные молекулы CO₂, а значит и источники экзотермического тепла (см. (1)), распределены более равномерно. Благодаря этому тепловая мощность процесса в лобовых (наиболее подверженных спеканию) слоях кислородсодержащего продукта снижается на 32,3 %. При этом до 2,9 % (колонка 5 таблицы) возрастает использование защитного ресурса регенеративного патрона, характеризуемое его средней (по координате) отработкой $\bar{u}(\tau_k)$ к моменту наступления критического проскока CO₂. Это проявляется в более медленной эволюции проскока CO₂ (см. рис. 3), что обеспечивает комфортные условия дыхания в течение всего срока защитного действия респиратора. Эффект достигается за счет истончения мертвого слоя хемосорбента, то есть без дополнительного расходования кислородсодержащего продукта на снаряжение регенеративного патрона. Причина в более медленной (по сравнению с неразрезанным патроном) фильтрации через вторую часть патрона. При этом снижение скорости хемосорбции в первой (короткой) части патрона слабо влияет на величину средней отработки $\bar{u}(\tau_k)$, ибо лобовые слои кислородсодержащего продукта дольше в работе, чем замыкающие, в которых в основном и сосредоточен мертвый слой сорбента.

Обезразмеренная координата места скачка скорости ζ определялась из условия равенства скоростей роста загрязненности лобовых слоев первой $\partial u(0, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0}$ и второй $\partial u(\zeta, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0}$ части регенеративного патрона в начале его работы, когда максимальный концентрационный напор CO_2 сочетается с неизрасходованной сорбционной емкостью кислородсодержащего продукта.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных в патенте 23426 технических решений и допускают разумную интерпретацию. Видно (см. 2-й столбец таблицы), что ζ тем больше, чем значительнее характеризуемое ε демпфирование скорости в однородном патроне. Это приводит к большему увеличению скорости фильтрации через первую часть патрона и соответственно возрастанию через нее проскока CO_2 . Поэтому, чтобы не допустить спекания гранул на входе во вторую часть патрона, длину первой части нужно увеличивать. Использование ресурса мертвого слоя при этом снижается (см. столбец 5 таблицы), ибо при значительном демпфировании скачков скорости фильтрации в однородном патроне, течение воздуха мало отличается от равномерного, имеющего место во второй части патрона.

Список литературы

1. Майстренко, А. В. Моделирование дыхательных изолирующих аппаратов на химически связанном кислороде / А. В. Майстренко, Н. В. Майстренко, О. И. Ерохин // Науч. ведомости Белгород, гос. ун-та. – 2014 – № 14 (172) – В. 29/1. – С. 81–87.
2. Балабанов, П. В. Идентификация параметров математических моделей регенерации воздуха средствами защиты изолирующего типа / П. В. Балабанов, А. А. Кримштейн, С. В. Пономарев // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 68–73.
3. Ехилевский, С. Г. Резервы более полного использования химически связанного кислорода в шахтных дыхательных аппаратах / С. Г. Ехилевский // Изв. Донец. горн. ин-та. – 1998. – № 1. – С. 17–26.
4. Ехилевский, С. Г. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации CO_2 в регенеративном патроне шахтного респиратора / С. Г. Ехилевский, С. . Ольшаников, Е. П. Потапенко // Изв. вузов. Горн. журн. – 2013. – № 3. – С. 46–53.
5. Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов / В. В. Пак [и др.] // Изв. вузов. Горн. журн. – 1998. – № 11–12. – С. 108–112.
6. Ехилевский, С. Г. Нестационарная задача динамики сорбции углекислого газа в регенеративном патроне изолирующего респиратора / С. Г. Ехилевский // Вестн. Фонда фундаментальных исследований. – 2019. – № 3(89). – С. 57–65.

© Ехилевский С.Г., Потапенко Е.П., 2021