



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

Полоцкий государственный
университет, Новополоцк, Республика
Беларусь

Оптимизация респиратора на химически связанном кислороде

Для оптимизации респиратора на химически связанном кислороде развит формализм моделирования регенерации воздуха слоем гранул надпероксида калия, диаметр которых меняется в направлении фильтрации. Увеличение на 1 мм диаметра гранул в лобовом слое хемосорбента на 36 % снижает мощность источников экзотермического тепла, препятствуя спеканию кислородсодержащего продукта. Получена зависимость диаметра гранул от глубины их залегания в регенеративном патроне, обеспечивающая равномерное распределение тепловой мощности и 27 % прироста защитного действия за счет ресурса мертвого слоя хемосорбента.

Ключевые слова: изолирующий дыхательный аппарат, экзотермическая реакция, размер гранул, надпероксид калия, регенерация воздуха, динамика хемосорбции.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-85-91

Введение

Изолирующие средства защиты дыхания незаменимы при наличии в воздухе нескольких (не имеющих универсального фильтра) отравляющих веществ или при недостатке кислорода. С этим приходится сталкиваться в чрезвычайных ситуациях: при аварийной утечке газа, пожаре в замкнутом пространстве (шахте, подводной лодке, метро), когда выгорает или вытесняется кислород и выделяются ядовитые продукты горения.

Во многих из описанных ситуаций важны такие характеристики дыхательных аппаратов, как их масса, габариты, срок защитного действия, надежность, простота в обслуживании и постоянная готовность к оперативному использованию. По этим показателям предпочтительнее использовать дыхательные аппараты на химически связанном кислороде [1]. В них выдыхаемый углекислый газ поглощается в процессе фильтрации воздуха через регенеративный патрон, снаряженный пористыми гранулами кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия, кДж:



В соответствии со стехиометрией реакции (1) выделяется необходимый для нового вдоха кислород в пропорции, близкой к идеальной для физиологии человека [2]. То есть расход зарезервированного в регенеративном патроне кислорода регулируется автоматически в зависимости от физической нагрузки человека, определяющей количество выдыхаемого в единицу времени углекислого газа. Это позволяет обойтись без имеющегося в баллонных аппаратах дополнительного оборудования (легочный автомат и

ресивер) [3], упростив таким образом конструкцию, снизив вес и повысив надежность изолирующего средства защиты дыхания. Уменьшению его массы и габаритов способствует и то, что надпероксид калия является твердым веществом. Это обеспечивает в несколько раз более плотную упаковку кислорода, чем в баллонных дыхательных аппаратах. Стальные баллоны не выдерживают более 250 атм, к тому же весят в 6 раз больше своего содержимого. В итоге изолирующий дыхательный аппарат на химически связанном кислороде при том же сроке защитного действия весит существенно меньше баллонного [3]. Изложенное позволяет главные перспективы совершенствования изолирующих средств защиты дыхания связать с химическим способом резервирования кислорода [4]. Совершенствованию его реализации посвящена данная публикация.

Пути совершенствования дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде

Первое направление такого совершенствования — оптимизация температурного режима регенеративного патрона. Лимитирующей стадией хемосорбции углекислого газа является диффузия его молекул внутрь гранул кислородсодержащего продукта. Под действием экзотермического тепла гранулы могут спекаться. Их поры при этом закрываются, и защитный ресурс остается неиспользованным [5]. Наибольшему риску подвергаются расположенные на входе в регенеративный патрон лобовые слои кислородсодержащего продукта, так как там в начале работы дыхательного аппарата максимальный концентрационный напор углекислого газа сочетается с совсем неизрасходованной сорбционной емкостью гранул [6]. По мере продвижения первых

порций выдыхаемого воздуха вглубь регенеративного патрона концентрация CO_2 в них снижается и в патроне формируется квазистационарный профиль концентрации углекислого газа, который медленно эволюционирует по мере послойной отработки кислородсодержащего продукта. При этом концентрация углекислого газа на выходе из регенеративного патрона (проскок) постепенно возрастает. Срок защитного действия аппарата заканчивается по достижении критического проскока (1,5 % молекул CO_2 в возвращаемом на вдох воздухе [7]), после чего начинается отравление углекислым газом [3]. Однако в штатном режиме, если высокая мощность источников экзотермического тепла в лобовом слое приводит к его перегреву и спеканию, в следующий слой начинает приходиться несниженная концентрация углекислого газа. Ситуация повторяется, происходит послойное спекание кислородсодержащего продукта, и критический проскок CO_2 наступает при фактически неиспользованном защитном ресурсе дыхательного аппарата.

