

УДК 622.867.322

ПЛОТНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ КООРДИНАТЫ ЭЛЕМЕНТАРНОГО АКТА СОРБЦИИ И МОЩНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕПЛА В РЕГЕНЕРАТИВНОМ ПАТРОНЕ ИЗОЛИРУЮЩЕГО РЕСПИРАТОРА**Ехилевский С.Г.**

Рассмотрен альтернативный подход к математическому моделированию рабочего процесса изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде. В его рамках уравнения математической физики, описывающие динамику сорбции углекислого газа кислородсодержащим продуктом регенеративного патрона, используются для вычисления статистических моментов случайной координаты элементарного акта сорбции молекул CO_2 . Зависимости от времени математического ожидания и дисперсии этой случайной величины позволяют установить асимптотику ее дифференциальной функции распределения исходя из максимальности энтропии Шеннона. Таким образом, устанавливается эволюция ширины и положения работающего слоя хемосорбента. Использование статистических моментов высших порядков позволяет учесть влияние на структуру работающего слоя асимметрий и эксцессов при конечных временах. Показано, что мощность сосредоточенных в единице объема хемосорбента внутренних источников экзотермического тепла пропорциональна плотности вероятности случайной координаты элементарного акта хемосорбции.

Ключевые слова: респиратор, регенеративный патрон, динамика сорбции, случайный процесс, работающий слой, тепловой режим.

(Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.)

Введение. В чрезвычайных ситуациях возникает необходимость защиты органов дыхания сразу от нескольких опасных и вредных факторов: ядовитых газов, нехватки кислорода, высокой температуры, дыма. Все массово посещаемые объекты (торговые комплексы, кинотеатры, гостиницы) целесообразно обеспечить изолирующими средствами защиты дыхания, т. к. фильтрующие дыхательные аппараты не справляются со своей функцией при наличии смеси отравляющих газов и совершенно неприменимы при выгорании или вытеснении кислорода [1].

В настоящий момент применяются аппараты баллонные изолирующие и с химически связанным кислородом [2]. В связи с более высокой плотностью упаковки второй способ резервирования кислорода перспективнее, т. к. позволяет при меньшей массе и компактных габаритах аппарата обеспечить больший срок защитного действия и высокую оперативность применения, что особенно важно в чрезвычайной ситуации [3]. Кроме того, в аппарате на химически связанном кислороде, в отличие от баллонного, не нужен отдельный поглотитель углекислого газа и оборудование, регулирующее подачу кислорода при изменении физической нагрузки человека. Кислород в аппарате на химически связанном кислороде выделяется при связывании выдыхаемых молекул CO_2 расположенными в регенеративном патроне пористыми гранулами супероксидов щелочных металлов [4]:



Т. е. при увеличении физической нагрузки выделяется больше CO_2 , а значит, и необходимого для дыхания кислорода. В выдыхаемом человеком воздухе содержится 4,5 % углекислого газа. Отравление углекислым газом начинается, если на выходе из регенеративного патрона в воздушном потоке остается (и возвращается на вдох) 1,5% углекислого газа [3]. После этого пользоваться дыхательным аппаратом нельзя. Поэтому такой проскок углекислого газа через регенеративный патрон является критическим.

Согласно (1) хемосорбция углекислого газа сопровождается выделением значительного количества тепла, что делает пребывание в аппарате менее комфортным и в тяжелом режиме эксплуатации может привести к послойному спеканию гранул хемосорбента [5], вследствие чего их поры закрываются, скорость внутренней диффузии, а с ней и динамиче-

ская сорбционная активность регенеративного патрона падает [6, 7]. В результате критический проскок CO₂, ведущий к отравлению человека, наступает быстрее. Особенно это нежелательно в рассчитанных на небольшой срок защитного действия самоспасателях [8]. Согласно приведенным в [9] оценкам в результате спекания гранул фактический срок защитного действия дыхательных аппаратов оказывается на 37–67 % меньше теоретического.

В связи с изложенным для оптимизации температурного режима регенеративного патрона важно знать мощность его внутренних источников тепла как функцию времени и координаты.

