

М. Л. РЯБЧИКОВ, д-р техн. наук, проф., УПА, Харків;
М. В. ДЕНИСЕНКО, здобувач, УПА, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОЛОГИ В ШАРІ МАТЕРІАЛУ СПЕЦОДЯГУ

В статті розглядаються питання визначення поглинання тканиною, яка використовується для пошиття спецодягу, вологи. При цьому науково обґрунтовано алгоритм визначення зміни концентрації вологи в матеріалі що дозволить вирішити ряд практичних задач. Для цього застосовується фізико-математичне моделювання, що дозволяє визначити максимальний час експлуатації матеріалу в вологому приміщенні, або рекомендувати час експлуатації матеріалу, який визначається накопиченням вологи на внутрішній стороні матеріалу, що гранично відповідає комфортним умовам праці.

Ключові слова: спецодяг, волога, концентрація вологи, волокна, рідина, коефіцієнт дифузії, концентрація рідини, накопичення вологи, поглинання вологи.

Вступ. Головне призначення спецодягу - захист організму від шкідливих умов, тому на перший план виступають показники якості. Оцінка якості спеціального одягу ґрунтується на визначенні міри її відповідності умовам виробничої діяльності тих працюючих. Показники, що визначають якість, враховують найважливіші домінуючі корисні властивості, що визначають міру застосовності продукції для задоволення тих або інших потреб.

Показники, по яких можна судити про якість спецодягу, підрозділяються на обов'язкові для всіх її видів і обов'язкові для окремих видів залежно від призначення. До обов'язкових показників, що характеризують якість всіх видів спецодягу, відносяться тепловий стан і мікроклімат під одягом, відповідність конструкції умовам праці і антропологічним вимірам, маса виробу, тривалість безперервного використання, жорсткість шва, розривне навантаження, цілісність композиційного матеріалу, стійкість до прання та хімічної чистки. Перераховані показники обумовлюють забезпечення головним чином гігієнічних, експлуатаційних і естетичних вимог.

Захисні властивості забезпечуються наступними обов'язковими показниками захисної ефективності спецодягу від: механічних дій і загальних виробничих забруднень; підвищених температур, теплового випромінювання і знижених температур; відкритого полум'я; радіоактивних речовин; рентгенівських випромінювань; нетоксичного пилу, азбесту, скловолокна; кислот; лугів; електричних зарядів; електронних полів; магнітних полів; води; лаків і фарб; органічних розчинників; комах; сирій нафти; масел і жирів. Проте на даний час не для всіх перерахованих показників розроблені досконалі методи їх визначення і нормативні вимоги.

Слід зазначити, що в ряді робіт [1 - 7] показано, що вимоги споживачів до якості спеціального робочого одягу, в цілому ряді випадків, залишаються

вищими, ніж вказані в стандартах, що негативно позначається на конкурентоспроможності виробів. Тому, очевидно, що уточнення номенклатури показників якості захисного одягу представляє значний науковий і практичний інтерес, що дозволить не лише об'єктивно оцінити його якість, але і врахувати вимоги споживача.

Мета роботи. Метою роботи являється визначення зміни концентрації вологи в шарі матеріалу для спецодягу. Для цього необхідно визначити концентрацію вологи у всіх точках матеріалу по всій його поверхні.

Визначення зміни концентрації вологи в шарі матеріалу спецодягу. Розрахункову схему проходження вологи крізь матеріал спецодягу представимо у вигляді шару товщиною h (рис. 1). З зони

зовнішнього впливу (на малюнку ліворуч) діє вплив вологи. Приймаємо до уваги заволожені приміщення з концентрацією вологи, близької до 100%.

Концентрація вологи в шарі матеріалу в початковий момент часу вважаємо нульовою.

Поставимо задачу визначити зміну концентрації вологи в шарі матеріалу спецодягу. Виходячи з мети захисту робітника необхідно мати відомості про концентрацію вологи на внутрішній поверхні (на рисунку праворуч). Для цього необхідно визначити концентрацію в усіх точках матеріалу.

Фізичний процес збільшення концентрації вологи в матеріалі – це процес проникнення вологи в

текстильний матеріал, що визначається, традиційно процесом дифузії вологи в матеріал. Швидкість підвищення концентрації в матеріалі пов'язують з коефіцієнтом дифузії.