Второе направление совершенствования средств защиты дыхания на химически связанном кислороде — использование защитного ресурса регенеративного патрона, остающегося незадействованным к моменту критического проскока CO_2 в штатном режиме работы. Полностью химически связанный кислород прореагирует, лишь когда все 4 % углекислого газа в выдыхаемом человеком воздухе начнут беспрепятственно преодолевать регенеративный патрон. Очевидно, это происходит несколько позже времени наступления критического проскока CO_2 и по этой причине невозможно. Непрореагировавшие молекулы надпероксида калия расположены в основном в замыкающих слоях кислородсодержащего продукта [6]. Их количество (неиспользуемая часть защитного ресурса аппарата) характеризуется толщиной так называемого мертвого слоя хемосорбента, который мог бы получиться из гранул, образованных только из таких (непрореагировавших) молекул.

Предотвращать спекание гранул и истончать их мертвый слой можно внесением изменений в конструкцию дыхательного аппарата. Например, можно устанавливать в регенеративном патроне перераспределяющие тепло медные пластины. Или использовать вместо круговой маятниковую схему воздухопроводной части [3], в которой частично регенерированный воздух возвращается на вдох опять через регенеративный патрон, увеличивая таким образом время контакта реагентов. В первом случае увеличивается масса аппарата, а благодаря пристеночным эффектам снижается плотность упаковки гранул. Во втором увеличивается так называемое вредное пространство, занятое воздухом, который возвращается на вдох, так и не вступив в контакт с непрореагировавшими слоями кислородсодержащего продукта.

Вместе с тем обе задачи можно решить, меняя при снаряжении регенеративного патрона размер гранул

в зависимости от глубины их залегания. Как уже упоминалось, лимитирующая стадия хемосорбции молекул CO_2 — их диффузия внутрь пористых гранул надпероксида калия. Скорость такой диффузии обратно пропорциональна квадрату их диаметра [8]. То есть, увеличив размер гранул в лобовом слое кислородсодержащего продукта, можно замедлить хемосорбцию и предотвратить его спекание. Напротив, уменьшение диаметра гранул в замыкающих слоях ускорит их работу, что позволит при неизменном времени фильтрации воздуха отодвинуть появление критического проскока CO_2 и увеличить срок защитного действия аппарата за счет использования ресурса мертвого слоя хемосорбента однородно снаряженного патрона.

Уменьшать диаметр гранул нужно не в самом конце патрона, так как при этом практически весь слой, незадействованный в однородно снаряженном патроне, останется мертвым. С другой стороны, существенное уменьшение размера гранул в начале мертвого слоя приведет к их спеканию, так как проскок CO_2 через практически отработанную часть патрона (предваряющую мертвый слой) слишком велик. Преодолеть описанные трудности можно, поэтапно уменьшая размер гранул по мере продвижения вглубь мертвого слоя хемосорбента.

Таким образом, для оптимизации респиратора на химически связанном кислороде требуется формализм моделирования регенерации выдыхаемого воздуха слоем гранул надпероксида калия, диаметр которых меняется в направлении фильтрации.

Математическая модель хемосорбции CO_2 неоднородно снаряженным регенеративным патроном

Стандартный кислородсодержащий продукт содержит гранулы размером примерно от 2 до 5 мм, что обеспечивает среднее значение 4 мм. Мельчить гранулы до бесконечности бессмысленно, так как полученный в [8] результат справедлив, пока размер гранул на порядки больше диаметра крупных пор. Их измерение выполняется с помощью специального оборудования [9] и дает характерное значение $1 \cdot 10^{-4}$ мм [10]. То есть развиваемый ниже формализм позволяет вполне корректно (с относительной погрешностью менее 0,1 %) рассматривать миллиметровые гранулы.

Чтобы обосновать зависимость толщины слоя от размера образующих его гранул, потребуется математическая модель динамической сорбционной активности при наличии нестационарного граничного условия на входе в поглощающий слой, поскольку концентрация углекислого газа на входе в следующий слой хемосорбента растет по мере отработки поглощительного ресурса предыдущего слоя. Выберем в качестве характерного масштаба объемной концентрации молекул CO_2 W_{0e} ее максимальное значение на входе в рассматриваемый слой W_0 , дости-

гаемое после полной обработки предыдущего слоя. Тогда, согласно [11], приведенная концентрация молекул CO_2 $\omega = W/W_0$ определяется соотношениями:

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

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

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

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

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

где x — расстояние от входа в слой; β и γ — феноменологические постоянные, характеризующие соответственно скорость хемосорбции и ее ресурс в патроне, однородно снаряженном гранулами среднего диаметра [10, 12]; ν — скорость фильтрации воздуха; t — время; m — индекс суммирования (не имеет отношения к нумерации слоев); u — использованная доля поглотительного ресурса хемосорбента.