Динамика хемосорбции как случайный процесс. Согласно [10] после формирования квазистационарного профиля концентрации молекул CO₂ в регенеративном патроне при наличии на входе в него стационарных граничных условий доля непоглощенных молекул ω является решением интегро-дифференциального уравнения

$$-\omega'_\xi = e^{-\tau} \left(e^{-\xi} + \int_0^\tau e^\tau d_\tau \omega \right), \quad (2)$$

где ξ и τ – соответственно, обезразмеренные координата и время, связанные с обычными переменными соотношениями:

$$\xi = \frac{x\beta}{v}; \quad \tau = \beta\gamma t, \quad (3)$$

в которых v – скорость фильтрации выдыхаемого воздуха, x – глубина его проникновения в слой поглотителя, t – время, β и γ – феноменологические постоянные, задающие скорость хемосорбции CO₂ и ее ресурс [11].

Решив (2), можно предсказать величину ω в любой момент времени в любом месте регенеративного патрона. Тем не менее координата любого элементарного акта сорбции – величина случайная, и возможен предложенный в [12, 13] теоретико-вероятностный подход к описанию динамики сорбции. В его рамках $1 - \omega(\xi, \tau)$ – статистическая вероятность поглощения молекулы CO₂ слоем сорбента толщиной ξ , а дифференциальная функция распределения координаты элементарного акта сорбции имеет вид:

$$f(\xi, \tau) = \frac{\partial(1 - \omega(\xi, \tau))}{\partial\xi} = -\omega'_\xi(\xi, \tau). \quad (4)$$

Плотность источников экзотермического тепла максимальна в начале работы регенеративного патрона в лобовых слоях кислородсодержащего продукта, где максимален концентрационный напор углекислого газа и не израсходован поглотительный ресурс его хемосорбента. Поэтому в данной работе представляет интерес реализация теоретико-вероятностного подхода при малых временах, в частности при $\tau = 0$ из (2), (4) следует

$$f(\xi, 0) = e^{-\xi} = \omega(\xi, 0), \quad (5)$$

что легко интерпретируется, ибо максимум энтропии на полубесконечной оси обеспечивается экспоненциальным законом распределения случайной величины [14]. Выясним, как эволюционирует $f(\xi, \tau)$ в дальнейшем. Известно [14, 15], что вся информация о законе распределения случайной величины содержится в ее статистических моментах. С помощью (2) можно найти начальные моменты произвольных порядков:

$$v_n(\tau) = \int_0^\infty \xi^n f(\xi, \tau) d\xi. \quad (6)$$

Для этого с учетом (4) выполним в (6) интегрирование по частям, приняв во внимание, что проскок через бесконечный фильтр отсутствует:

$$v_n(\tau) = nJ_{n-1}(\tau), \quad (7)$$

где

$$J_k(\tau) = \int_0^{\infty} \xi^k \omega(\xi, \tau) d\xi. \quad (8)$$

Для вычисления несобственного интеграла $J_k(\tau)$ кроме вытекающего из определения плотности вероятности соотношения (4) нужна связь между $f(\xi, \tau)$ и $\omega(\xi, \tau)$, учитывающая специфику модели (2). Подставив (4) в (2) и выполнив дифференцирование по τ , получим

$$\omega'_\tau(\xi, \tau) = f(\xi, \tau) + f'_\tau(\xi, \tau). \quad (9)$$

С учетом (9) производная $J_k(\tau)$ по времени имеет вид

$$J'_k(\tau) = \int_0^{\infty} \xi^k \omega'_\tau(\xi, \tau) d\xi = \int_0^{\infty} \xi^k [f(\xi, \tau) + f'_\tau(\xi, \tau)] d\xi = v_k(\tau) + \frac{\partial}{\partial \tau} v_k(\tau). \quad (10)$$

Подставив (5) в (8) и выполнив n -кратное интегрирование по частям, найдем начальное условие $J_k(0) = k!$, необходимое для решения уравнения (10). С его помощью вычислим

$$J_k(\tau) = \int_0^{\tau} v_k(\tau) d\tau + v_k(\tau) - v_k(0) + k!, \quad (11)$$

и, подставив результат в (7), получим рекуррентное соотношение

$$v_n(\tau) = n \cdot \left[v_{n-1}(\tau) + \int_0^{\tau} v_{n-1}(\tau) d\tau \right]. \quad (12)$$

Вместе с условием нормировки

$$v_0(\tau) = \int_0^{\infty} f(\xi, \tau) d\xi = 1 \quad (13)$$

соотношение (12) позволяет последовательно определять любые $v_n(\tau)$ ($n=1, 2, \dots$):

$$v_1(\tau) = \tau + 1, \quad v_2(\tau) = \tau^2 + 4\tau + 2, \dots \quad (14)$$

и заметить общую закономерность

$$v_n(\tau) = n! \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{\tau^k}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l, \quad (15)$$

где C_n^l – число сочетаний из n объектов по l .

