

**УРАХУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРИСТОСТІ
В МОДЕЛІ СТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РУЙНУВАННЯ
КОМПОЗИЦІЙНОГО ТЕПЛОЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ**

Зміст

	Вступ	
1	Аналіз процесів руйнування КТЗП	
2	Вибір моделі пористості	
3	Визначення впливу розмірів пор на прогрів КТЗП	
4	Висновки	
5	Список літератури	

ВСТУП

Пожежі є одними з найнебезпечніших видів надзвичайних ситуацій, що призводять до величезних збитків і створюють загрозу для людського життя. Яскравим прикладом великої пожежі є подія, що сталася в супермаркеті «Нова Лінія» м. Запоріжжя зі значними збитками, коли було повністю зруйновано супермаркет.

Кожний об'єкт, на якому застосовані системи протипожежного захисту, є захищеним від пожежі та її наслідків лише у тому випадку, коли ці системи правильно експлуатуються.

Необхідність в тепловому захисті будівельних конструкцій виникає в тих випадках, коли незахищений конструктивний елемент під дією теплових потоків неминуче повинен зруйнуватися. В якості захисту таких елементів від теплових потоків пропонується використати теплозахисні матеріали. Залежно від конкретних умов, можуть бути реалізовані різні методи теплового захисту з використанням теплозахисних покриттів, що руйнуються.

Більшість теплозахисних покриттів є композиційними. Процеси, що проходять в композиційних теплозахисних покриттях (КТЗП) при нагріві, пов'язані з рядом фізико-хімічних перетворень окремих складових матеріалу і носять складний характер, що вимагає усебічного розгляду і аналізу.

Об'єкт дослідження - процеси тепломасопереносу в композиційних теплозахисних покриттях при дії високо-інтенсивних теплових потоків.

Предмет дослідження - вплив параметрів пористості на процеси тепломасопереносу в композиційних теплозахисних покриттях при дії високо-інтенсивних теплових потоків.

Метою роботи є підвищення якості підготовки спеціалістів, при вивченні фізичних процесів, пов'язаних з руйнуванням композиційних теплозахисних покриттів при впливі високо-інтенсивних теплових потоків.

Для досягнення поставленої мети, в роботі сформульовані і вирішені наступні задачі:

1. Проведено аналіз фізичних процесів, пов'язаних з руйнуванням композиційних теплозахисних покриттів при впливі високо-інтенсивних теплових потоків.
2. Проведено аналіз моделей пористого тіла.
3. Створена модель руйнування композиційного теплозахисного покриття з урахуванням обраної моделі пористості.
4. Отримана оцінка впливу геометричних розмірів пор на прогрів матеріалу покриття при заданих величинах теплових потоків.

Практичне значення одержаних результатів дозволяє:

1. Виробникам протипожежного обладнання визначати тепловий стан будівельних конструкцій, які захищаються спеціальними теплозахисними матеріалами.
2. Надати рекомендації з технічних характеристик та конструкційного виконання теплозахисних матеріалів для захисту будівельних конструкцій.

1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ КТЗП

Аналіз робіт, присвячених розрахункам теплового захисту з використанням КТЗП, показав, що існуючі нині методи розрахунку теплового захисту будівельних конструкцій дозволяють досить точно встановити значення потрібної товщини покриття. Це пояснюється тим, що не враховуються багато процесів, що протікають в матеріалі КТЗП, або їх облік відбувається не досить повно і не комплексно. Так, для достовірнішого визначення температурного поля в матеріалі, повинні враховуватися наступні процеси і явища, що протікають в КТЗП, характерні при високо-інтенсивній тепловій дії:

- відображення теплових потоків (ТП) від поверхні; випромінювання тепла поверхнею, що нагрівається і нагрітою; - зниження величини теплового потоку при проходженні крізь газоподібні продукти руйнування;

- теплові ефекти процесів, пов'язаних з плавленням і випаром наповнювача, піролізом єднального, реакцій взаємодії газоподібних продуктів руйнування;

- теплофізичні характеристики початкового матеріалу, прококсованого шару і газоподібних продуктів руйнування;

- передача тепла в прококсованому шарі, яка при високих температурах (характерних лазерному руйнуванню), робить значний вплив на теплопровідність матеріалу;

- вплив газоподібних продуктів руйнування на величину теплового потоку до поверхні (вдувши газів).