Задача динамики сорбции рассматривается в рамках модели [11], основанной на уравнении баланса CO_2 и кинетики хемосорбции. В последнем фигурируют упомянутые постоянные β и γ . Адекватность такого подхода внутри однородно снаряженного слоя хемосорбента подтверждена натурными экспериментами [12].

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 соотношений (2)–(6) получим приведенную концентрацию CO_2 и долю отработанного хемосорбента в патроне без скачка диаметра гранул:

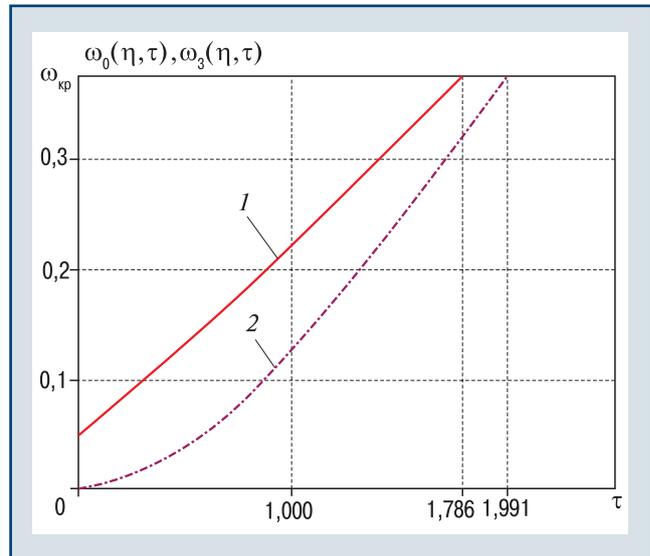
$$\omega_0(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\xi^m}{m!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right]; \quad (7)$$

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

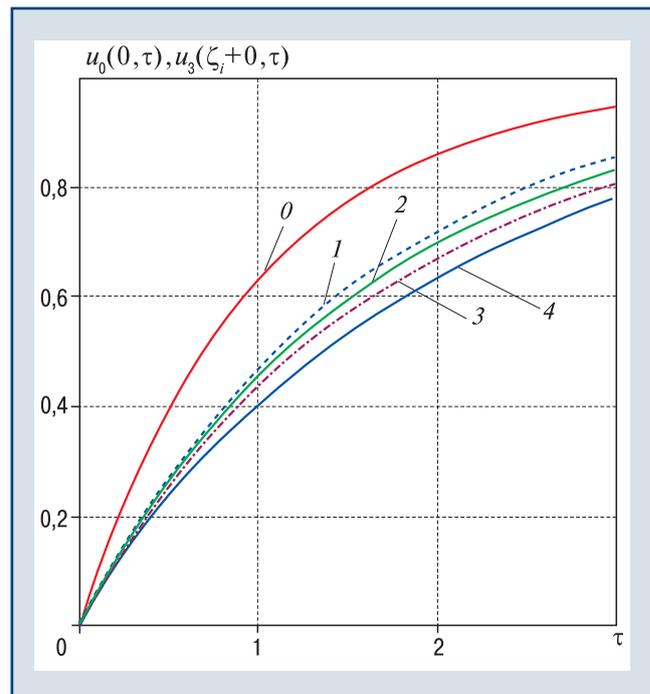
где k — индекс суммирования.

С помощью формул (7), (8) построены кривая 1 на рис. 1, 3 и кривая 0 на рис. 2. При этом суммирование велось до $m = 50$, что обеспечивало погрешность менее 0,001.