Согласно (14)

$$m(\tau) = v_1(\tau) = 1 + \tau, \quad (16)$$

$$\sigma^2(\tau) = v_2(\tau) - v_1^2(\tau) = 1 + 2\tau = \mu_2(\tau), \quad (17)$$

где $m(\tau)$ – математическое ожидание, $\sigma(\tau)$ – среднее квадратическое отклонение ξ .

В общем случае связь центральных моментов с начальными имеет вид

$$\mu_n(\tau) = \sum_k^{n-2} C_n^{n-k} (-1)^k v_{n-k}(\tau) v_1^k(\tau) + (-1)^n (1-n) v_1^n(\tau) \quad (18)$$

С помощью (15), (17), (18) можно найти асимметрии и эксцессы произвольных порядков:

$$A_{2n-1}(\tau) = \frac{\mu_{2n-1}(\tau)}{\sigma^{2n-1}(\tau)} \quad (n=2, 3, \dots); \quad (19)$$

$$E_{2n}(\tau) = \frac{\mu_{2n}(\tau)}{\sigma^{2n}(\tau)} - 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1). \quad (20)$$

Согласно (16), (17) при $\tau = 0$ математическое ожидание $m(\tau)$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma(\tau)$, как это и должно быть, совпадают: $m(0) = \sigma(0) = 1$. Именно таким свойством обладает экспоненциальное распределение (5).

Имея в виду асимптотику (5), плотность вероятности $f(\xi, \tau)$ при отличных от нуля временах будем искать в виде

$$f(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tau^n}{n!} R_n(\xi) \right), \quad (21)$$

где

$$R_k(\xi) = \sum_{l=0}^k R_{kl} \xi^l, \quad (22)$$

полиномы с искомыми коэффициентами R_{kl} . Для их получения воспользуемся (15) и определением начальных моментов (6). Подставив (22) в (21), а результат в (6), для $(n = 0, 1, 2, \dots)$ получим с учетом (15)

$$n! \sum_{k=1}^n (-1)^k \tau^k \frac{1}{k!} \sum_{l=0}^k C_{n+1}^l (-1)^l = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\tau^k}{k!} \sum_{l=0}^k R_{kl} (n+l)!. \quad (23)$$

Система (23) позволяет вычислить все R_{kl} для какого угодно k . Для этого нужно написать $k + 1$ уравнений, содержащих τ^k , и приравнять их коэффициенты при τ^k . В результате получим определенную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов k -го полинома. Решив ее для $k = 0, 1, 2, 3$, можно заметить общую закономерность

$$R_{kl} = (-1)^{k-l} C_k^l / l! \quad (l = 0, 1, \dots, k). \quad (24)$$

Подставив (24), (19) в (18), найдем искомую плотность вероятности координаты элементарного акта хемосорбции

$$f(\xi, \tau) = e^{-\xi} \sum_{k=0}^{\infty} \tau^k \sum_{l=0}^k \frac{(-1)^{k-l} \xi^l}{(k-l)! (l!)^2}. \quad (25)$$

Плотность мощности источников экзотермического тепла. Согласно [10] после формирования квазистационарного профиля концентрации CO_2 скорость ее роста в регенерируемом воздухе на 3–4 порядка ниже скорости поглощения углекислого газа в данном месте регенеративного патрона, что объясняется высокой сорбционной емкостью надпероксида калия. Один выдох – вдох длится секунды, а срок защитного действия аппарата измеряется в часах. Т. е. за время работы дыхательный аппарат восстанавливает несколько тысяч порций воздуха, помещающегося в регенеративном патроне. По этой причине в уравнении баланса молекул CO_2 можно пренебречь ростом их концентрации в воздушном потоке в данном сечении регенеративного патрона. После чего уравнение неразрывности примет вид

$$\partial U / \partial t = -v \partial W / \partial x, \quad (26)$$

в котором $U(x, t)$ и $W(x, t)$ – соответственно объемные концентрации поглощенных и несвязанных молекул CO_2 , причем

$$W(x, t) = W_0 \omega(\xi(x), \tau(t)), \quad (27)$$

где W_0 концентрация CO_2 на входе в регенеративный патрон.

