

Оценка неопределённости косвенного измерения ресурса защитных свойств фильтрующе-поглощающих изделий с использованием теплового метода

П. В. Балабанов, И. В. Рязанов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация,
e-mail: pav-balabanov@yandex.ru, senior.ryazanov2012@yandex.ru

Рассмотрены средства защиты органов дыхания с фильтрующе-поглощающими элементами на основе твёрдых, в частности химических, сорбентов. Для обеспечения надёжной работы указанных средств защиты необходимо контролировать их ресурс защитных свойств. Проанализированы факторы неопределённости косвенного измерения ресурса защитных свойств фильтрующе-поглощающих изделий, имеющих форму пластины и работающих в условиях конвективного обдува очищаемым воздухом. Показано, что для пластин сорбента на основе надпероксида калия KO_2 толщиной 0,8 мм при относительной влажности воздуха 60–90 % и концентрации диоксида углерода CO_2 1–4 % основным фактором неопределённости косвенного измерения ресурса защитных свойств является число Био Bi , характеризующее условия теплоотдачи с поверхности пластины. Экспериментально установлено, что при $Bi = 0 \dots 0,08$ основной фактор составляет до 30 % суммарной неопределённости измерения ресурса защитных свойств.

Ключевые слова: неопределённость измерения, ресурс защитных свойств, тепловой метод, адсорбенты, средства защиты.

Введение. В настоящее время актуальна проблема очистки воздуха от загрязнений и защиты органов дыхания человека. Это связано с возросшей техногенной деятельностью и участвовавшими природными явлениями, сопровождающимися выделением примесей, оказывающих негативное влияние на здоровье человека. Для защиты органов дыхания широко применяют средства защиты с фильтрующе-поглощающими элементами (ФПЭ) на основе твёрдых сорбентов. ФПЭ в средствах защиты изолирующего типа представляют собой пластины из твёрдых химических сорбентов и работают в условиях конвективного обдува воздухом, очищаемым от диоксида углерода CO_2 . Своевременная замена ФПЭ обеспечивает качественную очистку воздуха и надёжную защиту органов дыхания. При этом время действия средств защиты органов дыхания существенно зависит от параметров очищаемого воздуха, физиологических особенностей организма человека, видов деятельности и пр. Поэтому ФПЭ заменяют не только по расписанию, но и на основе показаний индикаторов или систем мониторинга их ресурса защитных свойств [1–3].

Применение химических индикаторов [4, 5], диэлектрических датчиков [6, 7], химических резисторов [8], полупроводниковых датчиков [9], предусматривающих контакт с поверхностью ФПЭ, приводит к нарушению газообмена

в области данного контакта. С этой точки зрения преимущественно обладают бесконтактные методы и средства измерения и контроля ресурса защитных свойств, в частности тепловой метод [10].

Одним из важных критериев выбора методики измерения ресурса защитных свойств является мера доверия к результатам измерения. Мерой, признанной на международном уровне, принята неопределённость измерений. Цель настоящей работы – оценка неопределённостей результатов измерений ресурса защитных свойств ФПЭ в форме пластин при контроле тепловым методом.

Методы и результаты оценки неопределённостей.

В качестве ФПЭ использовали химические сорбенты на основе надпероксидов и гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca), которые служат основными компонентами изолирующих дыхательных аппаратов для шахтеров, пожарных и сотрудников прочих служб. В качестве меры ресурса защитных свойств ФПЭ примем $\beta = 1 - \varphi / \varphi_{\max}$, где φ , $\varphi_{\max}$ – соответственно текущее и максимальное содержания поглощённого компонента в единице объёма сорбента, $\varphi_{\max}$ соответствует моменту времени полной отработки сорбента. Стандартная суммарная неопределённость измерения меры β определяется выражением

$$u_c(\beta) = \sqrt{(\partial\beta/\partial\varphi)^2 u^2(\varphi) + (\partial\beta/\partial\varphi_{\max})^2 u^2(\varphi_{\max})}, \quad (1)$$

где u – стандартная неопределённость соответствующей величины.

Для оценки вклада каждого из членов выражения (1) введём ограничения на условия эксплуатации ФПЭ: относительная влажность воздуха 60–90 %; концентрация CO_2 1–4 %. Для указанных условий $\varphi_{\max} = 90 \dots 120 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [11], $u(\varphi_{\max}) \leq 5 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а вклад второго члена суммы в суммарную неопределённость $u_c(\beta)$ не превышает 0,003.