Відмітимо, що існуючі нині розрахунки теплового захисту також не враховують різноманіття КТЗП. Так представлені у відомій літературі математичні моделі руйнування КТЗП, не дають

можливості їх використання для розрахунків інших видів покриттів, оскільки механізми поглинання енергії високо-інтенсивних ТП різними матеріалами можуть відрізнятися.

Таким чином, дослідження фізичних процесів, пов'язаних з поглинанням КТЗП високо-інтенсивних ТП, є актуальним завданням.

Аналітичне визначення теплового стану захисного покриття дозволяє відбити вплив різних чинників, оцінити їх значущість, виділити головні з них.

Опишемо основні етапи теплового руйнування КТЗП, рис. 1.1 [1].

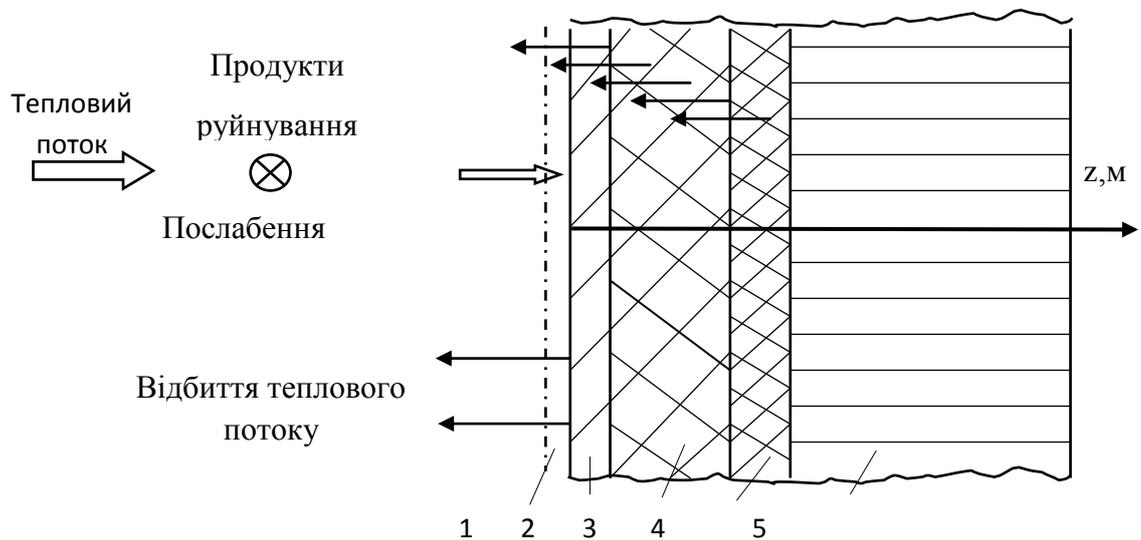


Рисунок 1.1. Модель руйнування КТЗП:

1 – шар продуктів руйнування;

2 – плівка розплаву;

3 – прококсований шар;

4 – зона деструкції;

5 – однорідний матеріал;

ТП – тепловий потік

При підвищенні температури КТЗП до 400 К, відбувається дегідратація КТЗП - виділення адсорбційної вологи. При подальшому підвищенні температури до 600 К, на поверхні і в прилеглому об'ємі КТЗП починається термічна деструкція смоли.

