

3.19. COMPUTER SIMULATION OF THE PROTECTIVE EFFECT OF ETHYL SILICATE GEL COATING ON TEXTILE MATERIALS IN CONDITIONS OF CONSTANT OR DYNAMIC HEAT

3.19. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХИСНОЇ ДІЇ ЕТИЛСИЛКАТНОГО ГЕЛЕВОГО ПОКРИТТЯ ПО ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ В УМОВАХ СТАЛОГО АБО ДИНАМІЧНОГО ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ

Вступ. Практично всі звичайні тканини запалюються і горять. Необхідність термічного захисту зумовлена низькою здатністю текстилю чинити опір конвективній, променистій тепловій енергії або комбінації двох або більше¹²⁷⁸. Незадовільні вогнезахисні властивості текстильних матеріалів викликають потребу у об'єктивній оцінці відомих методів підвищення вогнестійкості й розробці нових підходів.

Розрізняють три основні підходи щодо поліпшення вогнезахисних властивостей текстильних матеріалів¹²⁷⁹: (а) використання текстильних матеріалів, за своєю природою вогнестійких, що містять волокна з високими експлуатаційними характеристиками; (б) хімічно модифікувати існуючі текстильні вироби; (в) використовувати антипірени у синтетичних волокнах і/або для спеціальної обробки поверхні.

У технічній літературі розглядаються традиційні та передові процеси модифікації поверхні натуральних і синтетичних волокон і тканин з метою поліпшення їх вогнестійкості. Розробка нових методів з використанням золь-гель методу¹²⁸⁰, просочення розчинами, пошарової модифікації або збірки багатшарових покриттів дає переваги з точки зору підвищення властивостей вогнестійкості та надання текстильним матеріалам принципово нових властивостей, таких як гідрофобність, здатність до самоочищення і біоактивність.

Нанотехнології можна використовувати для підвищення хімічних, біологічних, фізико-хімічних, термомеханічних, оптичних, електричних та ін. властивостей текстильних матеріалів. Наприклад, вже випускаються і активно використовуються антибактеріальні, що самоочищаються й електропровідні текстильні вироби з нанорозмірною структурою¹²⁸¹.

Незважаючи на значний прогрес у виробництві функціональних тканин, залишається не вирішеним завдання спрощення технології як виготовлення тканини, так і її модифікування.

В останні роки став активно розвиватися науковий напрям з розробки вогнестійких покриттів по текстильних матеріалах з використанням золь-гель методу. Ця технологія дозволяє створювати нові матеріали з високим ступенем однорідності на молекулярному рівні та з винятковими фізичними і хімічними властивостями, які у значній мірі відрізняються від властивостей матеріалів, отриманих традиційними шляхами¹²⁸².

Незважаючи на те, що цей метод використовується давно, його застосування для уповільнення загоряння текстильних виробів було розпочато зовсім недавно. Цікаві результати наведені у роботі¹²⁸³. Було показано, що золь-гель процес може призводити до утворення наночастинок діоксиду кремнію, що генеруються *in situ*, або покриттів з діоксиду кремнію безпосередньо на поліефірних, бавовняних тканинах та їх сумішах у разі

¹²⁷⁸ Константинова Н. И., Молчадский О. И., Баратов А. Н. Проблемы защиты материалов из смеси волокон. *Пожарная безопасность*. 2003. № 3. С. 109-115.

¹²⁷⁹ Bourbigot S. Flame retardancy of textiles: new approaches. *Advances in fire retardant materials woodhead publishing series in textiles*. 2008. P. 9-40.

¹²⁸⁰ Drisko G. L., Sanchez C., Inorg Eur. J. Hybridization in materials science. *Evolution, current state and future aspirations Chem*. 2012. No. 32 (2012). P. 5097-5105.

¹²⁸¹ Проданчук М. Г., Сененко Л. Г., Дишніевич Н. Є. Текстильні матеріали та одяг – сучасні проблеми безпеки. *Легка промисловість*. 2004. № 4. С. 36-37.

¹²⁸² Brancatelli G., Colleoni C., Massafra M. R., Rosace G. Effect of hybrid phosphorus-doped silica thin films produced by sol-gel method on the thermal behaviour of cotton fabrics. *Polymer Degradation and Stability*. 2011. 96 (4), p. 483-4 90.