Проанализируем факторы неопределённости измерения текущего содержания φ . Для этого рассмотрим используемый тепловой метод измерения [12]. В процессе эксплуатации ФПЭ обдувается воздухом, очищаемым от примесей CO_2 . Активное вещество – надпероксид щелочного металла – вступает с очищаемым компонентом в химическую реакцию с экзотермическим эффектом. При этом согласно [12] температурное поле в пластине описывается одномерным по её толщине уравнением с экспоненциально изменяющимися во времени граничными условиями 3-го рода и источниками тепловой энергии. Объёмная мощность w источников тепловой энергии, действующих в ФПЭ, прямо пропорциональна скорости v поглощения CO_2 из очищаемого воздуха [11]:

$$w(\tau) = v(\tau)k,$$

где k – параметр, определяемый тепловым эффектом сорбции компонента; τ – время.

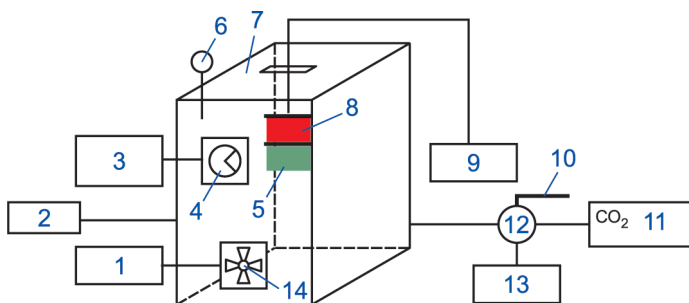


Рис. 1. Схема установки для реализации теплового метода контроля:

1 – блок питания вентилятора; 2 – газоанализатор; 3 – компьютер; 4 – тепловизионная камера; 5 – фильтрующе-поглощающий элемент; 6 – термогигрометр; 7 – камера; 8 – нагреватель; 9 – блок питания нагревателя; 10 – газозвдушная смесь; 11 – баллон с диоксидом углерода; 12 – вентиль; 13 – редуктор; 14 – вентилятор

Fig. 1. Installation diagram for the implementation of the thermal control method:

1 – heater power supply; 2 – gas analyzer; 3 – computer; 4 – thermal imaging camera; 5 – filter-absorbing element; 6 – thermohygrometer; 7 – camera; 8 – heater; 9 – heater power supply; 10 – gas air mixture; 11 – cylinder with carbon dioxide; 12 – valve; 13 – reducer; 14 – fan

Интегрируя $v(\tau)$ в интервале $[0, \tau_i]$, определяют текущее содержание CO_2 , поглощённого за указанный промежуток:

$$\varphi(\tau) = \int_0^{\tau_i} \frac{w(\tau)}{k} d\tau.$$

Мощность w источников тепловой энергии, действующих в пластине сорбента, является функцией разности температуры T поверхности пластины и начальной температуры T_0 , теплофизических свойств и геометрических размеров пластины, а также числа Био Bi , характеризующего условия теплоотдачи с поверхности пластины [9].

Таким образом, зависимость между текущим содержанием φ и параметрами, влияющими на результат измерения и неопределённость φ , имеет вид

$$\varphi = f(T - T_0; P_c; TFC; GP; k), \quad (2)$$

где $P_c = \{T_c; Bi\}$ – параметры окружающей среды (температура и число Био соответственно); $TFC = \{\lambda; c; \rho; a\}$ – теплофизические свойства сорбента (теплопроводность, удельная теплоёмкость, плотность и коэффициент температуропроводности соответственно); $GP = \{L; H; h\}$ – геометрические размеры (высота, ширина и толщина соответственно); $k = \text{const}$ при постоянных значениях параметров, влияющих на тепловой эффект сорбции.

Установка для реализации теплового метода.

Оценим неопределённости измерения параметров из выражения (2). Для этого рассмотрим установку (рис. 1) для реализации теплового метода и используемые в ней средства измерений. В условно-герметичной (создаётся подпор, предотвращающий попадание наружного воздуха) камере 7 объёмом $0,17 \text{ м}^3$ поддерживаются постоянными концентрация CO_2 , влажность и температура воздуха. Для контроля указанных параметров используются термогигрометр CENTER 313 (Center Technology Corp, Тайвань) 6 и газоанализатор ХОББИТ-Т- CO_2 (Информаналитика, Россия) 2. Диоксид углерода CO_2 подаётся из баллона 11, оснащённого вентилем 12 с редуктором 13. Контролируемый ФПЭ 5 в виде пластины размером $95 \times 95 \times 0,8 \text{ мм}$ размещают в камере 7, вентилятором 14 обдувают газозвдушной смесью и с интервалом времени 2 с регистрируют разность $T - T_0$ среднеинтегральной температуры T поверхности пластины и её начальной температуры T_0 с помощью тепловизионной камеры Flir A320 (FLIR Systems, Швеция) 4, от которой информация поступает в компьютер 3.