Прогрівання матеріалу, обумовлене теплопровідністю, призводить до піролізу смоли і супроводжується виділенням великої кількості газів. Гази, що утворюються під поверхнею, виходять назовні через пори і тріщини, та охолоджують каркас-наповнювач, що руйнується.

При досягненні на поверхні покриття температури плавлення, можливе утворення плівки розплаву, яка залежно від дії тепла і виду матеріалу, може бути значною. Із-за плівки розплаву, передача тепла в глибші шари матеріалу уповільнюється. Це пов'язано з тим, що розплав є додатковим прошарком і має великий коефіцієнт відображення, більший ніж у початковому матеріалі.

При подальшому зростанні температури поверхні, починається випар, який в деяких випадках може бути визначальним механізмом руйнування. У разі просування фронту випару углиб матеріалу, руйнування зачіпає усі нові шари і наведена картина руйнування повторюється [1].

З представленої моделі руйнування КТЗП видно, що ТП, який поступає на поверхню матеріалу витрачається на руйнування матеріалу, випромінювання з нагрітої поверхні і частково блокується тепловим ефектом вдуву, пов'язаним з відведенням тепла набігаючим потоком газів і поглинанням в парах матеріалу, що випаровується.

2. ВИБІР МОДЕЛІ ПОРИСТОСТІ

На теплофізичні характеристики матеріалів, при інших рівних умовах, істотний вплив робить пористість [1]. При цьому, в матеріалі що не містить пір, пористість може створюватися при розкладанні одного з компонентів, наприклад при піролізі смоли. Якщо енергія ТП проникає в пори, слід говорити про квазіоб'ємне поглинання енергії в матеріалі. Коротко розглянемо, як пористість робить вплив на зміну теплофізичних характеристик матеріалу, зокрема, на коефіцієнт теплопровідності.

Пористість робить важливий вплив на ефективну теплопровідність λ_{Σ} , так як пори, внаслідок низької провідності газу, є ефективним бар'єром на шляху поширення тепла.

Пористий матеріал умовно можна розглядати як систему, що складається з плоских шарів, що чергуються між собою, твердого і газоподібного речовин. При цьому зазвичай аналізуються два граничні випадки.

У першому варіанті тепловий потік передається перпендикулярно шарам. Тобто, термічний зв'язок, між окремими елементами тіла у напрямі потоку тепла абсолютно відсутній (рис. 2.1).

Формула теплопровідності має вигляд:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\lambda_g \cdot \lambda_s}{[\lambda_g (1 - \Pi) - \lambda_s \Pi]}, \quad (2.1)$$

де

- λ_s – коефіцієнт теплопровідності твердої фази [Вт/мК];

- λ_g – коефіцієнт теплопровідності газоподібної фази [Вт/мК];
- Π – пористість матеріалу.

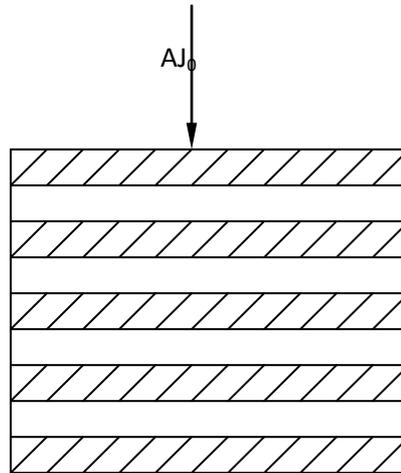


Рис. 2.1. Схема для розрахунку теплопровідності пористих матеріалів: передача теплового потоку здійснюється перпендикулярно шарам матеріалу

У другому випадку, тепловий потік спрямований паралельно шарам, тобто умови контакту між окремими елементами тіла у напрямі потоку тепла ідеальні (рис. 2.2).

