

Метод и устройство для определения теплофизических свойств гетерогенных материалов в твёрдой фазе

П. В. БАЛАБАНОВ, А. С. ЕГОРОВ, С. В. МИЩЕНКО,
А. П. САВЕНКОВ, Г. В. ШИШКИНА

Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия, e-mail: pav-balabanov@yandex.ru

Приведена математическая модель метода определения теплофизических свойств гетерогенных материалов в твёрдой фазе. Рассмотрена конструкция измерительного устройства для реализации метода. Представлены результаты практического применения метода для исследования изменений удельной теплоёмкости и теплопроводности твёрдой фазы хемосорбентов на основе надперекисей калия и натрия в интервале температур 273–383 К в процессе поглощения диоксида углерода. Показано, что метод и устройство могут быть использованы для контроля годности средств защиты органов дыхания на основе хемосорбентов.

Ключевые слова: гетерогенные материалы, порозность, теплоёмкость, теплопроводность, хемосорбент.

The mathematical model of the method for determining the thermophysical properties of the solid phase for heterogeneous materials is given. The construction of measuring device for implementing the method is shown. The results of practical application of the method for studying the changes in specific heat and thermal conductivity in solid phase of chemisorbents based on KO_2 and NaO_2 in the temperature range 273–383 K during the process of carbon dioxide absorption. It is shown that the method and device may be used for testing the suitability of chemisorbents.

Key words: heterogeneous materials, heat and thermal conductivity, chemisorbents.

Во время эксплуатации изолирующих средств защиты органов дыхания (СЗОД) часто возникает потребность в оперативных методах контроля их годности к эксплуатации. В значительной степени опасность определяется степенью отработки основных компонентов СЗОД – хемосорбентов на основе перекисных соединений щелочных и щелочноземельных металлов (калия, натрия, кальция, лития). В ходе работы эти вещества поглощают влагу и диоксид углерода, выделяя кислород. Процессы выделения и поглощения зависят от сравнительно большого количества влияющих факторов, что приводит к значительным случайным колебаниям ресурса СЗОД. Знание степени отработки хемосорбента позволяет, с одной стороны, принять решение о своевременной замене элемента СЗОД (регенеративного или поглотительного патрона) и не допустить опасного повышения концентрации диоксида углерода и снижения концентрации кислорода, а с другой – максимально полно использовать хемосорбент. Поэтому перед началом эксплуатации СЗОД необходимо проверять годность хемосорбентов, особенно после длительного хранения. В настоящее время существуют индикаторы степени отработки сорбентов для фильтрующих СЗОД [1–3]. Свойства хемосорбентов в изолирующих СЗОД контролируют химическими методами, не удовлетворяющими требованиям оперативности для своевременного принятия решения о замене регенеративного или поглотительного патрона. Между тем, насыщение хемосорбента диоксидом углерода сопровождается химическими реакциями, следствием которых является изменение теплофизических свойств (ТФС) материала. Поэтому актуальна разработка метода и устройства контроля годности и степени отработки хемосорбентов по изменению их ТФС.

Математическая модель метода. На рис. 1 показаны система контактирующих в измерительном устройстве тел и графические зависимости откликов тел на тепловое и пневматическое воздействия. При реализации предлагаемого метода определяют массу m слоя контролируемого пористого или сыпучего материала 1 толщиной l , размещённого между пластинами 2 измерительного устройства. К двум одинаковым плоским нагревателям 3 подводят различные постоянные напряжения $U_1 \neq U_2$ и измеряют температуры T_1 , T_2 нагревателей. С помощью тепломеров 5 определяют плотности $q_{1н}$, $q_{2н}$ попадающих в слой теплоизоляции 4 тепловых потоков от нагревателей. При достижении в момент времени τ^* в образце материала квазистационарного теплового режима (когда скорость изменения температур T_1 , T_2 становится постоянной) оказывают пневматическое воздействие на газовую фазу материала (т. е. уменьшают замкнутый объём измерительного устройства на ΔV) и регистрируют изменение давления Δp .