¹²⁸³ Yaman N. Preparation and flammability properties of hybrid materials containing phosphorous compounds via sol-gel process. *Fibers and Polymers*. 2009. Vol. 10. No. 4. P. 413-418.

використання різних прекурсорів SiO₂. У роботі¹²⁸⁴ досліджено вплив різних співвідношень TEOS / H₂O (1:1, 2:1 і 3:1) на вогнезахист бавовняних тканин. Однак у деяких працях опубліковані суперечливі дані про вплив золь-гель процесу на підвищення вогнестійкості тканин різної природи. Наприклад, у роботі¹²⁸⁵ було виявлено, що золь-гель обробка діє вибірково на різні волокна у тканинах: вогнестійкість полієфіру не покращується, а у сумішевих тканинах, що містять 35 мас.% бавовни, встановлено помітне збільшення часу до спалаху (з 14 до 27 с).

Найбільший успіх мають комплексні органо-неорганічні композиції, що містять, крім складних органічних сполук, неорганічні солі, здатні розкладатися з ендотермічним ефектом або виділяти під час нагрівання газу. Найбільш широко використовується у якості неорганічного компонента діамоній гідросульфат. Є достатня кількість публікацій, в яких обговорюється вплив кількості та концентрації діамоній гідросульфату у комплексних антипіренових композиціях. Відзначається, що його дія є найбільш ефективною при вмісті не більше 15-20%¹²⁸⁶.

Однак практично немає відомостей про вплив умов проведення золь-гель процесу у разі закріплення захисного покриття на волокнах тканини на такі властивості текстильних матеріалів як еластичність і збереження товарного вигляду.

Основними недоліками таких технологій є тривалість процесу і складна будова синтетичних компонентів суміші, які піддаються гелюванню. У технічній літературі немає відомостей про застосування у якості просочувальних композицій попередньо одержаних гідролізітів кремнійорганічних сполук.

З огляду на відомості про вплив галогенованих антипіренів на екологічну обстановку у світі й здоров'я людей, представляється перспективним розробити новий підхід до модифікації тканин, який дозволив би у разі використання традиційного золь-гель процесу і найпростіших нешкідливих антипіренів захистити тканини від дії вогню, підвищити їх вогнестійкість при збереженні їх природної еластичності і зовнішнього вигляду.

Недостатність теоретичних і експериментальних досліджень передбачає визначення завдання цього дослідження: на основі законів тепло- і масообміну побудувати математичну модель захисної дії гелевого покриття, що за умов максимально можливої простоти і мінімальної штучності враховує основні процеси, які протікають у системі «волокно – захисне покриття – навколишнє середовище», і у рамках єдиного підходу описує викликані нагріванням від зовнішнього теплового потоку процеси теплопереносу, термічного розкладання, випаровування й винесення маси, а також розробити алгоритми та програмне забезпечення щодо комп'ютерного моделювання захисної дії такого покриття у умовах сталого або динамічного теплового впливу.

Постановка завдання і його вирішення. Гелеве покриття розглядається як пористе середовище, основу якого складає тверда фаза силікоксанового каркасу SiO₂.

Просторова схема задачі прогрівання волокна, захищеного шаром гелевого покриття представлено на Рис. 1. На початковій стадії вільний об'єм пор силікоксанового каркасу частково заповнений компонентами вихідного золю, до яких відносяться: вільна вода (індекс «w»), зв'язана вода (індекс «fw»), залишки розчинника етанолу (індекс «e»).

У волокні текстильного матеріалу виділяємо дві складові: вуглець (індекс «C»), що залишається у разі повного піролізу волокна, й елементи, що під час нагрівання стають газоподібними продуктами піролізу (індекс «p»).

Під час нагрівання в гелевому покритті спочатку переходять у газовий стан залишки органічного розчинника (етанолу), що знаходиться у міжглобульному просторі та порак

¹²⁸⁴ Alongi J., Ciobanu M., Carosio F., Tata J., Malucelli, G. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics treated by sol-gel process. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011. No. 119. P. 1961-1969.

¹²⁸⁵ Tata J., Alongi J., Carosio F., Frache A. Optimization of the procedure to burn textile fabrics by cone calorimeter: part I. Combustion behavior of polyester. *Fire and Materials*. 2011. No. 35. P. 397-409.

