

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В РЕГЕНЕРАТИВНОМ ПАТРОНЕ ИЗОЛИРУЮЩЕГО ДЫХАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С.Б. Путин¹, С.В. Гудков¹, Е.Н. Туголуков²,
Н.П. Козлова¹, С.Ю. Алексеев¹, А.Ю. Хромов¹

ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (1); кафедра «Техника и технологии машиностроительных производств», ГОУ ВПО «ТГТУ» (2)

Представлена членом редколлегии профессором С.И. Дворецким

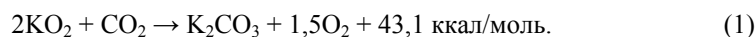
Ключевые слова и фразы: газоздушная смесь; изолирующий дыхательный аппарат; регенеративный патрон; регенерация воздуха.

Аннотация: Описаны исследования зависимости между состоянием температурного фронта экзотермических реакций, протекающих в регенеративном патроне, и выходом целевых продуктов этих реакций, а также распределения газоздушного потока внутри регенеративного патрона. Для исследования процессов регенерации воздуха в дыхательных аппаратах на основе надпероксида калия были проведены испытания на установке «Искусственные легкие».

При возникновении ситуаций, приводящих к образованию атмосферы, не пригодной для дыхания (в результате аварий, пожаров, террористических актов и др.), для обеспечения жизнедеятельности людей используют изолирующие дыхательные аппараты, которые воспроизводят газовую смесь, пригодную для дыхания. Среди изолирующих устройств, обеспечивающих жизнедеятельность человека при малом содержании кислорода в атмосфере, наиболее часто используются самоспасатели на химически связанном кислороде, которые просты в эксплуатации, имеют малый вес и небольшие габариты по сравнению с другими аппаратами.

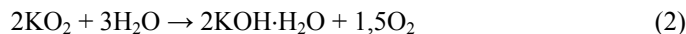
Изолирующие самоспасатели на химически связанном кислороде состоят из следующих составных частей: регенеративного патрона (РП), являющегося источником кислорода и одновременно поглотителем диоксида углерода, дыхательного мешка, представляющего собой эластичную емкость для накопления газоздушной смеси (ГВС), лицевой части (колпак, загубник, маска) и воздухопроводов. Наиболее ответственным узлом из вышеперечисленных составляющих, является регенеративный патрон. Упрощенно, он представляет собой металлическую обечайку, наполненную регенеративным продуктом – чаще всего надпероксидом калия (KO₂).

Использование надпероксида калия в системах регенерации воздуха, выдыхаемого человеком, основано на взаимодействии надпероксида с диоксидом углерода в присутствии влаги, сопровождающееся выделением эквивалентного количества кислорода [1]. В общем виде эта реакция может быть представлена уравнением

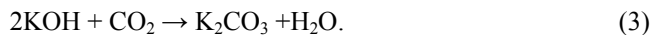


Реакция протекает с выделением значительного количества тепла.

В реальных условиях процесс регенерации может протекать в две стадии [2], при этом первичной стадией является взаимодействие водяного пара с надпероксидом калия с образованием гидроксида калия и его гидратов и выделением кислорода



и вторичной стадией – с образованием карбоната



Приведенные выше уравнения реакции не могут в полной мере отразить все возможные химические процессы, протекающие в аппарате при взаимодействии ГВС с регенеративным продуктом. Кроме того, протекание химических реакций необходимо рассматривать совместно с процессами адсорбции/десорбции и теплопереноса. В ходе экзотермической реакции в регенеративном патроне происходит локальное изменение агрегатного состояния регенеративного продукта и, как следствие, перераспределение газоздушных потоков.

Как указывалось выше, в ходе реакции выделяется большое количество тепла, часть которого рассеивается через наружную стенку регенеративного патрона, а часть расходуется на нагрев химического продукта, который в ряде случаев вызывает изменение агрегатного состояния вещества, его плавление, спекание и другие процессы. При проектировании изолирующего дыхательного аппарата ставится задача создания регенеративного патрона, обладающего высокой поглощательной способностью по диоксиду углерода и малой массой. Это достигается путем оптимизации конструкции регенеративного патрона, при которой необходимо учитывать все процессы, проходящие в нем, и влияния геометрии элементов корпуса на них.

Целью данной работы являлось исследование зависимости между состоянием температурного фронта экзотермических реакций, протекающих в регенеративном патроне, и выходом целевых продуктов этих реакций, а также изучение распределения газоздушного потока внутри регенеративного патрона.

