

DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-46-52

УДК 622.867.322

© С.Г. Ехилевский, О.В. Голубева, Е.П. Потапенко, 2021

Моделирование дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с кругомаятниковой схемой воздухопроводной части



С.Г. Ехилевский,
д-р техн. наук, проф.,
ekhilevskiy@yandex.ru



О.В. Голубева,
канд. техн. наук,
доцент, декан



Е.П. Потапенко,
вед. инженер

Полоцкий государственный университет,
Новополоцк, Республика Беларусь

Производственное
республиканское
унитарное
предприятие
«Витебскоблгаз»,
Витебск, Республика
Беларусь

С помощью методов математического и компьютерного моделирования исследована хемосорбция углекислого газа в дыхательном аппарате на химически связанном кислороде с гибридной кругомаятниковой схемой воздухопроводной части. Определен прирост защитного действия аппарата, обусловленный использованием ресурса мертвого слоя сорбента в результате реверса воздушного потока в маятниковой части регенеративного патрона. Показана целесообразность применения гибридной схемы в самоспасателях с небольшим сроком защитного действия. Определена оптимальная длина маятниковой части, при которой снижается сопротивление дыханию и не увеличивается вредное пространство, занятое воздухом, возвращающимся на вдох без контакта с непрореагировавшими слоями кислородсодержащего продукта.

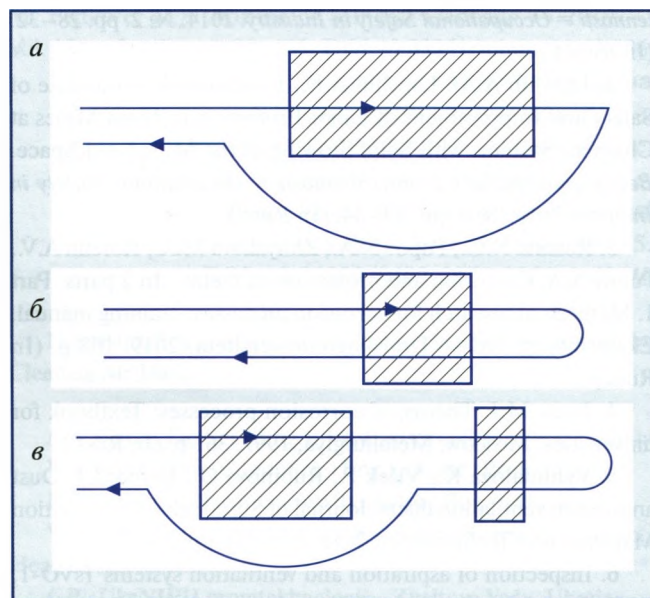
Ключевые слова: изолирующий дыхательный аппарат, регенерация воздуха, кислородсодержащий продукт, динамика хемосорбции, химически связанный кислород.

Для цитирования: Ехилевский С.Г., Голубева О.В., Потапенко Е.П. Моделирование дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с кругомаятниковой схемой воздухопроводной части // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 1. — С. 46–52. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-46-52

Введение

Современный дыхательный аппарат на химически связанном кислороде может содержать пусковое устройство, противопылевой фильтр, тепло- и влаго-

обменник, индикатор оставшегося защитного ресурса и множество других узлов, призванных обеспечить комфортные условия дыхания [1]. Основными из них (которые обязательно входят в воздухопроводную часть аппарата) являются: лицевая часть, регенеративный патрон с химически связанным кислородом и дыхательный мешок. Связав их соединительными шлангами с соответствующими клапанами, можно реализовать различные схемы фильтрации воздуха через кислородсодержащий продукт. К основным схемам относятся круговая и маятниковая [2].



▲ Рис. 1. Схемы воздухопроводной части дыхательных аппаратов:

▲ а — круговая; б — маятниковая; в — гибридная

▲ Fig. 1. Schemes of the breathing apparatus air duct part:
а — circular; б — pendulum; в — hybrid

В круговой схеме регенеративный патрон является частью замкнутого контура, вдоль которого циркулирует воздушный поток (рис. 1, а). Этим объясняется неравномерность отработки слоев продукта по ходу течения регенерируемого воздуха и, как следствие, неэффективное использование защитного ресурса патрона. К моменту наступления критического проскока CO_2 значительная часть защитного ресурса замыкающих слоев продукта остается неиспользованной. Ее традиционно характеризуют толщиной так называемого мертвого слоя сорбента.

