

УДК 532.546, 614.894

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЙ РЕСПИРАТОР НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

© 2022 г. Н. А. Луценко^{1,2,*}, С. С. Фецов^{1,2,**}

Представлено академиком РАН Ю.Н. Кульчиным 21.04.2022 г.

Поступило 21.04.2022 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принято к публикации 10.08.2022 г.

Для защиты органов дыхания от опасно высоких температур вдыхаемого воздуха при пожарах и иных чрезвычайных ситуациях предложено использовать теплозащитные респираторы на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами. Посредством численного эксперимента продемонстрирована возможность создания таких средств индивидуальной защиты на основе известных материалов. При этом незначительная масса охлаждающего элемента на основе гранулированного материала с фазовыми переходами позволяет совмещать его с газодымозащитным элементом и создавать комбинированные респираторы, защищающие как от высоких температур, так и от токсичных продуктов горения.

Ключевые слова: респиратор, защита органов дыхания, охлаждение вдыхаемого воздуха, материалы с фазовыми переходами, пористые среды, численное моделирование

DOI: 10.31857/S2686740022060104

Медицинская статистика показывает, что тепловой ожог органов дыхания вносит существенный вклад в смертность и травматизм при пожарах в помещениях [1, 2]. При пожарах ингаляционный ожог получают 20–35% пострадавших, среди которых наблюдаются повышенные заболеваемость пневмонией (38%) [1] и смертность (31%) [2]. С учетом смертей от полученной пневмонии максимальная ожидаемая смертность от ингаляционного ожога достигает 60% [1]. Предотвратить ожоги органов дыхания, снизить травматизм при пожарах, можно при использовании персональных защитных средств, способных охлаждать горячий воздух перед его попаданием в верхние дыхательные пути. В настоящее время исследуются различные варианты создания средств индивидуальной защиты органов дыхания от ингаляционных травм, которые основаны на использовании материалов с фазовым переходом (МФП) [3]. В частности, предлагаются кожухотрубчатые теплообменники с микрокапсулированными МФП и теплообменники на основе по-

следовательно расположенных перфорированных пластин из парафин-графитовых материалов.

В работе для охлаждения вдыхаемого воздуха предлагается использовать теплозащитные респираторы на основе гранулированных МФП. Такие МФП выпускаются широким ассортиментом в промышленных масштабах и активно используются в энергетике [4, 5]. Охлаждающая часть предлагаемого теплозащитного респиратора внешне идентична обычной фильтрующей коробке, но внутри содержит засыпку из мелких гранул МФП. Втекая в респиратор при вдохе, горячий воздух охлаждается за счет теплообмена с плотной засыпкой из частиц МФП, а затем через клапан вдоха попадает в дыхательные пути (рис. 1).

При нагреве гранул МФП до определенной температуры происходит либо твердотельный фазовый переход, либо плавление без нарушения целостности частиц, что обеспечивается их капсулированием или использованием специальных адсорбирующих матриц. В результате фазового перехода МФП поглощает тепловую энергию воздуха не нагреваясь, что увеличивает время, в течение которого выходящий из респиратора газ имеет пригодную для дыхания температуру.

Целью настоящей работы является оценка возможности создания теплозащитного респиратора на основе существующих гранулированных МФП. Заметим, что использовать какие-либо интегральные оценки здесь невозможно, так как

¹ Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Россия

*E-mail: NickL@inbox.ru

**E-mail: fetc95@mail.ru

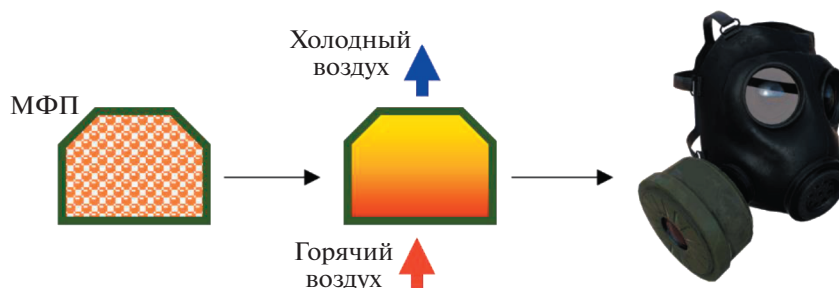


Рис. 1. Схематичное представление охлаждения воздуха гранулированным материалом в теплозащитном респираторе.

