

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

**ПОВЫШЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЩИТНОГО РЕСУРСА
ИЗОЛИРУЮЩЕГО ПРОТИВОГАЗА В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕВЕРСА
ПОТОКА РЕГЕНЕРИРУЕМОГО ВОЗДУХА**

*Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой
г. Новополоцк, Республика Беларусь
Витебскоблгаз, г. Витебск, Республика Беларусь*

С помощью натуральных сопоставительных испытаний подтверждено перераспределение связанного углерода в результате реверса воздушного потока в регенеративном патроне противогаза с химическим способом резервирования кислорода. В результате увеличилась поверхность отдачи экзотермического тепла и смягчился температурный режим регенеративного патрона. Это позволило избежать спекания гранул хемосорбента CO₂ и повреждения микроструктуры их пор. Таким образом была сохранена динамическая сорбционная активность поглотителя выдыхаемого углекислого газа, сопровождающаяся выделением кислорода для следующего вдоха. В результате реверса, осуществленного через 8 минут после начала работы противогаза, его защитное действие при том же количестве хемосорбента (1,8 кг) и объемном расходе воздуха (40 л/мин) было продлено на 8,62 %. В силу изложенных причин, в более тяжелом режиме эксплуатации (при увеличении физической нагрузки работника) прирост защитного действия противогаза, обусловленный реверсом воздушного потока, будет еще значительнее.

Ключевые слова: изолирующий противогаз, регенеративный патрон, мертвый слой хемосорбента, источники экзотермического тепла, реверс регенерируемого воздушного потока.

Ekhilevskiy S.G., Golubeva O.V., Potapenko E.P.

**INCREASING THE USE OF THE PROTECTIVE RESOURCE OF THE
INSULATING GAS MASK AS A RESULT OF THE REVERSE FLOW
OF REGENERATED AIR**

Polotsk state University, Novopolotsk, Vitebsk region, Republic of Belarus

With the help of comparative tests, the re-distribution of the fixed carbon as a result of the reverse of the air flow in the regenerative cartridge of the gas mask with the chemical method of oxygen reservation was confirmed. As a result, the surface of exothermic heat output increased and the temperature regime of the regenerative cartridge softened. This made it possible to avoid sintering of the CO₂ chemisorbent granules and damage to the microstructure of their pores. Thus, the dynamic sorption activity of the exhaled carbon dioxide absorber was preserved, accompanied by the release of oxygen for the next inhalation. As a result of the reverse, carried out 8 minutes after the start of the gas mask operation, its protective

effect with the same amount of chemisorbent (1.8 kg) and volumetric air flow rate (40 l/min) was extended by 8.62%. Due to the stated reasons, in a more difficult operation mode (with an increase in the physical load of the employee), the increase in the protective effect of the gas mask due to the reverse of the air flow will be even more significant.

Keywords: insulating gas mask, regenerative cartridge, dead layer of chemisorbent, sources of exothermic heat, reverse of regenerated air flow.

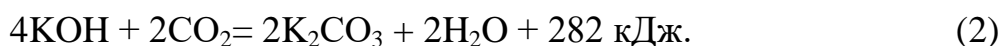
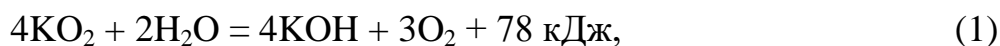
Введение

Изолирующие противогазы используются для защиты органов дыхания от одновременного присутствия в атмосфере сразу нескольких ядовитых газов и аэрозолей, а также при выгорании или вытеснении кислорода в замкнутом пространстве (например, при выбросе метана в угольной шахте). Очевидно, что при этом фильтрующие противогазы бесполезны.

Для регенерации воздуха в изолирующих средствах защиты необходимо удалять из выдоха углекислый газ и добавлять необходимый для вдоха кислород.

При этом важно, не уменьшая срок защитного действия, снизить массу и габариты дыхательного аппарата, повысить его надежность, упростить обслуживание. По этим показателям дыхательные аппараты на химически связанном кислороде предпочтительнее баллонных, ибо твердые вещества в тысячи раз плотнее газов, а стальные баллоны не выдерживают давление выше 250 атмосфер и к тому же весят в несколько раз больше своего содержимого [1].