Як відомо, у загальному випадку коефіцієнт дифузії залежить від накопиченої концентрації. У ряді джерел [8] визначається, що у такому разі рівняння руху рідини крізь шар матеріалу має вигляд:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(U, x) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} \quad (1)$$

а коефіцієнт дифузії може бути представлений як:

$$D(U) = D_0 (1 + \sigma U) \quad (2)$$

де U – концентрація вологи в певній точці шару матеріалу; x – координата певної точки в певний момент часу; t – час; D – коефіцієнт дифузії; D_0 – початковий коефіцієнт дифузії; σ – коефіцієнт нелінійності.

У такому випадку рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial D}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (3)$$

Враховуючи (3), можна визначити похідну:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = D_0 \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \quad (4)$$

Тоді рівняння (3) може бути записане у вигляді:

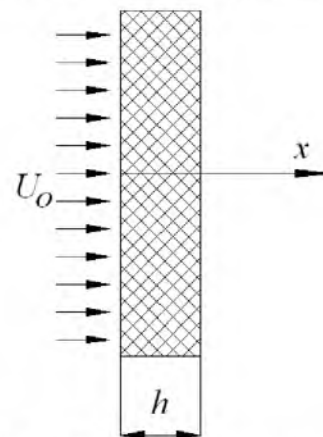


Рис. 1 – Розрахункова схема проходження вологи крізь матеріал спецодягу

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_0 \sigma \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + D_0 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + D_0 \sigma U \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (5)$$

Перейдемо до безрозмірних координат: безрозмірна концентрація $u = \frac{U}{U_0}$, де U_0 визначається рідиною, що поступає ззовні до матеріалу (концентрація рідини в нульовий момент процесу вбирання); безрозмірна координата $z = \frac{x}{h}$, де h – товщина матеріалу; безрозмірний час $\tau = \frac{t}{t_{\max}}$, де t_{\max} – час насичення матеріалу.

Тоді функції і похідні можуть бути записані, як:

$$U = u \cdot U_0; \quad \frac{\partial U}{\partial t} = t_{\max} U_0 \frac{\partial u}{\partial t};$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{U_0}{h} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad \frac{\partial U}{\partial t} = t_{\max} U_0 \frac{\partial u}{\partial t}$$

З врахуванням вище означеного, рівняння (5) має бути переписане у вигляді:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{D_0 \sigma U_0}{t_{\max} h^2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{D_0}{t_{\max} h^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{D_0 \sigma U_0}{t_{\max} h^2} u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6)$$

Введемо додаткові означення:

$$K_1 = \frac{D_0}{t_{\max} h^2}; \quad K_2 = \frac{D_0 \sigma U_0}{t_{\max} h^2} \quad (7)$$

Одержуємо рівняння:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + K_2 U \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + K_2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (8)$$

У цьому рівнянні перший член у правій частині характеризує лінійні властивості; другий і третій члени дають нелінійні складові.

Для вирішення рівняння (8) скористаємося шляхом розподілення змінних, представивши шукану функцію у вигляді нескінченного ряду, що є добутком двох функцій, одна з яких залежить тільки від часу, а друга – тільки від координати:

$$U = \sum_{i=1}^{\infty} V_i \cdot W_i \quad (9)$$

де V_i – функція концентрації, що залежить тільки від часу; W_i – функція концентрації, що залежить тільки від координати.

Окремий член, що залежить від координати, представимо у вигляді:

$$W_i = C_i \left(1 - \sin \frac{\pi z (2i - 1)}{2} \right)$$

Рішення рівняння (9) будемо шукати у вигляді нескінченного ряду.

Виконавши дії по знаходженню похідних функції, отримаємо нелінеаризоване рівняння:

$$\frac{dV}{dt} \sin \frac{\pi z(2i-1)}{2} = -K_1 \cdot V \cdot \frac{\pi^2(2i-1)^2}{4} \sin \frac{\pi z(2i-1)}{2} -$$

$$K_2 \cdot V^2 \cdot \frac{\pi^2(2i-1)^2}{4} \left(\sin \frac{\pi z(2i-1)}{2} \right)^2 + K_2 \cdot V^2 \cdot \frac{\pi^2(2i-1)^2}{4} \left(\cos \frac{\pi z(2i-1)}{2} \right)^2$$