В маятниковой схеме имеет место возвратно-поступательное движение воздуха через регенеративный патрон в дыхательный мешок и обратно (рис. 1, б), что обеспечивает более равномерный износ патрона. Недостатком такой схемы является вредное пространство, занятое воздухом, который возвращается на вдох, так и не вступив в контакт со свежей частью кислородсодержащего продукта. По этой причине маятниковая схема не может быть реализована в регенеративных патронах большого объема.

Известны попытки объединить достоинства круговой (малое вредное пространство) и маятниковой (малый объем мертвого слоя) схем воздухопроводной части [3]. Рассмотрим в этой связи гибридную (кругомаятниковую) схему [4], представленную на рис. 1, в. Выдыхаемый воздух поступает в круговую часть патрона, где находится основная часть сорбента и поначалу осуществляется практически вся регенерация. По мере отработки круговой части проскок углекислого газа через нее растет, и процесс регенерации смещается в маятниковую часть патрона. Ее объем должен быть меньше, чем в обычном самоспасателе, поскольку замыкающие слои круговой части некоторое время еще осуществляют начальную регенерацию — вплоть до полного исчезновения мертвого слоя. После этого процесс регенерации полностью переходит в маятниковую часть патрона. Ее уменьшенный объем способствует лучшему газообмену с дыхательным мешком. Таким образом, вредное пространство дыхательного аппарата оказывается меньше, чем в обычном самоспасателе.

Хемосорбция CO_2 при начальной загрязненности регенеративного патрона

Обычно при математическом моделировании хемосорбции углекислого газа в изолирующих дыхательных аппаратах пользуются стационарными краевыми и нулевыми начальными условиями [5–9]. Это означает неизменность режима фильтрации и отсутствие связанного углерода в толще кислородсодержащего продукта в момент подключения шахтера или горноспасателя к аппарату. Однако при реверсе воздушного потока, имеющем место в самоспасателе с маятниковой или гибридной схемами воздухопроводной части [4], молекулы CO_2 возвращаются в более отработанные слои сорбента, что нарушает обычную картину динамики сорбции. Чтобы адекватно моделировать описанные устройства и ситуации, используем развитый в [10] метод формализма, учитывающий неоднородную начальную загрязненность регенеративного патрона.

Если скорость фильтрации v постоянна, то эволюция объемной концентрации в токе воздуха молекул CO_2 W и связанного углерода U описывается уравнениями, отражающими баланс молекул углекислого газа и кинетику сорбции:

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

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

где x — координата, растущая в направлении течения; t — время; β, γ — феноменологические постоянные, характеризующие соответственно скорость и ресурс реакции [11]. Твердые вещества в тысячу раз плотнее газов. Поэтому после формирования квазистационарного распределения W первым слагаемым в правой части (1) можно пренебречь [7], после чего с учетом (2):

$$-vW'_x = \beta(W - \gamma U). \quad (3)$$

Чтобы сделать дальнейшее описание универсальным и не зависящим от вида аппарата и режима его эксплуатации, перепишем уравнения (1), (2) в терминах введенных в [7] безразмерных переменных:

$$\begin{cases} \xi = \beta x / v; \\ \tau = \beta \gamma t \end{cases} \quad (4)$$

и приведенных концентраций:

$$\begin{cases} \omega = W / W_0; \\ u = \gamma U / W_0, \end{cases} \quad (5)$$

где W_0 — постоянная с размерностью W , задающая ее характерный масштаб в рассматриваемой задаче. В результате уравнения (3) и (2) примут вид:

$$-\omega'_\xi = \omega + u; \quad (6)$$

$$u'_\tau = \omega - u. \quad (7)$$

Воспользовавшись линейностью (7), выразим в общем виде u через ω :

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \left[u(\xi, 0) + \int_0^\tau e^\tau \omega(\xi, \tau) d\tau \right], \quad (8)$$

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

Подставив (8) в (6), получим уравнение для определения ω :

$$\begin{aligned} -\omega'_\xi(\xi, \tau) &= \omega(\xi, \tau) - \\ &- e^{-\tau} \left[u(\xi, 0) + \int_0^\tau e^\tau \omega(\xi, \tau) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Его решение будем искать в виде ряда

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n, \quad (10)$$

где $f_n(\tau)$ — неизвестные функции, подлежащие дальнейшему определению. Подставив (10) в (9) и разложив начальную загрязненность в ряд Маклорена, приравняв коэффициенты при одинаковых степенях ξ :

$$f_{n+1}(\tau) = u_{\xi}^{(n)}(0, 0) + \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau - f_n(\tau), \quad (11)$$

где $u_{\xi}^{(n)}(0, 0)$ — производная n -го порядка, $n = 0, 1, 2, \dots$, по ξ от $u(\xi, 0)$ при $\xi = 0$.