Плотности q_1 , q_2 тепловых потоков, поступающих в образец материала 1 от нагревателей 3, находят с учётом U_1 , U_2 , $q_{1н}$, $q_{2н}$. По полученным значениям T_1 , T_2 , q_1 , q_2 определяют параметры теплопереноса, среднеинтегральные по объёму пробы: коэффициент эффективной теплопроводности λ и объёмную теплоёмкость c_p . По изменению давления Δp рассчитывают порозность ε контролируемого материала. Величины λ , c_p , ε используют для нахождения параметров теплопереноса гетерогенных материалов в твёрдой фазе: теплопроводности λ_0 и теплоёмкости c_0 .

Для получения формул расчёта λ , c_p по значениям T_1 , T_2 , q_1 , q_2 рассмотрим краевую задачу теплопроводности в системе тел, образованных конструктивными элементами изме-

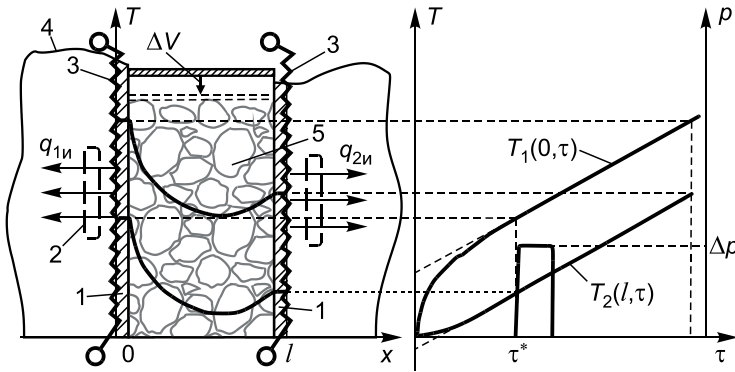


Рис. 1. Система контактирующих тел в измерительном устройстве и графики откликов на тепловое и пневматическое воздействия: 1 – пористый или сыпучий материал; 2 – пластины измерительного устройства; 3 – плоские нагреватели; 4 – слой теплоизоляции; 5 – термомеры

рительного устройства. При постановке и решении этой краевой задачи сделаем допущения об отсутствии потерь тепла по периметру плоского слоя и одномерности температурного поля в образце контролируемого материала. Для обеспечения принятых допущений в конструкции измерительного устройства используем охранные нагреватели. Таким образом, краевая задача теплопроводности в исследуемом материале имеет вид дифференциального уравнения [4–6]:

$$\frac{\partial \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 < \bar{x} < 1, Fo > 0; \quad (1)$$

$$\Theta(\bar{x}, 0) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = -1; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta(1, Fo)}{\partial \bar{x}} = \frac{q_2}{q_1}; \quad (4)$$

где $\Theta(\bar{x}, Fo) = \lambda [T(x, \tau) - T_0] / (q_1 l)$ – безразмерная температура; $\bar{x} = x/l$ – безразмерная пространственная координата; x – координата; $Fo = a\tau/l^2$ – число Фурье; a – температуропроводность; τ – время, прошедшее с момента начала нагрева; T , T_0 – текущая и начальная температуры.

Формула (2) является начальным условием краевой задачи (1), формулы (3), (4) – граничными условиями.

С учётом уравнения теплового баланса для некоторого малого промежутка времени $\Delta\tau$, которому будет соответствовать нагрев пластин 2 (см. рис. 1) на ΔT и в предположении постоянства ТФС материалов измерительного устройства, плотность $q_{1,2}$ теплового потока от нагревателя, поступающего в образец, можно вычислить как

$$q_i = \frac{U_i^2}{RS} - q_{iH} - c_H \rho_H H_H \frac{\Delta T_i}{\Delta \tau} - c_H \rho_H H_H \frac{\Delta T_i}{\Delta \tau},$$

где $i = 1, 2$; R – сопротивление нагревателей; S – площадь пластин; c_H , c_n – удельные теплоёмкости нагревателя и пластины, соответственно; ρ_H , ρ_n – плотность нагревателя и пластины, соответственно; H_H , H_n – толщина нагревателя

и пластины, соответственно.