¹²⁸⁶ Там само.

покриття. При досягненні температури близько 100°C із покриття випаровується вільна вода, а при досягненні температури близько 120-150°C із покриття видаляється вже зв'язана вода. Процеси випаровування охолоджують гелеве покриття, що уповільнює прогрівання і подальше розкладання матеріалу волокна.

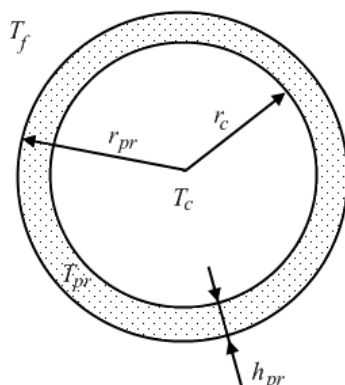


Рис. 1. Схема волокна, захищеного шаром гелевого покриття

Виходячи із термограм гелів, видно, що при досягненні температури близько 400°C у покритті починаються екзотермічні процеси реструктуризації силоксанового каркасу з утворенням інертного матеріалу (пов'язані з ним величини позначимо індексом «*in*») і паралельним виділенням додаткової кількості водяної пари і етанолу.

Целюлозне волокно прогривається під шаром гелевого покриття за рахунок теплопровідності і при досягненні критичної температури піролізу (для целюлозовмісних матеріалів приблизно 200-250 °C) починають протікати процеси розкладання з утворенням вуглецевого залишку і газоподібних продуктів піролізу.

Поява додаткової кількості газів всередині системи внаслідок протікання реакцій газоутворення під впливом нагрівання призводить до суттєвого зростання тиску у порожнинах волокна та захисного покриття. Це у відповідності до законів гідродинаміки викликає конвекційний переніс газів назовні, так що вони:

1) не встигають прореагувати всередині системи;

2) не дозволяють кисню повітря із зовні потрапити до системи, що унеможливорює процеси окиснення продуктів піролізу і вуглецевого залишку всередині системи. Проникнення кисню із зовні, що має виключно дифузійний характер, стає можливим тільки по завершенню внутрішнього газоутворення. Викладені обставини дозволяють при моделюванні процесів не враховувати гомогенні реакції у газовій фазі між газовими компонентами, що уходять із системи, а також враховувати не всі газові компоненти, якщо компоненти, що залишилися в описі, забезпечують конвекційний потік із системи.

На підставі фізичної моделі створено математичну модель вогнезахисної дії кремнійорганічного покриття по целюлозовмісному волокну ниток тканини.

Через малу товщину об'єктів можна знехтувати залежністю параметрів від просторової координати, в результаті чого опис зводиться до системи звичайних диференціальних рівнянь відносно часу. Будемо враховувати процеси теплопередачі, нагрівання, розкладання, окиснення і масопереносу.

Зміна маси *конденсованих складових захисного гелевого покриття* під час нагрівання:

$$\frac{dm_i}{d\tau} = -R_i(T_{pr}, m_i); \quad R_i(T, m_i) = k_i m_i \exp\left(\frac{T - T_{i,cr}}{\Delta T_i}\right), \quad (1)$$

де $i = e, w, fw, si, in$;

R_i – швидкості зміни маси i -ої компоненти;

k_i – характерний зворотній час відповідного перетворення, s^{-1} ;

$T_{i\ cr}$ – характерне (критичне) значення температури, суттєва відмінність від якого призводить до прояву експоненційного характеру залежності;

ΔT_i – ширина перехідної області температур, К.

Швидкості появи маси парів води $m_{w, si-in}$ і етанолу $m_{e, si-in}$ у процесі *реструктуризації твердої складової покриття*, дорівнюють:

$$\frac{dm_{w, si-in}}{d\tau} = k_{w, si-in} \cdot k_{si-in}^{gas} \cdot R_{si}(T_{pr}, m_{si}), \quad (2)$$

$$\frac{dm_{e, si-in}}{d\tau} = k_{e, si-in} \cdot k_{si-in}^{gas} \cdot R_{si}(T_{pr}, m_{si}), \quad (3)$$

де k_{si-in}^{gas} – частка гелевого покриття, яка під час реструктуризації переходить у газоподібний стан;

$k_{w, si-in}$ і $k_{e, si-in}$ – частки маси води і етанолу у газовій складовій, що виділяється у процесі реструктуризації. Ці складові є домінуючими, внаслідок чого можна вважати, що $k_{w, si-in} + k_{e, si-in} = 1$.