Оскільки функції, що залежать від координати, не скорочуються, використовуємо метод Бубнова-Гальоркіна [9], для реалізації якого помножуємо кожний член останнього рівняння на запропонований член ряду Фур'є $\left(\sin \frac{\pi z(2i-1)}{2} \right)$, що відповідає граничним умовам. При цьому одержуємо систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{dV_i}{dt} \int_0^1 \left(\sin \frac{\pi z(2i-1)}{4} \right)^2 dz = -K_1 \cdot V_i \cdot \frac{\pi^2(2i-1)^2}{4} \int_0^1 \left(\sin \frac{\pi z(2i-1)}{4} \right)^2 dz -$$

$$K_2 \cdot V_i^2 \cdot \frac{\pi^2(2i-1)^2}{4} \int_0^1 \left(\sin \frac{\pi z(2i-1)}{4} \right)^3 dz +$$

$$K_2 \cdot V_i^2 \cdot \frac{\pi^2(2i-1)^2}{4} \int_0^1 \sin \frac{\pi z(2i-1)}{2} \cdot \left(\cos \frac{\pi z(2i-1)}{2} \right)^2 dz$$

Якщо виконати операцію інтегрування, можна одержати рівняння відносно функції, що залежить від часу:

$$\frac{dV_i}{dt} = -(2i-1)^2 \cdot A \cdot (V_i + B \cdot V_i^2),$$

де A , B – константи матеріалу, одержані при інтегруванні. Наявність цих двох констант пов'язана з необхідністю урахування процесу гальмування водовбиранню при накопиченні вологи в матеріалі.

Для розв'язку цього рівняння скористуємося методом розділення змінних. Одержуємо:

$$\frac{dV_i}{V_i + B \cdot V_i^2} = -(2i-1)^2 \cdot A \cdot dt \quad (10)$$

Для розв'язання цього рівняння інтегруємо обидві сторони рівності
Права частина рівності одержується у вигляді:

$$-(2i-1)^2 \cdot A \cdot t + C.$$

Виконуємо інтегрування лівої частини

$$\int_0^t \frac{dV}{V + BV^2}$$

Для інтегрування розкладаємо дріб

$$\frac{1}{V + B \cdot V^2} = \frac{1}{V \cdot (1 + B \cdot V)} = \frac{1}{V} - \frac{B}{1 + B \cdot V}$$

Якщо провести інтегрування, одержимо:

$$\ln \frac{V}{(1 + B \cdot V)^B} = -(2i-1)^2 \cdot A \cdot t + C,$$

що може бути перебудовано у вигляді:

$$\frac{V}{(1+B \cdot V)^B} = C \cdot e^{-(2i-1)^2 \cdot A \cdot t}.$$

Звертаємо увагу, що хоча ми шукаємо залежність V від часу, невідомими залишаються значення коефіцієнтів A і B . Загальних правил розв'язання такого роду рівнянь не існує. Якщо уявити відомими коефіцієнти A і B , можна спробувати розв'язати рівняння методом ітерацій. Тоді на першому кроці уявляємо, що функція, яка взята з розв'язку, одержаному вище, є відомою. Назвемо її $V_i^{(0)}$. Кожний наступний крок можна одержувати з рекурентних формул:

$$V_i^{(j+1)} = (1 + B \cdot V_i^{(j)}) \cdot C \cdot e^{-(2i-1)^2 \cdot A \cdot t}.$$

j – номер рекурентного кроку.

Після ряду обчислювальних експериментів (в програмі MathCAD) знайдено, що досить близькою до шуканої буде функція:

$$V_i = C \cdot e^{-A \cdot (2i-1)t^B},$$

а загальний розв'язок по координаті:

$$U(z, t) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4 \cdot e^{-A(2i-1)t^B} \cdot \sin\left[\frac{(2i-1)\pi z}{2}\right]}{\pi(2i-1)} \quad (11)$$

Коефіцієнти A і B знаходяться в рівнянні (11) в явному вигляді, що дає змогу вільно з ними оперувати. Вони є константами дифузії матеріалу. Зокрема, прийнявши конкретні значення, можна знайти функцію зміни концентрації залежно від товщини і часу (рис. 2).

