

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой»

Объект авторского права  
УДК 622.867.322

**ПОТАПЕНКО**  
**Евгений Павлович**

**УВЕЛИЧЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЫХАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ  
ИЗМЕНЕНИЕМ КОНСТРУКЦИИ ЕГО ВОЗДУХОВОДНОЙ ЧАСТИ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.26.01 – охрана труда  
(топливная и химическая промышленность)

Новополоцк, 2025

Работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой».

Научный руководитель: **Ехилевский Степан Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры технологий программирования учреждения  
образования «Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой»

Официальные оппоненты: **Зильберглейт Марк Аронович**,  
доктор химических наук, доцент, профессор  
кафедры технологии неорганических веществ  
и общей химической технологии учреждения  
образования «Белорусский государственный  
технологический университет»  
**Кологривко Андрей Андреевич**,  
кандидат технических наук, доцент, декан  
факультета горного дела и инженерной экологии  
учреждения образования «Белорусский  
национальный технический университет»

Оппонирующая  
организация: Государственное научное учреждение  
«Институт прикладной физики Национальной  
академии наук Беларуси»

Защита диссертации состоится 20 июня 2025 года в 13.00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.19.01 при учреждении образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», по адресу: 211440, Витебская область, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, ауд. 263, телефон ученого секретаря +375 (29)7189253, e-mail: [u.bulavka@psu.by](mailto:u.bulavka@psu.by)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций К 02.19.01,  
кандидат технических наук, доцент

Ю. А. Булавка

## **ВВЕДЕНИЕ**

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 приоритетным направлением научно-технической и инновационной деятельности является защита человека, общества и государства от чрезвычайных ситуаций. Законом РБ от 23.06.08 № 356-З «Об охране труда» установлен приоритет сохранения жизни и здоровья работающих и ответственность за создание здоровых и безопасных условий труда.

Наличие техногенных происшествий, таких как на ОАО «Нафтан» в 2021 году и Мозырском НПЗ в 2023, требует совершенствования технических средств, предотвращающих воздействие вредных и опасных производственных факторов на человека. В процессе обслуживания газораспределительной системы и нефтеперерабатывающих предприятий Республики Беларусь необходима защита органов дыхания работников от комплекса вредных факторов. Среди них: выгорание или вытеснение кислорода, выделение ядовитых продуктов горения, и пр. В описанных ситуациях эффективны только изолирующие дыхательные аппараты. Среди них наиболее перспективны аппараты на химически связанном кислороде, ибо они компактнее и проще баллонных. Изложенное определяет актуальность данной диссертации.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Полученные в работе результаты являются продолжением исследований, начатых в рамках программы «Исследования тепло- и массообмена в регенеративном патроне дыхательного аппарата на химически связанном кислороде» (№ ГР 2005456, № темы 425, ГПОФИ «Энергия» (15.02.2005–20.12.2005)). Дальнейшие исследования осуществлялись при выполнении работ по темам: «Физико-химический, мультифрактальный и микроструктурный анализ углеродных материалов для их рационального использования в промышленности» (№ ГР 20103213, № темы 1110, БРФФИ (01.05.2010–31.03.2012)); «Обоснование технологических параметров и разработка схемы экспериментальной установки регенерации атмосферы» (№ ГР 20111092, № темы ГБ-0411, ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (03.01.2011–20.12.2013)).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

*Цель исследования* – увеличение защитного действия дыхательного аппарата на химически связанном кислороде изменением конструкции его воздуховодной части.

Реализация поставленной цели потребовала решения ряда взаимосвязанных научных и технических *задач*:

1) обобщить теоретико-вероятностный подход к моделированию динамической сорбционной активности на случай больших времен;

2) построить математическую модель процесса хемосорбции  $\text{CO}_2$  слоем кислородсодержащего продукта при начальной неоднородной отработке поглощительного ресурса регенеративного патрона и создать комплект программ для постановки численных экспериментов;

3) обосновать параметры гибридной (круго-маятниковой) схемы воздуховодной части дыхательного аппарата на химически связанном кислороде;

4) обосновать величину и место скачка скорости фильтрации выдыхаемого воздуха через регенеративный патрон дыхательного аппарата с замкнутой схемой воздуховодной части;

5) обосновать рекомендации по осуществлению реверса воздушного потока в дыхательном аппарате с круговой схемой воздуховодной части.

6) оценить эффективность предложенных технических решений в плане оптимизации температурного режима и прироста защитного действия регенеративного патрона при фиксированном количестве хемосорбента.

*Объект исследования* – регенерация воздуха в дыхательном аппарате на химически связанном кислороде.

*Предмет исследования* – влияние изменений конструкции воздуховодной части дыхательного аппарата на динамику сорбции выдыхаемого  $\text{CO}_2$  кислородсодержащим продуктом.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании теории рабочего процесса дыхательного аппарата на химически связанном кислороде при наличии реверса воздушного потока и скачка скорости его фильтрации через регенеративный патрон.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Теоретико-вероятностный подход к моделированию процессов молекулярной природы, что позволило выделить нормальную асимптотику проскока  $\text{CO}_2$  через регенеративный патрон респиратора на химически связанном кислороде и поправки к ней, обусловленные асимметриями и эксцессами случайной координаты элементарного акта сорбции, упростив таким образом проведение численных экспериментов при построении зависимости проскока от времени и координаты.

2. Новая модель регенерации атмосферы в изолирующем дыхательном аппарате, отличающаяся учетом неоднородной начальной отработки поглощи-

тельного ресурса регенеративного патрона, что позволило оптимизировать параметры изменений, вносимых в конструкцию воздухопроводной части дыхательного аппарата.

3. Использование в самоспасателях круго-маятниковой схемы воздухопроводной части, в зависимости от величины защитного ресурса регенеративного патрона, на 10,6 % – 26,4 % повышает эффективность его использования за счет уменьшения мертвого слоя сорбента и объема вредного пространства.

4. Определена оптимальная для предотвращения спекания гранул хемосорбента координата скачка скорости фильтрации воздушного потока. В зависимости от величины демпфирования давления на выдохе и вдохе, для респиратора РХС определен прирост защитного действия аппарата (до 6,5 %) и снижение мощности источников экзотермического тепла (от 23,8 % до 32,3 %) в лобовых слоях кислородсодержащего продукта.

5. Показано, что реверс воздушного потока обеспечивает более равномерное распределение источников экзотермического тепла в регенеративном патроне (загрязненность краев регенеративного патрона выравнивается и на 43,8 % ниже, чем на входе в патрон, работающий без реверса), что предотвращает спекание гранул кислородсодержащего продукта и по результатам натуральных сопоставительных испытаний на 8,6 % увеличивает срок защитного действия дыхательного аппарата.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

При непосредственном участии соискателя формулировалась цель исследования и решались задачи, необходимые для ее достижения. На основе полученных моделей регенерации воздуха в дыхательных аппаратах с измененной конструкцией воздухопроводной части соискателем были проведены численные эксперименты, интерпретированы их результаты и сформулированы рекомендации по их практическому использованию. Все это нашло отражение в положениях, выносимых на защиту.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве, состоит: в обобщении метода статистических моментов для математического моделирования случайных процессов молекулярной природы при больших временах [3, 8, 12, 15]; в способе решения задач динамики сорбции с неоднородной начальной «загрязненностью» фильтра [1, 10], что позволило моделировать динамику сорбции после реверса воздушного потока или изменения режима работы дыхательного аппарата [2, 9, 11]; в разработке математической модели [4, 13] дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с круго-маятниковой схемой воздухопроводной части [18]; в обосновании координаты и величины скачка скорости фильтрации выдыхаемого воздуха через регенера-

тивный патрон [5, 14]; в обосновании момента реверса потока воздуха в дыхательном аппарате с круговой схемой воздуховода, проведении натурных сопоставительных экспериментов и интерпретации их результатов [6, 7, 16, 17]; в технической реализации увеличения защитного действия дыхательного аппарата за счет более эффективного использования ресурса регенеративного патрона [18, 19].