Основные факторы, влияющие на неопределённость измерения указанной разности температур – случайные колебания концентрации CO_2 в диапазоне $\pm 0,3 \%$ и влажности в камере в интервале $\pm 5 \%$, приводящие к неопределённости $u(T - T_0)$ измерения температур, оценённой статистически и не превышающей $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Неопределённости результатов измерений длины и ширины пластины штангенциркулем ШЦК-1-150-0,02 и её высоты микрометром МК 50-75 (ГОСТ 6507-90 «Микрометры.

Технические условия (с Изменением № 1)» составили $u(L)$, $u(H)=0,03$ мм, $u(h)=2,5$ мкм. Неопределённости измерения теплофизических свойств пластины сорбента, определённых с помощью измерителей ИТП-МГ4 «100», ИТ-с-400 и весовым методом, составили $u(\lambda)=0,01$ Вт/(м·К), $u(c)=200$ Дж/(кг·К), $u(\rho)=50$ кг/м³. Температуропроводность пластины определили по формуле $\alpha=\lambda/(c\rho)$, при этом суммарная стандартная неопределённость измерения α не превысила 0,01.

Для оценки неопределённости измерения числа Bi проведены эксперименты, в ходе которых плоский нагреватель 8 (см. рис. 1) размером 95×95×0,8 мм размещали в камере 7 при условиях теплообмена, аналогичных условиям эксплуатации ФПЭ. Нагреватель подключали к источнику Б5-80 («ЭЛАТЕК», Беларусь) 9 (см. рис. 1) стабилизированного напряжения U (7; 10; 18) В с нестабильностью выходного напряжения 0,1 %. Погрешностью установки выходного напряжения пренебрегали. Результаты измерения температуры нагревателя (рис. 2) поступали в ноутбук Lenovo 6 (Lenovo Group Limited, Китай) и использовались для определения числа Био по формуле

$$Bi = U^2 h / [2rLH\lambda(T^* - T_c)], \quad (3)$$

где r – сопротивление нагревателя; T^* – среднеинтегральная температура поверхности нагревателя в стационарном состоянии.

Число Bi определяли в условиях как естественной конвекции, так и при обдуве плоского нагревателя 8 потоком воздуха. Для обдува использовали вентилятор размером 120×120×25 мм, расположенный на расстоянии 200 мм от нагревателя. Скорость обдува регулировали путём изменения выходного напряжения блока 1 питания вентилятора в диапазоне $U_{\text{вых}}=10...20$ В (см. рис. 1). Питание вентилятора осуществляли от источника Б5-8 с нестабильностью выходного напряжения 0,1 %. Погрешностью установки напряжения питания вентилятора пренебрегали. Результаты измерения числа Bi приведены на рис. 3. Для разработанной экспериментальной установки найденные по данным 20 опытов средние значения составляют $Bi=0,018$ (режим естественной конвекции) и $Bi=0,05$ и $0,07$ (в режиме обдува при напряжении блока питания вентилятора $U_{\text{вых}}=10$ и 20 В соответственно). При этом для отдельных результатов измерения Bi доверительный интервал составлял 0,0054 для режима естественной конвекции и 0,0068; 0,0093 для обдува при $U_{\text{вых}}=10$ и 20 В соответственно.

Рассмотрим причины возникновения достаточно высоких неопределённостей измерения Bi . Для сокращения числа переменных в выражении (3) положим $L=H$. Запишем формулу для расчёта суммарной неопределённости измерения Bi :

$$u_c(Bi) = [4u^2(U) + u^2(h) + u^2(r) + 4u^2(L) + u^2(\lambda) + u^2(T^* - T_c)]^{1/2}. \quad (4)$$

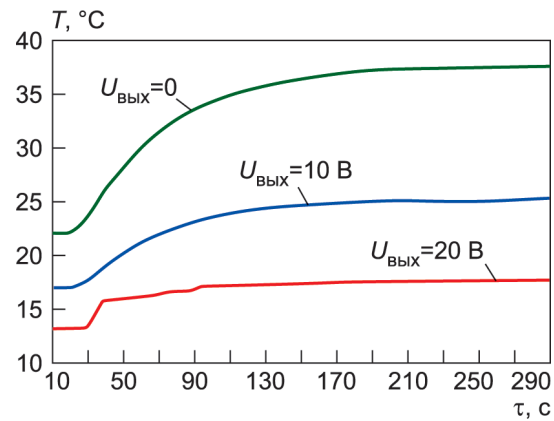


Рис. 2. Временные зависимости температуры поверхности нагревателя при различном напряжении $U_{\text{вых}}$