Швидкість зміни *маси конденсованих складових волокна* описуємо двома рівняннями, а саме зміною маси складових m_p , які в ході піролізу переходять у газоподібні продукти CO_2 , CH_4 , і зміною маси вуглецевого залишку m_c , що залишається після виносу газоподібних продуктів розкладання і вступає у реакцію окиснення за умови надходження кисню із навколишнього середовища через шар пористого покриття за рахунок дифузії:

$$\frac{dm_p}{d\tau} = -R_p(T_c, m_p), \quad \frac{dm_c}{d\tau} = -R_c(T_c, \varphi_{O_2}^c, F_c). \quad (4)$$

Швидкості *генерації маси окремих піролізних газів* будуть становити фіксовані частки від загальної швидкості піролізу, тобто

$$\frac{dm_{CO_2 p}}{d\tau} = k_{CO_2 p} \cdot R_p(T_c, m_p), \quad \frac{dm_{CH_4 p}}{d\tau} = k_{CH_4 p} \cdot R_p(T_c, m_p), \quad (5)$$

де $k_{CO_2 p}$ і $k_{CH_4 p}$ – безрозмірні коефіцієнти, що відображають масові частки продуктів піролізу ($k_{CO_2 p} + k_{CH_4 p} \leq 1$).

Щільність потоку i -ої газової компоненти між волокном і покриттям визначається конвекцією, яка зумовлена різницею тисків компоненти в матеріалі волокна і покриття, і молекулярною дифузією, яка зумовлена різницею концентрацій компоненти в матеріалі волокна і покриття:

$$j_{c-pr}(\varphi_i) = j_{c-pr}^{conv}(\varphi_i) + j_{c-pr}^{diff}(\varphi_i), \quad (6)$$

де i – компоненти CO_2 , O_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_5OH , N_2 ;

$j_{c-pr}^{conv}(\varphi_i)$ – конвекційна складова щільності потоку i -ої газової компоненти, зумовлена різницею тисків i -ої компоненти в матеріалі волокна і покриття,

$j_{c-pr}^{diff}(\varphi_i)$ – дифузійна складова щільності потоку і-ої газової компоненти, зумовлена різницею концентрацій і-ої компоненти в матеріалі волокна і покриття.

Тоді, рівняння, що описують *динаміку газових компонент в об'ємі волокна*, можна представити як суму швидкості витрачання або утворення і-ої компоненти під час протікання реакції окиснення і масопереносу між волокном і покриттям внаслідок конвекції і молекулярної дифузії. Наприклад, швидкість зміни концентрації CO₂ в об'ємі волокна зумовлена протіканням процесів піролізу целюлозовмісного матеріалу волокна, гетерогенного окиснення вуглецевого залишку і конвекційного унесення із волокна та має вигляд:

$$V_{cav}^c \frac{d\varphi_{CO_2}^c}{d\tau} = \beta_{CO_2}^c \frac{R_c(T_c, \varphi_{O_2}^c, F_c)}{\mu_c} + k_{CO_2p} \frac{R_p(T_c, m_p)}{\mu_{CO_2}} - j_{c-pr}(\varphi_{CO_2}) F_{c.cav}, \quad (7)$$

де V_{cav}^c – об'єм порожнин у волокні, м³;

$\beta_{CO_2}^c$ – стехіометричний коефіцієнт реакції окислення вуглецю киснем;

μ_i – молярні маси відповідних компонентів ($i = C, CO_2$);

$F_{c.cav}$ – загальна площа перерізів порожнин на поверхні волокна;