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертационного исследования докладывались на: XII Международной научно-практической конференции «Современные научные исследования актуальные вопросы, достижения и инновации», Пенза, 05.06.2020 г.; Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки: актуальные вопросы теории и практики», Пенза, 12.04.2021 г.; VII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки», Пенза, 10.06. 2023 г.; XX Международной научно-практической конференции, Пенза, 10.09.2024 г.

### **Опубликование результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 7 статей в научных изданиях, включенных в перечень ВАК, 1 – статья в других научных изданиях, 9 – доклады и материалы конференций, 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель. Общий объем публикаций – 4,1 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Структура диссертации отражает взаимосвязь содержания глав и вытекает из сути задач, решаемых для достижения цели исследования.

На основе выполненного в главе 1 анализа причин неэффективного использования кислородсодержащего продукта в существующих дыхательных аппаратах предложено повышать их защитное действие изменением конструкции воздуховодной части. Это вносит качественные изменения в динамику сорбции выдыхаемых молекул  $\text{CO}_2$ . Для ее исследования в главе 2 теоретико-вероятностный подход к моделированию динамической сорбционной активности обобщен на случай больших времен.

В главе 3 получена математическая модель процесса регенерации атмосферы в дыхательном аппарате на химически связанном кислороде при наличии неоднородной начальной загрязненности регенеративного патрона.

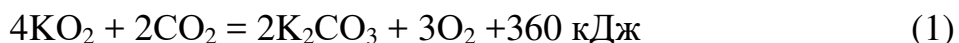
В главе 4 представлены технические решения, направленные на достижение заявленной цели. С помощью численных экспериментов и натурных сопоставительных испытаний подтверждена их эффективность.

Диссертация изложена на 112 страницах, содержит 2 таблицы, 39 иллюстраций, 1 приложение. Библиографический список включает 152 источника научно-технической литературы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе приведена классификация средств защиты дыхания, обоснованы преимущества изолирующих респираторов и самоспасателей перед фильтрующими. Показано, что химический способ резервирования кислорода перспективнее баллонного, ибо плотность твердых веществ на три порядка выше, чем у газов, а стальные баллоны не выдерживают давление более 250 атмосфер и в шесть раз тяжелее своего содержимого. В баллонном аппарате необходим поглотитель углекислого газа, легочный автомат и ресивер. Это усложняет конструкцию, увеличивает габариты аппарата.

Использование химически связанного кислорода



**Рисунок 1 – Конгломераты спекшихся гранул**

решает перечисленные проблемы, ибо чем выше физическая нагрузка, тем больше выделяется  $\text{CO}_2$ , а значит и кислорода для нового вдоха (см. (1)). Вместе с тем, как показывают стехиометрические оценки, защитный ресурс регенеративных патронов используется недостаточно эффективно. Первая причина – мертвый слой сорбента, образованный молекулами  $\text{KO}_2$ , не прореагировавшими к моменту критического проскока  $\text{CO}_2$ . Вторая причина – спекание пористых гранул надпероксида калия (рисунок 1) под действием выделяющегося в процессе хемосорбции экзотермического тепла (см.(1)).

Согласно экспериментальным данным<sup>1</sup>, при нагревании регенеративного патрона до 400°K образуются конгломераты гранул, что замедляет хемосорбцию и сокращает срок защитного действия дыхательных аппаратов.

Изложенное обосновывает актуальность темы диссертационного исследования, позволяет сформулировать его цель и осуществить постановку задач, решение которых необходимо для ее достижения.

---

<sup>1</sup> Ехилевский, С. Г. Повышение эффективности дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, С. А. Ольшанников // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 123–131.

**Во второй главе** обобщен на случай больших времен теоретико-вероятностный подход к решению уравнений математической физики, описывающих процессы молекулярной природы. Обычно для этого используют метод Фурье или процедуры операционного исчисления<sup>2</sup>. Такой формализм не учитывает случайную специфику моделируемых процессов, а привлечение теории вероятностей позволяет выделить асимптотику процесса при больших временах и на порядки увеличить скорость численных экспериментов. Апробация такого подхода выполнена на примере диффузии. Ограничившись для простоты размытием однородного концентрационного пятна, удалось получить рекуррентное соотношение

$$\mu_{2n}'(\tau) = 2n(2n-1)\mu_{2n-2}(\tau) \quad (2)$$

для центральных статистических моментов координаты диффундирующей молекулы

$$\mu_n(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - v_1(\tau))^n f(\xi, \tau) d\xi = v_n(\tau), \quad (3)$$

где

$$\tau = Dt/l^2, \quad \xi = x/l, \quad (4)$$

обезразмеренные время  $t$  и координата  $x$ ,  $D$  – коэффициент диффузии,  $l$  – ширина концентрационного пятна,  $f(\xi, \tau)$  – плотность вероятности.

Из (3) и начального условия

$$\mu_{2n}(0) = \int_{-1/2}^{1/2} \xi^{2n} d\xi = \frac{1}{(2n+1)2^{2n}} \quad (5)$$

следует

$$\mu_2(\tau) = 2\tau + 1/12 = \sigma^2(\tau), \quad \mu_4(\tau) = 12\tau^2 + \tau + 1/80, \quad (6)$$

что позволяет вычислить эксцесс и убедиться в нормальной асимптотике процесса

$$E_4(\tau) = \frac{\mu_4(\tau)}{\sigma^4(\tau)} - 3 = \frac{12\tau^2 + \tau + 1/80}{(2\tau + 1/12)^2} - 3 = -\frac{1}{120\sigma^4(\tau)} \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} 0 \quad (7)$$

$$f(\xi, \tau) \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(\tau)}} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma(\tau)^2}}, \quad (8)$$

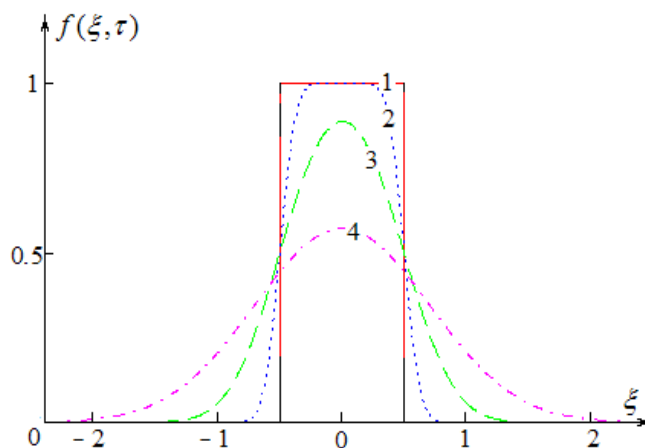
где  $\sigma(\tau)$  – среднеквадратическое отклонение  $\xi$ .

---

<sup>2</sup> Бугров, Я.С. Высшая математика / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – М.: Наука, 1989 г. – 464 с.

Поправки к нормальной асимптотике обусловлены эксцессами, что позволяет с помощью (2) – (8) отследить трансформацию равномерного распределения координаты диффундирующей молекулы в нормальное (рисунок 2).

