

Безопасность в чрезвычайных ситуациях (05.26.02, технические науки)

УДК 622.867.322

Положение и ширина работающего слоя хемосорбента углекислого газа в изолирующих респираторах и самоспасателях со скачком диаметра гранул кислородсодержащего продукта

The position and width of the working layer of the chemical adsorbent of carbon dioxide in isolating respirators and self-rescuers with the jump of the diameter of the oxygen-containing granules of the product

С.Г. Ехилевский,
д-р техн. наук, доцент
Полоцкий государственный университет

S.G. Ekhilewskiy,
Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, docent
Polotsk state University, Republic of Belarus

Аннотация:

В работе получены выражения для асимптотики математического ожидания и среднеквадратического отклонения координаты элементарного акта хемосорбции углекислого газа в регенеративном патроне изолирующего дыхательного аппарата с круговой схемой воздухопроводной части при наличии скачка диаметра гранул кислородсодержащего продукта. Увеличение диаметра гранул в начале регенеративного патрона позволяет предотвратить их спекание под действием экзотермического тепла. А уменьшение диаметра гранул в конце патрона – увеличивает скорость хемосорбции и уменьшает мертвый слой сорбента. И то и другое повышает эффективность использования защитного ресурса аппарата. Показано, что в патронах с двумя и более килограммами кислородсодержащего продукта, даже при наличии скачка диаметра гранул, успевает сформироваться нормальное распределение проскока углекислого газа. Это позволило записать простое уравнение для определения увеличенного срока защитного действия таких аппаратов.

Ключевые слова: регенерация воздуха в изолирующем дыхательном аппарате, химически связанный кислород, динамическая сорбционная активность.

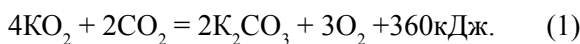
Abstract:

Expressions for the asymptotics of the mathematical expectation and standard deviation of the coordinate of the elementary act of chemisorption of carbon dioxide in the regenerative cartridge of the insulating breathing apparatus with a circular circuit of the airway in the presence of a jump in the diameter of the granules of the oxygen-containing product are obtained. Increasing the diameter of the granules at the beginning of the regenerative cartridge prevents them from sintering under the action of exothermic heat.

A decrease in the diameter of the granules at the end of the cartridge – increases the rate of chemisorption and reduces the dead layer of sorbent. Both increase the efficiency of the protective resource of the device. It is shown that in cartridges with two or more kilograms of oxygen-containing product, even in the presence of a jump in the diameter of the granules, the normal distribution of the carbon dioxide slip has time to form. This allowed us to write a simple equation to determine the increased duration of the protective action of such devices.

Key words: air regeneration in an insulating breathing apparatus, chemically bound oxygen, dynamic sorption activity.

Введение. В аварийной ситуации органы дыхания шахтеров и горноспасателей, работников предприятий топливной и химической промышленности, сотрудников газовой службы, пожарных необходимо защитить от дыма, пыли, угарного газа, метана, высокой температуры, недостатка кислорода. Эффективно со всем комплексом перечисленных факторов справляются только изолирующие дыхательные аппараты [1]. Уменьшение их массы и габаритов при фиксированном сроке защитного действия, имеет большое значение при покидании места аварии, организации спасательных и восстановительных работ. Наиболее перспективны в этом плане аппараты с химическим способом резервирования кислорода [2], ибо твердые вещества в тысячу раз плотнее газов, а стальные баллоны (весащие в шесть раз больше заключенного в них воздуха) выдерживают лишь 250 атмосфер. Кроме того аппараты на химически связанном кислороде имеют более простую конструкцию, так как не требуют переключения режима работы при изменении физической нагрузки человека. Кислород в них выделяется в процессе хемосорбции CO₂ при фильтрации выдыхаемого воздуха через слой пористых гранул надпероксида калия



То есть, чем выше физическая нагрузка, тем больше молекул CO₂ «производится» легкими в единицу времени, и тем быстрее выделяется кислород, поступающий на вдох. Описанные преимущества стимулируют теоретические и экспериментальные исследования рабочего процесса изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде с целью их дальнейшей оптимизации.