Вследствие постоянства напряжений U_1 , U_2 и тепловых потоков q_1 , q_2 через некоторое время после начала нагрева в образце установится квазистационарный тепловой режим. Для этого случая решение задачи (1)–(4) будет иметь вид [4–6]:

$$\Theta(\bar{x}, Fo) = AFo + F(\bar{x}), \quad (5)$$

где A – постоянный коэффициент, зависящий от скорости нагрева; $F(\bar{x})$ – функция, определяющая установившийся в квазистационарном режиме профиль температурного поля образца.

Подставим (5) в задачу (1)–(4), найдём A , $F(\bar{x})$ [4–6]:

$$A = q_2 / q_1 + 1;$$

$$F(\bar{x}) = A\bar{x}^2 / 2 - \bar{x} - A/6 + 0,5,$$

запишем окончательное решение задачи (1)–(4) как

$$\Theta(\bar{x}, Fo) = \frac{q_1 + q_2}{q_1} Fo + \frac{q_1 + q_2}{q_1} \frac{\bar{x}^2}{2} - \bar{x} + 0,5 - \frac{1}{6} \frac{q_1 + q_2}{q_1}. \quad (6)$$

Из выражения (6) несложно получить формулу для вычисления коэффициента эффективной теплопроводности

$$\lambda = 0,5(q_1 - q_2)l / (T_1 - T_2). \quad (7)$$

Расчётная формула для объёмной теплоёмкости исследуемого материала имеет вид

$$c_p = \frac{3(q_1^2 - q_2^2)\tau}{l[q_1(T_1 + 2T_2 - 3T_0) - q_2(T_2 + 2T_1 - 3T_0)]}. \quad (8)$$

Теплопроводность λ_0 и теплоёмкость c_0 твёрдой фазы контролируемого гетерогенного материала находят по полученным значениям λ , c_p с учётом порозности ε . С целью повышения точности определения порозности ε компенсируем влияние атмосферного давления на результат измерения параметров теплопереноса. Для этого перед заполнением измерительного устройства контролируемым материалом проведём эксперимент со сжатием воздуха в пустой ёмкости и зарегистрируем изменение давления Δp_0 . Объём V_0 твёрдой фазы контролируемого материала найдём по изменениям давления Δp_0 , Δp в пустой и заполненной ёмкостях измерительного устройства, соответственно [7, 8]:

$$V_0 = V(1 - \Delta p_0 / \Delta p), \quad (9)$$

где V – объём ёмкости измерительного устройства с контролируемым материалом после уменьшения исходного объёма на ΔV .

Порозность гетерогенного материала, состоящего из твёрдой и газовой фаз, определим по формуле

$$\varepsilon = 1 - V_0 / V,$$

откуда с учётом (9) получим

$$\varepsilon = \Delta p_0 / \Delta p. \quad (10)$$

Математическая модель измерения удельной тепло-

ёмкости твёрдой фазы с учётом (8), (10) и аддитивности теплоёмкости имеет вид

$$c_0 = \frac{V}{m} \left[\frac{3(q_1^2 - q_2^2)\tau}{l[q_1(T_1 + 2T_2 - 3T_0) - q_2(T_2 + 2T_1 - 3T_0)]} - \frac{\Delta P_0}{\Delta P} c_r \rho_r \right], \quad (11)$$

где c_r , ρ_r – удельная теплоёмкость и плотность газовой фазы, соответственно.