В задаче динамики сорбции отсутствует представленная на рисунке 2 зеркальная симметрия. Поэтому, кроме эксцессов случайной координаты акта сорбции, нужно учитывать ее асимметрии



1 –  $\tau = 0$ ; 2 –  $\tau = 0.005$ ;  
3 –  $\tau = 0.05$ ; 4 –  $\tau = 0.2$

**Рисунок 2 – Диффузионное «расползание» однородного концентрационного пятна**

$$A_3(\tau) = \frac{\mu_3(\tau)}{\sigma^3(\tau)} = \frac{3}{\sigma(\tau)} - \frac{1}{\sigma^3(\tau)}, \quad A_5(\tau) = \frac{\mu_5(\tau)}{\sigma^5(\tau)} = \frac{30}{\sigma(\tau)} + \frac{50}{\sigma^3(\tau)} - \frac{36}{\sigma^5(\tau)}, \quad (9)$$

$$E_4(\tau) = \frac{12}{\sigma^2(\tau)} - \frac{6}{\sigma^4(\tau)}, \quad E_6(\tau) = \frac{\mu_6(\tau)}{\sigma^6(\tau)} - 15 = \frac{270}{\sigma^2(\tau)} + \frac{210}{\sigma^4(\tau)} - \frac{230}{\sigma^6(\tau)}, \quad (10)$$

где  $\sigma^2(\tau) = 2\tau + 1$  – дисперсия, а  $\mu_n(\tau)$  – центральные статистические моменты, координаты элементарного акта сорбции, полученные с использованием уравнения

$$-\omega'_\xi = e^{-\tau} \left( e^{-\xi} + \int_0^\tau e^\tau d_\tau \omega \right), \quad (11)$$

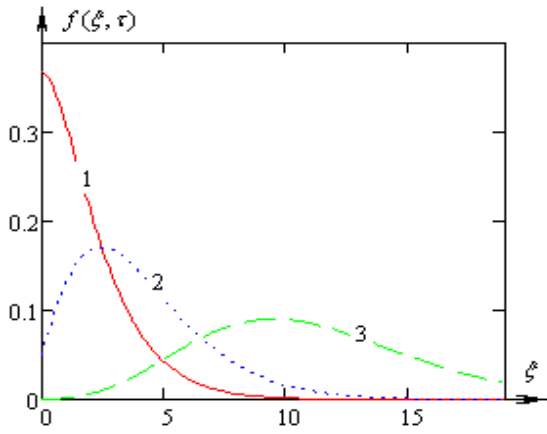
описывающего, при постоянстве концентрации  $\text{CO}_2$  на входе в регенеративный патрон, долю непоглощенных молекул  $\omega(\xi, \tau)$ .

В (9) – (11) фигурируют новые безразмерные переменные<sup>3</sup>

$$\xi = x\beta/\nu, \quad \tau = \beta\gamma t, \quad (12)$$

в которых  $\nu$  – скорость фильтрации выдыхаемого воздуха,  $x$  – расстояние от входа в патрон,  $t$  – время,  $\beta$  и  $\gamma$  – феноменологические постоянные, задающие скорость сорбции и ее ресурс.

<sup>3</sup> Использование безразмерных переменных (19) делает описание универсальным (пригодным для моделирования различных дыхательных аппаратов в любом режиме эксплуатации).



1 –  $\tau=1$ ; 2 –  $\tau=3$ ; 3 –  $\tau=10$   
**Рисунок 3 – Зависимость  $f(\xi, \tau)$  от координаты в различные моменты времени**

Долю поглощенных молекул  $1 - \omega(\xi, \tau)$  можно трактовать, как интегральную функцию распределения безразмерной координаты  $\xi$  элементарного акта сорбции. Поэтому

$$f(\xi, \tau) = -\omega'_\xi(\xi, \tau) \quad (13)$$

– плотность вероятности координаты элементарного акта сорбции. Формулы (9) – (13) позволяют отследить нормальную асимптотику проскока  $\text{CO}_2$  (рисунок 3) и упростить численные эксперименты с динамикой сорбции.

В третьей главе уравнение (11) обобщено на случай начальной загрязненности кислородсодержащего продукта  $u(\xi, \tau)$  и переменной концентрации  $\text{CO}_2$  на входе в патрон:

$$-\omega'_\xi(\xi, \tau) = \omega(\xi, \tau) - e^{-\tau} \left( u(\xi, 0) + \int_0^\tau e^\tau \omega(\xi, \tau) d\tau \right), \quad \tau \geq 0 \quad (14)$$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \left( u(\xi, 0) + \int_0^\tau e^\tau \omega(\xi, \tau) d\tau \right). \quad \tau \geq 0 \quad (15)$$

Это позволило моделировать дыхательные аппараты с измененной конструкцией воздухопроводной части. Решение (14) записано в виде ряда

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

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

$$f_{n+1}(\tau) = u_\xi^{(n)}(0, 0) + \int_0^\tau f_n(\tau) d\tau - f_n(\tau). \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (17)$$

Положив в (16)  $\xi = 0$ , найдем

$$f_0(\tau) = e^\tau \omega(0, \tau). \quad (18)$$

При отсутствии начальной загрязненности ( $u(\xi, 0) = 0$ ) и постоянном граничном условии ( $\omega(0, \tau) = 1$ ), с помощью (14) – (18) получается

$$\omega(\xi, \tau) = \omega_1(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left( 1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right), \quad (19)$$

$$u(\xi, \tau) = u_1(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left( 1 - e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right). \quad (20)$$

Тестом на правильность формул (14) – (18) является следующее рассуждение. Выберем момент времени  $\tau_1$  в (20) в качестве начального для соотношений (14) – (18). При этом в (14), (15)  $u(\xi, 0) = u_1(\xi, \tau_1)$ , а в (17)

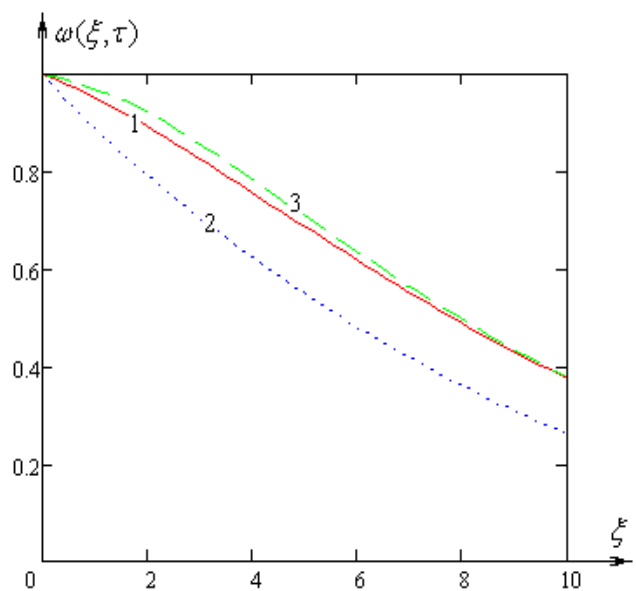
$$u_{\xi}^{(n)}(0, 0) = u_1^{(n)}(\xi, \tau_1) = \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} C_n^k \left( 1 - e^{-\tau_1} \sum_{m=0}^k \frac{\tau_1^m}{m!} \right). \quad (21)$$

Дальнейшее описание эволюции приведенной концентрации можно осуществлять как с помощью формул (19), (20), так и с помощью (14) – (18), в которой  $\omega(0, \tau) = 1$ . При этом должны выполняться тождества  $\omega_1(\xi, \tau_1 + \tau) \equiv \omega(\xi, \tau)$ ,  $u_1(\xi, \tau_1 + \tau) \equiv u(\xi, \tau)$ , что подтверждено численно.

Формализм (14) – (18) использован для моделирования рабочего процесса самоспасателя после изменения режима его эксплуатации.

При осуществлении численных расчетов, рассмотрена ситуация, когда трехкратное замедление воздушного потока увеличивает обезразмеренную длину патрона до  $\eta = 10$ . Это соответствует самоспасателю с 1 кг кислородсодержащего продукта при переходе от 10 режима дыхания (расход воздуха 60 л/мин) к 3-му (при спокойном выходе рабочего из зоны аварии)<sup>4</sup>.

Видно (рисунок 4), что уменьшение скорости фильтрации воздуха, выполненное в момент  $\tau_1 = 2.077$  критического проскока  $\text{CO}_2$  ( $\omega_1(\eta, \tau_1) = 1.5/4 = 0.375$ ), привело к более длительному пребыванию молекул углекислого газа в слое хемосорбента и, как следствие, снижению их содержания



- 1 – до замедления воздуха;
- 2 – после замедления воздуха;
- 3 – через  $\tau_2$  после замедления воздуха

**Рисунок 4 – Изменение проскока  $\text{CO}_2$**

<sup>4</sup> Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов / В. В. Пак, С. Г. Ехилевский, Э. Г. Ильинский, Е. И. Конопелько // Известия вузов. Горный журнал. – 1998. – № 11-12. – С. 108–112.