поле температур газа внутри респиратора существенно не совпадает с полем температур МФП и сильно зависит от времени и координаты. Охлаждающий элемент теплозащитного респиратора при моделировании можно рассматривать как пористый объект с фазовыми переходами в конденсированном компоненте и описывать процессы в нем методами механики сплошных многофазных сред [6]. Система уравнений, описывающая течение газа в таком объекте, включает в себя уравнение энергии МФП и уравнения энергии, движения, неразрывности и состояния воздуха:

$$\begin{aligned}
 (1-a)\rho_c \frac{\partial h_c}{\partial t} &= \\
 &= -\alpha(T_c - T_g) + (1-a) \operatorname{div}(\lambda_c \operatorname{grad} T_c), \\
 a \frac{\partial(\rho_g h_g)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{u} h_g) &= \\
 &= \alpha(T_c - T_g) + a \operatorname{div}(\lambda_g \operatorname{grad} T_g), \\
 \frac{1+(1-a)\chi}{a^2} \left(a \frac{\partial(\rho_g \mathbf{u})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{u} \mathbf{u}) \right) &= \\
 &= -\operatorname{grad} p - \left(\frac{\mu}{k_1} + \rho_g k_2 |\mathbf{u}| \right) \mathbf{u}, \\
 a \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{u}) &= 0, \quad p = \rho_g R_g T_g.
 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь a – пористость, h – энтальпия, k_1 – коэффициент проницаемости засыпки, k_2 – коэффициент инерционного сопротивления засыпки, p – давление воздуха, R_g – газовая постоянная, T – температура, t – время, \mathbf{u} – скорость фильтрации воздуха, α – коэффициент, определяющий интенсивность межфазного теплообмена, λ – коэффициент теплопроводности, μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, ρ – плотность, χ – коэффициент, учитывающий инерционное взаимодействие сред [6]. Индексы в обозначениях указывают на следующее: c – МФП, g – воздух. Фазовый переход в модели учитывается в первом уравнении системы (1) в виде специальной непропорциональной зависимости полной энтальпии МФП h_c от температуры, которая претерпе-

вает скачкообразное изменение около точки фазового перехода [7].

На входе в объект известны температура и давление воздуха, которые полагаются равными их значениям в окружающей среде (в нагретом помещении). На выходе известен объемный расход, определяемый дыханием человека. Также известны условия теплообмена на входе, выходе и боковых непроницаемых поверхностях. Таким образом, можно записать следующие краевые условия для системы (1):

$$\begin{aligned}
 p|_{G_i} &= p_0 \quad T_g|_{G_i} = T_0, \quad \int_{G_o} u_n ds = Q_{v0}(t), \\
 \partial_n T_c|_{G_i \cup G_o \cup G_w} &= 0, \quad \partial_n T_g|_{G_o \cup G_w} = 0, \quad u_n|_{G_w} = 0,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где ∂_n и u_n – производная и скорость фильтрации вдоль внешней нормали, G_i , G_o – соответственно, входная и выходная поверхности, G_w – непроницаемая поверхность объекта.

Система уравнений (1) с граничными условиями (2) может быть решена численным методом, предложенным в [8] и детально описанным в [9]. Адекватность данной численной модели подтверждается валидацией, показавшей хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальным данным даже при моделировании малогабаритных объектов [8, 9]. Заметим, что модификация указанного численного метода используется для расчета процессов в пористых средах не только с фазовыми переходами, но и с химическими превращениями [10].

Условия функционирования разрабатываемого теплозащитного устройства накладывают на его конструкцию довольно жесткие ограничения. Респиратор должен иметь компактные размеры и малую массу, но при этом эффективно охлаждать воздух в течение заданного времени. В качестве верхней оценки такого времени примем 10 мин, этого обычно достаточно для эвакуации из горящего помещения. Температура фазового перехода гранулированного МФП должна быть выше температуры хранения респиратора, но при этом не должна быть слишком высокой, иначе поглощение теплоты за счет фазовых превращений не

Таблица 1. Теплофизические параметры материалов А43, А70, Х70

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/кг °С	Теплота фазового перехода, Дж/кг	Температура фазового перехода, °С
А43	780	2370	196000	43
А70	890	2200	157500	70
Х70	1085	1570	160000	70