Эффективность использования химически связанного кислорода. По мере исчерпания поглощенного ресурса передних слоев кислородсодержа-

щего продукта процесс хемосорбции углекислого газа смещается вглубь регенеративного патрона. Процесс может внештатно ускориться в результате послыйного спекания кислородсодержащего продукта под действием экзотермического тепла, выделяющегося интенсивнее при возрастании физической нагрузки человека. При этом поры гранул закрываются, их ресурс остается неиспользованным, что ведет к уменьшению срока защитного действия аппарата. Наибольшему риску подвергаются слои, расположенные на входе в регенеративный патрон, где концентрация углекислого газа максимальна. Ее можно снизить за счет более быстрого пропускания выдыхаемого воздуха через лобовые слои с последующим его замедлением в замыкающих [3], чтобы общее время пребывания одного выдоха в регенеративном патроне оставалось неизменным. Однако осуществить переменную скорость фильтрации невозможно без существенных изменений конструкции аппарата. Вместе с тем кинетика хемосорбции и интенсивность тепловыделения зависит от размера гранул [4]. Увеличив гранулы в лобовых слоях, можно предотвратить их спекание в тяжелом режиме эксплуатации [5]. Чтобы общая динамическая сорбционная активность патрона при этом не снизилась, гранулы замыкающих слоев нужно уменьшить. Это истончит мертвый слой сорбента, неиспользуемый к моменту критического проскока CO₂ через регенеративный патрон, и существенно увеличит срок защитного действия дыхательного аппарата [6].

Поглощение CO₂ в неоднородно снаряженном патроне. По мере отработки передней (с увеличенными гранулами) части патрона, концентрация молекул CO₂ на входе во вторую монотонно возрастает. Для изучения в ней рабочего процесса нужна математическая модель регенерации воздуха с переменным граничным условием. Соответствующий формализм развит в [7] и позволяет рассчитать квазистационарный профиль приведенной концентрации углекислого газа в регенеративном патроне со скачком диаметра гранул кислородсодержащего продукта

$$\omega(\xi, \tau) = \omega_1(\xi, \tau)\theta(\xi - \xi) + \omega_2(\xi - \xi, \tau)\theta(\xi - \xi), \quad (\xi \in [0, \eta]) \quad (2)$$

$$\omega_1(\xi, \tau) = e^{-\alpha_1 \xi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\alpha_1 \xi)^n}{n!} \left(1 - e^{-\alpha_1 \tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha_1 \tau)^k}{k!} \right) \right], \quad (\xi \in [0, \xi]) \quad (3)$$

$$\omega_2(\xi, \tau) = e^{-\alpha_2(\xi + \tau)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} (\alpha_2 \xi)^n, \quad (\xi \in [\xi, \eta]) \quad (4)$$

$$f_0(\tau) = e^{-\alpha_2 \tau} \omega_1(\xi, \tau), \quad f_{n+1}(\tau) = \alpha_2 \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (5)$$

где θ - функция Хевисайда, $\omega(\xi, \tau)$ – доля не поглощенных молекул CO_2 (проскок), как функция обезразмеренных переменных, связанных с обычными временем и расстоянием от входа в патрон формулами

$$\xi(x) = \beta x / v, \quad \tau(t) = \beta \gamma t, \quad (6)$$

в которых v – скорость фильтрации воздуха, γ и β – феноменологические постоянные, характеризующие ресурс хемосорбции и ее скорость в патроне, однородно снаряженном гранулами первоначального диаметра d . Лимитирующей стадией хемосорбции является диффузия молекул CO_2 внутрь гранул, поэтому величина β обратно пропорциональна квадрату их диаметра [4]. То есть, фигурирующие в (3) – (5) параметры $\alpha_1 \leq 1$ и $\alpha_2 \geq 1$ учитывают, во сколько раз увеличен (уменьшен) первоначальный диаметр гранул кислородсодержащего продукта соответственно в первой ($\sqrt{\alpha_1} = d/d_1$) и второй ($\sqrt{\alpha_2} = d/d_2$) частях регенеративного патрона, где d_1 и d_2 – новые значения диаметров. Заметим, что γ при этом не меняется, ибо плотность упаковки гранул в большие емкости не зависит от их диаметра. В (2) – (4) η и ζ – обезразмеренная длина регенеративного патрона и обезразмеренная координата скачка диаметра гранул.