Математические модели измерения теплопроводности λ_0 твёрдой фазы получены подстановкой выражений (7), (10) в известные модели для расчёта коэффициента эффективной теплопроводности гетерогенных материалов. В частности, найдём соотношение для сорбента с частицами сферической формы при $\varepsilon = 0,4 \dots 0,6$ с учётом модели М. Г. Каганера [9]:

$$\frac{(q_1 - q_2)l / [\lambda_r(T_1 - T_2)] - 1}{11,6(1 - \Delta p_0 / \Delta p)^2} + 0,5 = k^{-2} \ln(1 - k)^{-1} - 1/k, \quad (12)$$

где λ_r – теплопроводность газовой фазы; k – неизвестный параметр.

После численного решения уравнения (12) определим теплопроводность твёрдой фазы по формуле

$$\lambda_0 = \lambda_r / (1 - k).$$

Соотношение для сыпучего хемосорбента с зёрнами неправильной формы (например, на основе KO_2) с учётом модели Г. Н. Дульнева, Ю. П. Заричняка [10] имеет вид

$$\frac{0,5(q_1 - q_2)l}{T_1 - T_2} = \lambda_0 C^2 + \lambda_r(1 - C)^2 + \frac{2\lambda_r C(1 - C)}{\lambda_r(C + 1 - C)/\lambda_0}. \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет найти теплопроводность λ_0 твёрдой фазы после вычисления параметра C в результате решения уравнения

$$2C^3 - 3C^2 + 1 = \Delta p_0 / \Delta p.$$

Конструкция измерительного устройства. Для реализации предложенного термопневмометрического метода определения ТФС разработано измерительное устройство (рис. 2), в котором образец гетерогенного материала находится в герметичной измерительной ёмкости 1 объёмом V , приведённой в тепловой контакт с плоскими нагревателями 2, 9. В центре каждого нагревателя для контроля температур T_1 , T_2 размещены термоэлектрические преобразователи. На противоположных по отношению к ёмкости 1 сторонах нагревателей располагаются датчики 3 теплового потока, предназначенные для измерения плотностей $q_{1и}$, $q_{2и}$ потоков, поступающих в слой теплоизоляции 8. Для уменьшения утечек теплоты в окружающую среду используются охранные нагреватели 4. Измерительная ёмкость 1 соединена трубкой с ёмкостью 6 переменного объёма, с помощью которой можно изменять объём измерительного устройства на ΔV . Для измерения давления в системе 7 оказания пневматического воздействия служит преобразователь давления 5.

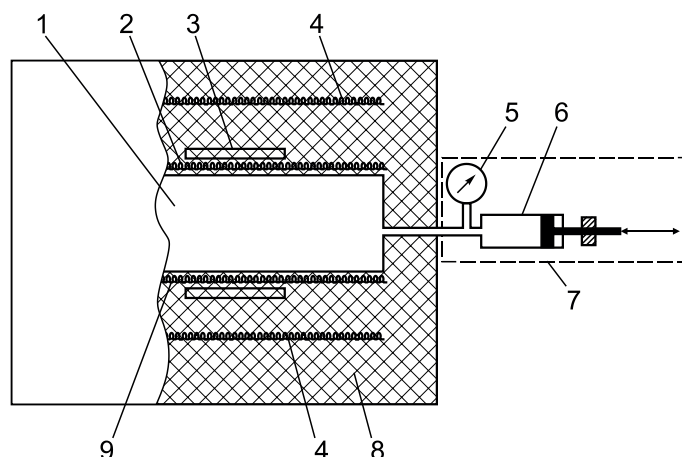


Рис. 2. Схема устройства для определения теплофизических свойств и порозности гетерогенных материалов: 1 – измерительная ёмкость; 2, 9 – плоские нагреватели; 3 – датчики теплового потока; 4 – охранные нагреватели; 5 – преобразователь давления; 6 – ёмкость переменного объёма; 7 – система оказания пневматического давления; 8 – слой теплоизоляции

Основные характеристики разработанного устройства следующие: размеры образца контролируемого материала $16 \times 100 \times 100$ мм; относительная погрешность определения ТФС твёрдой фазы не более 15 %; среднее время измерения в интервале температур 273–373 К составляет 30 мин.