Для исследования процессов регенерации воздуха в дыхательных аппаратах на основе надпероксида калия были проведены испытания регенеративных патронов на установке «Искусственные легкие» (ИЛ), которая имитирует внешнее дыхание человека.

ИЛ были настроены таким образом, что выдыхаемая из них ГВС проходила через регенеративный патрон в одном направлении вдоль оси РП. Испытания проводились при следующих условиях: легочная вентиляция – $35 \pm 1,75$ дм³/мин, глубина дыхания – $1,75 \pm 0,08$ дм³, частота пульсаций $n = 20 \pm 1$ мин⁻¹, объемный расход диоксида углерода – $1,575 \pm 0,08$ дм³/мин, концентрация CO₂ на входе в патрон – $4,5 \pm 0,2$ %. Этот режим аналогичен условиям проведения испытаний по Европейскому стандарту [3], но отличается тем, что ГВС из ИЛ проходила через РП прямо в атмосферу. В данной работе для снаряжения регенеративных патронов использовался продукт на основе надпероксида калия марки ОКЧ-3М, с фракцией гранул 3–4 мм и массой 1,4 кг. Для исключения спекания продуктов взаимодействия надпероксида калия с влагой и для улучшения циркуляции воздуха исходный продукт располагался в регенеративном патроне в четыре слоя, массой по 350 г, каждый из которых отделялся друг от друга сеткой из нержавеющей стали. Во избежание высыпания продукта металлические сетки также устанавливались в зоне входа и выхода ГВС. Время проведения испытаний 1 час 20 минут.

Для оценки фазового состава регенеративного продукта и характера протекания химической реакции в зависимости от времени проведения испытаний, реакция в патроне по истечении временного интервала в 10 мин останавливалась.

Так, например, первое испытание проводилось в течение 10 минут, потом реакция искусственно останавливалась, второе испытание проводилось 20 минут и т.д. Такая методика позволила наблюдать процесс отработки регенеративного продукта в динамике.

Для оценки протекания процессов регенерации воздуха, образцы кислородсодержащего продукта до и после проведения эксперимента исследовались методом количественного химического анализа, основанного на измерении массовых долей активного кислорода, перекисного кислорода, общей щелочности и диоксида углерода в исследуемых продуктах. Определение активного кислорода в регенеративном продукте основывалось на реакции надпероксида калия с водой, количество выделившегося в процессе реакции активного кислорода определялось гравиметрическим методом. Образовавшийся при разложении пероксид водорода определяли перманганатометрическим методом в сернокислой среде при температуре около 0 °С. Образовавшуюся в результате гидролиза щелочь оттитровывали раствором серной или соляной кислоты. Для определения количества поглощенного диоксида углерода, образовавшиеся карбонаты разлагали соляной кислотой, после чего выделившийся диоксид углерода определяли объемным методом. В результате пересчета полученных данных рассчитывали массовую долю надпероксида, пероксида, карбоната и гидроксида калия.

Для изучения особенностей распределения газовой воздушной смеси по объему патрона и характера протекания химических реакций образцы для исследований отбирались из центральной и боковой части каждого рабочего слоя. Основными критериями оценки свойств регенеративных продуктов на данном этапе исследовательской работы являлось содержание активного кислорода и диоксида углерода в отработанных продуктах реакции. Считалось, что чем ниже содержание активного кислорода и чем выше содержание диоксида углерода в отобранном для анализа слое продукта, тем интенсивнее проходила в нем реакция регенерации.

Помимо основной цели испытаний – определения состава отработанного продукта, снимались температурные кривые каждого из четырех слоев за время работы регенеративного патрона – 80 минут, которые также характеризуют интенсивность протекания реакции регенерации. Испытания показали, что регенеративный продукт плавится, и это при горизонтальном расположении РП приводит к частичному стеканию продукта вдоль разделительной сетки. Изучение регенеративного продукта после испытаний показало, что плавление начинается с центральной области и распределяется радиально. Нижняя часть регенеративного продукта преимущественно была расплавлена больше, чем верхняя, что привело к образованию воздушных каналов в нижней части РП вдоль оси и проскоку значительной части ГВС. В результате плавления нижней части регенеративного продукта в слое, увеличивается его поглотительная способность по диоксиду углерода, верхняя часть, наоборот, может быть не отработана полностью, так как в химическую реакцию вступает только поверхность гранул регенеративного продукта. В связи с трудностью извлечения термопар при отборе проб регенеративного продукта, термопары извлекались из регенеративного патрона до того, как расплавленный регенеративный продукт застынет в области замера температуры. Время извлечения определялось по достижению пика и снижению температуры.