в регенерируемом воздухе (кривая 2). Затем начинается рост концентрации  $\text{CO}_2$ , обусловленный дальнейшим исчерпанием поглотительного ресурса регенеративного патрона. Через  $\tau_2 = 2.078$  происходит повторное достижение критического проскока  $\text{CO}_2$  (кривая 3) уже в ослабленном режиме работы дыхательного аппарата. При этом время защитного действия аппарата возрастает на 100 % ( $\tau_2/\tau_1 \approx 1$ ) и на 28 % повышается использование его защитного ресурса.

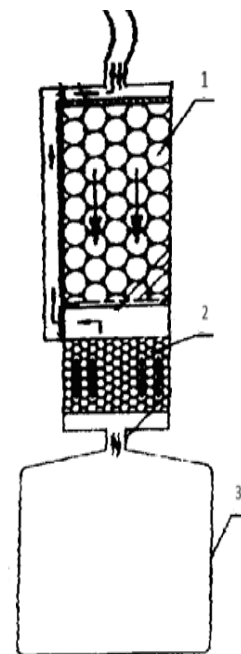
В четвертой главе на основании обоснованного алгоритма (14) – (18) представлены модели регенеративных дыхательных аппаратов с изменениями конструкции, обеспечивающими увеличение защитного действия. В частности, регенеративного дыхательного аппарата (рисунок 5) с гибридной (круго-маятниковой) схемой воздухопроводной части. Полезная модель позволяет объединить достоинства круговой (малое вредное пространство) и маятниковой (малый объем мертвого слоя) схем воздухопроводной части.

Выдыхаемый воздух поступает в круговую часть патрона 1, где находится основная часть сорбента, и поначалу осуществляется практически вся регенерация. По мере отработки круговой части, процесс регенерации смещается в маятниковую 2. Уменьшенный объем маятниковой части сокращает вредное пространство дыхательного аппарата и способствует лучшему газообмену с дыхательным мешком 3.

Чтобы определить обусловленную реверсом воздушного потока загрязненность маятниковой части использован принцип песочных часов<sup>5</sup>. Это позволяет процесс работы аппарата с гибридной схемой разделить на два последовательных этапа. Вначале весь выдыхаемый воздух проходит через регенеративный патрон, а затем через маятниковую часть возвращается на вдох. Реверс длится время

$$\tau_2(\tau, \eta) = \frac{1}{\omega l(\eta, \tau)} \int_0^{\tau} \omega l(\eta, \tau) d\tau, \quad (22)$$

где  $\eta$  – безразмерная длина патрона, задаваемая общим (в отсеках 8 и 9) количеством надпероксида калия. Чтобы узнать распределение молекул в аппарате с гибридной схемой воздухопроводной части к моменту времени  $\tau_1$ , нужно ре-



- 1 – отсек с круговой схемой;
- 2 – отсек с маятниковой схемой;
- 3 – дыхательный мешок

**Рисунок 5 – Регенеративный дыхательный аппарат**

<sup>5</sup>Ехилевский, С. Г. Нестационарная задача динамики сорбции углекислого газа в регенеративном патроне изолирующего респиратора / С. Г. Ехилевский // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2019. – № 3(89). – С. 57–65.

шить задачу (14) – (18) с граничным и начальным условиями, задаваемыми равенствами (см. (19), (20))

$$\omega(0, \tau) = \omega_1(\eta, \tau_1), u(\xi, 0) = u_1(\eta - \xi, \tau_1). \quad (0 \leq \xi \leq \xi_2(\tau_1, \eta)) \quad (23)$$

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

$$u(\xi, \tau_2(\tau_1, \eta)) = \omega(\xi, \tau_2(\tau_1, \eta)) \Rightarrow \xi = \xi_2(\tau_1, \eta) \quad (24)$$

в момент наступления критического проскока  $\text{CO}_2$

$$\omega(\xi_2(\tau_1, \eta), \tau_2(\tau_1, \eta)) = 0,375. \quad (25)$$

Для реализации рекуррентной процедуры (17) согласно (23) потребуются производные произвольных порядков при  $\xi = 0$  от функции  $u_1(\eta - \xi, \tau_1)$ . С помощью (20) можно убедиться в справедливости равенства

$$u_{\xi}^{(n)}(0, 0) = \left. \frac{\partial^n u_1(\eta - \xi, \tau)}{\partial \xi^n} \right|_{\xi=0} = (-1)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{v(n+k, \tau)}{k!} \eta^k, \quad (26)$$

в котором

$$v(n, \tau) = \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \frac{n!}{k!(n-k)!} g_k(\tau), \quad g_k(\tau) = 1 - e^{-\tau} \sum_{m=0}^k \frac{\tau^m}{m!}. \quad (27)$$

Таким образом, алгоритм моделирования респиратора с гибридной (круго-маятниковой) схемой воздухопроводной части следующий:

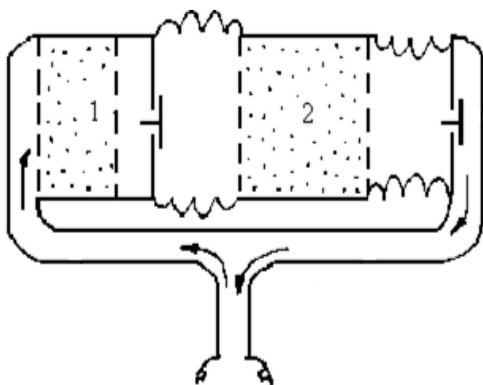
- 1) для данного  $\eta$  с помощью (19) определить срок защитного действия  $\tau_0$  аппарата с круговой схемой воздухопроводной части ( $\omega_1(\eta, \tau_0) = 0.375$ );
- 2) для  $\tau_1 > \tau_0$  (наличие реверса увеличивает срок защитного действия) с помощью (22), (24) вычислить  $\tau_2(\tau_1, \eta)$ ,  $\xi_2(\tau_1, \eta)$  и проверить выполнение равенства (25) (если оказывается, что приведенная концентрация меньше критического проскока  $\text{CO}_2$ , время  $\tau_1$  нужно увеличить, и наоборот);
- 3) для данного  $\eta$  и установленных параметров  $\tau_1$ ,  $\tau_2(\tau_1, \eta)$ ,  $\xi_2(\tau_1, \eta)$  с помощью (14) – (20), (23), (26), (27) построить распределение  $\omega(\xi, \tau)$  в маятниковой, а с помощью (19), (20) – в круговой части патрона.

Результаты численного эксперимента, выполненного в соответствии с данным алгоритмом, представлены на рисунке 6.

Выбор  $\eta=3$  обусловлен тем, что маятниковая часть расположена в конце патрона, где сосредоточен основной ресурс мертвого слоя хемосорбента. С увеличением  $\eta$  его доля в общем ресурсе регенеративного патрона уменьшается. Поэтому максимальный эффект от внедрения кругомаятниковой схемы следует ожидать в аппаратах с небольшим сроком защитного действия (самоспасателях).

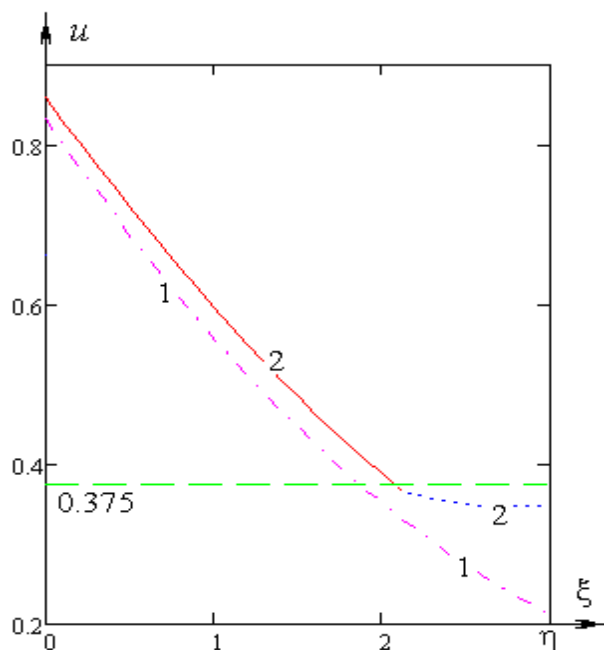
Видно, что реверс воздушного потока повышает степень обработки поглотительного ресурса маятниковой части регенеративного патрона. Это отодвигает достижение критического проскока  $\text{CO}_2$ , благодаря чему возрастает использование кислородсодержащего продукта и круговой части регенеративного патрона. В итоге, для  $\eta=3$ , эффективность использования защитного ресурса дыхательного аппарата суммарно возрастает на 10,6 %. В самоспасателе с  $\eta=2$  этот показатель 26,4 %.