Рекуррентное соотношение (11) позволяет по известному $f_0(\tau)$:

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau) \quad (12)$$

последовательно вычислять $f_n(\tau)$ (10) до какого угодно номера. С помощью (4), (5), (8), (10)–(12) можно вычислить концентрацию углекислого газа в регенерируемом воздухе и распределение связанного углерода при наличии произвольной начальной загрязненности патрона и переменной концентрации на входе в него молекул CO_2 .

Моделирование динамики сорбции после реверса воздушного потока

Если начальной загрязненности нет ($u(\xi, 0) = 0$), то соотношения (8), (9) примут вид:

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau; \quad (13)$$

$$-\omega'_{\xi}(\xi, \tau) = \omega(\xi, \tau) - e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau. \quad (14)$$

При $\tau = 0$ из (14) следует:

$$\omega(\xi, 0) = \omega(0, 0) e^{-\xi}. \quad (15)$$

С учетом этого обстоятельства решение (14) удобно искать в виде

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\xi-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n, \quad (16)$$

выделив $e^{-\xi}$ в качестве множителя и устранив этим последнее слагаемое в (11):

$$f_{n+1}(\tau) = \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau. \quad (17)$$

При $\xi = 0$ из (16) следует условие (12), которое при постоянной концентрации сорбтива на входе в фильтр ($W(0, \tau) = W_0$ и $\omega(0, \tau) = 1$) примет вид

$$f_0(\tau) = e^{\tau}. \quad (18)$$

С учетом (18) решением рекуррентного соотношения (17) является

$$f_n(\tau) = e^{\tau} - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!}, \quad (19)$$

где $n = 1, 2, \dots$.

Подставив (18) и (19) в (16), получим

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right]. \quad (20)$$

С помощью (13) и с учетом (17) найдем соответствующую (20) загрязненность:

$$\begin{aligned} u(\xi, \tau) &= e^{-\xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} g_n(\tau) \equiv \\ &\equiv 1 - e^{-\tau} \left(1 + e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$g_n(\tau) = e^{\tau} f_{n+1}(\tau) = 1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^n \frac{\tau^k}{k!}. \quad (22)$$

Чтобы определить обусловленную реверсом воздушного потока загрязненность маятниковой части регенеративного патрона и ее влияние на эволюцию приведенной концентрации углекислого газа, воспользуемся развитым в [12] принципом песочных часов в нестационарной задаче динамики сорбции. В соответствии с ним, если поглотительный ресурс кислородсодержащего продукта не исчерпан, время работы регенеративного патрона можно измерять количеством поступивших в него молекул CO_2 . Это позволит разделить процесс работы аппарата с гибридной схемой на два последовательных этапа. Вначале весь выдыхаемый воздух проходит через регенеративный патрон, а затем через маятниковую часть возвращается на вдох. В соответствии с принципом песочных часов такой реверс должен длиться промежуток времени:

$$\tau_2(\tau, \eta) = \frac{1}{\omega(\eta, \tau)} \int_0^{\tau} \omega(\eta, \tau) d\tau, \quad (23)$$

где η — обезразмеренная длина патрона. То есть чтобы узнать распределение молекул в аппарате с гибридной схемой воздухопроводной части к моменту времени τ_1 , нужно решить задачу (8)–(12) с граничным и начальным условиями, задаваемыми равенствами

$$\begin{cases} \omega(0, \tau) = \omega(\eta, \tau_1); \\ u(\xi, 0) = u(\eta - \xi, \tau_1), \end{cases} \quad (24)$$

где $0 \leq \xi \leq \xi_2(\tau_1, \eta)$.