Не менее важным преимуществом является автоматический расход химически зарезервированного кислорода в результате поглощения выдыхаемого углекислого газа:



Стехиометрия такой реакции близка к идеальной с точки зрения физиологии человека, ибо в обычных условиях (на свежем воздухе) он потребляет кислорода в полтора раза больше, чем выделяет углекислого газа [2].

Согласно (1), (2), количество выделяющихся молекул кислорода именно в 1,5 раза больше количества связываемых молекул CO_2 . Последнее пропорционально объемному расходу воздуха, возрастающему при увеличении физической нагрузки работника. Таким образом отпадает потребность в легочных автоматах и ресиверах, используемых в баллонных дыхательных аппаратах для регулировки подачи кислорода. Это упрощает конструкцию противогаза, повышает его надежность, дополнительно снижает вес и уменьшает габариты.

Кроме того, такие средства защиты не нуждаются в компрессорном хозяйстве и перманентно готовы к оперативному использованию. Изложенное позволяет отдать предпочтение при защите дыхания в экстремальных условиях химическому способу резервирования кислорода.

Постановка проблемы

Оценим эффективность использования защитного ресурса химически связанного кислорода в существующих дыхательных аппаратах. При получении оценки исходить будем из того, что в баллоне четырехчасового респиратора Р12 550 г сжатого кислорода [1]. Аппарат РХ-4 имеет такое же время защиты и снаряжен 3,7 кг хемосорбента с 90% содержанием надпероксида калия [1]. Исходя из уравнений (1), (2) и молекулярных масс кислорода и калия, при полном исчерпании защитного ресурса регенеративного патрона выделяться $(0,9 \cdot 3,7 \cdot 32/71) \cdot 3/4 = 1,13$ кг кислорода. То есть к концу работы респиратора РХ-4 не используется половина его защитного ресурса.

Отравление углекислым газом начинается при наличии в воздухе 1,5% молекул CO_2 . Поглотительный ресурс регенеративного патрона при таком проскоке еще не израсходован, ибо в выдохе 4 % молекул CO_2 . Оставшийся невостребованным ресурс задается шириной мертвого слоя хемосорбента. На нее влияет физическая нагрузка работника, объем регенеративного патрона, химический состав и структура гранул хемосорбента

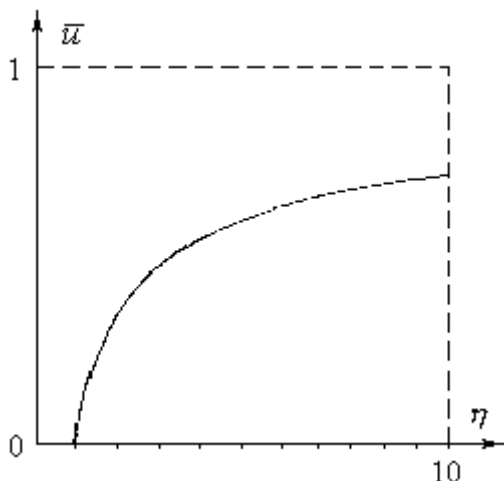


Рисунок 1. – Обработка ресурса регенеративного патрона как функция его обезразмеренной длины

$$\eta = L\beta/v, \quad (3)$$

где L – длина слоя хемосорбента, преодолеваемая регенерируемым воздухом, v – скорость его фильтрации, β – постоянная, характеризующая скорость хемосорбции CO_2 [3].

В частности, при тяжелой физической нагрузке в самоспасателе с небольшим сроком защитного действия проскок CO_2 может с самого начала превысить критический. При этом доля использованного защитного ресурса $\bar{\eta}$ (см. полученный в [3] рисунок 1), а значит и срок защитного действия аппарата, равны нулю. То есть при ($\eta < 1$) весь слой сорбента оказывается мертвым. И даже в штатном режиме эксплуатации ($\eta = 3$) защитный ресурс химически связанного кислорода не может использоваться более чем на 40%. Однако реальные показатели еще хуже теоретических.