Швидкість зміни концентрації по товщині як функцію часу можна знайти, продиференціювавши вираз (11) для концентрації:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} A \cdot B \cdot e^{B-1} \cdot e^{-A \cdot (2i-1)t^B} \cdot \sin\left[\frac{(2i-1) \cdot \pi z}{2}\right] \quad (12)$$

Для деякого матеріалу, який характеризується певними значеннями коефіцієнтів A та B , залежності швидкості від координати та часу показані на рис. 3.

Оскільки коефіцієнти одержані в явному вигляді, можна знайти залежність концентрації і швидкості від часу в середньому по товщині:

$$U(t) = \int_0^1 U(z, t) dz = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8e^{-A(2i-1)t^B}}{\pi^2 \cdot (2i-1)^2}, \quad (13)$$

$$v(t) = \frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8ABt^{B-1}e^{-A(2i-1)t^B}}{\pi^2 \cdot (2i-1)}. \quad (14)$$

Залежність загальної концентрації в матеріалі від часу показано на рис. 3. Тоді можна визначити залежність накопичення вологи в матеріалі.

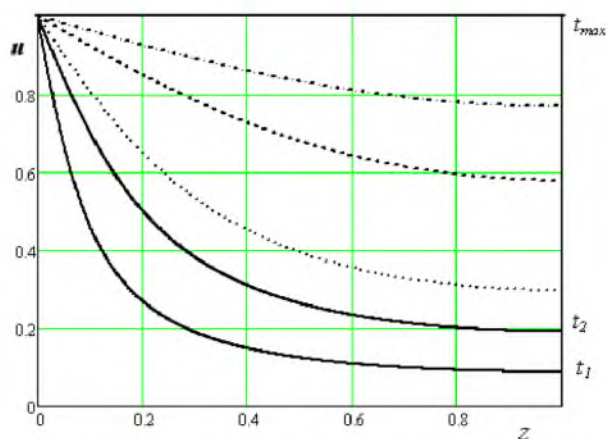


Рис. 2 – Зміна концентрації вологи по товщині шару матеріалу для різних моментів часу ($t_1 < t_2 < \dots < t_6 < \dots \leq t_{\max}$)

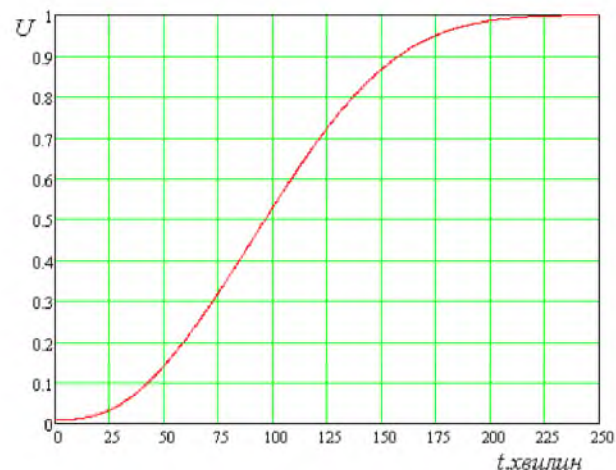


Рис. 3– Зміна концентрації вологи в матеріалі

Висновки. Науково обґрунтовано алгоритм визначення зміни концентрації вологи в матеріалі для виготовлення спеціального робочого одягу, що дозволить вирішити ряд практичних задач, таких як: рекомендувати максимальний час експлуатації матеріалу в вологому приміщенні, що визначається повним стовідсотковим поглинанням вологи матеріалом (його повним намоканням); рекомендувати час експлуатації матеріалу, який визначається накопиченням вологи на внутрішній стороні матеріалу, що гранично відповідає комфортним умовам праці; визначати загальний обсяг вологи, накопичений матеріалом за певний час, при врахуванні густини вологи і загальної площі матеріалу спецодягу.