При этом точку $\xi_2(\tau_1, \eta)$ разрезания регенеративного патрона (длину его маятниковой части) следует определять из условия достижения равновесной концентрации углекислого газа (см. (7) при возвращении регенерируемого воздуха в лобовые (с повышенным износом поглотительного ресурса) слои кислородсодержащего продукта

$$u[\xi, \tau_2(\tau_1, \eta)] = \omega[\xi, \tau_2(\tau_1, \eta)] \Rightarrow \xi_2(\tau_1, \eta) \quad (25)$$

в момент наступления критического проскока CO_2

$$\omega[\xi_2(\tau_1, \eta), \tau_2(\tau_1, \eta)] = 0,375. \quad (26)$$

В выдыхаемом человеком воздухе содержится 4 % углекислого газа. Оравление в изолирующем респираторе начинается, если на вдох возвращается полупроцентная концентрация CO_2 . Поэтому срок защитного действия дыхательного аппарата заканчивается в момент, когда доля проскакивающих через него молекул CO_2 равна $1,5/4 = 0,375$ [2].

Для реализации рекуррентной процедуры (11), согласно (24), потребуются производные произвольных порядков при $\xi = 0$ от функции $u_1(\eta - \xi, \tau_1)$. С помощью (21) и (22) можно непосредственно убедиться в справедливости равенства

$$\left. \frac{\partial^n u_1(\xi, \tau)}{\partial \xi^n} \right|_{\xi=0} = u_1^{(n)}(0, \tau) = \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} C_n^k g_k(\tau) = v(n, \tau), \quad (27)$$

в котором C_n^k — число сочетаний из n объектов по k .

Поэтому

$$u_1(\eta - \xi, \tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{v(k, \tau)}{k!} (\eta - \xi)^k,$$

откуда следует, что

$$u_1^{(n)}(0, 0) = \left. \frac{\partial^n u_1(\eta - \xi, \tau)}{\partial \xi^n} \right|_{\xi=0} = (-1)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{v(n+k, \tau)}{k!} \eta^k = w(n, \tau). \quad (28)$$

Таким образом, алгоритм моделирования респиратора с гибридной (кругомаятниковой) схемой воздухопроводной части следующий.

1. Для данного η с помощью (20) следует определить срок защитного действия τ_0 аппарата с круговой схемой воздухопроводной части $\omega_1(\eta, \tau_0) = 0,375$.

2. Для $\tau_1 > \tau_0$ (наличие реверса увеличивает срок защитного действия) с помощью (23), (25) нужно вычислить $\tau_2(\tau_1, \eta)$, $\xi_2(\tau_1, \eta)$ и проверить выполнение равенства (26) (если оказывается, что приведенная концентрация меньше критического проскока CO_2 , время τ_1 нужно увеличить и наоборот).

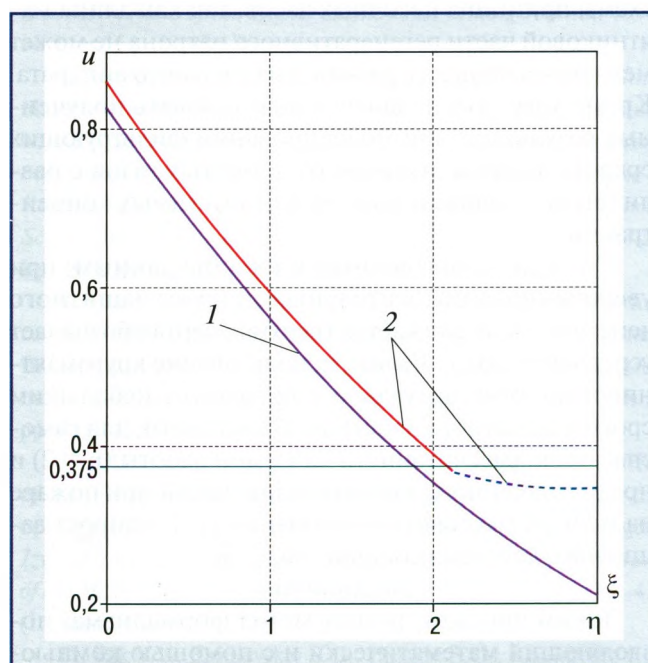
3. Для данного η и установленных параметров τ_1 , $\tau_2(\tau_1, \eta)$, $\xi_2(\tau_1, \eta)$ с помощью (8), (10)–(12), (22), (24), (27), (28) необходимо построить распределение приведенной концентрации в маятниковой, а с помощью (20), (21) — в круговой части регенеративного патрона.