Причины неэффективного использования химически связанного кислорода и пути улучшения этого показателя

Экстремальному тепловому воздействию (см. (1), (2)) подвергаются лобовые слои кислородсодержащего продукта. В них максимальный концентрационный напор молекул углекислого газа сочетается с максимальной сорбционной емкостью хемосорбента в начале работы аппарата. Это влияет на структуру пор гранул хемосорбента и замедляет кинетику сорбции [3]. После чего процесс регенерации воздуха смещается в следующие слои сорбента. В результате, по-

слоистого спекания гранул уменьшается β [3], и обезразмеренная длина патрона укорачивается (см. (3)). А это увеличивает мертвый слой сорбента.

Для устранения обеих причин неэффективного использования ресурса регенеративного патрона необходимо переместить источники экзотермического тепла из лобовых слоев хемосорбента в замыкающие. Для этого достаточно осуществить реверс регенерируемого воздушного потока, до начала спекания гранул лобовых слоев хемосорбента. Конструкция такого дыхательного аппарата защищена патентом [4].

Эффективность предложенной конструкции, в плане смягчения температурного режима регенеративного патрона подтверждена численными экспериментами на основе обоснованного в [5] подхода к моделированию рабочего процесса изолирующего противогаса после реверса воздушного потока.

Численный эксперимент

В классической постановке задача динамики сорбции решается при нулевой начальной загрязненности фильтра [6]. Однако, до реверса в регенеративном патроне успевает сформироваться неоднородное распределение связанного углерода. И новая структура работающего слоя хемосорбента формируется при наличии начальной отработки патрона. Для моделирования этого процесса воспользуемся полученными в [5] соотношениями:

$$-\omega'_\xi(\xi, \tau) = \omega(\xi, \tau) - e^{-\tau} \left[u(\xi, 0) + \int_0^\tau e^\tau \omega(\xi, \tau) d\tau \right], \quad (4)$$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \left(u(\xi, 0) + \int_0^\tau e^\tau \omega(\xi, \tau) d\tau \right), \quad (5)$$

где $\omega(\xi, \tau)$ и $u(\xi, \tau)$ доли проскочивших молекул CO_2 и использованных вакансий для связанного углерода, τ и ξ - обезразмеренные время и координата

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

которых γ - количественная характеристика ресурса реакции по связыванию CO_2 , x ($0 \leq x \leq L$) – глубина проникновения в регенеративный патрон, t – время его работы.

Фигурирующая в (4), (5) функция $u(\xi, 0)$ - начальная загрязненность патрона, влияние которой на динамику сорбции позволит моделировать рабочий процесс дыхательного аппарата после реверса воздушного потока.

Благодаря линейности (4) его решение можно представить в виде

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\tau} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(\tau)}{n!} \xi^n, \quad (7)$$

где $f_n(\tau)$ - функции, удовлетворяющие рекуррентному соотношению

$$f_{n+1}(\tau) = u_{\xi}^{(n)}(0,0) + \int_0^{\tau} f_n(\tau) d\tau - f_n(\tau), \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

в котором $u_{\xi}^{(n)}(0,0)$ - n -е производные $u(\xi,0)$ по ξ на входе в патрон.

Положив в (7) $\xi = 0$ получим необходимое для старта рекуррентной процедуры

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau), \quad (9)$$

где $\omega(0, \tau)$ - приведенная концентрация углекислого газа на входе в фильтр поглощающий слой.