Перейдя в правой части (26) к обезразмеренной координате ξ , с учетом (4) получим, что загрязненность данного места регенеративного патрона растет со скоростью

$$\partial U(x, t) / \partial t = \beta W_0 f(\xi(x), \tau(t)). \quad (28)$$

Уравнение (1) позволяет определить количество тепла q , выделяющегося при связывании одной молекулы CO_2 , и с помощью (28) найти плотность мощности $Q(x,t)$ источников экзотермического тепла

$$Q(x,t) = q\beta W_0 f(\xi(x), \tau(t)). \quad (29)$$

Чтобы узнать, сколько тепла выделится на участке $(x, x + \Delta x)$ за время $(t, t + \Delta t)$, нужно умножить $Q(x,t)$ на площадь поперечного сечения патрона S и проинтегрировать по времени и координате. При малых Δx и Δt ответ пропорционален плотности вероятности обезразмеренной координаты элементарного акта хемосорбции CO_2 , которую по этой причине можно считать обезразмеренной плотностью тепловой мощности. С помощью формулы (25) построены графики ее зависимости от координаты в различные моменты времени (рис. 1).

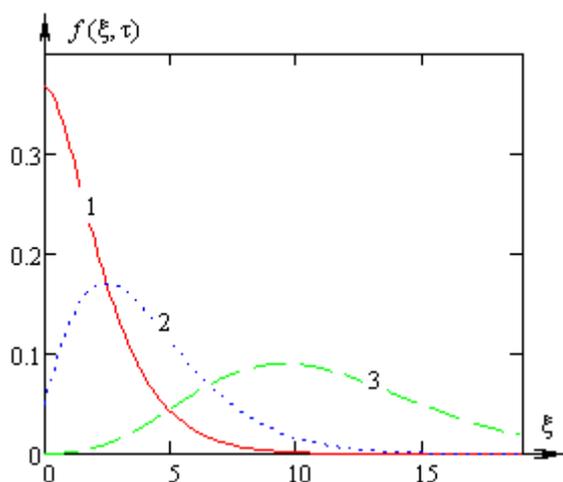


Рисунок 1. – Распределение мощности источников экзотермического тепла в различные моменты времени (1: $\tau = 1$; 2: $\tau = 3$; 3: $\tau = 10$)

Видно, как по мере удаления работающего слоя от входа в патрон формируется нормальное распределение ξ :

$$f(\xi, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\tau)} e^{-\frac{(\xi - m(\tau))^2}{2\sigma(\tau)^2}}. \quad (30)$$

Причина в том, что согласно (16), (17) $\sigma(\tau)$ растет медленнее, чем $m(\tau)$, т. е. (в соответствии с правилом трех сигм [14]) промежуток возможных значений ξ становится как бы бесконечным, и максимум энтропии Шеннона на нем обеспечивается нормальным законом распределения [14]. Прямое доказательство эволюции экспоненциального распределения ξ в нормальное осуществляется с помощью формул (15), (18) – (20), позволяющих построить зависимость от времени асимметрий и эксцессов произвольных порядков. В частности при больших временах $A_3(\tau)$ и $E_4(\tau)$ стремятся к нулю, как и должно быть при формировании нормального распределения случайной координаты элементарного акта хемосорбции молекул CO_2 (рис. 2).

Представленные на рисунке 2 начальные значения ($A_3(0) = 2$ и $E_4(0) = 6$) соответствуют экспоненциальному закону (5), в чем легко убедиться аналитически.

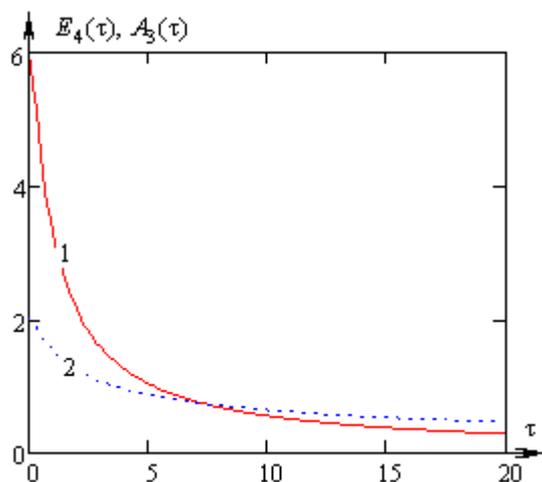


Рисунок 2. – Эволюция эксцесса (кривая 1) и асимметрии (кривая 2) плотности вероятности координаты элементарного акта хемосорбции