Енергетичний баланс у волокні враховує витрачання енергії на протікання процесу піролізу вихідного матеріалу волокна і унесення певної частки теплоти конвекційним потоком піролізних газів, виділення енергії внаслідок протікання реакції окиснення вуглецевого залишку волокна, а також теплові потоки теплопровідністю між захисним покриттям і волокном. Тоді, *зміна температури волокна під час нагрівання* описується рівнянням:

$$\begin{aligned} (m_c c_c + m_p c_p) \frac{dT_c}{d\tau} = & R_p(T_c, m_p) \cdot [\Delta H_p - c_p^{gas}(T_c - T_0)] + \\ & + \beta_{CO_2}^c \frac{R_c(T_c, \varphi_{O_2}^c, F_c)}{\mu_c} \mu_{CO_2} \left[\Delta H_{CO_2} - \left(c_{CO_2} + \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{CO_2}} c_{O_2} \right) (T_c - T_0) \right] + \\ & + q_{c-pr}(T_c, T_{pr}) \cdot F_c, \end{aligned} \quad (8)$$

де $F_c = 2\pi r_c L$ – площа поверхні волокна, м²;

ΔH_p – питома теплота піролізу волокна, взята при температурі T_c , в розрахунку на кілограм продуктів піролізу, Дж·кг⁻¹;

$c_p^{gas} = k_{CH_4p} \cdot c_{CH_4} + k_{CO_2p} \cdot c_{CO_2}$ – ізобарна питома масова теплоємність газоподібних продуктів піролізу;

$c_{CH_4}, c_{CO_2}, c_{O_2}$ – відповідно, ізобарні питомі масові теплоємності CH₄, CO₂ і O₂, Дж·К⁻¹·кг⁻¹;

ΔH_{CO_2} – питомий тепловий ефект реакції окислення вуглецю, взятий за температури T_c , у розрахунку на кілограм CO₂, що утворився, Дж·кг⁻¹;

μ_i – молярні маси відповідних компонентів ($i = C, CO_2, O_2$).

Останній доданок визначає тепловий потік від захисного шару покриття до волокна за рахунок теплопровідності і описується рівнянням:

$$q_{c-pr}(T_c, T_{pr}) = \lambda_{pr} \frac{T_{pr} - T_c}{h_{pr}}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (9)$$

де λ_{pr} – коефіцієнт теплопровідності матеріалу захисного покриття;

T_c – середнє об'ємне значення температури волокна.

Рівняння *енергетичного балансу у захисному покритті* задає зміни температури під час нагрівання:

$$\begin{aligned} \left(\sum_i m_i c_i \right) \frac{dT_{pr}}{d\tau} = & \sum_i R_i(T_{pr}, m_i) \cdot \left[\Delta H_i - c_i(T_{pr} - T_0) \right] + \\ & + R_{si}(T_{pr}, m_e) \cdot \left[\Delta H_{si-in} - k_{si-in}^{gas} \cdot c_{si-in}^{gas} (T_{pr} - T_0) \right] - \\ & - q_{c-pr}(T_c, T_{pr}) \cdot F_c + q_{pr-f}(T_{pr}, T_f) \cdot F_{pr}, \end{aligned} \quad (10)$$

де F_{pr} - площа контакту між захисним покриттям і зовнішнім середовищем, м^2 ;

ΔH_i – питома масова теплота газифікації (випаровування) i -ої компоненти із захисного покриття, взята за температури T_{pr} , $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

ΔH_{si-in} – питома масова теплота реструктуризації твердої складової покриття, взята за температури T_{pr} , $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

c_i – ізобарна питома масова теплоємність i -ої компоненти, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$c_{si-in}^{gas} = k_{w, si-in} c_{sw} + k_{e, si-in} c_{se}$ – ізобарна питома масова теплоємність газоподібних продуктів реструктуризації каркасу, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

c_{sw}, c_{se} – ізобарна питома масова теплоємність газоподібних продуктів сушіння (пари води і етанолу), $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Перша складова в рівнянні (10) визначає тепловий ефект випаровування і унесення із гелевого покриття етилового спирту; вільної і зв'язаної води, другий доданок враховує тепловий ефект процесу реструктуризації твердого силоксанового каркасу покриття. Наступний доданок визначає тепловий потік від захисного шару покриття до волокна за рахунок теплопровідності (рівняння 9). Остання складова формули (10) відображає потік теплоти від зовнішнього середовища до захисного покриття. Щільність цього потоку дорівнює:

$$q_{pr-f}(T_{pr}, T_f) = \frac{T_f - T_{pr}}{\frac{h_{pr}}{2\lambda_{pr}} + \frac{1}{\alpha}}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (11)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішнього середовища до поверхні захисного покриття.