Формула теплопровідності для цього випадку має вигляд:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_s(1 - \Pi) + \lambda_g \Pi. \quad (2.2)$$

При високих температурах доводиться враховувати не лише зміну з температурою теплопровідності твердого каркаса λ_s і теплопровідності газу λ_g , але і додаткове перенесення тепла випромінюванням. При цьому вважається, що випромінювання входить в ефективний коефіцієнт теплопровідності λ_{Σ} у вигляді

доданку λ_R . Стінки пір можна представити у вигляді екранів, що сприймають енергію випромінювання і що одночасно випускають її.

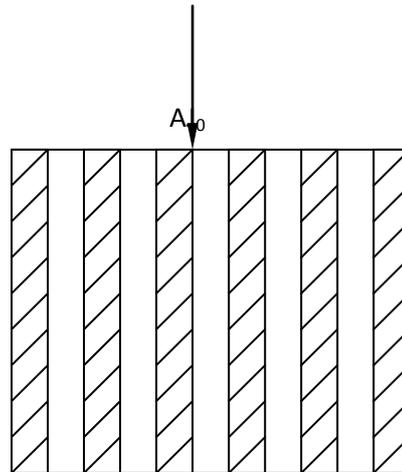


Рис. 2.2. Схема для розрахунку теплопровідності пористих матеріалів: передача теплового потоку здійснюється паралельно шарам матеріалу.

Розглянемо процес "радіаційної теплопровідності" на прикладі найпростішого пористого осередку, що має форму паралелепіпеда заввишки h . Враховуючи тільки одноразове відображення з поверхонь, використовуючи коефіцієнт радіаційної теплопровідності, результуючий тепловий потік від першої стінки до другої рівний:

$$q_R^{(1-2)} = \lambda_R \frac{T_1 - T_2}{h} = (4\varepsilon^2 \sigma T_1^3 h) \frac{T_1 - T_2}{h}; \quad (2.3)$$

$$\lambda_R = (4\varepsilon^2 \sigma T_1^3 h).$$

При низьких температурах λ_R зазвичай набагато менше ніж λ_S (рис.2.3).

Із зростанням температури спостерігається швидка зміна співвідношення між радіаційною λ_R і молекулярною λ_S складовими коефіцієнта теплопровідності, причому збільшення розміру пір

призводить до суттєвого вкладу випромінювання. При температурі $T = 1000 \text{ K}$ і висоті пористого осередку $h = 1 \text{ мм}$, радіаційна складова виявляється одного порядку з молекулярною. Геометрія пористого середовища сильно впливає на величину λ_R . У вказано на використання спеціального множника, що враховує форму пір : для витягнутих у напрямі градієнта температур циліндрів він дорівнює 1, для циліндрів перпендикулярних потоку тепла - 0,8.

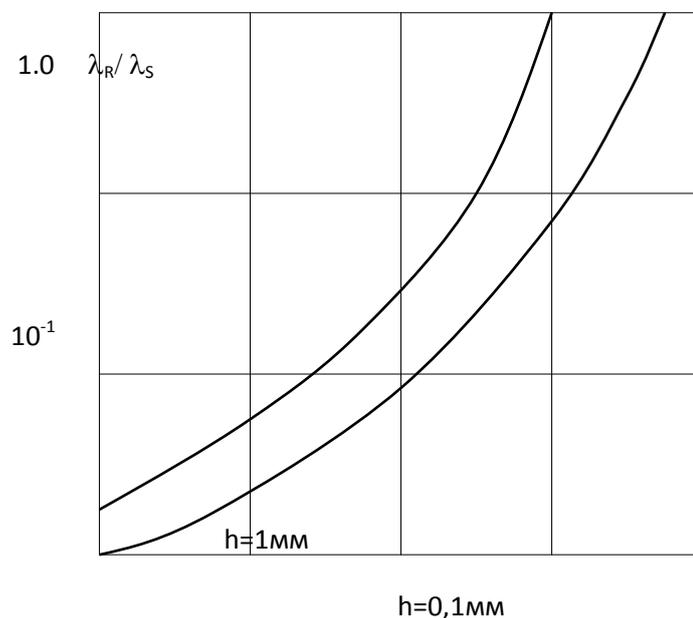


Рис. 2.3. Залежність відношення радіаційної і молекулярної теплопровідності λ_R/λ_S від температури для двох розмірів пір h

Із зростанням температури спостерігається швидка зміна. На підставі аналізу різних методів визначення λ_R [2], слідє відмітити, що формула (2.3) дозволяє визначити коефіцієнт теплопровідності з урахуванням розміру пір і випромінювальної здатності матеріалу.