Положение и ширина работающего слоя кислородсодержащего продукта. Формулы (2)–(6) позволяют вычислить проскок углекислого газа в любой момент времени в любом месте регенеративного патрона со скачком диаметра гранул. Однако с практической точки зрения интерес представляет положение и ширина работающего слоя кислородсодержащего продукта. Чтобы их вычислить, исходя из статистического смысла введем плотность вероятности случайной координаты элементарного акта хемосорбции

$$f(\xi, \tau) = \frac{\partial(1 - \omega(\xi, \tau))}{\partial \xi} = -\omega'_\xi(\xi, \tau). \quad (7)$$

С помощью (2) – (7) можно найти начальные моменты ξ произвольных порядков

$$\nu_n(\tau) = \int_0^\infty \xi^n f(\xi, \tau) d\xi. \quad (8)$$

Подставив (7) в (8)

$$\nu_n(\tau) = -\int_0^\infty \xi^n \omega'_\xi(\xi, \tau) d\xi = \int_0^\infty \xi^n d_\xi \omega(\xi, \tau), \quad (9)$$

выполним интегрирование по частям

$$\nu_n(\tau) = -\xi^n \omega(\xi, \tau) \Big|_0^\infty + n \int_0^\infty \xi^{n-1} \omega(\xi, \tau) d\xi = n \int_0^\infty \xi^{n-1} \omega(\xi, \tau) d\xi, \quad (10)$$

где учтено, что $\omega(\infty) = 0$ в любой конечный момент времени.

Исходя из (10) и в соответствии со смыслом решаемой задачи положение работающего слоя хемосорбента меняется со временем по закону математического ожидания

$$m(\tau) = M\{\xi\} = \int_0^\infty \omega(\xi, \tau) d\xi, \quad (11)$$

а его ширина пропорциональна корню квадратному из дисперсии

$$D\{\xi\} = 2 \int_0^\infty \xi \omega(\xi, \tau) d\xi - m(\tau)^2 = \sigma(\tau)^2, \quad (12)$$

где $\sigma(\tau)$ – среднеквадратическое отклонение.

В частности, для $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ из (2) – (5), (11), (12) следует, что в однородно снаряженном патроне параметры работающего слоя следующим образом меняются со временем

$$m_0(\tau) = \tau + 1, \quad \sigma_0(\tau) = \sqrt{2\tau + 1}. \quad (13)$$

Результаты численных расчетов при наличии скачка диаметра гранул ($\alpha_1 = 16/22$, $\alpha_2 = 16/11$, $\zeta = 0,91$) представлены на рис. 1.

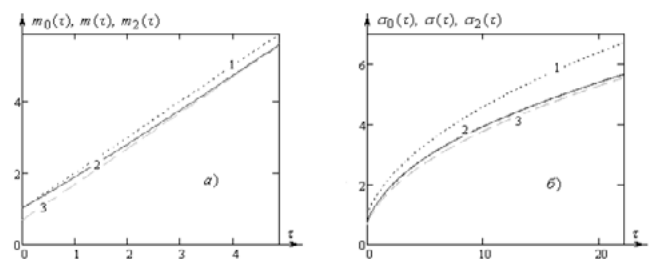


Рис. 1. Математическое ожидание (рис.1а) и среднеквадратическое отклонение (рис.1б) координаты элементарного акта сорбции: 1 – в стандартно снаряженном патроне; 2 – в патроне со скачком диаметра гранул; 3 – в патроне с уменьшенными гранулами.

Видно, что рост $m(\tau)$ и $\sigma(\tau)$ происходит медленнее, чем в однородном патроне, в связи с более скоростной кинетикой во второй части патрона. И то и другое уменьшает проскок CO_2 (рис. 2). Последнее означает более интенсивную работу регенеративного патрона в целом. Несмотря на это, температурный режим лобовых слоев хемосорбента смягчен снижением мощности внутренних источников экзотермического тепла (рис. 3).