По результатам анализа твердой фазы регенеративного продукта получены кривые изменения состава надпероксида калия в зависимости от времени протекания химической реакции. Типовые результаты испытаний представлены на рис. 1, 2. По оси абсцисс отложено время испытаний, в данном случае 80 минут. По оси ординат – содержание в продукте целевого компонента. На рис. 1 показано содержание остаточного кислорода и поглощенного диоксида углерода в центральной части регенеративного слоя, на рис. 2 показано содержание остаточного кислорода и поглощенного диоксида углерода в боковой части.

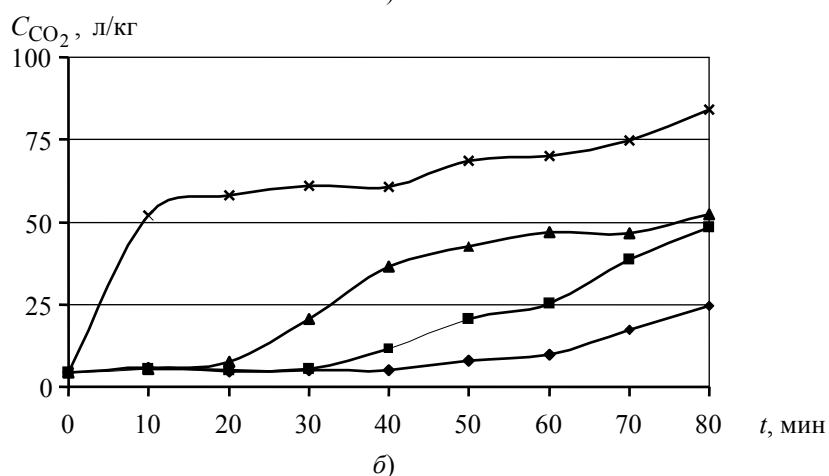
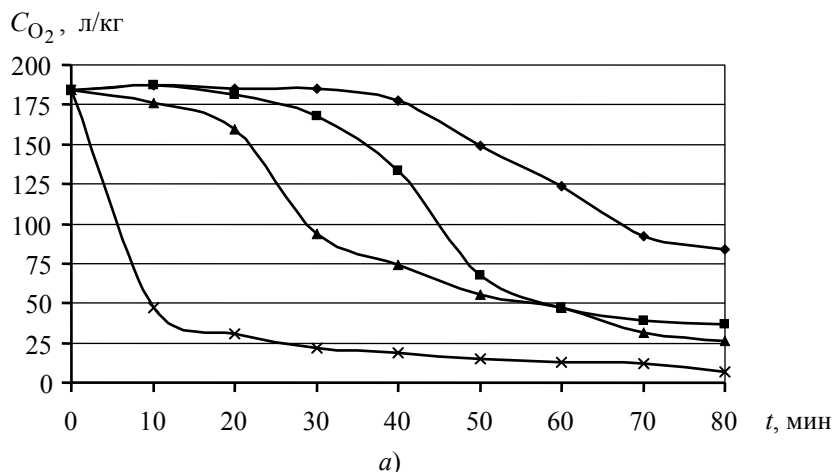


Рис. 1. Содержание кислорода (а) и диоксида углерода (б) в центре слоя:
 × – слой 1; ▲ – слой 2; ■ – слой 3; ◆ – слой 4

По результатам проведенных исследований установлено, что процесс регенерации наиболее интенсивно идет в первом лобовом слое, где количество поглощенного диоксида углерода и остаточного кислорода практически одинаково для центральной и боковой частей слоя, что говорит о равномерном распределении газовой воздушной смеси по всему слою и равномерном характере протекания химических реакций. В начальный момент регенеративный продукт, находящийся в центральной части первого слоя, поглощает большую часть диоксида углерода и влаги, обрабатывается быстрее и в результате разогрева спекается, тем самым создавая сопротивление дальнейшему прохождению ГВС. Поэтому прохождение потока через следующие слои регенеративного продукта происходит преимущественно вдоль стенок РП. Данное предположение подтверждается на рис. 1, 2 где видно, что содержание остаточного кислорода в боковых частях третьих и четвертых слоев патрона меньше, а содержание диоксида углерода больше, чем в центральных.