Слід додати, що експериментальні дані вказують і на залежність коефіцієнту теплопровідності, при однаковій пористості Π , від розміру і форми пір [3]. Вплив цих двох параметрів пов'язаної з

появою вільної конвекції в порах і зазвичай лежить в пре-справі 10 ÷ 15 % [1].

Відмітимо, що при малій щільності пористих систем вільна конвекція може стати основним механізмом перенесення тепла в них, причому коефіцієнт ефективною теплопровідності λ_{Σ} при зменшенні ρ_s може навіть збільшуватися [1].

За допомогою моделей пористого тіла можна визначати не лише степінь впливи λ_R на λ_{Σ} , але і оцінити вклад внутрішнього тиску в порах на процес руйнування матеріалу.

У [4] розглядався внутрішній випар в моделях пір "пісок" і "дерево".

Модель "пісок" припускає, що структура пір в матеріалі володіє високою проникністю, і тиск в порах не зростає настільки, щоб подавити випар. Внутрішній випар обмежений швидкістю, з якою маса покидає поверхню матеріалу.

Модель "дерево" складається з циліндричних пір, які галузяться подібно звичайному дереву або річковій системі (рис. 2.4).

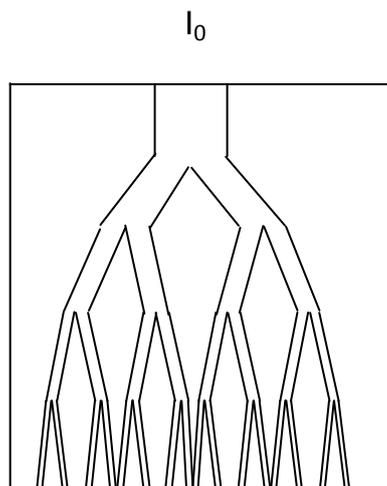


Рис. 2.4. Схематичне зображення моделі пористого тіла "дерево"

Відмітимо, що ускладнення моделі пористості (модель " дерево") хоча і відбиває точніше картину тиску газу в порах, але не призводить до суттєвої зміни профілю температури в матеріалі [2]. При цьому руйнування матеріалу відбувається в основному за рахунок збільшення винесення маси через зростання внутрішнього тиску.

Навпаки, в простішій моделі " піску", коли швидкість витікання газів перевищує швидкість наростання їх тиску, внутрішній випар призводить до пригнічення температури за рахунок збільшення винесення маси.

Таким чином, ускладнення моделі пористого тіла, хоча і дозволяє оцінити тиск газу в порах, якісно не зачіпає визначення температурного поля.

Профіль температур в матеріалі можна визначати по моделі паралельних шарів (мал. 2.2), формули (2.2, 2.3), при цьому погрішності незначні [1].

При розгляді дії ЛІ на пористі матеріали (що мають внутрішні пори) відзначається [4], що випар матеріалу може проходити як на поверхні, так і усередині пір.

Наприклад, в [5] досліджувався вплив високо інтенсивного ТП на внутрішній тиск в пористих матеріалах. Відзначалося, що внутрішній випар може викликати дискретне винесення маси з матеріалу в твердій фазі, якщо тиск в порах досяг-немає порогу руйнування матеріалу.

Разом з цим відмітимо, що при об'ємному поглинанні енергії в матеріалі, температура в об'ємі може виявитися вище за температуру на поверхні. У позбавлених пір матеріалах внутрішнього випару немає, але температура в об'ємі також може перевищувати температуру випару [1].

3. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРІВ ПОР НА ПРОГРІВ КТЗП

Врахуємо модель пористості у вигляді системи, виходячи з плоских паралельних шарів твердої і газоподібної речовини, що чергуються між собою у моделі стаціонарного поверхневого руйнування композиційного покриття [1].

Пористий осередок має форму паралелепіпеда заввишки h . При високих температурах, стінки пір сприймають енергію випромінювання і одночасно випускають її, вносячи необхідність обліку радіаційної складової теплопровідності :

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_s(1 - \Pi) + \lambda_g \Pi + \lambda_R, \quad (3.1)$$

де

- λ_{Σ} – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК;
- λ_s – коефіцієнти теплопровідності твердої фази, Вт/мК;
- λ_g – коефіцієнти теплопровідності газоподібної фази, Вт/мК; Π - пористість матеріалу.

У разі одноразового відображення енергії з поверхні пір, коефіцієнт радіаційної теплопровідності має вигляд [4]:

$$\lambda_R = (4\varepsilon^2 \sigma T^3 h), \quad (3.2)$$

де

- ε – міра чорноти;

- σ – постійна Стефана-Больцмана, Вт/м²К⁴;
- T – температура стінки пори, К;
- h - висота пори, м.

Використаємо цю модель пористості для визначення теплового стану КТЗП, вважаючи, що процес теплового руйнування КТЗП встановився стаціонарним, тобто розглянемо це завдання в лінійній постановці [1].

Рівняння збереження енергії усередині КТЗП з обліком вплив пір (3.1), (3.2) має вигляд:

$$\lambda_{\Sigma} \frac{d^2 T(\xi)}{d\xi^2} + (\rho c)_{\Sigma} V_s \frac{dT(\xi)}{d\xi} - c_g G_g \frac{dT(\xi)}{d\xi} - Q^* = 0; \quad (3.3)$$

$$(\rho c)_{\Sigma} = (1 - \Pi_M) (\rho c)_s + \Pi_M (\rho c)_g; \quad (3.4)$$

$$\Pi_M = \varphi_{CM} h_g, \quad (3.5)$$

де

- T – поточна температура, К;
- ζ – координата в рухливій системі координат, м;
- VS – лінійна швидкість віднесення поверхні ТЗП, м/с;
- Gg – витрата газоподібних продуктів руйнування, кг/м²с;
- Q^* – об'ємний стік тепла, обумовлений тепловим ефектом фізико-хімічних перетворень, Вт/м³;
- Π_M – масова пористість;
- $(\rho c)_g$ – щільність кг/м³ і теплоємність Дж/кгК газоподібної фази;
- $(\rho c)_s$ – щільність кг/м³ і теплоємність Дж/кгК твердої фази;

- φ_{CM} – масова доля смоли;
- h_g - масова доля газоподібних продуктів реакції.

Граничні умови мають вигляд:

$$\begin{cases} -\lambda_{\Sigma} \frac{dT(\xi)}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = AI_0 \kappa_{\Sigma} - (V_s \rho + G_g) \Gamma H - \varepsilon \sigma T_s^4 - q_{ВД}; \\ T(\xi) \Big|_{\xi=\infty} = T_0, \end{cases} \quad (3.6)$$

де

- A – поглинальна здатність поверхні;
- I_0 – щільність ТП, Вт/м²;
- κ_{Σ} – коефіцієнт поглинання ТП в парах;
- Γ – параметр газифікації;
- H – прихована теплота руйнування ТЗП, Дж/кг;
- $q_{ВД}$ – тепловий ефект вдуву газів, що утворилися, Вт/м²;
- T_0 – початкова температура КТЗП, К.

На рис. 3.1. показано графічне рішення задачі (3.3 ÷ 3.6), при заданих значеннях величини ТП і висоти пір.