Для предотвращения спекания разместим в лобовом слое хемосорбента ($\xi \in [0, \zeta_1]$) гранулы диаметром 5 мм. При этом β в (2) нужно заменить на $\alpha_0 \beta$, где, в соответствии с ранее изложенным, $\alpha_0 = 16/25$ [8]. В результате с помощью формул (2)–(8) и функций Хевисайда θ получим:



▲ Рис. 1. Зависимость от времени концентрации CO_2 при однородном (кривая 1) и с тремя скачками диаметра гранул (кривая 2) регенеративном патроне
▲ Fig. 1. Dependence on CO_2 concentration time in case of the homogeneous (curve 1) and with three changes in granule diameter (curve 2) regenerative cartridge



▲ Рис. 2. Использованная доля хемосорбента в зависимости от времени в лобовом слое однородно (кривая 0) и на входах в 1, 2, 3 и 4 части неоднородно снаряженного регенеративного патрона (кривые 1, 2, 3, 4)
▲ Fig. 2. Used fraction of chemisorbent depending on time in the frontal layer of the homogeneously packed regenerative cartridge (curve 0), and at the inlets to 1, 2, 3 and 4 parts of the inhomogeneously regenerative cartridge (curves 1, 2, 3, 4)

$$\begin{aligned} \omega_1(\xi, \tau) &= \omega_0(\alpha_0 \xi, \alpha_0 \tau) \theta(\zeta_1 - \xi) + \\ &+ \omega_{12}(\xi - \zeta_1, \tau) \theta(\xi - \zeta_1); \end{aligned} \quad (9)$$



▲ Рис. 3. Отработка ресурса к моменту критического проскока CO₂ в однородном патроне (кривая 1) и в патроне с тремя скачками диаметра гранул (кривая 2)
 ▲ Fig 3. Resource development by the moment of critical CO₂ slip in the homogeneous cartridge (curve 1), and in the cartridge with two changes of granule diameter (curve 2)

$$u_1(\xi, \tau) = u_0(\alpha_0 \xi, \alpha_0 \tau) \theta(\zeta_1 - \xi) + u_{12}(\xi - \zeta_1, \tau) \theta(\xi - \zeta_1), \quad (10)$$

где для вычисления приведенной концентрации CO₂ ω_{12} и отработки хемосорбента u_{12} во второй части патрона с одним скачком диаметра гранул в (3), (6) ξ следует заменить на $\xi - \zeta_1$, в (5) вместо $\omega(0, \tau)$ подставить $\omega_0(\alpha_0 \zeta_1, \alpha_0 \tau)$, а в (6) вместо ω — выражение для ω_{12} . Координата скачка диаметра гранул $\zeta_1 = 0,681$ выбрана из условия равенства производных $\partial u_1(0, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0} = \partial u_1(\zeta_1 + 0, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0} = 0,64$, пропорциональных мощности источников экзотермического тепла на входе в первую и вторую части патрона в начальный момент времени. Важно, что в неразрезанном патроне $\partial u_0(0, \tau) / \partial \tau|_{\tau=0} = 1$, т.е. увеличение на 1 мм диаметра гранул в лобовом слое хемосорбента на 36 % снижает мощность источников экзотермического тепла на входе в регенеративный патрон.

Аналогично определена обезразмеренная координата $\zeta_2 = 1,249$ второго скачка диаметра гранул ($\beta \rightarrow \alpha_2 \beta$) от 4 до 3 мм ($\alpha_2 = 16/9$), для чего использованы вытекающие из (2)–(6) формулы:

$$\omega_2(\xi, \tau) = \omega_1(\xi, \tau) \theta(\zeta_2 - \xi) + \omega_{23}(\xi - \zeta_2, \tau) \theta(\xi - \zeta_2); \quad (11)$$

$$u_2(\xi, \tau) = u_1(\xi, \tau) \theta(\zeta_2 - \xi) + u_{23}(\xi - \zeta_2, \tau) \theta(\xi - \zeta_2), \quad (12)$$

в которых

$$\omega_{23}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_2(\xi+\tau)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{f_m(\tau)}{m!} (\alpha_2 \xi)^m; \quad (13)$$

$$f_0(\tau) = e^{\alpha_2 \tau} \omega_1(\zeta_2, \tau);$$

$$f_{m+1}(\tau) = \alpha_2 \int_0^{\tau} f_m(\tau) d\tau; \quad (14)$$

$$u_{23}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_2 \tau} \alpha_2 \int_0^{\tau} e^{\alpha_2 \tau} \omega_{23}(\xi, \tau) d\tau. \quad (15)$$