С помощью формул (5), (7) – (9) можно вычислить концентрацию углекислого газа в фильтруемом через регенеративный патрон воздухе и степень обработки поглотительного ресурса патрона при наличии любой его начальной загрязненности. В частности, при ее отсутствии ($u(\xi,0) = 0$) и постоянной концентрации CO_2 на входе в патрон ($\omega(0, \tau) = 1$) зависимость проскока CO_2 и приведенной загрязненности патрона от времени и координаты имеет вид

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right]. \quad (10)$$

$$u(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left(1 + e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right) \quad (11)$$

Из (11) следует, что при реверс воздушного потока в момент времени τ_1 , возникает задача динамики сорбции (4) – (9) с начальной загрязненностью

$$u(\xi,0) = u(\eta - \xi, \tau_1) = 1 - e^{-\tau_1} \left(1 + e^{-\eta+\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau_1^k}{k!} \right). \quad (12)$$

Выполнив в (12) m – кратное дифференцирование по ξ и положив $\xi = 0$, найдем фигурирующие в (8) производные начальной загрязненности на входе в патрон

$$u_{\xi}^{(m)}(0,0) = e^{-\tau_1 - \eta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\eta^n \tau_1^{n+1}}{(n!)^2} g(m, \tau_1, n), \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (13)$$

$$g(m, \tau_1, n) = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(-\tau_1)^i C_i^{m-1}}{\prod_{k=0}^i (n+1+k)}, \quad (14)$$

где $C_i^{m-1} = i!/(m-1)!(i-m+1)!$ – числа сочетаний.

Численный эксперимент на основе формул (5), (7) – (9) требует обоснования используемых при его проведении числовых значений параметров η и τ_1 .

Согласно (3) интервал возможных значений η определяется защитным ресурсом регенеративных патронов и режимами их эксплуатации. Для самоспасателя ШСС, предназначенного для выхода работника из зоны аварии, $3 \leq \eta \leq 15$ в зависимости от физической нагрузки человека [3]. А у респиратора РХ-4, используемого при проведении спасательных работ $13 \leq \eta \leq 58$.

В первую очередь в повышении эффективности работы нуждаются изолирующие самоспасатели, ибо при уменьшении η возрастает мертвый слой сорбента (рисунок 1), неиспользуемый к моменту возвращения на вдох 1,5 % CO_2 из выдыхаемых 4 %

$$\omega(\eta, \tau_{кр}) = 1.5\%/4\% = 0.375, \quad (15)$$

где $\tau_{кр}$ – время наступления критического проскока CO_2 .

Именно в таких обстоятельствах важно предотвратить спекание гранул хемосорбента, чтобы дополнительно не понижать реализацию защитного ресурса регенеративного патрона. С учетом изложенного численный эксперимент выполнен с $\eta = 4$, когда использование менее 2, 5 кг надпероксида калия сочетается с выполнением тяжелой физической работы. Такому η в отсутствии реверса согласно (10), (15) соответствует $\tau_{кр} = 2.664$ или согласно (6) 56 минут обычного (необезразмеренного) времени, ибо $\beta\gamma = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ [3].

Из-за спекания гранул фактический срок защитного действия на 37-67% ниже теоретического [3]. Поэтому реверс необходим в момент τ_1 , когда выработана треть ресурса лобового слоя $u_1(0, \tau_1) = 0.33$. Т.е. $\tau_1 = 0.4$ (см. (11)), или 8 минут.

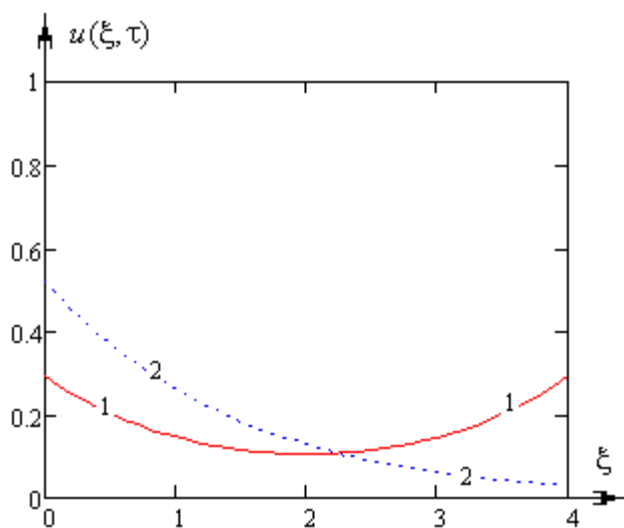


Рисунок 2. Отработка ресурса регенеративного патрона в момент времени $\tau = 0.735$:
1 – после реверса воздушного потока ($\tau_1 = 0.4$); 2 – в отсутствии реверса

Меньшая выпуклость кривой 1 – следствие равномерной отработки ресурса регенеративного патрона, что увеличивает поверхность теплоотдачи и предотвращает спекание гранул. Поэтому реальный срок защитного действия при наличии реверса будет больше, чем без него.