Повышение эффективности использования ресурса дыхательного аппарата на химически связанном кислороде. Подставив распределение (30) в условие нормировки (13) и выполнив под интегралом замену переменных (3), можно получить нормальное распределение плотности вероятности обычной (необезразмеренной) координаты элементарного акта сорбции x и установить зависимость от обычного времени t математического ожидания и среднеквадратического отклонения этой случайной величины:

$$m\{x\} = v\gamma t + v/\beta = m_x(t); \quad (31)$$

$$\sigma\{x\} = \sqrt{\frac{2vm\{x\}}{\beta} - \left(\frac{v}{\beta}\right)^2} = \sigma_x(t), \quad (32)$$

Тот же результат получается, если в (16), (17) с помощью (3) перейти к размерным величинам:

$$\beta m_x(t)/v = \beta\gamma t + 1; \quad (33)$$

$$(\beta\sigma_x(t)/v)^2 = 2\beta\gamma t + 1. \quad (34)$$

Умножив (33) на v/β , получим (31). А выразив из (33) $\beta\gamma t$ и подставив результат в (34), получим (32). Т. е. формулы (31), (32) верны не только после формирования нормального закона, но и при любых временах.

Лимитирующей стадией процесса регенерации фильтруемого воздуха является диффузия молекул CO_2 внутрь пористых гранул хемосорбента [6]. Поэтому величина β обратно пропорциональна квадрату их диаметра [16]:

$$\beta \sim 1/d^2. \quad (35)$$

В соответствии с (31), (32), чем дальше поперечное сечение от входа в патрон, тем дольше у него статус работающего и тем больше времени на рассеивание в окружающую среду выделяющегося в нем экзотермического тепла. По этой причине расположенные на входе в патрон гранулы кислородсодержащего продукта могут спекаться. Вторая причина неэффективного использования защитного ресурса дыхательного аппарата – мертвый слой хемосорбента, сосредоточенный в основном в замыкающих слоях кислородсодержащего продукта, не до конца отработываемых к моменту τ_{kp} критического проскока углекислого газа через регенеративный патрон. В соответствии с ранее изложенным время его наступления τ_{kp} определяется из условия:

$$\omega(\eta, \tau_{kp}) = 0,375 = 1,5/4,5, \quad (36)$$

т. к. $\omega(\xi, \tau)$ – доля молекул CO_2 не поглощаемых в момент времени τ на расстоянии ξ от входа в регенеративный патрон. В (36) η – обезразмеренная длина регенеративного патрона.

Чем больше $\sigma\{x\}$ к моменту τ_{kr} , тем шире мертвый слой и выше его доля в фиксированной массе кислородсодержащего продукта (связанной в данном режиме эксплуатации с обезразмеренной длиной патрона η [9]). Например, если $\sigma(\tau)$ с самого начала так велико, что

$$\int_{\eta}^{\infty} f(\xi, 0) d\xi \geq 0,375, \quad (37)$$

весь кислородсодержащий продукт окажется мертвым слоем.

В соответствии с изложенным, чтобы предотвратить спекание гранул кислородсодержащего продукта и уменьшить его мертвый слой, нужно сделать $\sigma_x(0) = v/\beta$ достаточно большим и зафиксировать ширину работающего слоя кислородсодержащего продукта ($\sigma_x(t) = \sigma_x(0)$).

Согласно (32) сделать это можно двумя способами: либо уменьшая скорость фильтрации v по мере продвижения воздушного потока вглубь патрона [17, 18], либо (приняв во внимание (35)) уменьшая диаметр гранул по мере удаления от входа в патрон, чтобы β росла по тому же закону, что и $m\{x\}$. Практическая реализация второго способа намного проще, т. к. не требует изменений конструкции дыхательного аппарата.

Т. е., увеличив экспериментально диаметр гранул для предотвращения спекания лобовых слоев в самом тяжелом (с максимальным v) режиме эксплуатации аппарата, согласно (32), (35) нужно уменьшать их диаметр по закону:

$$d(x) = 1/\sqrt{x} \quad (x \geq v/\beta), \quad (38)$$

где $x = m_x(t)$ – место, куда приходит работающий слой к моменту времени t .