окажет существенного влияния на охлаждение вдыхаемого газа. Принципиальным требованием к гранулированному МФП является то, что материал должен оставаться стабильным при высоких температурах, и это многократно сокращает список потенциально подходящих МФП. Однако ряд плавящихся материалов серии А, а также серии Х с твердотельным фазовым переходом, производимых РСМ Products Ltd [11], способны функционировать при температуре 180°С, имея при этом относительно низкие температуры фазового перехода. В табл. 1 приведены некоторые характеристики материалов А43, А70 и Х70. Заметим, что для использования материалов А43 и А70 в виде гранул их нужно капсулировать, поэтому в таблице для этих материалов приведена теплота фазового перехода на единицу массы с учетом капсулирования в предположении, что объемная доля оболочки равна 30%.

Чтобы проверить, какие массогабаритные характеристики может иметь теплозащитный респиратор, созданный на основе материалов А43, А70 и Х70, численно рассчитаем режим работы такого респиратора цилиндрической формы, варьируя его длину H от 65 до 90 мм и диаметр D от 60 до 75 мм. При расчетах полагалось $T_0 = 177^\circ\text{C}$,

$p_0 = 10^5$ Па, а расход на выходе менялся по кусочно-синусоидальной функции, имитирующей дыхание человека, так, чтобы за минуту суммарный расход равнялся 20 л. Пористость засыпки полагалась равной 0.45, проницаемость и коэффициент инерционного сопротивления определялись из формулы Эргуна для диаметра гранулы 4 мм. В качестве значения коэффициента межфазного теплообмена α была взята его нижняя оценка $\alpha = 15000$ Вт/м³°С, так как численные эксперименты показали, что чем больше его значение, тем дольше обеспечиваются допустимые температуры выходящего воздуха. На рис. 2а изображена зависимость температуры воздуха T_{out} на выходе охлаждающего элемента от его длины H и диаметра D через 10 мин, рассчитанная с помощью предложенной модели для материала А43.

Из рис. 2а видно, что для материала А43 существует область значений H и D , при которых респиратор способен охлаждать воздух в течение 10 мин до температур ниже 50°С. На рис. 2б показано, как при изменении массы МФП меняется предельное время работы респиратора, в течение которого температура выходящего воздуха остается ниже максимально допустимого значения, при этом рассмотрено 4 варианта максимально

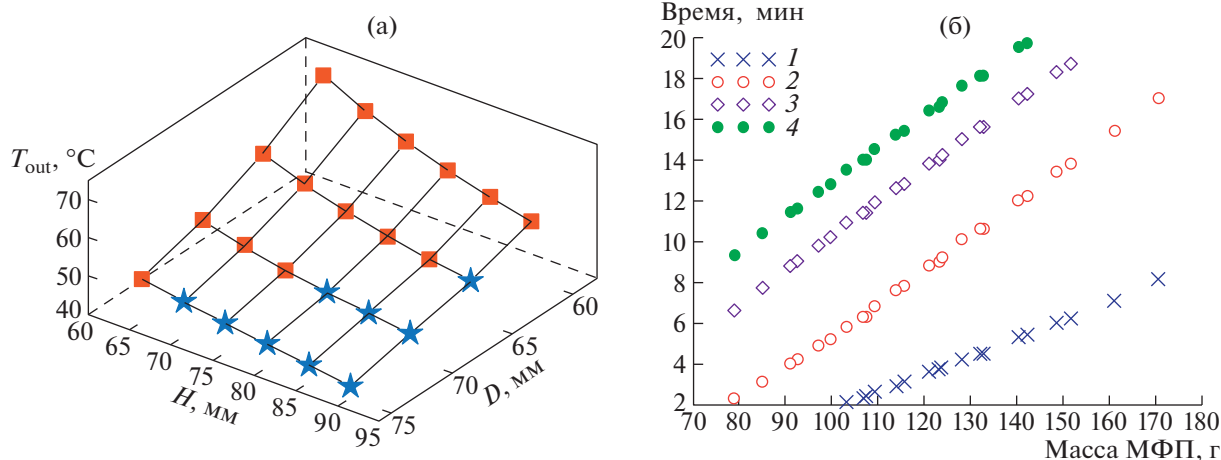


Рис. 2. Рассчитанные для респиратора на основе МФП А43 зависимости: а – температуры выходящего воздуха от размеров охлаждающего элемента через 10 мин (★ – $T_{\text{out}} < 50^\circ\text{C}$, ■ – $T_{\text{out}} > 50^\circ\text{C}$); б – предельного времени работы респиратора от массы МФП при максимально допустимой температуре выходящего воздуха, равной 40 (1), 50 (2), 60 (3), 70°С (4).