Fig.2. Dependence of the heater surface temperature over time

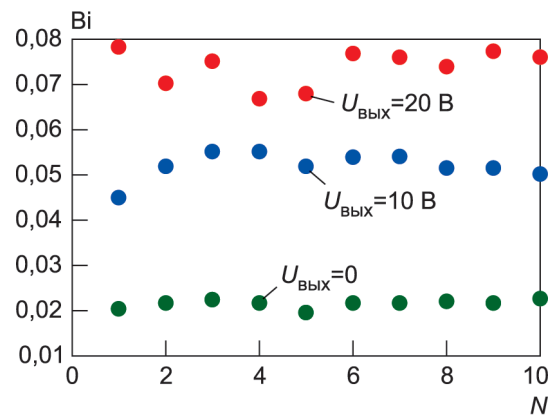


Рис. 3. Результаты измерения чисел Bi при различных напряжениях $U_{\text{вых}}$

Fig. 3. Results of measurement of Bi numbers at various U_f

В выражении (4) исключим систематические составляющие $u(h)$, $u(L)$, $u(\lambda)$, поскольку в экспериментах используем одни и те же образцы, упростим и представим (4) в виде

$$u_c(Bi) = [4u^2(U) + u^2(T^* - T_c) + u^2(r)]^{1/2}.$$

С учётом выражения

$$T^* - T_c = U^2 h / [2BirLH\lambda]$$

рассчитали значения $u_c(Bi) = f(U; T^* - T_c)$ для диапазонов $Bi=[0; 0,1]$ и $U=[7; 20]$ В. На рис. 4 приведена диаграмма суммарных неопределённостей измерения Bi , разделённая на области с диапазонами значений $u_c(Bi)$: $[0; 0,1]$;

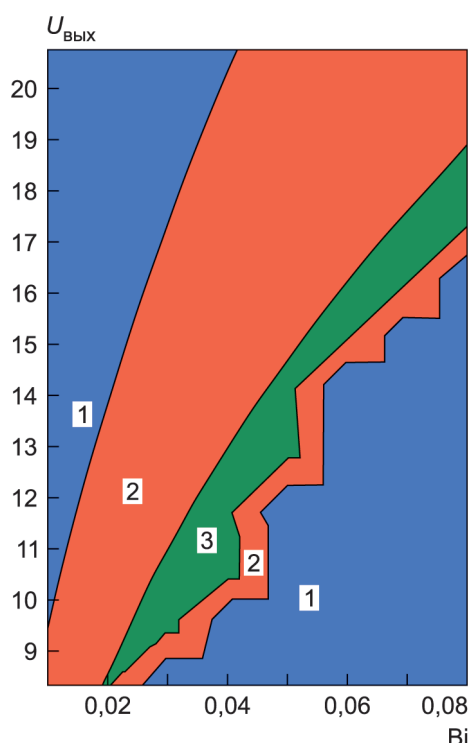


Рис. 4. Суммарные неопределённости измерения чисел Bi в областях $u_c(Bi)=[0; 0,1]; [0,1; 0,2]; [0,2; 0,3]$ – соответственно 1–3

Fig. 4. Total measurement uncertainties of Bi $u_c(Bi)$ in range $[0; 0,1]; [0,1; 0,2]; [0,2; 0,3]$ – 1–3

$[0,1; 0,2]; [0,2; 0,3]$. Согласно полученным данным неопределённости измерения Bi существенно зависят от напряжения нагревателя и значительно увеличиваются при $U < 10$ В для исследованного диапазона Bi . При этом в практически важных случаях эксплуатации ФПЭ $u_c(Bi)$ попадает в диапазоны $[0,1; 0,2]$ и $[0,2; 0,3]$, поскольку даже в условиях естественной конвекции $Bi > 0,03$. По этой причине минимальные значения $u_c(Bi)$ лежат в интервале $0,18–0,20$, что ограничивает область применения теплового метода контроля.

Заключение. На неопределённость измерения ресурса защитных свойств β наибольшее влияние оказывают неопределённости измерения чисел Bi . Это накладывает ограничения на условия реализации используемого теплового метода, в частности требует тщательно подходить к выбору параметров нагревателя (размеров, мощности) в зависимости от условий эксплуатации ФПЭ. При изменении условий эксплуатации реальные неопределённости измерения β могут существенно отличаться от расчётных. Указанные недостатки рассмотренного теплового метода обусловлены необходимостью экспериментального определения параметра Bi , характеризующего теплоотдачу поверхности пластины. Поэтому необходимо повышать точность теплового метода контроля ресурса защитных свойств ФПЭ в форме пластин.