Формулы (11)–(15) позволяют заметить общую закономерность:

$$\omega_n(\xi, \tau) = \omega_{n-1}(\xi, \tau) \theta(\zeta_n - \xi) + \omega_{nn+1}(\xi - \zeta_n, \tau) \theta(\xi - \zeta_n); \quad (16)$$

$$u_n(\xi, \tau) = u_{n-1}(\xi, \tau) \theta(\zeta_n - \xi) + u_{nn+1}(\xi - \zeta_n, \tau) \theta(\xi - \zeta_n); \quad (17)$$

$$\omega_{nn+1}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_n(\xi+\tau)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{f_m(\tau)}{m!} (\alpha_n \xi)^m; \quad (18)$$

$$f_0(\tau) = e^{\alpha_n \tau} \omega_{n-1}(\zeta_n, \tau);$$

$$f_{m+1}(\tau) = \alpha_n \int_0^{\tau} f_m(\tau) d\tau; \quad (19)$$

$$u_{nn+1}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_n \tau} \alpha_n \int_0^{\tau} e^{\alpha_n \tau} \omega_{nn+1}(\xi, \tau) d\tau, \quad (20)$$

где n показывает, сколько скачков диаметра гранул имеется в патроне; ζ_i — их координаты ($i = 1, 2, \dots, n$); индекс $n + 1$ обозначает последнюю часть патрона, а α_n равняется квадрату отношения прежнего диаметра гранул к имеющему место после последнего скачка. В рассматриваемой ситуации $\alpha_1 = 1$, что неприципиально для формализма.

Вместе с выражением для $\omega_0(\alpha_0 \zeta_1, \alpha_0 \tau)$, получаемым с помощью (7), формулы (16)–(20) позволяют моделировать динамику хемосорбции углекислого газа в регенеративном патроне с произвольным числом скачков диаметра гранул кислородсодержащего продукта. Отметим, что перераспределение источников экзотермического тепла не только оптимизировало работу респиратора, но и упростило ее моделирование, устранив зависимость температуры работающего слоя хемосорбента от координаты [13]. Благодаря этому отсутствует температурный градиент между воздухом, покинувшим предыдущий слой, и уменьшенными гранулами следующего слоя. В такой ситуации рост теплоотдающей поверхности мелких гранул не приводит к снижению их температуры и скорости реакции.

Численный эксперимент

К моменту τ_{kp} критического проскока CO₂ ($\omega(\eta, \tau_{kp}) = 1,5 \% / 4 \% = 0,375 = \omega_{kp}$) доля мертвого слоя

хемосорбента велика в патронах с небольшой обезразмеренной длиной η регенеративного патрона. В них процент прироста защитного действия от поэтапного уменьшения диаметра гранул должен быть максимальным. С учетом изложенного численные эксперименты проводились для $\eta = 3$, что соответствует самоспасателю с 915 г кислородсодержащего продукта в тяжелом (1 л выдыхаемого воздуха в секунду) режиме работы. Величина η для существующих аппаратов в разных режимах работы определена в [12].

Результаты расчетов в среде пакета MathCAD, выполненных на основе развитого формализма для случая трех скачков диаметра гранул с размерами 5; 4; 3 и 2 мм, в графической форме представлены на рис. 1–3. Суммирование в (18) для $n = 1, 2, 3$ осуществлялось до $m = 50$, что обеспечивало погрешность вычислений менее 0,001. Координата третьего скачка диаметра $\zeta_3 = 1,693$ также определена из условия равенства скорости хемосорбции CO_2 в лобовых слоях всех (четырех) частей регенеративного патрона в начальный (наиболее неблагоприятный с точки зрения спекания гранул) момент времени.

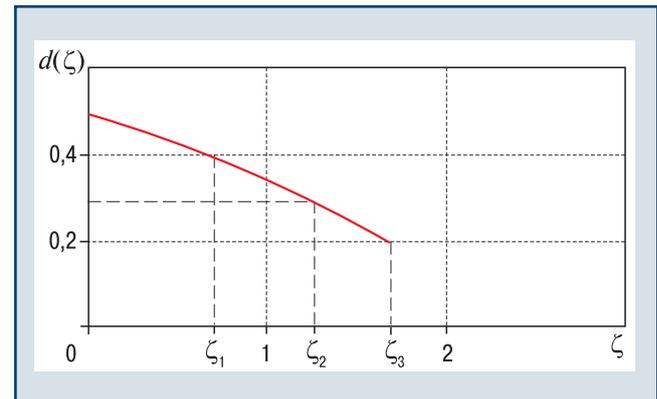
Видно (см. рис. 1), что уменьшение диаметра гранул в мертвом слое хемосорбента на 11,5 % отодвигает время наступления критического проскока CO_2 ($1,991/1,786 = 1,115$). При этом важно, что мощность источников экзотермического тепла, характеризующая наклоном кривых на рис. 2, меньше, чем на входе в однородно снаряженный патрон.