Численный эксперимент

Расчеты в соответствии с приведенным алгоритмом проводятся в среде Mathcad. В целях экономии машинного времени рекуррентная процедура (11), (12), (24), (28) реализована с помощью кубической сплайн-интерполяции. Выбор $\eta = 3$ обусловлен следующими соображениями. Маятниковая часть расположена в конце патрона, где сосредоточен ос-

новной ресурс мертвого слоя хемосорбента. С увеличением η его доля в общем ресурсе регенеративного патрона уменьшается, поскольку положение работающего слоя хемосорбента меняется быстрее, чем его ширина [7]. Поэтому максимальный эффект от внедрения кругомаятниковой схемы следует ожидать в аппаратах с небольшим сроком защитного действия (самоспасателях). В них используется менее 1 кг кислородсодержащего продукта, что при средней физической нагрузке, когда потребляется 28,8 л воздуха в минуту, означает $\eta < 6$ [11].

Для $\eta = 3$ кругомаятниковая схема воздухопроводной части снижает проскок углекислого газа через дыхательный аппарат на 9,59 %, увеличивая срок его защитного действия: $\tau_1/\tau_0 = 1,0959$. При этом важно, что в течение всего увеличенного срока на вдох возвращается меньшее количество молекул CO_2 , благодаря чему обеспечиваются более комфортные условия дыхания. То есть относительный прирост защитного действия гибридной схемы больше относительного прироста срока появления в ней критического проскока CO_2 . Количественно это характеризуется степенью отработки поглотительного ресурса аппарата к моменту наступления критического проскока CO_2 . Соответствующие зависимости в графической форме представлены на рис. 2 (здесь 1 — график отработки ресурса регенеративного патрона с круговой схемой воздухопроводной части; 2 — с кругомаятниковой схемой). Видно, что реверс воздушного потока повышает степень отработки поглотительного ресурса маятниковой части регенеративного патрона. Это отодвигает достижение критического проскока CO_2 , благодаря чему возрастает использование кислородсодержащего



▲ Рис. 2. Отработка ресурса регенеративного патрона воздухопроводной части ($\eta = 3$)

▲ Fig. 2. Development of the resource of the regenerative cartridge of the air duct part ($\eta = 3$)

продукта и круговой части регенеративного патрона. В итоге эффективность использования защитного ресурса дыхательного аппарата суммарно возрастает на 10,56 %.

Аналогичные расчеты, выполненные для других η , показывают (см. таблицу), что длина маятниковой части ξ_2 примерно равна единице и слабо зависит от общей обезразмеренной длины регенеративного патрона. Это значит, что чисто маятниковая схема воздухопроводной части практически всегда нецелесообразна, поскольку даже в самом тяжелом режиме эксплуатации рассчитанные на сравнительно небольшой срок защитного действия шахтные самоспасатели имеют η втрое больше [11]. То есть в конце срока защитного действия при реверсе воздушного потока равновесная концентрация CO_2 достигается задолго до выхода из регенеративного патрона $\xi_2(\tau_1, \eta)/\eta = 1/3$ и две трети его длины уже не участвуют в процессе регенерации, лишь увеличивая объем вредного пространства и гидравлическое сопротивление дыханию.

η	τ_0	ξ_2	$\tau_1 - \tau_0$	τ_1/τ_0	$\Delta\bar{u}/\bar{u}$
2	0,9198	0,9941	0,2197	1,2389	0,2635
3	1,7857	1,0199	0,1713	1,0959	0,1056
4	2,6661	1,0646	0,1459	1,0547	0,0603
5	3,5595	1,1107	0,1275	1,0358	0,0396
6	4,4628	1,1554	0,1142	1,0256	0,0284

Важно также, что уменьшение значения критического проскока, как показывают расчеты, тоже не влияет на ξ_2 . Это подтверждает корректность используемого при моделировании кругомаятниковой схемы принципа песочных часов, так как длина маятниковой части регенеративного патрона не может меняться в процессе работы дыхательного аппарата. Кроме того, это позволяет использовать полученные результаты при моделировании фильтрующих средств защиты дыхания от ядовитых газов с различными уровнями предельно допустимых концентраций.

Согласно приведенным в таблице данным, при увеличении η относительный прирост защитного действия $\Delta\bar{u}/\bar{u}$ снижается (верхняя черта обозначает усреднение по ξ). Значит, использование кругомаятниковой схемы актуально в аппаратах с небольшим сроком защитного действия. В частности, для самоспасателя, рассчитанного на 15 мин работы ($\eta = 2$) и предназначенного для эвакуации людей при пожаре из мест их массового пребывания [13], прирост защитного действия составит 26,35 %.