Основная идея следующего изобретения (рисунок 7) заключается в том, чтобы через скоростной участок пропускать воздух импульсно (порция, пауза, порция и т.д.). Это позволяет совместить сохранение расхода воздуха с уменьшением скорости его течения при переходе из передних слоев сорбента в замыкающие.



1 – отсек №1; 2 – отсек №2

**Рисунок 7 – Респиратор с разной скоростью фильтрации воздуха**



1 – в круговой; 2 – в кругомаятниковой

**Рисунок 6 – Отработка ресурса регенеративного патрона в различных схемах воздухопроводной части ( $\eta=3$ )**

Поскольку вдох и выдох примерно равны по длительности, в объеме сорбента 1 скорость течения воздуха примерно вдвое больше, чем в объеме сорбента 2. При этом, благодаря отсутствию пульсации давления скорость фильтрации воздуха в объеме сорбента 2 оказывается ниже, чем в неразрезанном патроне.

Максимальный эффект, от изменений конструкции дыхательного аппарата будет в респираторах со

средним сроком защитного действия и тяжелым режимом эксплуатации. Таким требованиям удовлетворяет изолирующий дыхательный аппарат на химически связанном кислороде РХС. В нем 2400 г кислородсодержащего продукта. Плотность упаковки гранул кислородсодержащего продукта равна 930 г/л. Значит, объем регенеративного патрона РХС составляет  $2400/930 = 2,58$  л. При этом на пустоты между гранулами приходится около трети объема регенеративного патрона  $2,58/3 = 0,86$  л.

В десятом (тяжелом) режиме работы РХС соответствует обезразмеренная длина  $\eta = 7,5$ . При этом человек потребляет около 60 литров воздуха в минуту осуществляя 30 вдохов-выдохов. Т.е. объем каждого выдоха примерно равен 2 л.

Чтобы мало влиять на среднее время пребывания молекул  $\text{CO}_2$  в первой части регенеративного патрона, часть выдоха, остающаяся между двумя выдохами в первой части патрона, должна быть на порядок меньше общего объема одного выдоха. То есть общий объем пустот первой части не должен превышать 0,2 л, что соответствует обезразмеренной длине первой части  $\zeta \leq 7,5 \cdot 0,2/0,86 = 1,74$ , в связи с чем назовем ее короткой.

Таким образом через короткую часть патрона воздух фильтруется существенно быстрее, а через вторую (длинную) часть медленнее, чем через неразрезанный патрон. При этом, в терминах обезразмеренных переменных (см. (12)) первая часть патрона становится короче, а ход времени в ней как бы замедляется, поскольку в него не поступают молекулы  $\text{CO}_2$ . Таким образом (см. (19), (20)),

$$\omega_1(\xi, \tau) = \omega(\alpha \xi, \alpha \tau), \quad (0 \leq \xi \leq \zeta) \quad (28)$$

$$u_1(\xi, \tau) = u(\alpha \xi, \alpha \tau), \quad (0 \leq \xi \leq \zeta) \quad (29)$$

где  $\omega_1$  и  $u_1$  – приведенная концентрация  $\text{CO}_2$  и использованная доля ресурса хемосорбента в первой части патрона,  $\alpha \approx 0,5$ , т.к. скорость фильтрации через короткую часть патрона при одинаковой продолжительности выдоха и вдоха примерно вдвое выше, чем в неразрезанном патроне.

Аналогично, с помощью (14), (18) получены  $\omega$  и  $u$  во второй части патрона

$$\omega_2(\xi, \tau) = \omega(\gamma(\xi - \zeta), \gamma \tau), \quad (\zeta < \xi \leq \eta) \quad (30)$$

$$u_2(\xi, \tau) = u(\gamma(\xi - \zeta), \gamma \tau), \quad (\zeta < \xi \leq \eta) \quad (31)$$

где  $\gamma > 1$  учитывает замедление воздушного потока во второй части патрона и зависит от демпфирования скачков скорости в неразрезанном патроне.

В качестве граничного условия в (18) при реализации (30), (31) должен фигурировать проскок через первую часть патрона

$$\omega(0, \tau) = \omega_1(\zeta, \tau) = \omega_0(\alpha \zeta, \alpha \tau), \quad (32)$$

при этом

$$f_0(\tau) = \omega_1(\zeta, \tau) \cdot e^\tau. \quad (33)$$

Для проведения численных экспериментов полученные при наличии скачка скорости зависимости (28) – (31) были сшиты функциями Хевисайда

$$\tilde{\omega}(\xi, \tau) = \omega_1(\xi, \tau)\theta(\zeta - \xi) + \omega_2(\xi, \tau)\theta(\xi - \zeta), \quad (\zeta < \xi \leq \eta) \quad (34)$$

$$\tilde{u}(\xi, \tau) = u_1(\xi, \tau)\theta(\zeta - \xi) + u_2(\xi, \tau)\theta(\xi - \zeta). \quad (\zeta < \xi \leq \eta) \quad (35)$$

Вычисления по формулам (34), (35) выполнялись в среде пакета MathCAD. Результаты расчетов (таблица 1) подтверждают эффективность моделируемой конструкции воздухопроводной части и допускают разумную интерпретацию.

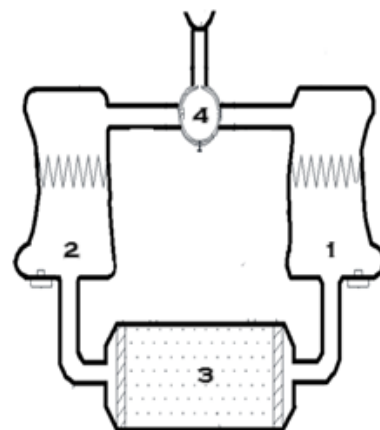
Таблица 1 – Результаты численных экспериментов

| $\varepsilon$ | $\zeta$ | $\partial u_0(0, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}$ | $\partial \tilde{u}(0, \tau) / \partial \tau _{\tau=0} = \partial \tilde{u}(\zeta, \tau) / \partial \tau _{\tau=0}$ | $\tilde{u}(\tau_k) / \bar{u}_0(\tau_k)$ |
|---------------|---------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1,4           | 0,723   | 1                                                 | 0,762                                                                                                               | 1,065                                   |
| 1,6           | 0,794   | 1                                                 | 0,677                                                                                                               | 1.029                                   |
| 1,8           | 0,856   | 1                                                 | 0,611                                                                                                               | 0,993                                   |

Видно (2-й столбец таблицы), что  $\zeta$  тем больше, чем значительнее характеризуемое  $\varepsilon$  демпфирование скорости в неразрезанном патроне. Это приводит к большему увеличению скорости фильтрации через первую часть патрона и возрастанию через нее проскока  $\text{CO}_2$ . Поэтому, чтобы не допустить спекания гранул на входе во вторую часть патрона, длину первой части нужно увеличивать. Использование ресурса мертвого слоя при этом снижается (5-й столбец таблицы), ибо, при значительном демпфировании скачков скорости фильтрации в однородном патроне, течение воздуха мало отличается от равномерного, имеющего место во второй части патрона. В частности, для  $\varepsilon = 1,6$  в патроне со скачком скорости фильтрации тепловая мощность процесса в лобовых (наиболее подверженных спеканию) слоях кислородсодержащего продукта снижается на 32,3 % (4-й столбец таблицы). При этом до 2,9 % (5-й столбец таблицы) возрастает использование защитного ресурса регенеративного патрона, характеризуемое его средней (по координате) отработкой  $\tilde{u}(\tau_k)$  к моменту наступления

критического проскока  $\text{CO}_2$ . Для  $\varepsilon = 1,4$  эти показатели равны 23,8 % и 6,5 % соответственно.