В действительности прирост защитного действия существенно больше, так как воздухопроводная часть изолирующего аппарата является замкнутым пространством. Это значит, что еще некритический проскок CO_2 все равно возвращается на вдох, ухудшая функциональное состояние человека и увеличивая содержание CO_2 в выдохе, сокращая таким образом срок защитного действия аппарата. Поэтому правильнее оценивать прирост защитного действия интегрально, по суммарному числу проскочивших или (что то же самое в силу закона сохранения массы) поглощенных молекул CO_2 .

По такому показателю прирост защитного действия 20,1 % получается отношением площадей под кривыми 2 и 1 на рис. 3. В результате средняя отработка кислородсодержащего продукта возрастает с 47,2 до 56,7 %. И это притом что в лобовой (с увеличенным диаметром гранул) части патрона кривая 2 проходит ниже кривой 1. Пики отработки ресурса тем ниже, чем они дальше от входа в патрон, что соответствует скорости роста кривых 1–4 (см. рис. 2) и также препятствует спеканию. Важно, что суммарное тепло, пропорциональное площади под кривой 2, выделяется за большее время, чем в однородном патроне. Это увеличивает рассеивание тепла в окружающую среду. Предотвращение спекания гранул препятствует блокировке каналов

фильтрации и росту (за счет этого) сопротивления воздушному потоку.

На рис. 4 представлена полученная на основе численных расчетов интерполяционная зависимость диаметра гранул от глубины их залегания. Плавное убывание диаметра позволит заполнить зубчики между пиками кривой 2 (см. рис. 3). При этом будут использованы еще 3 % защитного ресурса аппарата. Соответственно суммарная эффективность его использования к моменту критического проскока CO_2 составит 60 %. Это даже без учета предотвращения спекания гранул на 27 % больше, чем в однородно снаряженном патроне.



▲ Рис. 4. Убывание диаметра гранул хемосорбента с ростом ζ , обеспечивающее равномерное распределение источников экзотермического тепла

▲ Fig. 4. Decrease in the diameter of the chemisorbent granules with ζ growth, which ensures the uniform distribution of the sources of exothermic heat

Видно (см. рис. 4), что обеспечивающее равномерную тепловую мощность уменьшение размера гранул обращает их диаметр в ноль на отрезке более коротком, чем длина регенеративного патрона, т.е. полностью ликвидировать мертвый слой не удастся. Однако определение его минимальной толщины в рамках развитого формализма некорректно. Лежащая в его основе модель рабочего процесса [11] соответствует хемосорбции в области Генри.

Неограниченное увеличение α_n трансформирует изотерму сорбции и переводит процесс в ее горизонтальную часть при неизменной концентрации CO_2 на входе в патрон. В описанной ситуации модель (2)–(6) перестает быть адекватной, так как любая конечная концентрация CO_2 в принципе не может быть равновесной и ведет к полному истощению поглотительного ресурса кислородсодержащего продукта. При этом спад концентрации CO_2 в работающем слое хемосорбента происходит по наиболее быстрому (экспоненциальному) закону [12]. Нижняя оценка обезразмеренной толщины мертвого слоя при этом равна $\omega_{кр} = 0,375$, что при рассматриваемой обезразмеренной длине патрона $\eta = 3$ составляет 12,5 % его защитного ресурса. Задействовать эти проценты можно, только увели-

чивая время контакта реагентов, замедляя скорость фильтрации воздуха [14].

Заключение

Таким образом, для оптимизации рабочего процесса дыхательного аппарата на химически связанном кислороде развит новый формализм, позволяющий моделировать регенерацию выдыхаемого воздуха слоем гранул надпероксида калия, диаметр которых поэтапно убывает в направлении фильтрации воздушного потока. Показано, что увеличение на 1 мм диаметра гранул в лобовом слое хемосорбента на 36 % снижает мощность источников экзотермического тепла, препятствуя спеканию кислородсодержащего продукта при тяжелой физической нагрузке человека. Получена зависимость диаметра гранул от глубины их залегания в регенеративном патроне, обеспечивающая равномерное распределение тепловой мощности динамической хемосорбции углекислого газа. Уменьшение диаметра гранул по найденному закону до 2 мм, даже при отсутствии спекания в однородно снаряженном патроне, обеспечивает 27 % прироста защитного действия за счет ресурса мертвого слоя хемосорбента самоспасателя в тяжелом режиме эксплуатации. Выполнена нижняя оценка ресурса мертвого слоя при дальнейшем измельчении гранул и указаны пути его использования.