Следует отметить, что зависимость (38) – лишь первый шаг итерационной процедуры, для дальнейшей реализации которой и расчета прироста τ_{kr} нужно обобщить модель (2) на случай переменной $\beta = \beta(x)$.

Альтернативный способ оптимизации зависимости $\beta(x)$ с целью повышения эффективности использования химически связанного кислорода состоит в скачкообразном увеличении β (уменьшении d) по мере удаления от входа в патрон. Чтобы определить место и величину скачков, модель (2) нужно обобщить на случай возрастающей концентрации CO_2 на входе в следующую часть патрона по мере исчерпания поглотительного ресурса предыдущей. В [19] такой подход реализован для патрона, разделенного на две части с разными d . Увеличение числа скачков β позволит приблизить ступенчатую зависимость $\beta(x)$ к оптимальной.

В результате время работы всех сечений (независимо от глубины их залегания) будет одинаковым (не приводящим к последовательному спеканию гранул) и сузится работающий (а значит, и мертвый) слой сорбента к моменту его прихода в конец регенеративного патрона.

Выводы. В работе представлен альтернативный (теоретико-вероятностный) подход к математическому моделированию динамики сорбции CO_2 регенеративным патроном изолирующего дыхательного аппарата. В его рамках установлены зависимости от времени математического ожидания и дисперсии случайной координаты элементарного акта хемосорбции. Найдены также статистические моменты высших порядков этой случайной величины, что позволило восстановить ее плотность вероятности и связать последнюю с мощностью источников экзотермического тепла, расположенных в единице объема кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия. Это способствовало установлению причин неэффективного использования защитного ресурса существующих аппаратов. Предложены простые пути улучшения данного показателя. Для их оптимальной реализа-

ции намечены основные направления развития теории рабочего процесса изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде.

В завершение отметим, что предлагаемый в статье подход позволяет выйти за рамки собственно математической физики и подключить к моделированию динамики сорбции мощный дополнительный ресурс в виде основных положений теории вероятностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басманов, П.И. Средства индивидуальной защиты: справочное руководство / П.И. Басманов [и др.]. – СПб.: Искусство России, 2002. – 400 с.
2. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н.С. Диденко. – М.: Недра, 1990. – 158 с.
3. Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты: утв. Минздравом СССР 23.06.80. – М.: Медицина, 1981. – 27 с.
4. Вольнов, И.И. Перекисные соединения щелочных металлов / И.И. Вольнов. – М.: Наука, 1980. – 160 с.
5. Пак, В.В. Об использовании ресурса шахтных респираторов с химически связанным кислородом / В.В. Пак, С.Г. Ехилевский // Изв. вузов. Горный журнал. – 1996. – № 1. – С. 66–71.
6. Каналина, В.С. Внутридиффузионное торможение в каталитических процессах / В.С. Каналина, В.М. Померанцев, Г.В. Мещеряков // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. XXI, № 9 (77). – С. 84–86.
7. Фандеев, В.П. Методы исследования пористых структур / В.П. Фандеев, К.С. Самохина // Научное ведение. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 1–21.
8. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Аппараты изолирующие автономные с химически связанным кислородом (самоспасатели) Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 12.4.220–2001. – Введ. 21.08.2001. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 19 с.
9. Ехилевский, С.Г. Повышение ресурса дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде: дис. ... д-ра тех. наук: 05.26.01 / С.Г. Ехилевский. – Донецк, 2002. – 279 л.
10. Пак, В.В. Математическая модель рабочего процесса изолирующего шахтного респиратора / В.В. Пак [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. – 1994. – № 1. – С. 54–57.
11. Пак, В.В. Значение феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов / В.В. Пак [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. – 1998. – № 11. – С. 108–112.
12. Ехилевский, С.Г. Вклад высших моментов случайной величины в асимптотику функции распределения / С.Г. Ехилевский, Д.В. Пяткин // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 3. – С. 100–108.
13. Ехилевский, С.Г. Метод моментов и динамика сорбционной активности при малых временах / С.Г. Ехилевский, О.В. Голубева, С.А. Ольшанников // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикл. науки. – 2013. – № 3. – С. 150–156.
14. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1969. – 400 с.
15. Ехилевский, С.Г. Связь плотности вероятности с начальными моментами случайной величины / С.Г. Ехилевский, О.В. Голубева // Изв. Донецкого горного ин-та. – 2009. – № 2. – С. 30–35.
16. Ехилевский, С.Г. Влияние формы и размеров пористой гранулы на скорость внутренней диффузии / С.Г. Ехилевский [и др.] // Изв. Донецкого горного ин-та. – 2010. – № 1. – С. 105–113.
17. Ехилевский, С.Г. Оптимальное пропускание воздуха через регенеративные патроны шахтных респираторов / С.Г. Ехилевский, В.В. Пак // Уголь Украины. – 1996. – № 1. – С. 25–26.
18. Регенеративный патрон дыхательного аппарата с химически связанным кислородом: пат. UA 23427 / С.Г. Ехилевский, В.В. Пак, Э.Г. Ильинский. – Опубл. 08.07.1998.
19. Ехилевский, С.Г. Оптимизация теплового режима шахтного самоспасателя на химически связанном кислороде / С.Г. Ехилевский, С.А. Ольшанников // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 35–42.