Сопоставительные натурные испытания

Для проведения натуральных экспериментов использовались регенеративные патроны РП-7 от изолирующего средства индивидуальной защиты органов дыхания на химически связанном кислороде ИП-4МК с 1,8 кг кислородсодержащего продукта при длине поглощающего слоя $L = 13$ см. Для имитации дыхания с помощью компрессорной установки на вход патрона подавалась воздушная смесь с 4% углекислого газа. В отсутствие реверса, обоснованный в предыдущем разделе срок защитного действия (около 56 минут) обеспечивался при объемном расходе воздуха 40 л/мин, что соответствует физической нагрузке выше среднего уровня. Температурный режим процесса хемосорбции CO_2 (как функция времени и координаты) отслеживался на поверхности регенеративного патрона с

Для обоснованных значений η и τ_1 с помощью формул (5), (7) – (9) построены зависимости на рисунке 2. Видно, что после реверса воздушного потока загрязненность краев регенеративного патрона выравнивается и оказывается на 43.8% ниже, чем в лобовых слоях патрона, работающего без реверса. Это значит, что количество экзотермического тепла, выделившегося в лобовых слоях кислородсодержащего продукта, уменьшилось почти вдвое. При этом важно, что реверс не повлиял на теоретический срок защитного действия противогаса (рисунок 3).

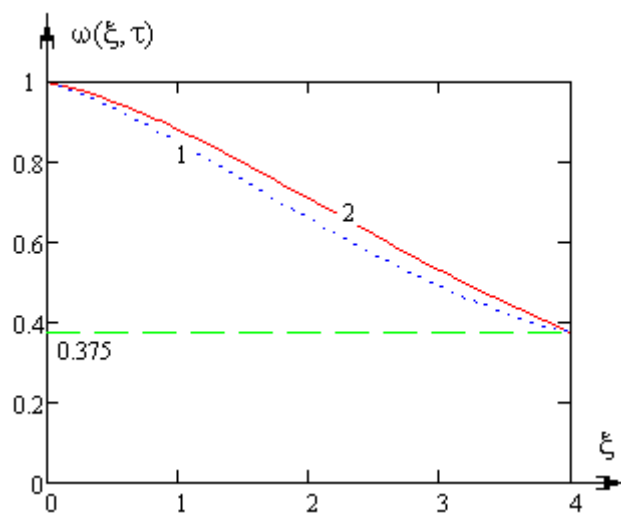


Рисунок 3. Распределение $\omega(\xi, \tau)$ в момент критического проскока CO_2 ($\tau = 2.664$):
1 – после реверса воздушного потока ($\tau_1 = 0.4$); 2 – в отсутствии реверса

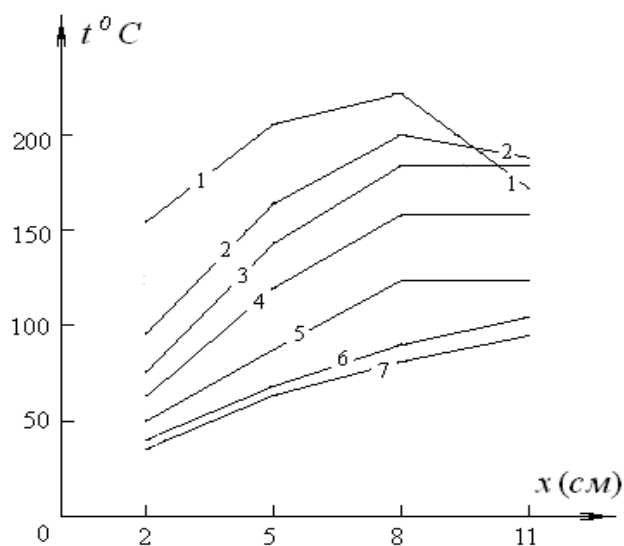


Рисунок 4. Зависимость температуры хемосорбента от времени и координаты: 1 – 8 мин; 2 – 15 мин; 3 – 23 мин; 4 – 31 мин; 5 – 39 мин; 6 – 55 мин; 7 – 58 мин