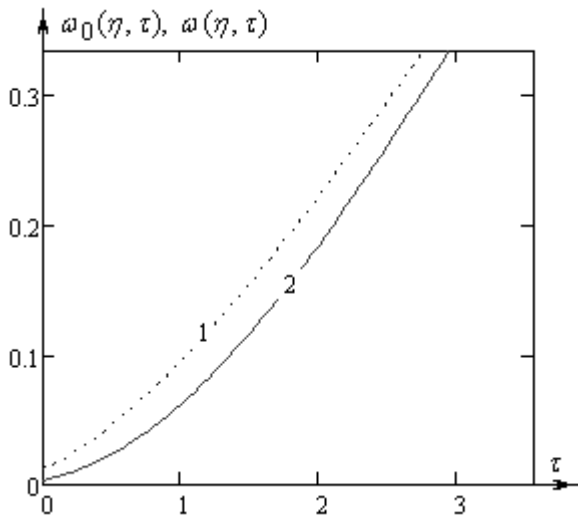


Рис. 2 Эволюция проскока CO₂ через регенеративный патрон (η=4,426): 1 – стандартный; 2 – со скачком диаметра гранул.

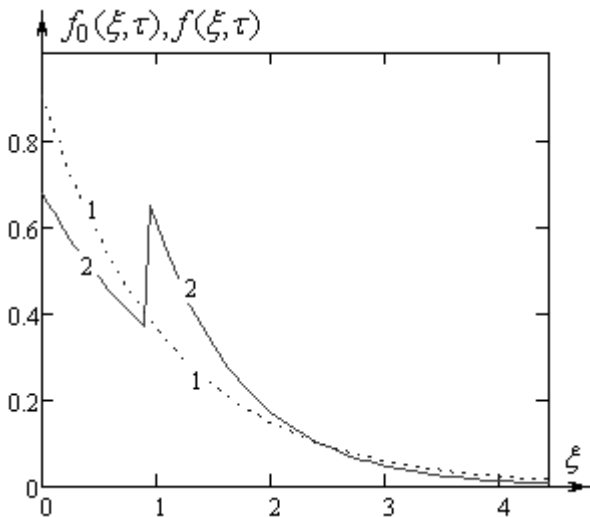


Рис. 3. Распределение при τ=0,1 плотности вероятности координаты элементарного акта сорбции CO₂: 1 – в стандартном патроне; 2 – со скачком диаметра гранул.

Изображенные на нем кривые получены дифференцированием $1-\omega(\xi, \tau)$ по ξ , ибо по смыслу упомянутая мощность пропорциональна фигурирующей в (7) плотности вероятности $f(\xi, \tau)$. Непосредственно в этом можно убедиться с помощью отражающего баланс молекул CO₂ уравнения неразрывности $u'_\tau(\xi, \tau) = -\omega'_\xi(\xi, \tau)$, в котором $u(\xi, \tau)$ – приведенная плотность связанного углерода, позволяющая судить о количестве прореагировавшего «топлива». Видно, что вначале работы аппарата максимумы $f(\xi, \tau)$ на входе в первую и вторую части патрона меньше, чем на входе в однородно снаряженный патрон $f_0(\xi, \tau)$.

В свете изложенного, величину $\alpha_1 \leq 1$ уменьшают до предотвращения спекания гранул в лобовых сло-

ях при максимальной физической нагрузке. Величину $\alpha_2 \geq 1$ выбирают из условия равенства максимумов $f(\xi, \tau)$ при данном ζ , а место скачка диаметра из условия не снижения динамической сорбционной активности патрона в целом.

Благодаря медленной хемосорбции в первой части патрона, величины $m(\tau)$ и $\sigma(\tau)$ больше соответствующих показателей в однородном патроне ($\zeta=0$) с уменьшенными гранулами. Действительно, исходя из (13), а также свойств математического ожидания и дисперсии, получим

$$M\left\{\frac{\alpha_2 \beta x}{v}\right\} = \alpha_2 \beta \gamma t + 1 = \alpha_2 M\left\{\frac{\beta x}{v}\right\} = \alpha_2 M\{\zeta\} \Rightarrow M\{\zeta\} = t + \frac{1}{\alpha_2} = m_2(\tau), \quad (14)$$

$$D\left\{\frac{\alpha_2 \beta x}{v}\right\} = 2\alpha_2 \beta \gamma t + 1 = \alpha_2^2 D\left\{\frac{\beta x}{v}\right\} = \alpha_2^2 D\{\zeta\} \Rightarrow D\{\zeta\} = \frac{2t}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_2^2} = \sigma_2(\tau)^2. \quad (15)$$