**Плотность вероятности координаты элементарного акта сорбции
и мощность источников экзотермического тепла
в регенеративном патроне изолирующего респиратора**

**The density of probability of the coordinate of the elementary sorption act and power
of exothermic heat sources in the regenerative cartridge of isolating respirator**

Ехилевский Степан Григорьевич
доктор технических наук, доцент

Учреждение образования «Полоцкий
государственный университет», кафедра
технологий программирования, профессор

Адрес: 211440, Беларусь, Витебская обл.,
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29
e-mail: ekhilevskiy@yandex.ru

Stepan G. Ekhilevskiy
Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Educational institution «Polotsk state University»,
Chair of Programming Technologies, Professor

Address: 211440, Belarus, Vitebsk region,
Novopolotsk, ul. Blokhina, 29
e-mail: ekhilevskiy@yandex.ru

THE DENSITY OF PROBABILITY OF THE COORDINATE OF THE ELEMENTARY SORPTION ACT AND POWER OF EXOTHERMIC HEAT SOURCES IN THE REGENERATIVE CARTRIDGE OF ISOLATING RESPIRATOR

Ekhilevskiy S.G.

Purpose. The article is devoted to the search and justification of ways to improve the efficiency of the protective resource of breathing apparatus on chemically bound oxygen.

Methods. Mathematical and computer simulation of the working process of the insulating breathing apparatus on chemically bound oxygen using the data of previous experimental studies.

Findings. The dependences of the time of the initial and central moments of the random coordinate of the elementary act of chemisorption of carbon dioxide in the regenerative cartridge of the respiratory apparatus on chemically bound oxygen are found. The dependence of the probability density of the coordinate of the elementary act of chemisorption on the time is established and its proportionality of the power of internal sources of exothermic heat is shown.

Application field of research. The obtained results about the law of reduction of the diameter of the oxygen-containing granules of the product in the direction of filtration of the exhaled air can be used in the creation of new and improvement of existing self-contained breathing apparatus for chemically bound oxygen.

Conclusions. The increase in diameter of the oxygen-containing granules of the product at the inlet to the regenerative cartridge prevents the sintering of the most loaded front layers of the chemical adsorbent. Decreasing pellet diameter enclosing layers of oxygen-containing product reduces the dead layer of the chemical adsorbent, unused to the critical point of breakthrough of carbon dioxide gas through the regenerative cartridge.

Keywords: respirator, regenerative cartridge, sorption dynamics, random process, working layer of the heat mode.

(The date of submitting: March 18, 2019)