В следующем изобретении реализован реверс воздушного потока в аппарате с круговой схемой воздухопроводной части. Принципиальное отличие такого технического решения (рисунок 8) от аппарата с маятниковой схемой воздухопроводной части – отсутствие вредного пространства, занятого воздухом, который возвращается на вдох, так и не вступив в контакт с невыработанной частью регенеративного патрона. Подпружинивание мешков выдоха 1 и вдоха 2 демпфирует скачки давления и снижает сопротивление дыханию.

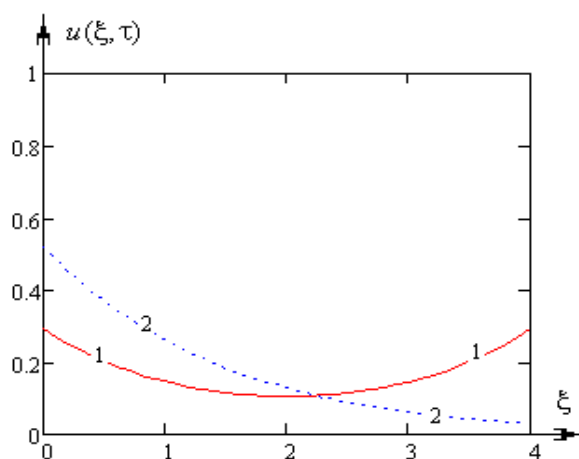


**Рисунок 8 – Дыхательный аппарат с реверсом воздушного потока**

Мощность источников экзотермического тепла максимальна на входе в регенеративный патрон 3 в начале работы дыхательного аппарата. В результате послойного спекания гранул реальный срок защитного действия на 37 – 67 % ниже теоретического<sup>6</sup>. Поэтому реверс нужно совершать переключателем 4 в момент  $\tau_1$ , когда ресурс лобового слоя выработан не более, чем на треть. С помощью (29) из условия  $u_1(0, \tau_1) = 0.33$  получено  $\tau_1 = 0.4$ , что соответствует 8.3 минутам, ибо, согласно источнику в сноске 6,  $\beta\gamma = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . В этот момент  $\omega_1(4, \tau_1) = 0.053$  (см. (19)). Значение  $\eta = 4$  использовано, чтобы спекание гранул не усугубляло проблему и без того низкой эффективности аппарата с небольшим защитным сроком. Изложенное приводит к задаче динамики сорбции (14) – (18) с начальной загрязненностью, получаемой из (20) заменой  $\xi \rightarrow \eta - \xi$

$$u(\xi, 0) = u_1(\eta - \xi, \tau_1) = 1 - e^{-\tau_1} \left( 1 + e^{-\eta + \xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\eta - \xi)^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau_1^k}{k!} \right).$$

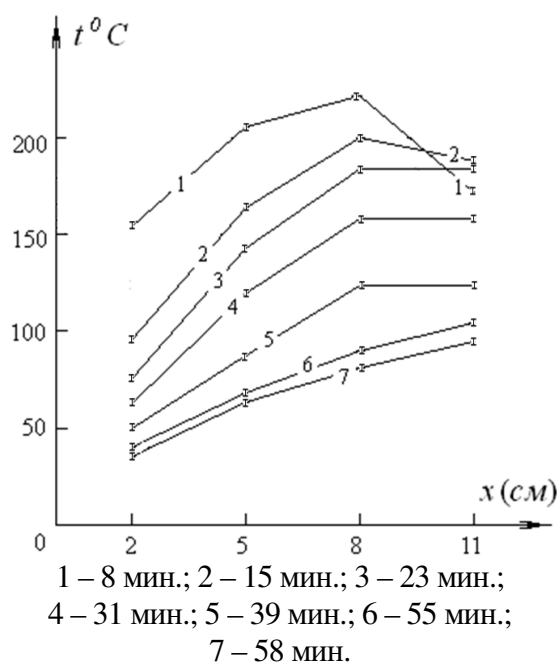
Результаты выполненных численных экспериментов представлены на рисунке 9. Видно, что через промежуток времени  $\tau - \tau_1 = 0.335$  после реверса воздушного потока загрязненность краев регенеративного патрона выравнивается и оказывается на 43.8 % ниже, чем на входе в патрон, работающий без реверса, что предотвратит спекание гранул хемосорбента.



1 – после реверса воздушного потока ( $\tau_1 = 0.4$ ); 2 – в отсутствии реверса

**Рисунок 9 – Оработка регенеративного патрона в момент времени  $\tau = 0.735$**

<sup>6</sup> Ехилевский, С. Г. Повышение ресурса дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.26.01 / Ехилевский Степан Григорьевич. – Днепропетровск, 2002. – 36 с.

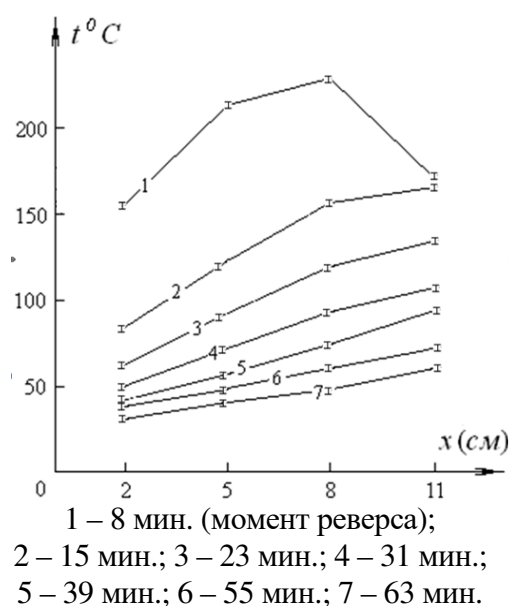


**Рисунок 10 – Зависимость температуры хемосорбента от времени и координаты**

700. Видно, что в начале работы аппарата быстрый рост температуры происходит в лобовом слое продукта, где максимальный концентрационный напор сочетается с еще незадействованным поглотительным ресурсом хемосорбента. Затем процесс экзотермической хемосорбции смещается вглубь регенеративного патрона. Причина в частичной регенерации воздуха в предыдущих слоях и частичной отработке замыкающих слоев. И то, и другое снижает скорость хемосорбции в замыкающих слоях, а значит и выделение в них экзотермического тепла. Измерения завершены на 58 минуте в момент критического проскока  $\text{CO}_2$ .

При проведении сопоставительных испытаний (рисунок 11), реверс (по итогам численных экспериментов) 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 10 и 11). Причина в расширении работающего слоя сорбента и включении в теплосъем практически всей поверхности регенеративного патрона. И самое важное: срок защитного действия противогаса (без изменения количества хими-

Для проведения натурных экспериментов (рисунок 10) использовались регенеративные патроны РП-7 от изолирующего средства индивидуальной защиты органов дыхания на химически связанном кислороде ИП-4МК. Для имитации дыхания с помощью компрессорной установки на вход патрона подавалась воздушная смесь с 4 % углекислого газа. В отсутствии реверса, полученный в численном эксперименте срок защитного действия (56 минут) обеспечивался при объемном расходе воздуха 40 л/мин. Температурный режим процесса хемосорбции  $\text{CO}_2$  отслеживался на поверхности регенеративного патрона инфракрасным прибором Ada instruments TemPro



**Рисунок 11 – Зависимость температуры регенеративного патрона от времени и координаты при наличии реверса воздушного потока**

чески связанного кислорода) увеличился на 8,6 %. Причина – предотвращение спекания гранул в результате смягчения температурного режима регенеративного патрона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научно-техническая задача увеличения защитного действия изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде, что достигнуто внесением изменений в конструкцию воздухопроводной части и привело к более эффективному использованию ресурса регенеративного патрона.

### Основные научные результаты диссертации

1. На примере уравнения диффузии реализован и успешно протестирован теоретико-вероятностный подход к решению уравнений математической физики, описывающих случайные процессы молекулярной природы [8]. Для моделирования динамической сорбционной активности теоретико-вероятностный подход обобщен на случай больших времен, что позволило выделить нормальную асимптотику проскока углекислого газа через регенеративный патрон и определить поправки к ней, обусловленные асимметриями и эксцессами случайной координаты элементарного акта хемосорбции молекулы  $\text{CO}_2$  [3, 12, 15]. В результате возрастает скорость численных экспериментов с новыми конструкциями дыхательных аппаратов.