По формулам (14), (15) построены кривые 3 на рис. 1а и 1б. Несмотря на выполнение неравенств $m_2(\tau) < m(\tau)$ и $\sigma_2(\tau) < \sigma(\tau)$, для увеличения срока защитного действия просто уменьшить гранулы во всем патроне нельзя. Это приведет к ужесточению и без того неприемлемого теплового режима лобовых слоев кислородсодержащего продукта. Тем не менее, зависимости (14), (15) можно использовать для получения асимптотики проскока.

Асимптотика проскока CO₂ через регенеративный патрон. По мере исчерпания поглотительного ресурса первой части регенеративного патрона ($1-\omega(\zeta, \tau) \ll 1 \Rightarrow \tau > 8$) скорости роста $m(\tau)$ и $\sigma(\tau)$ становятся такими же, как и в однородном патроне с уменьшенными гранулами (рис. 1а и 1б), так как при неизменном расходе CO₂ на входе в патрон, они определяются лишь кинетикой сорбции. А работающий слой хемосорбента к этому времени сместился во вторую часть патрона. При этом $m(\tau) \approx m_2(\tau)$, так как положение работающего слоя определяется суммарным расходом CO₂ и задаваемой γ сорбционной емкостью гранул, упакованных с одинаковой плотностью во всем патроне. Однако накопленное в первой части опережение $\sigma(\tau) - \sigma_2(\tau)$, носит более устойчивый характер, ибо, в отличие от скорости, определяется еще и квазистационарным распределением связанного углерода, сформированным с участием первой части патрона. Поэтому для $\tau > 8$ аппроксимировать $\sigma(\tau)$ можно с помощью сдвига во времени

$$\sigma(\tau) \approx \sqrt{\frac{2(\tau + \Delta)}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_2^2}} = \sigma_2(\tau + \Delta), \quad (16)$$

определяемого из условия

$$\sigma(\tau) \approx \sqrt{\frac{2(\tau + \Delta)}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_2^2}} = \sigma_2(\tau + \Delta), \quad (17)$$

и в актуальном диапазоне аргументов ($\tau > 8$) практически не зависящего от времени. Видно, что построенные с помощью формул (16), (12) кривые (рис. 4) неразличимы на глаз.

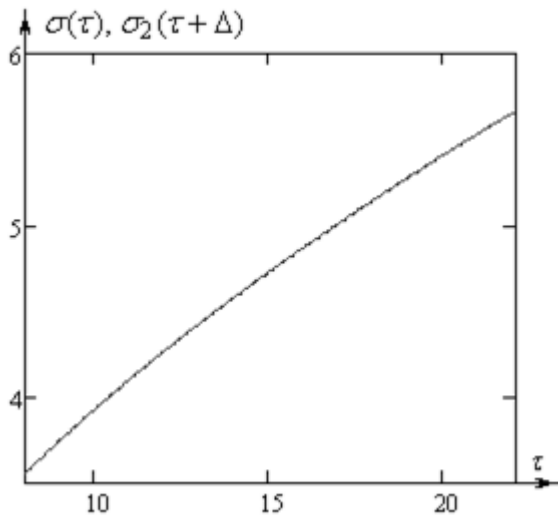


Рис. 4. Аппроксимация $\sigma(t)$ после отработки первой части патрона ($\tau > 8$).

Согласно (15), (16) $\sigma'(t)$ порядка $1/\sqrt{t}$, то есть скорость роста $\sigma(t)$ постепенно падает, что при фиксированном Δ , согласно (17), означает уменьшение абсолютной погрешности $\sigma(t) - \sigma_2(t)$. Относительная погрешность убывает еще быстрее, ибо $\sigma(t)$ растет. В такой ситуации ($\tau \gg 8$) сдвигом во времени в (16) можно и пренебречь.