Заключение

Таким образом, развит метод формализма, позволяющий математически и с помощью компьютера моделировать динамическую сорбционную активность регенеративного патрона дыхательного аппарата с гибридной (кругомаятниковой) схемой воздухопроводной части. Определен прирост защитного

действия аппарата, обусловленный использованием ресурса мертвого слоя сорбента в результате реверса воздушного потока в маятниковой части регенеративного патрона. Показана целесообразность использования гибридной схемы в самоспасателях с небольшим сроком защитного действия. Определена оптимальная длина маятниковой части, при которой снижается сопротивление дыханию и не увеличивается вредное пространство, занятое воздухом, возвращающимся на вдох без контакта с непрореагировавшими слоями кислородсодержащего продукта. Показана ее слабая зависимость от общей длины регенеративного патрона и предельно допустимой концентрации углекислого газа в возвращающемся на вдох воздухе, что делает кругомаятниковую схему реализуемой на практике.

Список литературы

1. *Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования: учеб. пособие/ С.В. Гудков, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин, В.П. Таров.* — М.: Машиностроение, 2008. — 188 с.
2. *Диденко Н.С.* Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. — М.: Недра, 1990. — 160 с.
3. *А.с. 1785712 СССР.* А 62 В 7/08. Изолирующий дыхательный аппарат/ Н.С. Диденко, Т.Е. Инденбаум, С.И. Фастивец; заявл. 26.11.1990; опубл. 07.01.1993, Бюл. № 1.
4. *Пат. 47440* Украина. А 62 В. Изолирующий дыхательный аппарат/ С.Г. Ехилевский, В.В. Пак, Е.Г. Ильинский; опубл. 15.07.2002, Бюл. № 7.
5. *Жуховицкий А.А., Забежинский Я.Л., Тихонов А.Н.* Поглощение газа из тока воздуха слоем зернистого материала// Журнал физической химии. — 1945. — Т. 19. — Вып. 6. — С. 253–261.
6. *Моделирование работы изолирующих аппаратов на химически связанном кислороде/ А.А. Кримштейн, С.В. Плотникова, В.И. Коновалова, Б.В. Путин// Журнал прикладной химии.* — 1992. — Т. 65. — № 11. — С. 2463–2469.
7. *Математическая модель рабочего процесса изолирующего шахтного респиратора/ В.В. Пак, С.Г. Ехилевский, В.К. Овчаров, А.Э. Ильинский// Известия высших учебных заведений. Горный журнал.* — 1994. — № 1. — С. 54–57.
8. *Майстренко А.В., Майстренко Н.В., Ерохин О.И.* Моделирование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде// Научные ведомости Белгородского государственного университета. История. Политология. Экономика. Информатика. — 2014. — № 1 (172). — Вып. 29/1. — С. 81–87.
9. *A Method for the Development of Self-Contained Breathing Apparatus Using Computer Modeling/ V.G. Matveikin, E.N. Tugolukov, S.Y. Alekseyev, A.Y. Zakharov// International Journal of Engineering and Technology.* — 2018. — Vol. 7. — № 3. — P. 481–486.
10. *Ехилевский С.Г., Голубева О.В., Потапенко Е.П.* Влияние начальной загрязненности регенеративного патрона на работу шахтного респиратора на химически связанном кислороде// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2014. — № 8. — С. 37–43.

11. Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов/ В.В. Пак, С.Г. Ехилевский, Э.Г. Ильинский, Е.И. Конопелько// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 1998. — № 11–12. — С. 108–112.

12. Ехилевский С.Г. Нестационарная задача динамики сорбции углекислого газа в регенеративном патроне изолирующего респиратора// Вестник Фонда фундаментальных исследований. — 2019. — № 3 (89). — С. 57–65.

13. Изолирующий самоспасатель для эвакуации людей при пожаре/ Л.А. Зборщик, Р.С. Плетенецкий, В.В. Говжеев, В.И. Францев// Научный вестник НИИГД «Респиратор». — 2017. — № 1 (54). — С. 102–109.

ekhilevskiy@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 27 мая 2020 г.

«Bezопасnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2021, № 1, pp. 46–52.
DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-46-52

Simulation of a Breathing Apparatus on Chemically Bound Oxygen with a Circular Pendulum Circuit of the Air Duct Part

S.G. Ekhilevskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
ekhilevskiy@yandex.ru

O.V. Golubeva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of Department

Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus

E.P. Potapenko, Lead Engineer

Production republican unitary enterprise «Vitebskoblgaz», Vitebsk, Republic of Belarus

Abstract

At present, the main prospects for improving the insulating means of respiratory protection are associated with the chemical method of oxygen reservation. The arguments in favor of this choice are the high packing density of oxygen and its self-regulating supply, depending on the physical activity of a person. The main schemes of the air duct part of breathing apparatus on chemically bound oxygen are circular and pendulum. The attempt is made in the article to combine the advantages of the circular (small harmful space) and pendulum (small volume of the dead layer) schemes of breathing apparatus on chemically bound oxygen.

For these purposes, the formalism method was developed, which allows mathematically and with the help of a computer to simulate the dynamic sorption activity of the regenerative cartridge of a breathing apparatus with a hybrid (circular-pendulum) scheme of the air duct part. The increase in the protective action of the apparatus is determined due to the use of the resource of the dead sorbent layer in the result of the air flow reverse in the pendulum part of the regenerative cartridge. Feasibility of using a hybrid scheme in the self-rescuers with a short period of protective action is shown.

The optimal length of the pendulum part is determined, at which the breathing resistance decreases, and the harmful space occupied by the air returning for inhalation without contact with the unreacted layers of the oxygen-containing product is not increased.

Its weak dependence on the total length of the regenerative cartridge and the maximum permissible concentration of carbon dioxide in the air returning to inhalation is shown, which makes the circular pendulum scheme realizable in practice.

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

References

1. Gudkov S.V., Dvoretzkiy S.I., Putin S.B., Tarov V.P. Self-contained breathing apparatus and the basics of their design: textbook. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 188 p. (In Russ.).
2. Didenko N.S. Regenerative respirators for mining and rescue operations. Moscow: Nedra, 1990. 160 p. (In Russ.).
3. Didenko N.S., Indenbaum T.E., Fastivets S.I. A.S. 1785712 USSR. A 62 V 7/08. Self-contained breathing apparatus. Applied: November 26, 1990. Published: January 7, 1993. Bulletin № 1. (In Russ.).
4. Ekhilevskiy S.G., Pak V.V., Ilinskiy E.G. Patent. 47440 Ukrain. A 62 B. Self-contained breathing apparatus. Published: July 15, 2002. Bulletin № 7. (In Ukr.).
5. Zhukhovitskiy A.A., Zabezhinskiy Ya.L., Tikhonov A.N. Gas absorption from the air flow by a layer of granular material. Zhurnal fizicheskoy khimii = Physical Chemistry Journal. 1945. Vol. 19. Iss. 6. pp. 253–261. (In Russ.).
6. Krimsteyn A.A., Plotnikova S.V., Konovalova V.I., Putin B.V. Simulation of the self-contained apparatus operation using chemically bound oxygen. Zhurnal prikladnoy khimii = Journal of Applied Chemistry. 1992. Vol. 65. № 11. pp. 2463–2469. (In Russ.).
7. Pak V.V., Ekhilevskiy S.G., Ovcharov V.K., Ilinskiy A.E. Mathematical model of the working process of an insulating mine respirator. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 1994. № 1. pp. 54–57. (In Russ.).
8. Maystrenko A.V., Maystrenko N.V., Erokhin O.I. Simulation of self-contained breathing apparatus on chemically bound oxygen. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika = Research Bulletin of Belgorod State University. History. Political Sciencs. Economics. Information Technologies. 2014. № 1 (172). Iss. 29/1. pp. 81–87. (In Russ.).
9. Matveikin V.G., Tugolukov E.N., Alekseyev S.Y., Zakharov A.Y. A Method for the Development of Self-Contained Breathing Apparatus Using Computer Modeling. International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7. № 3. pp. 481–486.
10. Ekhilevskiy S.G., Golubeva O.V., Potapenko E.P. Effect of the initial contamination of the regenerative cartridge on the operation of a mine respirator using chemically bound oxygen. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2014. № 8. pp. 37–43. (In Russ.).
11. Pak V.V., Ekhilevskiy S.G., Ilinskiy E.G., Konopelko E.I. Values of the phenomenological parameters of a chemisorption model in the mine respirators regenerative cartridges. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 1998. № 11–12. pp. 108–112. (In Russ.).

12. Ekhilevskiy S.G. Non-stationary problem of the dynamics of sorption of carbon dioxide in the regenerative cartridge of an isolating respirator. *Vestnik Fonda fundamentalnykh issledovaniy* = *Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*. 2019. № 3 (89). pp. 57–65. (In Russ.).