юющих расти, но медленнее, чем это было в лобовых слоях. Причина в частичной регенерации воздуха в предыдущих слоях (поскольку их поглотительный ресурс до конца не исчерпан) и частичной отработке замыкающих слоев (см. рис.3 кривая 2) (поскольку даже в начале работы лобовых слоев проскок CO_2 через них не равен нулю). И то и другое снижает скорость хемосорбции в замыкающих слоях, а значит и выделение в них экзотермического тепла. Измерения были завершены на 58 минуте опыта в момент появления критического проскока CO_2 (1,5%) через регенеративный патрон. Содержание CO_2 на выходе из патрона контролировалось с помощью газового анализатора Testo 330-2.

При проведении сопоставительных испытаний (рисунок 5) реверс, в соответствии с приведенным в предыдущем разделе обоснованием, был осуществлен через 8 минут после начала опыта. В результате перераспределения источников экзотермического тепла на 15 минуте работы максимум температуры в регенеративном патроне снизился на 20% (кривые 2 на рисунках 4 и 5) Причина в расширении работающего слоя сорбента и включении в теплоъем практически всей поверхности регенеративного

помощью инфракрасного прибора для измерения температуры Ada instruments TemPro 700. Результаты измерений в графической форме представлены на рисунке 4. Видно, что в начале работы аппарата быстрый рост температуры происходит в лобовом слое продукта, где максимальный концентрационный напор сочетается с незадействованным поглотительным ресурсом хемосорбента. Затем по мере послойной отработки поглотительного ресурса, кислородсодержащего продукта процесс экзотермической хемосорбции смещается вглубь регенеративного патрона. При этом температура лобовых слоев начинает снижаться, а замыкающих

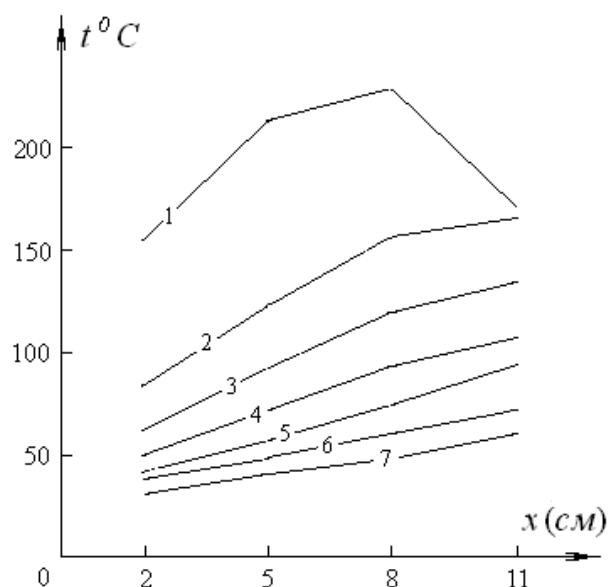


Рисунок 5. Зависимость температуры регенеративного патрона от времени и координаты при наличии реверса воздушного потока: 1 – 8 мин (момент реверса); 2 – 15 мин; 3 – 23 мин; 4 – 31 мин; 5 – 39 мин; 6 – 55 мин; 7 – 63 мин