Важно, что $\sigma_2(t + \Delta)$ растет со временем медленнее, чем $m_2(t)$. В соответствии с правилом трех сигм это означает, что при $\tau > 12$ поглощающий слой из полубесконечного становится как бы бесконечным. На нем максимум энтропии обеспечивается нормальным распределением случайной величины (рис. 5).

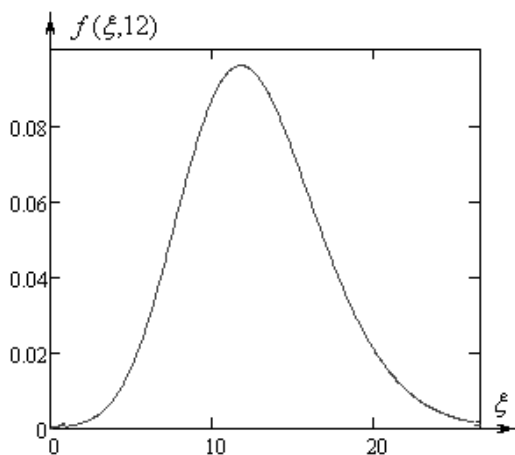


Рис. 5 Плотность вероятности координаты элементарного акта сорбции ($\tau = 12$).

Это позволяет в длинных патронах ($\eta > 14$) срок защитного действия аппарата со скачком диаметра гранул определять из условия

$$\Phi\left(\frac{\eta - m_2(\tau)}{\sigma_2(\tau + \Delta)}\right) = 0,625. \quad (18)$$

В нем $\Phi(z)$ – интегральная функция распределения нормального закона с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; $1 - 0,625 = 1,5/4$ – критическое значение проскока, в котором 4 – процентное содержание CO_2 в выдыхаемом человеком воздухе, а 1,5 – процентное содержание CO_2 по возвращении которого на вдох начинается отравление углекислым газом [8]. Если патрон короткий, критический проскок наступает до формирования нормального распределения координаты элементарного акта сорбции, и использование (18) приводит к большой погрешности. Однако в респираторах с содержанием кислородсодержащего продукта 2 кг и более при средней физической нагрузке (объемный расход воздуха 30 л/мин) это не так [9]. А при слабой нагрузке (неторопливой ходьбе) использование (18) оправдано уже и в самоспасателях (при наличии в регенеративном патроне одного килограмма кислородсодержащего продукта).

Заключение. Таким образом, в патроне со скачком диаметра гранул кислородсодержащего продукта определены параметры работающего слоя хемосорбента и получены простые выражения для асимптотики математического ожидания и среднеквадратического отклонения координаты элементарного акта хемосорбции углекислого газа. Показано, что в патронах большой обезразмеренной длины даже при наличии скачка диаметра гранул успевает сформироваться нормальное распределение проскока углекислого газа. Это позволило записать простое уравнение для определения срока защитного действия аппарата со скачком диаметра гранул кислородсодержащего продукта.

Литература

1. Диденко, Н. С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н. С. Диденко. – М.: Недра, 1990. – 158 с.
2. Вольнов, И. И. Перекисные соединения щелочных металлов / И. И. Вольнов. – М.: Наука, 1980. – 160 с.
3. Ехилевский, С. Г. Оптимальное пропускание воздуха через регенеративные патроны шахтных респираторов / С. Г. Ехилевский, В. В. Пак // Уголь Украины. – 1996. – №1. – С. 25–26.
4. Ехилевский, С. Г. Влияние формы и размеров пористой гранулы на скорость внутренней диф-

- фузии / С. Г. Ехилевский [и др.] // Изв. Донецкого горного ин-та. – 2010. – №1. – С. 105–113.
5. Ехилевский, С. Г. Оптимизация теплового режима шахтного самоспасателя на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, С. А. Ольшанников, Е. П. Потапенко // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 35–42.
 6. Ехилевский, С. Г. Повышение эффективности дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, С. А. Ольшанников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 123–131.
 7. Ехилевский, С. Г. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации CO₂ в регенеративном патроне шахтного респиратора / С. Г. Ехилевский, С. А. Ольшанников, Е. П. Потапенко // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – № 3. – С. 46–53.
 8. Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты. – Утв. Минздравом СССР 23.06.80. – М.: Медицина, 1981. – 27 с.
 9. 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.