2. Математическая модель регенерации воздуха в изолирующем дыхательном аппарате обобщена на случай неоднородной начальной загрязненности регенеративного патрона и переменной концентрации  $\text{CO}_2$  на входе в патрон [1, 10], что позволило моделировать динамику сорбции после реверса воздушного потока или изменения режима работы дыхательного аппарата [2, 9, 11]. В частности показано, что трехкратное снижение объемного расхода воздуха после достижения критического проскока  $\text{CO}_2$  вдвое увеличивает срок эксплуатации самоспасателя с 1 кг надпероксида калия и на 28 % повышает использование его защитного ресурса.

3. Предложена математическая модель [4, 13] дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с круго-маятниковой схемой воздухопроводной части [18]. Показано, что внесение изменений в конструкцию самоспасателя, в зависимости от величины защитного ресурса, на 10,6 % – 26,4 % повышает эффективность его использования за счет уменьшения мертвого слоя сорбента и объема вредного пространства.

4. Предложена математическая модель процесса регенерации воздуха в дыхательном аппарате на химически связанном кислороде с неравномерной скоростью фильтрации выдоха через регенеративный патрон [5, 14]. С помо-

щью численных экспериментов определена оптимальная для предотвращения спекания гранул координата скачка скорости фильтрации воздушного потока. В зависимости от величины демпфирования давления на выдохе и вдохе для респиратора РХС определен прирост защитного действия аппарата (до 6,5 %) и снижение мощности источников экзотермического тепла (от 23,8 % до 32,3 %) в лобовых слоях кислородсодержащего продукта.

5. Предложен формализм [6, 16], позволяющий моделировать работу изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с круговой схемой воздухопроводной части после реверса воздушного потока [19]. Реверс обеспечивает более равномерное распределение источников экзотермического тепла в регенеративном патроне (загрязненность его краев выравнивается и оказывается на 43,8 % ниже, чем на входе в патрон, работающий без реверса). Это предотвращает спекание гранул кислородсодержащего продукта и по результатам натурных сопоставительных испытаний на 8,6 % увеличивает срок защитного действия аппарата [7, 17].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты могут использоваться для расчетов основных параметров регенеративных патронов при создании новых и модернизации существующих изолирующих средств защиты дыхания на химически связанном кислороде для работников топливной, химической и горнодобывающей промышленности, а также для спасателей МЧС, пожарных и военных.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в научных изданиях, включенных в перечень ВАК**

1. Ехилевский, С. Г. Влияние начальной загрязненности регенеративного патрона на работу шахтного респиратора на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 37–43.

2. Ехилевский, С. Г. Моделирование рабочего процесса дыхательного аппарата на химически связанном кислороде после изменения режима его эксплуатации / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко, О. В. Голубева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 35–41.

3. Ехилевский, С. Г. Теоретико-вероятностный подход к моделированию респиратора на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 7–15.

4. Ехилевский, С. Г. Моделирование дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с кругомаятниковой схемой воздухопроводной части / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 46–52.

5. Ехилевский, С. Г. Оптимизация теплового режима изолирующего дыхательного аппарата на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 101–109.

6. Ехилевский, С. Г. Реверс воздушного потока в дыхательном аппарате на химически связанном кислороде с круговой схемой воздухопроводной части / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 11. – С. 57–62.

7. Ехилевский, С. Г. Повышение использования защитного ресурса изолирующего противогаза в результате реверса потока регенерируемого воздуха / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2024. – № 1. – С. 57–66.

### **Статьи в рецензируемых научных изданиях**

8. Теоретико-вероятностный подход к решению уравнения диффузии / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко, С. А. Ольшанников // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2015. – № 4. – С. 94–105.

## **Статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций**

9. Ехилевский, С. Г. Моделирование рабочего процесса дыхательного аппарата на химически связанном кислороде после изменения режима его эксплуатации / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Проблемы и перспективы развития науки в начале третьего тысячелетия в странах СНГ : материалы XXI Международ. науч.-практ. конф., Переяслав-Хмельницкий, 30–31 марта 2014 г. / Переяслав-Хмельниц. гос. пед. ун-т ; редкол.: В. П. Коцур (гл. ред.) [и др.]. – Переяслав-Хмельницкий, 2014. – С. 107–111.

10. Ехилевский, С. Г. Влияние начальной загрязненности фильтра на динамику сорбции вредной примеси / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Международ. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию Белорус. гос. аграр. техн. ун-та и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ), д-ра техн. наук, проф. В. П. Суслова, Минск, 4–6 июня 2014 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т, Респ. объедин. «Белагросервис» ; под общ. ред. И. Н. Шило, Н. А. Лабушева ; редкол.: В. П. Миклуш (науч. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 468–473.

11. Potapenko, E. Imitation of the breathing apparatus operation on chemically bonded oxygen after the changes in its operation mode / E. Potapenko, S. Alshanikau, S. Ekhilevskiy // European and national dimension in research : materials of VII Junior Researchers' Conf., Novopolotsk, 29–30 April 2015 : in 3 pts. / Polotsk State Univ. ; publ. board: D. Lazouski (chairperson) [et al.]. – Novopolotsk, 2015. – Pt. 3 : Technology. – P. 158–162.

12. Ехилевский, С. Г. Моделирование респиратора на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Проблемы и перспективы развития современной науки в странах Европы и Азии : материалы XXVIII Международ. науч.-практ. интернет-конф., Переяслав, 30 апр. 2020 г. / Ун-т Г. Сковороды ; редкол. : В. П. Коцур (гл. ред.) [и др.]. – Переяслав, 2020. – С. 77–81.

13. Ехилевский, С. Г. Исследование хемосорбции дыхательного аппарата на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. XII Международ. науч.-практ. конф., г. Пенза, 5 июня 2020 г. : в 3 ч. / Международ. центр науч. сотрудничества «Наука и просвещение» ; отв. ред. Г. Ю. Гуляев. – Пенза, 2020. – Ч. 1. – С. 61–66.

14. Ехилевский, С. Г. Совершенствование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде / С. Г. Ехилевский, Е. П. Потапенко // Инновационное развитие современной науки: актуальные вопросы теории и практики : сб. ст. Международ. науч.-практ. конф., Пенза, 12 апр. 2021 г. /

Междунар. центр науч. сотрудничества «Наука и Просвещение» ; отв. ред. Г. Ю. Гуляев. – Пенза, 2021. – С. 46–52.

15. Ехилевский, С. Г. Теоретико-вероятностный подход к моделированию динамики хемосорбции CO<sub>2</sub> / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : I Междунар. форум, Санкт-Петербург, 10–11 нояб. 2021 г. : сб. тез. докл. / С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосм. приборостроения. – СПб., 2021. – С. 191–194.

16. Потапенко, Е. П. Реверс воздушного потока в дыхательном аппарате на химически связанном кислороде с круговой схемой воздухопроводной части / Е. П. Потапенко, О. В. Голубева // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 10 июня 2023 г. / Междунар. центр науч. сотрудничества «Наука и Просвещение» ; отв. ред. Г. Ю. Гуляев. – Пенза, 2023. – С. 31–36.

17. Потапенко, Е. П. Натурные сопоставительные испытания дыхательного аппарата на химически связанном кислороде с реверсом воздушного потока / Е. П. Потапенко, О. В. Голубева // Актуальные научные исследования : сб. ст. XXI Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 10 сент. 2024 г. / Междунар. центр науч. сотрудничества «Наука и Просвещение» ; отв. ред. Г. Ю. Гуляев. – Пенза, 2024. – С. 21–23.

#### **Авторские свидетельства, патенты**

18. Полезная модель ВУ 9807, МПК А62В 7/08 (2006.01). Регенеративный дыхательный аппарат : № 20130467 : заявлено 03.06.2013 : опубл. 30.12.2013 / Олышаников С. А., Ехилевский С. Г., Потапенко Е. П. ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – 4 с.