По результатам испытаний были рассчитаны усредненные результаты температуры слоя регенеративного продукта и построена зависимость температуры слоев регенеративного продукта от времени испытания (рис. 3).

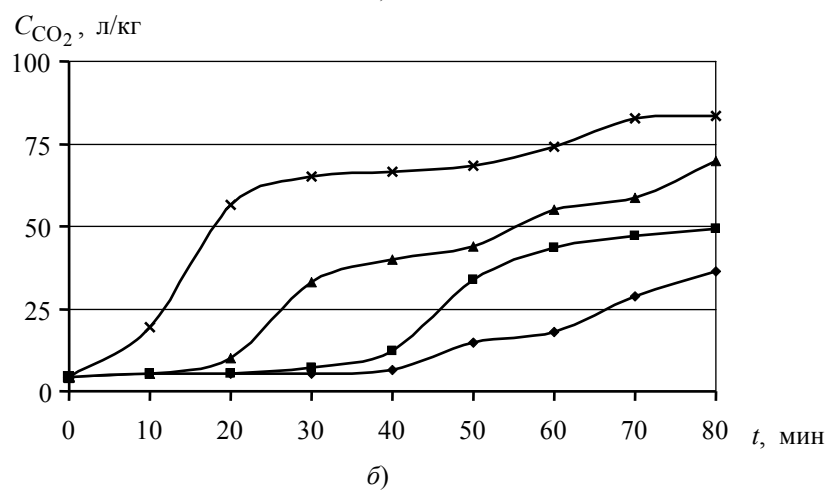
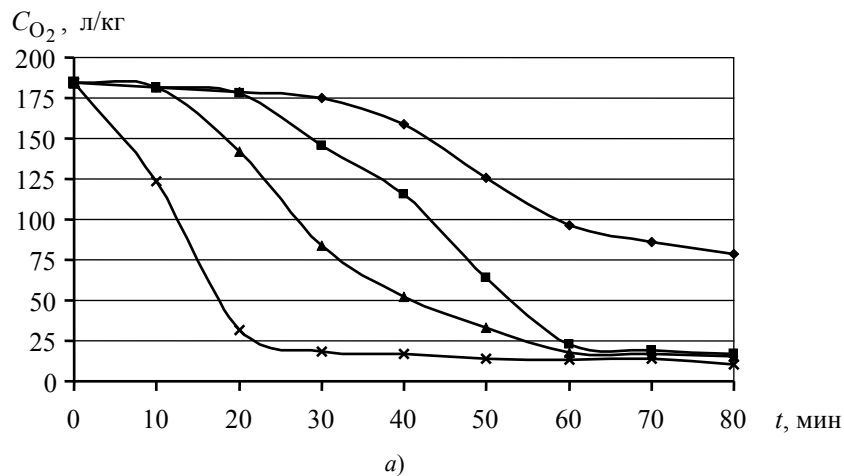


Рис. 2. Содержание кислорода (а) и диоксида углерода (б) в пристеночных областях:
 × – слой 1; ▲ – слой 2; ■ – слой 3; ◆ – слой 4

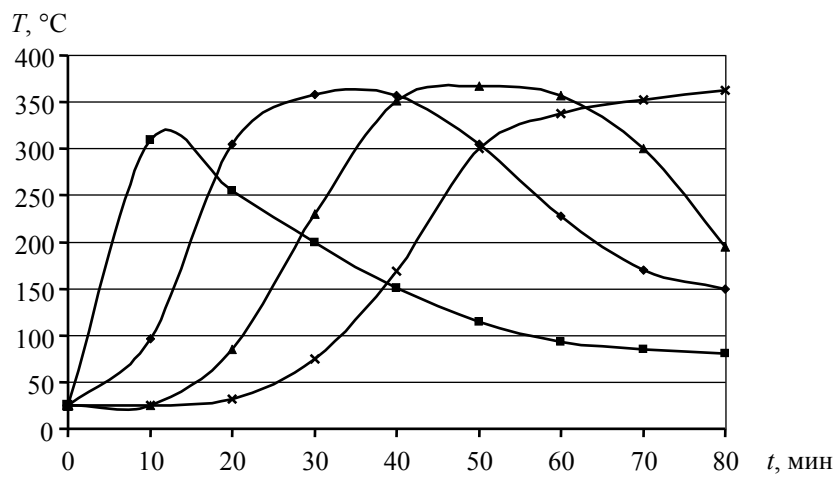


Рис. 3. Зависимость температуры слоя от продолжительности испытания:
 ■ – слой 1; ◆ – слой 2; ▲ – слой 3; × – слой 4

Сопоставив рис. 1 и 2 с рис. 3, можно заметить, что для каждого слоя интенсивное поглощение диоксида углерода (см. рис. 1, б, 2, б) и выделение кислорода (см. рис. 1, а, 2, а) происходит в период максимального значения температуры (см. рис. 3). Таким образом, для данного случая наблюдается корреляция между процессами тепловыделения и массопереноса.