Список литературы

1. Wood G. O., Snyder J. L., *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2011, no. 8 (10), pp. 609–617. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.606536>
2. Nelson T. J., Janssen L. L., *3M Jobhealth Highlights*, 1999, no. 1 (17), pp. 1–5.
3. Favas J., *Human protection & performance division defence science and technology organization*, 2005, URL: <https://files.library.by/files/1573381407.doc> (дата обращения: 22.04.2020).
4. Greenawald L. A., Boss G. R., Reeder A., Bell S., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, vol. 230, pp. 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.02.129>
5. Пат. № 2459204 РФ / О. Б. Громов, А. Н. Дьяченко, П. В. Жернаев // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 23.
6. Mason A., Wylie S., Shaw A., Al-Shamma'a A. I., Thomas A., Keele H., *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, vol. 307, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/307/1/012041>
7. Cerro G., Ferrigno L., Ferdinandi M., Laracca M., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, vol. 67, pp. 2504–2515. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2843218>
8. Bernard P., Caron S., St. Pierre M., Lara J., US Patent no. 6375725 (23 апреля 2002).
9. Hajime H., Ishidao T., Ishimatsu S., *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 90–95. <https://doi.org/10.1080/10473220301438>
10. Пат. № 2419783 РФ / С. Н. Кондронов // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 12.
11. Mishchenko S. V., Balabanov P. V., Krimstein A. A., *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 328–336. <https://doi.org/10.1134/S0040579514030130>
12. Балабанов П. В., Мищенко С. В. Метод неразрушающего теплового контроля степени истощения защитных свойств химического сорбента на матрице // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 69–72.

References

1. Wood G. O., Snyder J. L., *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2011, no. 8 (10), pp. 609–617. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.606536>
2. Nelson T. J., Janssen L. L., *3M Jobhealth Highlights*, 1999, no. 1 (17), pp. 1–5.
3. Favas J., *Human protection & performance division defence science and technology organization*, 2005, available at: <https://files.library.by/files/1573381407.doc> (accessed: 22.04.2020).
4. Greenawald L. A., Boss G. R., Reeder A., Bell S., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, vol. 230, pp. 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.02.129>
5. Gromov O. B., Dyachenko A. N., Zernaev P. V., RF Patent no. 2459204, *Byull. Izobret.*, no. 23 (2012).
6. Mason A., Wylie S., Shaw A., Al-Shamma'a A. I., Thomas A., Keele H., *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, vol. 307, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/307/1/012041>

7. Cerro G., Ferrigno L., Ferdinandi M., Laracca M., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, vol. 67, no. 10, pp. 2504–2515. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2843218>
 8. Bernard P., Caron S., St. Pierre M., Lara J., US Patent no. 6375725 (23.05.2002).
 9. Hajime H., Ishidao T., Ishimatsu S., *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 90–95. <https://doi.org/10.1080/10473220301438>
 10. Kondroshov S. N., RF Patent no. 2419783, *Byull. Izobret.*, no. 12 (2011).
 11. Mishchenko S. V., Balabanov P. V., Krimshstein A. A., *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 328–336. <https://doi.org/10.1134/S0040579514030130>
 12. Balabanov P. V., Mishchenko S. V., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1219–1224. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0606-5>
- Дата поступления: 22.04.2020.
Дата принятия: 24.08.2020.

The uncertainty of residual life indicator measurement by thermal method for respirator cartridge

Pavel V. Balabanov, Ivan V. Ryazanov

Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation,
e-mail: pav-balabanov@yandex.ru, senior.ryazanov2012@yandex.ru

Filtering and absorbing products in the form of a plate and working under conditions of convective blowing with cleared air residual life indicator uncertainties of measurement analysis is carried out. It is shown that for 0.8 mm thick KO_2 -based sorbent plates at a relative humidity of 60...90 % and a CO_2 concentration of 1...4 %, the main factor of the uncertainty of indirect measurement of the residual life indicator is the Biot parameter characterizing the conditions of heat transfer from the plate surface. It has been experimentally proven that for Biot parameter in the range of 0–0.08, this factor contributes up to 30 % in the total uncertainty.

Key words: uncertainty of measurement, residual life indicator, thermal method, adsorbents, respiratory device.