патрона. По этой причине в дальнейшем обусловленный реверсом эффект снижения максимальной температуры только нарастает (кривые 3 – 6), достигая на 55 минуте уже 30 %. В частности, в момент критического проскока CO_2 (кривые 7) в шланг вдоха поступает менее горячий воздух (60°C вместо 90°C), что обеспечивает более комфортные условия дыхания. Это весьма существенно в конце срока защитного действия дыхательного аппарата на фоне ощутимого проскока углекислого газа. И наконец, самое важное (то ради чего проводились сопоставительные испытания) срок защитного действия дыхательного аппарата (без изменения количества химически связанного кислорода) увеличился на 8,6% ($63/58 = 1,0862$). Хотя численный эксперимент этого не предсказывал (рисунок 3), т.к. не учитывал влияние экзотермического тепла на структуру пористых гранул хемосорбента ($\beta = \text{const}$). Т.е. причина увеличения времени защитного действия респиратора – предотвращение спекания гранул в результате смягчения температурного режима регенеративного патрона. Это значит, что при более тяжелой физической нагрузке (например, при эвакуации пострадавшего из зоны аварии), когда увеличивается выделение CO_2 (а значит и мощность источников экзотермического тепла), реверс воздушного потока обеспечит еще больший относительный прирост времени защитного действия респиратора. Полученный результат принципиально важен в чрезвычайных обстоятельствах, когда для спасения жизни при эвакуации из зоны аварии дорога каждая добавленная минута.

Заключение

С помощью натуральных сопоставительных испытаний подтверждено перераспределение связанного углерода в результате реверса воздушного потока в регенеративном патроне противогаса с химическим способом резервирования кислорода. В результате увеличилась поверхность отдачи экзотермического тепла и смягчился температурный режим регенеративного патрона. Это позволило избежать спекания гранул хемосорбента CO_2 и повреждения микроструктуры их пор. В результате срок защитного действия респиратора (при том же количестве хемосорбента и объемном расходе воздуха) был увеличен на 8,62 %. В силу изложенных причин, в более тяжелом режиме эксплуатации (при увеличении физической нагрузки работника) прирост защитного действия респиратора, обусловленный реверсом воздушного потока будет еще значительнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н.С. Диденко. – М.: Недра, 1990. – 158 с.
2. Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты. – Утв. Минздравом СССР 23.06.80. – М.: Медицина, 1981. – 27 с.
3. Ехилевский С. Г. Повышение ресурса дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде: автореф. дис. ... д-ра тех. наук 05.26.01 – Днепропетровск, 2002. – 36 с.

4. Патент 24003 Беларусь, кл. А 62 В. Регенеративный дыхательный аппарат / С.Г. Ехилевский, Е.П. Потапенко Оpub. 30.04.2023. Бюл. № 2.

5. Ехилевский С.Г., Голубева О.В., Потапенко Е.П. Реверс воздушного потока в изолирующем самоспасателе на химически связанном кислороде // Безопасность труда в промышленности. 2023 г. №11, с.57-62.

6. Мамаев, В.В. Математическое моделирование процессов в регенеративном патроне респиратора с химически связанным кислородом / В.В. Мамаев, А.П. Кирьян // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: – Донецк, 2020 – № 1(57). – С. 18-24.

REFERENCES

1. Didenko N.S. Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatelnykh работ / N.S. Didenko. – М.: Nedra. 1990. – 158 s.

2. Fiziologo-gigiyenicheskiye trebovaniya k izoliruyushchim sredstvam individualnoy zashchity. – Utv. Minzdravom SSSR 23.06.80. – М.: Meditsina. 1981. – 27 s.

3. Ekhilevskiy S. G. Povysheniye resursa dykhatelnykh apparatov na khimicheski svyazannom kislorode: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.26.01 – Dnepropetrovsk. 2002. – 36 s.

4. Patent 24003 Belarus`, kl. A 62 V. Regenerativny`j dy`xatel`ny`j apparat / S.G. Ekhilevskiy, E.P. Potapenko Opub. 30.04.2023. Byul. № 2.

5. Ekhilevskiy S.G.. Golubeva O.V.. Potapenko E.P. Revers vozdušnogo potoka v izoliruyushchem samospasatele na khimicheski svyazannom kislorode // Bezopasnost truda v promyshlennosti. 2023 g. №11. s.57-62.

6. Mamaev, V.V. Matematicheskoe modelirovanie processov v regenerativnom patrone respiratora s ximicheski svyazanny`m kislородом / V.V. Mamaev, A.P. Kir`yan // Nauchny`j vestnik NIIGD «Respirator»: – Doneczk, 2020 – № 1(57). – S. 18-24.