Як вже було сказано, проникнення кисню із зовні до поверхні волокна через шар захисного покриття має виключно дифузійний характер і стає можливим тільки по завершенню внутрішнього газоутворення. Таким чином, до завершення процесів газоутворення (видалення етанолу, випаровування вільної води і зв'язаної води, піролізу органічної маси волокна, газоутворення, що пов'язане з процесом реструктуризації твердого каркасу) врахування газової підсистеми даної моделі є не обов'язковим. Формально це означає, що дану стадію процесу (до закінчення реструктуризації твердого каркасу) можна описувати без урахування рівнянь газової фази. Крім того, утворення надлишку CO_2 при горінні вуглецевого залишку значно подавляє потрапляння нових порцій кисню всередину

системи, що суттєво ускладнює процес окислення захищеного волокна у порівнянні із незахищеним. Це означає, що при описі гетерогенного горіння вуглецевого залишку волокна врахування газових продуктів горіння стає обов'язковим. Після закінчення піролізу треба використовувати рівняння балансу маси вуглецевого залишку, рівняння балансу основних газових компонент: кисню, діоксиду вуглецю, азоту, а також рівняння енергетичного балансу.

У відповідності розробленій математичній моделі проведено комп'ютерне моделювання нагрівання одиночного волокна текстильного матеріалу, захищеного гелевим покриттям. Воно описує часовий інтервал від початку нагрівання до моменту можливого загоряння вуглецевого залишку волокна.

При моделюванні використовували залежність температури середовища від часу у вигляді рівняння:

$$t_f(\tau) = t_{f,\max} - (t_{f,\max} - t_{f,0}) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_f}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (12)$$

де $t_{f,\max}$, $t_{f,0}$ – відповідно максимальне і початкове значення температури середовища, $^\circ\text{C}$;

τ_f - характерний час зміни температури середовища.

На Рис. 2 представлено динаміку зміни температури незахищеного волокна, волокна діаметром 60 мкм із гелевим покриттям (товщина шару $h_{pr} = 5$ мкм), зміни мас конденсованих складових і газових продуктів, що виділяються в процесі нагрівання системи.

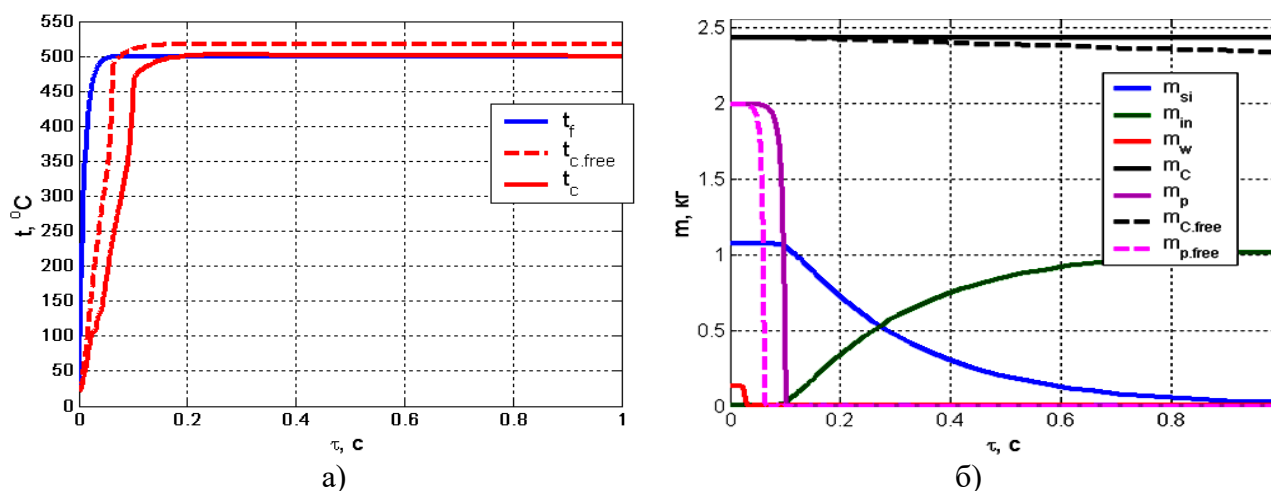


Рис. 2. Графіки динаміки змін температури зовнішнього середовища, незахищеного і захищеного волокон (а), а також мас конденсованих компонент системи (б) під час нагрівання захищеного гелевим покриттям волокна, при $t_{f,\max} = 500$ $^\circ\text{C}$ і константі часу $\tau_f = 1 \cdot 10^{-2}$ с