Список литературы

1. Гудков С.В., Матвейкин В.Г., Шаповалов Г.Г. Преимущества использования изолирующих самоспасателей с химически связанным кислородом в угольных шахтах// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 11. — С. 40–44.
2. BS EN 13794:2002. Respiratory protective devices — Self-contained closed-circuit breathing apparatus for escape — Requirements, testing, marking. URL: http://www.nsofb.ru/fck_editor_files/files/8%20%202053260%201%20.pdf (дата обращения: 01.07.2019).
3. 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.
4. Jolson J. Underground Self-Rescuer Technology, Past, Present, and Future// 3rd SCSR Workshop at the MSHA Training Academy. — Arlington, 2006.
5. Рылов Ю.Б., Дворецкий С.И. Разработка энерго-сберегающего процесса и аппаратурно-технологического оформления производства регенеративного продукта с ферратом (VI) калия// Вестник ТГТУ. — 2012. — Т. 18. — № 3. — С. 656–662.
6. Майстренко А.В., Майстренко Н.В., Ерохин О.И. Моделирование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде// Научные ведомости Белгородского государственного университета. — 2014. — № 1 (172). — Вып. 29/1. — С. 81–87.
7. Диденко Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. — М.: Недра, 1990. — 158 с.
8. Влияние формы и размеров пористой гранулы на скорость внутренней диффузии/ С.Г. Ехилевский, О.В. Голубева, Д.В. Пяткин, Н.А. Гурьева// Известия Донецкого горного института. — 2010. — № 1. — С. 105–113.
9. Patent № 2741079 EP, G01N 27/74. PCT/JP 2012/069697. Porosity Measurement Apparatus and Porosity Measurement Method/ М. Kawano, Н. Watarai. Applied: August 2, 2012. Published: June 11, 2014. Bulletin № 24.
10. Балабанов П.В., Кримиштейн А.А., Пономарев С.В. Идентификация параметров математических моделей регенерации воздуха средствами защиты изолирующего типа// Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2010. — Т. 6. — № 7. — С. 68–73.
11. Ехилевский С.Г., Ольшанников С.А., Потапенко Е.П. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации CO₂ в регенеративном патроне шахтного респиратора// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2013. — № 3. — С. 46–54.
12. Ехилевский С.Г. Повышение ресурса дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Днепропетровск, 2002. — 36 с.
13. Alhama F., González-Fernández C.F. Network simulation method for solving phase-change heat transfer problems with variable thermal properties// Heat and Mass Transfer. — 2002. — Vol. 38. — Iss. 4–5. — P. 327–335.
14. Ехилевский С.Г., Потапенко Е.П., Голубева О.В. Моделирование рабочего процесса дыхательного аппарата на химически связанном кислороде после изменения режима его эксплуатации// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2015. — № 1. — С. 35–41.

ekhilevskiy@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 15 июля 2019 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2019, № 8, pp. 85–91.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-85-91

Optimization of Chemically Bound Oxygen Respirator

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

Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract

Currently, the main prospects for improving the insulating means of respiratory protection are associated with the chemical method of oxygen reservation. Main arguments in favor of this choice are the high density of oxygen packaging and its self-regulating supply depending on physical activity of the person. However, the efficiency of using the protective resource of chemically bound oxygen is far from ideal. This is due to the presence of the so-called dead layer of chemisorbent based on potassium superoxide and pallets sintering under the effect of exothermic heat released when the exhaled carbon dioxide is bound.

To optimize the working process of the breathing apparatus using chemically bound oxygen, the formalism was developed that allows to simulate regeneration of the exhaled air by the layer of potassium superoxide oxide granules, the diameter of which

gradually decreases in the direction of airflow filtration. It was shown that an increase of 1 mm in the granules in the frontal layer of chemisorbent reduces by 36 % the power of exothermic heat sources, preventing the sintering of the oxygen-containing product at heavy physical load of the person. Dependence of the diameter of the granules on the depth of their occurrence in the regenerative cartridge is obtained, which ensures the uniform distribution of the thermal power of the dynamic chemisorption of carbon dioxide. Decrease in the diameter of the granules according to the found law to 2 mm, even in the absence of sintering in the uniformly equipped cartridge, ensures 27 % increase in protective action due to the resource of the dead layer of self-rescuing chemisorbent in heavy duty operation. The lower estimate of the dead layer resource during further grinding of granules is made and the ways of its use are indicated.