Практическое применение разработанного метода. Разработанный метод и устройство применяли для экспериментального исследования ТФС следующих хемосорбентов:

материал № 1 в виде зёрен фракции 3–5 мм (85 % надперекиси калия, 10 % окиси кальция, асбест);

материал № 2 в виде цилиндрических гранул длиной 10–12 мм и диаметром 2,5 мм (70 % гидроокиси лития, 20 % гидроокиси кальция);

материал № 3 в виде зёрен фракции 3–5 мм (85 % надперекиси натрия, 5 % гидроокиси кальция, 1 % надперекиси калия);

материал № 4 в виде зёрен фракции 3–5 мм (40 % надперекиси натрия, 50 % надперекиси калия, 5 % гидроокиси кальция, асбест).

Диапазон температур исследования хемосорбентов составлял 293–328 К. Нижняя граница диапазона задана из условия, что минимальная температура хемосорбента в составе СЗОД при эксплуатации не может быть ниже комнатной. Верхняя граница диапазона (около 330 К) ограничена температурой термического разложения хемосорбентов. Это значение определено опытным путём по уменьшению теплоёмкости в интервале 335–375 К. Это уменьшение обусловлено тепловыделением при термическом разложении компонентов хемосорбента.

Исследования зависимостей теплопроводности от степени отработки хемосорбентов позволили установить, что значительным изменениям в процессе эксплуатации подвержена эффективная теплопроводность λ насыпного слоя материала, а в процессе хранения – теплопроводность λ_0 твёрдой фазы (зёрен).

При изучении изменения теплопроводности хемосорбентов в процессе эксплуатации СЗОД через слой исследуемого материала в течение некоторого промежутка вре-

мени продували газовую смесь с заданными параметрами (расход, температура, влажность, концентрация CO_2). Продолжительность продувки зависела от требуемой степени отработки хемосорбента. После продувки ёмкость с материалом охлаждалась при комнатной температуре, после чего осуществляли измерение теплопроводности и химический анализ. При анализе устанавливали количество оставшегося химически связанного кислорода, по которому определяется фактическая степень ψ отработки хемосорбента.

В процессе эксплуатации СЗОД коэффициент эффективной теплопроводности λ насыпного слоя хемосорбентов на основе надперекисей калия и натрия изменяется от 0,13–0,15 Вт/(м·К) в начале работы до 0,24–0,26 Вт/(м·К) при отработанном на 90 % хемосорбенте (рис. 3). В среднем теплопроводность отработанных на 90 % различных материалов увеличивается на 75 % относительно значения в начале эксплуатации. Такие результаты позволяют эффективно контролировать состояние хемосорбента и оперативно заменять регенеративные и поглотительные патроны. Замену следует выполнять при достижении эффективной теплопроводности значения 0,22 Вт/(м·К).

Существенные изменения эффективной теплопроводности хемосорбентов на основе надперекисей калия и натрия при эксплуатации можно объяснить насыщением сорбента адсорбатами (влажностью и диоксидом углерода), оплавлением и спеканием зёрен, способствующими образованию гетерогенных структур с взаимопроникающими компонентами, каркас которых обладает большей теплопроводностью по сравнению с каркасом частиц в свободной засыпке [10].

Также при эксплуатации СЗОД кроме теплопроводности в различной степени (в 1,1–2 раза) для разных хемосорбентов увеличивается их кажущаяся плотность [7, 8], что связано с увеличением массы вследствие поглощения адсорбатов.