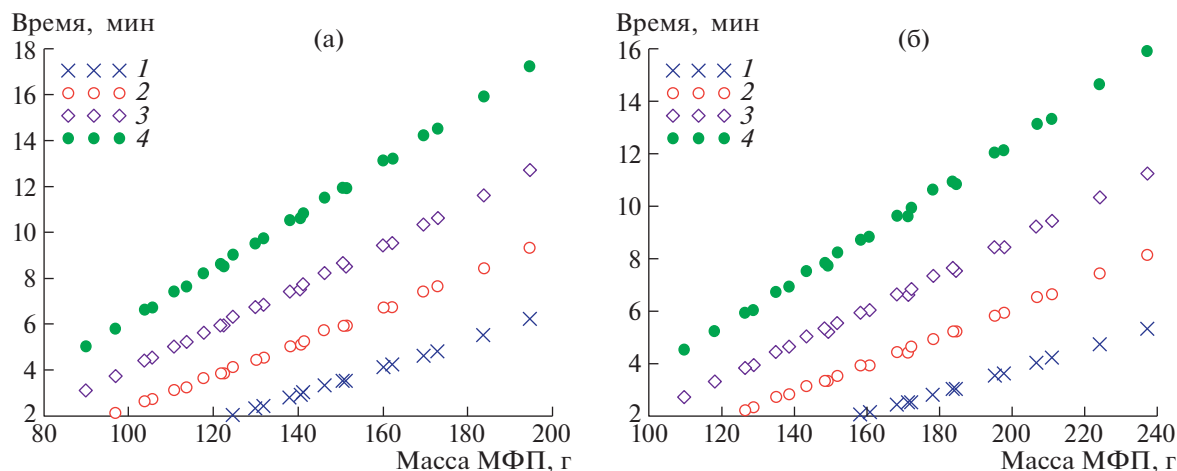


Рис. 3. Зависимость предельного времени работы респиратора от массы материалов А70 (а) и Х70 (б) при максимально допустимой температуре выходящего воздуха, равной 40 (1), 50 (2), 60 (3), 70°С (4).

допустимой температуры вдыхаемого воздуха. Из рис. 2 видно, что наименьшая масса МФП, при которой выходящий воздух имеет температуру ниже 50°С в течение 10 мин, равна приблизительно 130 г. При увеличении максимально допустимой температуры необходимое значение массы МФП уменьшается, и для охлаждения воздуха в течение 10 мин до температур ниже 60°С респиратор может содержать примерно 100 г материала А43. Таким образом, гранулы с материалом А43 могут быть успешно использованы в теплозащитном респираторе. При этом незначительная масса охлаждающего элемента на основе данного материала позволяет совмещать его с фильтрующим газодымозащитным элементом и создавать комбинированные респираторы, защищающие как от высоких температур, так и от токсичных продуктов горения.

На рис. 3 изображены зависимости предельного времени работы респиратора от массы МФП для материалов А70 и Х70. Видно, что респиратор на основе МФП А70 способен охлаждать воздух в течение 10 мин до температур ниже 60°С при массе около 165 г, а респиратор на основе МФП Х70 — при массе около 220 г.

Большие в сравнении с А43 значения массы являются следствием меньших теплоты фазового перехода и теплоемкости, большей плотности, а также значительно более высокой температуры плавления, из-за которой фазовый переход наступает позже. Более высокая температура фазового перехода приводит к тому, что меньшая часть МФП успевает поменять фазовое состояние к тому моменту, когда температура выходящего воздуха достигает максимально допустимого значения. В частности, для респираторов на основе Х70 и А70, обеспечивающих охлаждение воздуха в течение 10 мин до температур ниже 60°С

и имеющих минимально возможную массу, доля претерпевшего фазовый переход вещества за 10 мин процесса равна соответственно 37 и 41%. В то же время для материала А43 аналогичный показатель равен 79%. Таким образом, в респираторах на основе Х70 и А70 значительная часть материала оказывается не использованной в качестве МФП к моменту окончания процесса. Поэтому применение данных материалов в теплозащитных респираторах неэффективно. Однако замена не используемых в качестве МФП гранул А70 или Х70 на фильтрующий газодымозащитный материал с нужными свойствами, вероятно, позволит получить эффективные комбинированные респираторы, но это требует дополнительных исследований.