Незахищене волокно швидко прогрівається з інтенсивною втратою маси конденсованих складових. Спочатку зменшується піролізна частина волокна, а потім починає інтенсивно зменшуватися вуглецевий залишок. Враховуючи, що температура незахищеного волокна починає перевищувати температуру середовища, що обумовлено протіканням екзотермічних процесів, можна зробити висновок, що відбувається горіння волокна. Температура досягає значень більше 1000°C , що є характерним для гомогенного полуменового горіння і обумовлено вільним доступом кисню із навколишнього середовища до поверхні волокна і вільним надходженням газоподібних продуктів піролізу.

Захищене гелевим покриттям волокно прогрівається значно повільніше, що обумовлено протіканням ендотермічних процесів випаровування і розкладання у захисному шарі. Крім того, температура захищеного волокна починає перебільшувати температуру навколишнього середовища пізніше, ніж у незахищеного волокна, швидкість зменшення маси вуглецевого залишку значно менша, отже екзотермічні процеси окиснення вуглецевого залишку при нагріванні протікають повільно за рахунок ускладненої дифузії кисню через шар гелевого покриття.

При нагріванні незахищеного волокна до 500°C його температура дещо перебільшує температуру навколишнього середовища, але швидкість втрати маси піролізної частини волокна і вуглецевого залишку значно менші, ніж за температури середовища 700°C . Крім того, температура волокна не досягає 600°C , отже це вказує, що протікають екзотермічні реакції горіння целюлозного волокна в гетерогенному режимі.

За умови нагрівання незахищеного волокна до 500°C його температура дещо перебільшує температуру навколишнього середовища, але швидкість втрати маси піролізної частини волокна і вуглецевого залишку значно менші, ніж за температури середовища 700°C . Крім того, температура волокна не досягає 600°C , отже це вказує, що протікають екзотермічні реакції горіння целюлозного волокна в гетерогенному режимі.

Під час нагрівання захищеного волокна до 500°C температура волокна не перебільшує температуру навколишнього середовища, тобто не відбуваються екзотермічні процеси горіння, що зумовлено відсутністю контакту вуглецевого залишку целюлозовмісного волокна з киснем навколишнього середовища.

За температури середовища 700°C (Рис. 3) незахищене волокно швидко прогрівається з інтенсивною втратою маси конденсованих складових. Враховуючи, що температура незахищеного волокна починає перевищувати температуру середовища і досягає значень більше 1000°C , можна зробити висновок, що відбуваються екзотермічні процеси горіння волокна. Така температура є характерною для гомогенного полуменевого горіння, що обумовлено вільним доступом кисню із навколишнього середовища до поверхні волокна і вільним надходженням газоподібних продуктів піролізу.

Захищене гелевим покриттям волокно прогрівається повільніше, що обумовлено протіканням ендотермічних процесів випаровування і розкладання у захисному шарі. Крім того, температура захищеного волокна починає перебільшувати температуру навколишнього середовища пізніше, ніж у незахищеного волокна, швидкість зменшення маси вуглецевого залишку значно менша, отже екзотермічні процеси окиснення вуглецевого залишку при нагріванні протікають повільно за рахунок ускладненої дифузії кисню через шар гелевого покриття.