При исследовании изменения теплопроводности хемосорбентов в процессе хранения образец выдерживали в течение заданного времени в негерметичной ёмкости. Затем проводили химический анализ на остаточное содержание активного кислорода в образце и измерение теплопроводности. Эффективная теплопроводность λ насыпного слоя хемосорбентов остаётся почти неизменной (рис. 4). Однако теплопроводность λ_0 зёрен хемосорбентов подвержена существенным изменениям именно на начальном этапе (хемо-

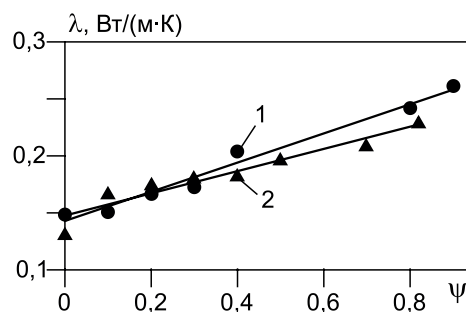


Рис. 3. Зависимости коэффициентов эффективной теплопроводности λ насыпного слоя хемосорбентов № 3 (1) и № 4 (2) от степени ψ отработки при эксплуатации; точки – экспериментальные данные; линии – результаты линейной аппроксимации

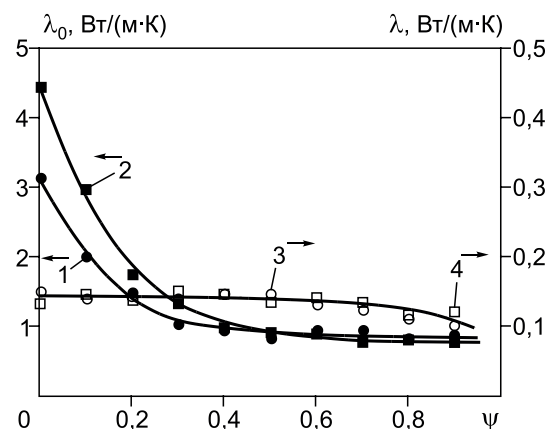


Рис. 4. Зависимости теплопроводности λ_0 твёрдой фазы (1, 2) и коэффициента эффективной теплопроводности λ (3, 4) хемосорбентов № 3 (1, 3) и № 4 (2, 4) от степени ψ отработки в процессе хранения; точки – экспериментальные данные; линии – аппроксимирующие функции

сорбента, отработанного на 30 % и менее) хранения в негерметичной ёмкости. Теплопроводность зёрен уменьшается с 3,0–4,5 Вт/(м·К) в начале хранения до 1,0–1,5 Вт/(м·К) при отработанном на 30 % хемосорбенте и в дальнейшем изменяется слабо.

Изменение теплопроводности зерна хемосорбента в процессе насыщения, вероятнее всего, связано с переходом (вследствие химических реакций) надперекисей калия и натрия, составляющих основу твёрдой фазы, в карбонаты калия и натрия, и насыщения зёрен влажностью. Полученные результаты свидетельствуют о возможности контроля годности хемосорбентов после хранения по результатам измерения теплопроводности λ_0 зёрен. Если теплопроводность $\lambda_0 < 1,5$ Вт/(м·К), то продукт следует признать негодным к использованию из-за его ненадлежащего хранения.

Выводы. Разработанный метод и измерительное устройство для исследования теплофизических свойств гетерогенных материалов в твёрдой фазе апробированы при изучении хемосорбентов на основе надперекисей натрия и калия. Показано, что теплопроводность этих материалов изменяется вследствие насыщения диоксидом углерода в процессе эксплуатации и хранения СЗОД. Это позволяет использовать полученные значения эффективной теплопроводности насыпного слоя и теплопроводности зёрен в качестве критериев при экспресс-оценке степени отработки указанных хемосорбентов для контроля годности СЗОД.

Работа выполнена при поддержке РНФ (соглашение № 15-19-10028).

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 2459204 РФ. Способ диагностирования состояния сорбента / О. Б. Громов, А. Н. Дьяченко, П. В. Зернаев, П. И. Михеев, В. К. Прокудин, Е. О. Петренко // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 23.

2. Hori H., Ishidao T., Ishimatsu S. Development of a New Respirator for Organic Vapors with a Breakthrough Detector Using a Semiconductor Gas Sensor // Appl. Occupational and Environmental Hygiene. 2003. V. 18. No. 2. P. 90–95. DOI: 10.1080/10473220301438.