Также из рис. 2б и рис. 3 можно заметить, что рассмотренные цилиндрические респираторы одинаковой массы, но разной длины и диаметра имеют почти равное время поддержания температуры выходящего воздуха ниже максимально допустимого значения. Отсюда следует, что варьирование диаметра и длины теплозащитного респиратора на десятки процентов при сохранении массы МФП не приводит к заметному изменению предельного времени его работы.

Таким образом, проведенные вычислительные эксперименты показали, что на основе существующих гранулированных МФП могут быть созданы средства индивидуальной защиты органов дыхания от опасно высоких температур вдыхаемого воздуха. Охлаждающие элементы таких средств защиты будут иметь незначительную массу, что позволит совмещать их с фильтрующими газодымозащитными элементами и создавать комбинированные респираторы, защищающие как от высоких температур, так и от токсичных продуктов горения. Также показано, что на предельное вре-

мя работы теплозащитного респиратора цилиндрической формы почти не влияет варьирование его диаметра и длины на десятки процентов при сохранении массы МФП.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП “Дальневосточный вычислительный ресурс” ИАПУ ДВО РАН.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01129, <https://rscf.ru/project/22-29-01129/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shirani K., Pruitt B., Mason A.* The influence of inhalation injury and pneumonia on burn mortality // *Ann. Surg.* 1987. V. 205. № 1. P. 82–87.
2. *Smith D., Cairns B., Ramadan F., et al.* Effect of inhalation injury, burn size, and age on mortality // *J. Trauma.* 1994. V. 37. № 4. P. 655–659.
3. *Zhu Y., Xiao J., Chen T., Chen A., et al.* Experimental and numerical investigation on composite phase change material (PCM) based heat exchanger for breathing air cooling // *Appl. Therm. Eng.* 2019. V. 155. P. 631–636.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.014>
4. *Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., et al.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // *Appl. Therm. Eng.* 2003. V. 23. P. 251–283.
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
5. *Peng H., Li R., Ling X., Dong H.* Modeling on heat storage performance of compressed air in a packed bed system // *Appl. Energy.* 2015. V. 160 P. 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.029>
6. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
7. *Самарский А.А., Вабищевич П.Н.* Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
8. *Левин В.А., Луценко Н.А., Фецов С.С.* Моделирование движения газа через слой гранулированного теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом // *ДАН.* 2018. Т. 479. № 4. С. 386–389.
<https://doi.org/10.7868/S0869565218100067>
9. *Lutsenko N.A., Fetsov S.S.* Numerical Model of Time-Dependent Gas Flows Through Bed of Granular Phase Change Material // *Int. J. Comp. Meth.* 2020. V. 17. № 6. Article 1950010.
<https://doi.org/10.1142/S0219876219500105>
10. *Луценко Н.А.* Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлсодержащих сред методом фильтрационного горения // *Доклады РАН. Физика, технические науки.* 2020. Т. 491. С. 85–89.
<https://doi.org/10.1134/S1028335820030106>
11. www.pcmproducts.net

THERMAL PROTECTIVE RESPIRATOR BASED ON GRANULAR PHASE CHANGE MATERIALS

N. A. Lutsenko^{a,b} and S. S. Fetsov^{a,b}

^a *Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

^b *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

Presented by Academician of the RAS Yu.N. Kulchin

To protect the respiratory organs from dangerously high temperatures of inhaled air during fires and other emergencies, it is proposed to use the heat-protective respirators based on granular phase change materials. By means of a numerical experiment, the possibility of creating such personal protective equipment based on known materials has been demonstrated. The insignificant mass of the cooling element based on granular phase change material makes it possible to combine it with a gas and smoke protective element and create combined respirator that protect both from high temperatures and from toxic combustion products.

Keywords: respirator, respiratory protection, breathing air cooling, phase change materials, porous media, numerical simulation