Key words: self-contained breathing apparatus, exothermic reaction, granule size, potassium superoxide, air regeneration, chemisorption dynamics.

References

1. Gudkov S.V., Matveykin V.G., Shapovalov G.G. Advantage of Using Isolating Self-Rescuers with Chemically Fixed Oxygen in the Coal Mines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 11. pp. 40–44. (In Russ.).
2. BS EN 13794:2002. Respiratory protective devices — Self-contained closed-circuit breathing apparatus for escape — Requirements, testing, marking. Available at: http://www.nsopb.ru/fck_editor_files/8%20%20%2053260%201%20.pdf (accessed: July 1, 2019).
3. 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.).
4. Jolson J. Underground Self-Rescuer Technology, Past, Present, and Future. 3rd SCSR Workshop at the MSHA Training Academy. Arlington, 2006.
5. Rylov Yu.B., Dvoretzkiy S.I. Development of energy-saving process and hardware-technological design of the production of the regenerative product with potassium ferrate (VI). *Vestnik TGTU = Bulletin TGTU*. 2012. Vol. 18. № 3. pp. 656–662. (In Russ.).
6. Maystrenko A.V., Maystrenko N.V., Erokhin O.I. Modeling of self-contained breathing apparatus on chemically bound oxygen. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific journal of Belgorod State University*. 2014. № 1 (172). Iss. 29/1. pp. 81–87. (In Russ.).
7. Didenko N.S. Regenerative respirators for mining operations. Moscow: Nedra, 1990. 158 p. (In Russ.).
8. Ekhilevskiy S.G., Golubeva O.V., Pyatkin D.V., Gureva N.A. Influence of the shape and size of the porous granules on the rate of internal diffusion. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta = News of Donetsk Mining Institute*. 2010. № 1. pp. 105–113. (In Russ.).
9. Kawano M., Watarai H. Porosity Measurement Apparatus and Porosity Measurement Method. Patent № 2741079 EP, G01N 27/74. PCT/JP 2012/069697. Applied: August 2, 2012. Published: June 11, 2014. Bulletin № 24.
10. Balabanov P.V., Krimshteyn A.A., Ponomarev S.V. Identification of parameters of the mathematical models of air regeneration by means of insulating type protective equipment. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2010. Vol. 6. № 7. pp. 68–73. (In Russ.).
11. Ekhilevskiy S.G., Olshannikov S.A., Potapenko E.P. Effect of the variable boundary conditions on the quasi-stationary profile of CO₂ concentration in the regeneration cartridge of the mine respirator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = News of Higher Education Institutions. Mining Journal*. 2013. № 3. pp. 46–54. (In Russ.).
12. Ekhilevskiy S.G. Increasing the resource of breathing apparatus on chemically bound oxygen: Abstract of the thesis... Doctor of Technical Science. Donetsk, 2002. 36 p. (In Russ.).
13. Alhama F., González-Fernández C.F. Network simulation method for solving phase-change heat transfer problems with variable thermal properties. *Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 38. Iss. 4–5. pp. 327–335.
14. Ekhilevskiy S.G., Potapenko E.P., Golubeva O.V. Modeling the of the breathing apparatus working process on the chemically bound oxygen after changing the mode of its operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = News of higher educational institutions. Mining journal*. 2015. № 1. pp. 35–41. (In Russ.).

Received July 15, 2019

Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций (научный информационный сборник)

Белов П.Г. Прогнозирование и снижение риска аварии с выбросом сжиженного природного газа. — 2019. — № 2.

Представлены результаты исследования процесса возникновения и негативного развития техногенной чрезвычайной ситуации при использовании сжиженного природного газа с целью априорной оценки

риска и вклада в него всех учетных факторов. Объектом исследования служит процесс перекачки этого опасного вещества из наземного резервуара в управляемый танкер, что интерпретируется как функционирование системы «человек — машина — среда». В качестве соответствующего метода выбрано моделирование и автоматизированный системный анализ обстоятельств появления и разрушительного воздействия данной аварии на ближайшие объекты с целью обоснования рациональных по затратам и эффекту организационно-технические решений по снижению вероятности исследуемой чрезвычайной ситуации.