Список літератури: 1. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды [Текст] / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 346 с. 2. Колесников, П. А. Эксплуатационные свойства тканей и современные методы их оценки [Текст] / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1967. – 306 с. 3. Гущина, К. Г. Ассортимент, свойства и технические требования к материалам для одежды [Текст] / К. Г. Гущина, С. А. Беляева. – М.: Легкая индустрия, 1978. – 160 с. 4. Гущина, К. Г. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества [Текст] / К. Г. Гущина, С. А. Беляева. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 312 с. 5. Склянный, В. П. Гигиеническая оценка материалов для одежды [Текст] / В. П. Склянный, Р. Ф. Афанасьева, Е. Н. Машикова. – Москва, 1985. 6. Чубарова, З. С. Методы оценки качества специальной одежды [Текст] / З. С. Чубарова. – Москва, 1988. 7. Гущина, К. Г. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества [Текст] / К. Г. Гущина, С. А. Беляева, Е. Я. Командрикова и др. – Москва, 1984. 8. Yoneda, M. Measurement of water absorption perpendicular to fabric plane in two- and multi-layered fabric systems [Text] / M. Yoneda, Y. Mizuno, J. Yoneda // Textile Res. J. – 1993. – Vol. 29 (12). – P. 940–949. 9. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галёркина [Текст] / К. Флетчер. – М.: Мир, 1988. – 158 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kolesnikov, P. A. (1965). Heatcover properties of clothes. Easy industry, 346. 2. Kolesnikov, P. A. (1967). Operating properties of fabrics and modern methods of their estimation. Easy industry, 306. 3. Guschina, K. G., Belyaeva, S. A. and other (1978). Assortment, properties and technical requirements to materials for clothes. Easy industry, 160. 4. Guschina, K. G., Belyaeva, S. A. and other (1984). Operating properties of materials for clothes and methods of estimation of their quality. Light and food industry, 312. 5. Sklyannikov, V. P., Afanas'eva, R. F., Mashkova, E. N. (1985). the Hygienical estimation of materials for clothes. 6. Chubarova, Z. S. (1988). Methods of estimation of quality of the special clothes. 7. Guschina K. G., Belyaeva S. A.,

Komandrikova E. Ya. and other (1984). Operating properties of materials for clothes and methods of estimation of their quality. 8. *Yoneda M., Mizuno Y., Yoneda J.* (1993). Measurement of water absorption perpendicular to fabric plane in two- and multi-layered fabric systems, 29(12), 940–949. 9. *Fletcher, K.* (1988). Chislennyye metody na osnovy metoda Galerkin, 158.

Надійшла (received) 25.07.2014

УДК 543.271.3

А. В. ЖУЖА, аспирант, НТУУ «КПИ», Киев

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАМЕННО-ИОНИЗАЦИОННЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

Рассмотрен пламенно-ионизационный метод измерения концентрации газообразных углеводородов. В зависимости от условий и целей применения, возникает необходимость выбора оптимальной структурной схемы построения пламенно-ионизационного газоанализатора. Представлены новые структурные схемы построения пламенно-ионизационных газоанализаторов под конкретные условия применения и требования к быстродействию, надёжности, автоматизации процессов контроля и диагностики прибора.

Ключевые слова: пламенно-ионизационный газоанализатор, детектор, ионизация, атмосфера, выбросы, анализ, пробоподготовка, углеводороды, схема, быстродействие, углеводороды.

Введение. Газообразные углеводороды (C_nH_m) являются одним из основных компонентов – загрязнителей атмосферы, которые оказывают негативное влияние на человека и окружающую среду. Углеводороды – характерный спутник производственных процессов в нефтехимии, энергетике, нефтегазовых магистралях. Значительное количество углеводородов попадает в окружающую среду с отработанными газами транспортных средств: автомобилей, самолетов, тепловозов, сельскохозяйственных и дорожных машин, мопедов, теплоходов, газонокосилок, бензопил и т.д. Соответствующие международные стандарты нормируют уровни выбросов углеводородов:

- автомобилей: правила Европейской экономической комиссии (ЕЭК) ООН по транспорту, нормативы Евро 2 – Евро 6.

- самолетов: нормативы международной организации гражданской авиации (нормативы ИКАО);

- морских и речных судов: нормативы МАРПОЛ;

Все эти нормативы предусматривают измерение концентрации газообразных углеводородов автоматическими высокочувствительными газоанализаторами.

Нормирование и контроль выбросов является общемировой и европейской проблемой и именно страны ЕС разработали комплексный подход к нормированию выбросов автотранспорта как при изготовлении на автозаводах, так и при их дальнейшей эксплуатации. Разработаны четкие методики экологической проверки автомобилей, являются классификационные требования к газоанализаторам, с помощью которых происходит инструментальный контроль выбросов, созданы средства их метрологического обеспечения. Адаптация

© А. В. ЖУЖА, 2014