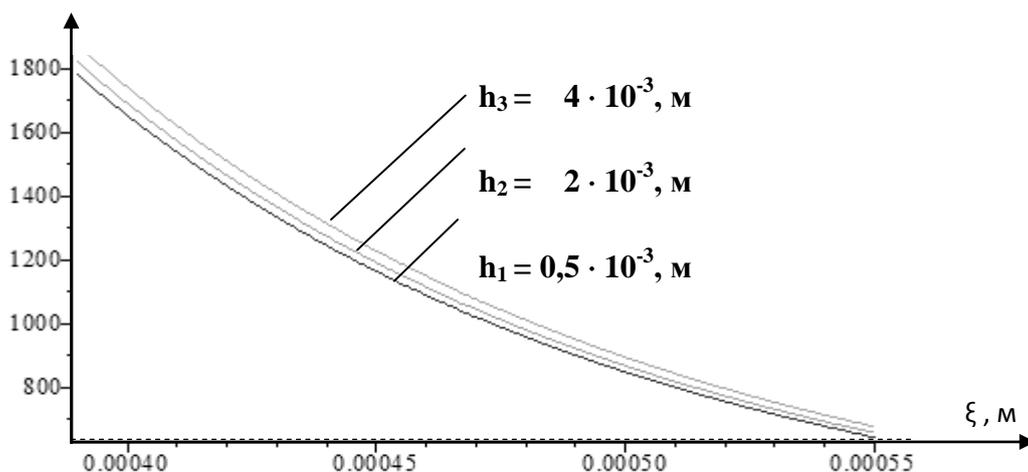


Рис. 3.1. Температурне поле в КТЗП з урахуванням висоти пір

Матеріал КТЗП - рефразил [1], величина ТП : $I_0 = 10^8$, Вт/м².
Висота пір : $h_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$, м; $h_2 = 2 \cdot 10^{-3}$, м; $h_3 = 4 \cdot 10^{-3}$, м [2].

Аналіз температурних полів на рис. 4.1 показує, що збільшення розмірів пір приводить до підвищення прогрівання КТЗП при заданому значенні величини ТП. Причиною цього підвищення, являється зміна співвідношення між радіаційною λ_R і молекулярною λ_g складовими коефіцієнта теплопровідності λ_{Σ} .

Збільшення розмірів пір призводить до вікутньої вкладу випромінювання в частку перенесення тепла углиб теплозахисного покриття.

4. ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Визначено механізм теплового руйнування композиційного теплозахисного покриття при впливі високоінтенсивних теплових потоків.

2. Розглянута фізична картина теплового руйнування композиційного теплозахисного покриття.

3. Обрана модель пористого тіла, що відображає найбільш характерні фізичні процеси передачі тепла в глибину покриття.

4. Наведена модель теплового руйнування композиційного теплозахисного покриття з урахування розмірів пор.

5. Показано вплив розмірів пор на глибину прогріву композиційного теплозахисного покриття.

5. ЛІТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита/ Под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия. – 1976. – 392 с.
2. Васильев Л. Л., Танаева С. А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника. – 1971. – 268 с.
3. Алифанов О. М., Тренин А. П. Определение коэффициента внутреннего теплообмена и эффективной теплопроводности пористого тела по данным нестационарного эксперимента// Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т. 48. – № 3. – С. 472 – 483.
4. Хастингс Д. Е., Ригос А. А. Внутреннее испарение пористых материалов при лазерном облучении// Аэрокосмическая техника.– 1989. – № 5. – С. 139 - 144.
5. Симонс Дж. А. К вопросу о разрушении материалов с выбросом частиц с поверхности, вызванном пиролизом при воздействии лазерного излучения// Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 9. – С. 115- 122.
6. Сендерович Р. Б., Первушин Ю. С. К определению теплофизических характеристик композиционных полимерных материалов// Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т. 49. – № 6. – С. 982- 988.