13. Zborshchik L.A., Pletenetskiy R.S., Govzheev V.V., Frantsev V.I. Self-contained self-rescuer for evacuation of the people by a fire. *Nauchnyy vestnik NIIGD «Respirator»* = *Scientific bulletin of NIIGD «Respirator»*. 2017. № 1 (54). pp. 102–109. (In Russ.).

Received May 27, 2020



МАЗИРКА Виктор Александрович (к 95-летию со дня рождения)

4 января 2021 г. исполнилось 95 лет Виктору Александровичу Мазирке, инспектору московского котлонадзора.

Родился Виктор Александрович в с. Елизаветовка Ростовской обл. Его юность пришлась на лихолетье Великой Отечественной войны. Избегая немецкого плена, он проделал полный лишений путь вместе с отступающими частями Красной армии до Сталинграда.

С 1943 г. Виктор Александрович — в рядах Советской Армии, в которой он достойно служил до 1950 г. Удостоен государственных наград, на его груди медали «За боевые заслуги», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «20 лет Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «30 лет Советской Армии и Флота», «50 лет Вооруженных сил СССР», орден Отечественной войны II степени.

В котлонадзор Виктор Александрович пришел работать в 1959 г. (Госгортехнадзор РСФСР) по рекомендации инспекторов, осуществлявших надзор за объектами котлонадзора, где и проработал 27 лет, в 1986 г. ушел на пенсию.

Но не стареют душой ветераны, как поется в песне. Воспоминания и напутственные слова ветерана войны и котлонадзора и сегодня являются для молодого поколения инспекторов символом связи со старшим поколением и преемственности.

Коллектив Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, редколлегия и редакция журнала «Безопасность труда в промышленности» поздравляют Виктора Александровича с 95-летием и желают крепкого здоровья, благополучия, оптимизма и неиссякаемой энергии.

22-Е ИЗДАНИЕ, ДОПОЛНЕННОЕ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН О ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ



Приведен текст Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» с изменениями, внесенными федеральными законами от 10.01.2003 № 15-ФЗ, от 22.08.2004 № 122-ФЗ, от 09.05.2005 № 45-ФЗ, от 18.12.2006 № 232-ФЗ, от 30.12.2008 № 309-ФЗ, от 27.12.2009 № 374-ФЗ, от 23.07.2010 № 171-ФЗ, от 27.07.2010 № 226-ФЗ, от 01.07.2011 № 169-ФЗ, от 18.07.2011 № 242-ФЗ, от 18.07.2011 № 243-ФЗ, от 19.07.2011 № 248-ФЗ, от 28.11.2011 № 337-ФЗ, от 30.11.2011 № 347-ФЗ, от 25.06.2012 № 93-ФЗ, от 04.03.2013 № 22-ФЗ, от 02.07.2013 № 186-ФЗ, от 31.12.2014 № 514-ФЗ, от 13.07.2015 № 233-ФЗ, от 02.06.2016 № 170-ФЗ, от 03.07.2016 № 283-ФЗ, от 22.02.2017 № 22-ФЗ, от 07.03.2017 № 31-ФЗ, от 29.07.2018 № 271-ФЗ, от 08.12.2020 № 429-ФЗ, в редакции, действующей с 08.12.2020.

В разработке первой редакции федерального закона принимали участие должностные лица Госгортехнадзора России (Б.А. Красных, Р.А. Стандрик) и специалисты подведомственного Госгортехнадзору России научно-технического центра по безопасности в промышленности (В.И. Сидоров, Е.В. Кловач), а также ученые-юристы Института государства и права Российской академии наук (М.М. Бринчук) и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (А.К. Голиченков). В разработке его последних редакций принимали участие должностные лица Ростехнадзора (Б.А. Красных, С.Г. Радионова, А.В. Феропонтов, Д.А. Яковлев) и специалисты группы компаний «Промышленная безопасность» (В.И. Сидоров, Е.В. Кловач, А.С. Печёркин, И.А. Кручинина).

ЭТУ КНИГУ И ДРУГИЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ МОЖНО ПРИОБРЕСТИ ПО АДРЕСУ:

Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а также заказать в отделе распространения по тел./факсам: +7(495) 620-47-53 (многоканальный), +7(495) 620-47-47, +7(495) 620-47-46. E-mail: ornd@safety.ru.