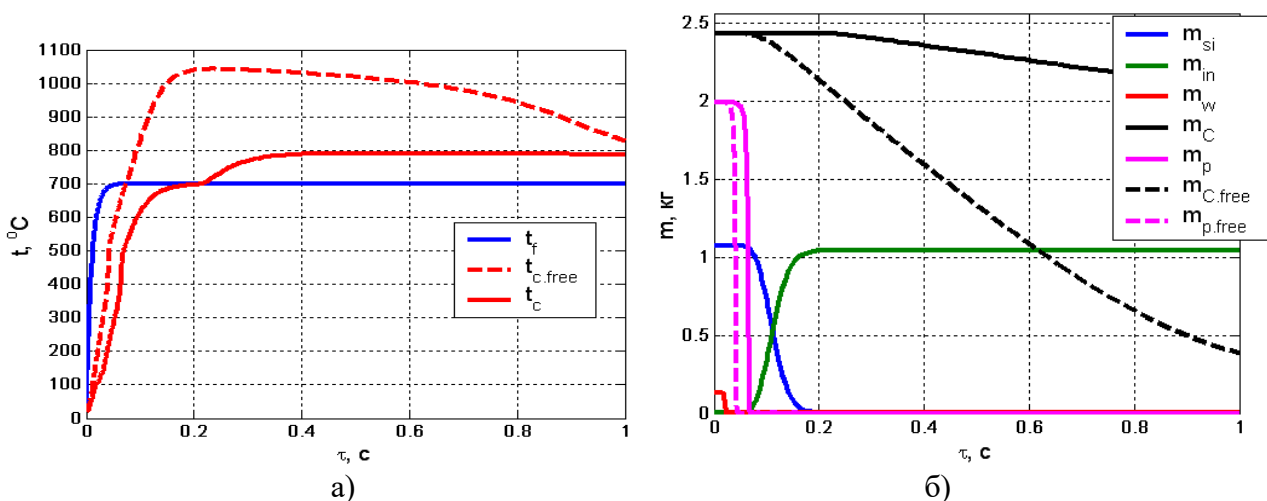


Рис. 3. Графіки динаміки змін температури зовнішнього середовища, незахищеного і захищеного волокон (а), а також мас конденсованих компонент системи під час нагрівання захищеного гелевим покриттям волокна, при $t_{f\max} = 700^{\circ}\text{C}$ і константі часу $\tau_f = 1 \cdot 10^{-2} \text{ c}$

Отже гелеве покриття не тільки охолоджує матеріал, але і створює захисний ізолюючий шар.

Збільшення товщини гелевого покриття уповільнює процес прогрівання волокна, більш надійно ізолює поверхню карбонового залишку від кисню навколишнього середовища, що обумовлює збільшення часу вогнестійкості.

Висновки. Таким чином, вперше розроблено математичну модель вогнезахисної дії кремнійорганічного покриття по целюлозним волокнам текстильного матеріалу.

Створене програмне забезпечення може застосовуватися в якості інструмента для одержання прогностичних оцінок параметрів пожежної безпеки текстильного матеріалу, виходячи із товщини гелевого покриття і рівня теплового впливу на поверхню захищеного матеріалу.

Література

1. Константинова Н. И., Молчадский О. И., Баратов А. Н. Проблемы защиты материалов из смеси волокон. *Пожарная безопасность*. 2003. № 3. С. 109-115.
2. Bourbigot S. Flame retardancy of textiles: new approaches *Advances in fire retardant materials. Woodhead publishing series in textiles*. 2008. P. 9-40.
3. Drisko G. L., Sanchez C., Inorg Eur. J. Hybridization in materials science. *Evolution, current state and future aspirations Chem*. 2012. No. 32 (2012). P. 5097-5105.
4. Проданчук М. Г., Сененко Л. Г., Дишиневич Н. Є. Текстильні матеріали та одяг – сучасні проблеми безпеки *Легка промисловість*. 2004. № 4. С. 36-37.
5. Brancatelli G., Colleoni C., Massafra M. R., Rosace G. Effect of hybrid phosphorus-doped silica thin films produced by sol-gel method on the thermal behaviour of cotton fabrics. *Polymer Degradation and Stability*. 2011. 96 (4). p. 483-490.
6. Yaman N. Preparation and flammability properties of hybrid materials containing phosphorous compounds via sol-gel process. *Fibers and Polymers*. 2009. Vol. 10. No. 4. P. 413-418.
7. Alongi J., Ciobanu M., Carosio F., Tata J., Malucelli, G. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics treated by sol-gel process. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011. No. 119. P. 1961-1969.
8. Tata J., Alongi J., Carosio F., Frache A. Optimization of the procedure to burn textile fabrics by cone calorimeter: part I. Combustion behavior of polyester. *Fire and Materials*. 2011. No. 35. P. 397-409.