Смещение пиковых значений температур во времени относительно интенсивности поглощения и выделения газов объясняется образованием зон со спекшимся регенеративным продуктом или расплавом с пустотами, которые препятствуют равномерному распределению газовой смеси по сечению регенеративного патрона и смещению фронта реакции к какой-либо из его сторон.

В результате проведенных экспериментальных исследований процессов хемосорбции, протекающих в регенеративном патроне, получены зависимости изменения концентраций диоксида углерода и кислорода во времени по длине зоны реакции. Показано, что в первоначальный момент времени первый регенеративный слой продукта обрабатывает одинаково по всей площади поверхности, но с увеличением времени проведения реакции процесс хемосорбции смещается к боковой части РП и только к концу времени прохождения реакции начинают обрабатывать центральные части слоев регенеративного продукта. Таким образом, полученные зависимости дают представления о ходе прохождения процесса регенерации воздуха, а определение концентраций остаточного кислорода и поглощенного диоксида углерода – о времени проведения процесса хемосорбции.

Разработанный подход к изучению процессов регенерации, описанный в данной работе, может быть в дальнейшем использован для оптимизации конструкции регенеративных патронов.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ 06-07-89008.

Список литературы

1. Вольнов, И.И. Перекисные соединения щелочных металлов / И.И. Вольнов. – М. : Наука, 1980. – 80 с.
2. Мельников, А.Х. Исследование взаимодействия надперекиси калия с водяным паром и углекислым газом / А.Х. Мельников, Т.П. Фирсова, А.Н. Молодкина // Журн. неорган. химии. – 1962. – Т. 6. – С. 1229.
3. EN 13794:2002 Respiratory protective devices – Self-contained closed-circuit breathing apparatus for escape – Requirements, testing, marking, 2002.

Experimental Research into Process of Air Regeneration in Regenerative Canister of Insulating Respirator

S.B. Putin¹, S.V. Gudkov¹, E.N. Tugolukov², N.P. Kozlova¹,
S.Yu. Alekseev¹, A.Yu. Khromov¹

*“Corporation Roskhimzashchita” plc (1),
Department “Equipment and Technologies of Engineering”, TSTU (2)*

Key words and phrases: air regeneration; gas-and-air mixture; insulating respirator; regenerative canister.

Abstract: Research into dependencies between the condition of temperature front of exothermic reactions taking place in regenerative canister and the yield of target products of these reactions is presented; the spread of gas-air flow inside regenerative canister is examined. In order to study the processes of air regeneration in respirators on the basis of potassium peroxide the tests on the device "Artificial lungs" have been carried out.

Experimentale Forschungen des Prozesses der Regeneration der Luft in der Regenerativpatrone des isolierenden Atmungsapparates

Zusammenfassung: Es sind die Forschungen der Abhängigkeit zwischen dem Zustand der Temperaturfront der in der Regenerativpatrone verlaufenden exothermischen Reaktionen und dem Ausgang der zweckbestimmten Produkte dieser Reaktionen, und auch das Studium der Verteilung des Gas-Luft-Stroms innerhalb der Regenerativpatrone beschrieben. Für die Forschung der Prozesse der Regeneration der Luft in den Atmungsapparaten wurden aufgrund des Kaliumhyperoxid die Tests auf der Anlage «Künstliche Lungen» durchgeführt.

Etudes expérimentales du processus de la régénération de l'air dans un mandrin régénératif d'un appareil isolant d'aspiration

Résumé: Sont décrites les dépendances entre les états du front de température des réactions exothermiques se déroulant dans un mandrin régénératif et la sortie des produits de but de ces réactions, ainsi que l'étude de la répartition du courant à l'intérieur du mandrin régénératif. Pour les études des processus de la régénération de l'air dans les appareils d'aspiration à la base de surperoxyde du potassium sont réalisés les essais sur une installation «Poumons artificiels».