REFERENCES

1. Basmanov P.I. et al. *Sredstva individualnoy zashchity: spravochnoye rukovodstvo* [Regenerative respirators for mine rescue]: textbook. Saint Petersburg: Iskustvo Rossii, 2002. 400 p. (rus)
2. Didenko N.S. *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatelnykh rabot* [Regenerative respirators for mine rescue]. Moscow: Nedra, 1990. 158 p. (rus)
3. *Fiziologo-gigiyenicheskiye trebovaniya k izoliruyushchim sredstvam individualnoy zashchity* [Physiological and hygienic requirements for isolating personal protective equipment]. Affirmed June 23, 1980. Moscow: USSR Ministry of Health, 1981. 27 p. (rus)
4. Volnov I.I. *Perekisnyye soyedineniya shchelochnykh metallov* [Alkali metal peroxides]. Moscow: Nauka. 1980. 160 p. (rus)
5. Pak V.V., Ekhilevskiy S.G. Ob ispolzovanii resursa shakhtnykh respiratorov s khimicheski svyazannym kislorodom [On the use of the resource of mine respirators with chemically bound oxygen]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1996. No. 1. Pp. 66–71. (rus)
6. Kanalina V.S., Pomerantsev V.M., Meshcheryakov G.V. Vnutridiffuzionnoye tormozheniye v kataliticheskikh protsessakh [Intradiffusion inhibition in catalytic processes]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2007. Vol. XXI, No. 9 (77). Pp. 84–86. (rus)
7. Fandeyev V.P., Samokhina K.S. Metody issledovaniya poristyykh struktur [Methods of investigation of porous structures]. *Naukovedeniye*, 2015. Vol. 7. No 4. Pp. 1–21. (rus)
8. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individualnoy zashchity organov dykhaniya. Apparaty izoliruyushchiye avtonomnyye s khimicheski svyazannym kislorodom (samospasateli) Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. Metody ispytaniy: GOST R 12.4.220–2001* [System of occupational safety standards. Means of individual protection of respiratory organs. Devices isolating Autonomous with chemically bound oxygen (self-rescuers) General technical requirements. Test method: GOST R 12.4.220–2001]. Affirmed August 21, 2001. Moscow: Standards publishing house, 2001. 19 p. (rus)
9. Ekhilevskiy S.G. *Povysheniye resursa dykhatelnykh apparatov na khimicheski svyazannom kislorode* [Increasing the life of breathing apparatus on chemically bound oxygen]: Grand PhD tech. sci. diss.: 05.26.01. Donetsk. 2002. 279 p. (rus)

10. Pak V.V. et al. Matematicheskaya model rabocheho protsessa izoliruyushchego shakhtnogo respiratora [Mathematical model of the working process of the isolating mine respirator]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1994. No. 1. Pp. 54–57. (rus)
11. Pak V.V. et al. Znachenije fenomenologicheskikh parametrov modeli khemosorbtsii v regenerativnykh patronakh shakhtnykh respiratorov [The value of the phenomenological parameters of the model of chemisorption in the regenerative ammo mine respirators]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1998. No. 11. Pp. 108–112. (rus)
12. Ekhilevskiy S.G., Pyatkin D.V. Vklad vysshikh momentov sluchaynoy velichiny v asimptotiku funktsii raspredeleniya [Contribution of higher moments of a random variable to the asymptotics of the distribution function]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. C. Fundamentalnyye nauki*, 2009. No. 3. Pp. 100–108. (rus)
13. Ekhilevskiy S.G., Golubeva O.V., Olshannikov S.A. Metod momentov i dinamika sorbtsionnoy aktivnosti pri malykh vremenakh [Method of moments and dynamics of sorption activity at small times method of moments and dynamics of sorption activity at small times]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. B. Promyshlennost. Prikladnye Nauki*, 2013. No. 3. Pp. 150–156. (rus)
14. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostey* [Course of probability theory]. Moscow: Nauka, 1969. 400 p. (rus)
15. Ekhilevskiy S.G., Golubeva O.V. Svyaz plotnosti veroyatnosti s nachalnymi momentami sluchaynoy velichiny [Connection of probability density with initial moments of a random variable]. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta*, 2009. No. 2. Pp. 30–35. (rus)
16. Ekhilevskiy S.G. et al. Vliyaniye formy i razmerov poristoy granuly na skorost vnutrenney diffuzii [Effect of the shape and size of the porous granule on the internal diffusion rate]. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta*, 2010. No. 1. Pp. 105–113. (rus)
17. Ekhilevskiy S.G., Pak V.V. Optimalnoye propuskaniye vozdukha cherez regenerativnyye patrony shakhtnykh respiratorov [Optimal air flow through regenerative cartridges of mine respirators]. *Ugol' Ukrainy*, 1996. No. 1. Pp. 25–26. (rus)
18. Ekhilevskiy S.G., Pak V.V., Ilinskiy E.G. *Regenerativnyy patron dykhatelnogo apparata s khimicheskimi svyazannym kislorodom* [Regenerative cartridge of breathing apparatus with chemically bound oxygen]; patent UA 23427. Published July 8, 1998. (rus)
19. Ekhilevskiy S.G., Olshannikov S.A. Optimizatsiya teplovogo rezhima shakhtnogo samospasatelya na khimicheski svyazannom kislorode [Optimization of the thermal regime of the mine of the device for chemically bound oxygen]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2013. No. 6. Pp. 35–42. (rus)