3. **Pat. 8336543 US.** Filter Cartridge Having Cover for Masking Service Life Indicator / Holmquist-Brown T. W., Rakow N. A. // Appl. 25.12.2012.

4. **Балабанов П. В., Пономарев С. В., Балабанова Е. Н.** Метод и устройство для измерения теплофизических свойств образцов регенеративного продукта на матрице при нагреве их постоянным тепловым потоком // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 49–53.

5. **Балабанов П. В., Костров А. С.** Методика повышения точности и оперативности измерения теплофизических характеристик на стадии регулярного режима второго рода // Вестник ТГТУ. 2011. Т. 17. № 4. С. 936–944.

6. **Балабанов П. В., Мищенко С. В., Костров А. С.** Метод комплексного определения объемной и удельной теплоемкостей сыпучих материалов и устройство для его осуществления // Вестник ТГТУ. 2013. Т. 19. № 2. С. 255–261.

7. **Мордасов М. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е.** Манометрический метод измерения кажущейся плотности сыпучих материалов // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 38–42.

8. **Балабанов П. В., Савенков А. П.** Устройство для неразрушающего измерения плотности сыпучих материалов // Приборы. 2015. № 9 (183). С. 3–6.

9. **Минко К. Б., Артемов В. И., Яньков Г. Г.** Гидравлическое сопротивление и эффективная теплопроводность засыпок из сферических частиц // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 47–55.

10. **Zarichnyak Y. P., Ivanov V. A.** Calculating the thermal conductivity of filled fluoroplastics by methods of general conductivity theory // Intern. Polymer Sci. Technol. 2015. V. 42. No 1. P. T27–T30.

Дата принятия: 02.12.2016.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.391.8

Методика оценки отношения сигнал–шум в волоконно-оптических системах передачи с частотным разделением каналов

В. А. ВАРДАНЫН

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия,
e-mail: vardgesvardanyan@mail.ru

Предложена методика оценки отношения сигнал–шум в волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением, уплотнением ортогональных и неортогональных поднесущих каналов при перекрестных помехах между каналами из-за четырёхволнового смешения в волокне. Показано, что оценить отношение сигнал–шум системы с любым количеством поднесущих каналов можно по результатам измерений этого отношения для четырёхканальной системы передачи.

Ключевые слова: частотное разделение каналов, оптическое отношение сигнал–шум, четырёхволновое смешение, поднесущие каналы.

The procedure of estimating optical signal to noise ratio (OSNR) in optical fiber transmission systems with spectral multiplexing, using orthogonal and not orthogonal subcarriers multiplexing with domination of four-wave mixing effects was offered. The technique is based on measuring the OSNR for four-channel signal transmission system which is used to predict OSNR for M-channel transmission system.

Key words: frequency division multiplexing, optical signal to noise ratio, four-wave mixing, subcarriers.

В последнее время растёт интерес к волоконно-оптическим системам передачи (ВОСП) с частотным разделением каналов (frequency division multiplexing, FDM). Это связано, с одной стороны, с трудностями реализации сверхвысокоскоростных оптоэлектронных составляющих для ВОСП с временным разделением каналов (time division multiplexing, TDM), с другой стороны – поисками экономически выгодного и эффективно-го использования пропускной способности оптического волокна. Плотное размещение каналов в частотном

спектре, а также применение методов многоуровневой модуляции сигналов при формировании каналов позволяют повысить спектральную эффективность. Так, в ВОСП со спектральным уплотнением каналов (dense wavelength division multiplexing, DWDM) каналы формируются в оптическом диапазоне, где частотные интервалы Δf между каналами регламентируются стандартом [1] и составляют 100, 50, 25 и 12,5 ГГц. Однако частотно-разделённые каналы могут формироваться не только в оптическом, но и в сверхвысокочастотном