19. Патент ВУ 24003, МПК А62В 7/08 (2006.01). Регенеративный дыхательный аппарат : № 20200317 : заявлено 16.11.2020 : опубл. 30.04.2023 / Ехилевский С. Г., Потапенко Е. П. ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – 4 с.

## РЭЗЮМЭ

Патапенка Яўген Паўлавіч

### Павелічэнне ахоўнага дзеяння дыхальнага апарата на хімічна звязаным кіслародзе зменай канструкцыі яго паветраводнай часткі

**Ключавыя словы:** ізалявальны дыхальны апарат, рэгенератыўны патрон, кіслародзмяшчальны прадукт, экзатэрмічная хемасорбцыя, мёртвы пласт сарбенту, канструкцыя паветраводнай часткі.

**Мэта даследавання:** павелічэнне ахоўнага дзеяння дыхальнага апарата на хімічна злучаным кіслародзе зменай канструкцыі яго паветраводнай часткі.

**Метады даследавання і апаратура:** тэхнічныя рашэнні, матэматычнае і камп'ютарнае мадэляванне, лікавыя і натурныя эксперыменты, камп'ютар, газавы аналізатар, электронны тэрмометр.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** На прыкладзе раўнання дыфузіі рэалізаваны і паспяхова пратэставаны тэарэтыка-імавернасны падыход да рашэння раўнанняў матэматычнай фізікі, якія апісваюць выпадковыя працэсы малекулярнай прыроды.

Тэарэтыка-імавернасны падыход да мадэлявання дынамічнай сарбцыйнай актыўнасці абагульнены на выпадак вялікіх часоў, што дазволіла вылучыць нармальную асімптатыку праскоку  $\text{CO}_2$  і вызначыць папраўкі да яе, абумоўленыя асіметрыямі і эксцэсамі вышэйшых парадкаў.

Суадносіны матэматычнай мадэлі рэгенерацыі паветра ў ізалявальным дыхальным апарате абагульнены на выпадак неаднароднай пачатковай забруджанасці рэгенератыўнага патрона і зменнай канцэнтрацыі  $\text{CO}_2$  на ўваходзе ў патрон, што дазволіла мадэляваць дынаміку сорбцыі пасля рэверсу паветранага струменя або змены рэжыму працы апарата.

Пабудаваны матэматычныя мадэлі дыхальных апаратаў на хімічна звязаным кіслародзе з круга-маятнікавай схемай паветраводнай часткі, нераўнамернай хуткасцю фільтрацыі выдыху праз рэгенератыўны патрон, з кругавой схемай паветраводнай часткі пасля рэверсу паветранага патоку. Паказана, што занясенне змен у канструкцыю паветраводнай часткі павялічвае эфектыўнасць выкарыстання ахоўнага рэсурсу апарата, прадухіляе спяканне кіслародзмяшчальнага прадукта, памяншае яго мёртвы пласт і аб'ём шкоднай прасторы ў маятнікавай схеме.

**Ступень выкарыстання або рэкамендацыі па выкарыстанні.** Змяненні канструкцыі паветраводнай часткі дыхальных апаратаў на хімічна звязаным кіслародзе абаронены патэнтамі і прыняты да ўкаранення аварыйна-дыспетчарскай службай Вытворчага Упраўлення "Полацкгаз".

**Вобласць прымянення.** Стварэнне і мадэрнізацыя ізаляваных дыхальных апаратаў на хімічна звязаным кіслародзе.

## РЕЗЮМЕ

Потапенко Евгений Павлович

### Увеличение защитного действия дыхательного аппарата на химически связанном кислороде изменением конструкции его воздуховодной части

**Ключевые слова:** изолирующий дыхательный аппарат, регенеративный патрон, кислородсодержащий продукт, экзотермическая хемосорбция, мертвый слой сорбента, конструкция воздуховодной части.

**Цель исследования:** увеличение защитного действия дыхательного аппарата на химически связанном кислороде изменением конструкции его воздуховодной части.

**Методы исследования и аппаратура:** технические решения, математическое и компьютерное моделирование, численные и натурные эксперименты, компьютер, газовый анализатор, электронный термометр.

**Полученные результаты и их новизна.** На примере уравнения диффузии реализован и успешно протестирован теоретико-вероятностный подход к решению уравнений математической физики, описывающих случайные процессы молекулярной природы.

Теоретико-вероятностный подход к моделированию динамической сорбционной активности обобщен на случай больших времен, что позволило выделить нормальную асимптотику проскока  $\text{CO}_2$  и определить поправки к ней, обусловленные асимметриями и эксцессами высших порядков.

Соотношения математической модели регенерации воздуха в изолирующем дыхательном аппарате обобщены на случай неоднородной начальной загрязненности регенеративного патрона и переменной концентрации  $\text{CO}_2$  на входе в патрон, что позволило моделировать динамику сорбции после реверса воздушного потока или изменения режима работы аппарата.

Построены математические модели дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде с круго-маятниковой схемой воздуховодной части, неравномерной скоростью фильтрации выдоха через регенеративный патрон, с круговой схемой воздуховодной части после реверса воздушного потока. Показано, что внесение изменений в конструкцию воздуховодной части повышает эффективность использования защитного ресурса аппарата, предотвращает спекание кислородсодержащего продукта, уменьшает его мертвый слой и объем вредного пространства в маятниковой схеме.

**Степень использования или рекомендации по использованию.** Изменения конструкции воздуховодной части дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде защищены патентами и приняты ко внедрению аварийно-диспетчерской службой Производственного Управления «Полоцкгаз».

**Область применения.** Создание и модернизация изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде.

## SUMMARY

Potapenko Evgeny Pavlovich

### **Change in the design of the air duct part of the respirator on chemically bound oxygen to increase its protective effect**

**Keywords:** insulating breathing apparatus, regenerative cartridge, oxygen-containing product, exothermic chemisorption, dead sorbent layer, airway part structure.

**The purpose of the study:** increasing protective action of respiratory apparatus on chemically bound oxygen by changing the design of its air duct part.

**Research methods and apparatus:** technical solutions, mathematical and computer modeling, numerical and natural experiments, computer, gas analyzer, electronic thermometer.

**The results obtained and their novelty.** Using the diffusion equation as an example, a probability-theoretic approach to solving equations of mathematical physics describing random processes of molecular nature has been implemented and successfully tested.

The probability-theoretic approach to modeling dynamic sorption activity is generalized to the case of long times, which made it possible to isolate the normal asymptotic behavior of CO<sub>2</sub> breakthrough and determine corrections to it due to asymmetries and excesses of higher orders.

The relations of the mathematical model of air regeneration in the isolating respiratory apparatus are generalized to the case of inhomogeneous initial contamination of the regenerative cartridge and variable concentration of CO<sub>2</sub> at the inlet to the cartridge, which made it possible to simulate the dynamics of sorption after the reverse of the air flow or changes in the operating mode of the apparatus.

Mathematical models of breathing apparatus based on chemically bound oxygen with a round-pendulum design of the air duct part, an uneven rate of exhalation filtration through a regenerative cartridge, with a circular design of the air duct part after reversing the air flow were built. It is shown that introduction of changes in the design of the air duct part increases efficiency of using the protective resource of the apparatus, prevents sintering of the oxygen-containing product, reduces its dead layer and the volume of harmful space in the pendulum circuit.

**The utilization or recommendation for use.** Changes in the design of the air duct part of breathing apparatus using chemically bound oxygen are protected by patents and accepted for implementation by the emergency dispatch service of the Polotskgas Production Directorate.

**Sphere of application.** Establishment and modernization contained breathing apparatus on chemical oxygen.

*Научное издание*

ПОТАПЕНКО Евгений Павлович

**УВЕЛИЧЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЫХАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ  
ИЗМЕНЕНИЕМ КОНСТРУКЦИИ ЕГО ВОЗДУХОВОДНОЙ ЧАСТИ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.26.0 – охрана труда  
(топливная и химическая промышленность)

---

Подписано в печать 17.04.25. Формат 60×84 1/16. Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,32. Тираж 80 экз. Заказ 152.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.

