

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

## Зміст

	Вступ	3
1	Аналіз процесів руйнування КТЗП	5
2	Вибір моделі пористості	8
3	Визначення впливу розмірів пор на прогрів КТЗП	14
4	Висновки	18
5	Список літератури	19

## 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, прококсowanego шару і газоподібних продуктів руйнування;

- передача тепла в прококсowanego 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).

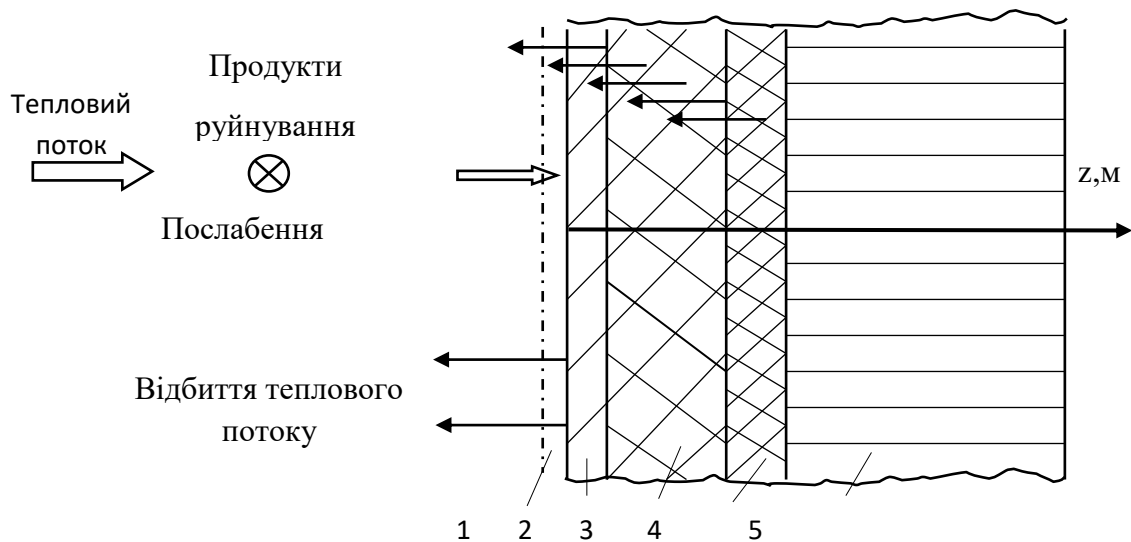
Відмітимо, що існуючі нині розрахунки теплового захисту також не враховують різноманіття КТЗП. Так представлені у відомій літературі математичні моделі руйнування КТЗП, не дають

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 – прококований шар;  
4 – зона деструкції; 5 – однорідний матеріал

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  $\lambda_{\Sigma}$ , 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:

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

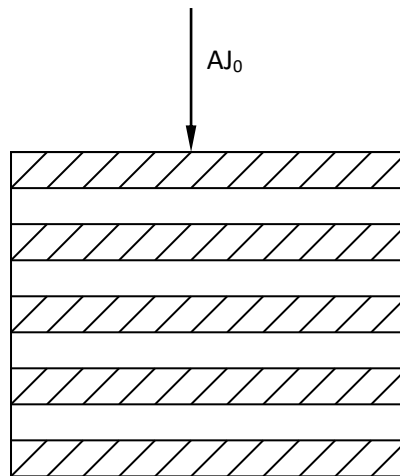
де

$\lambda_s$  коефіцієнт теплопровідності твердої фази [Вт/мК];

$\lambda_g$  коефіцієнт теплопровідності газоподібної фази [Вт/мК];

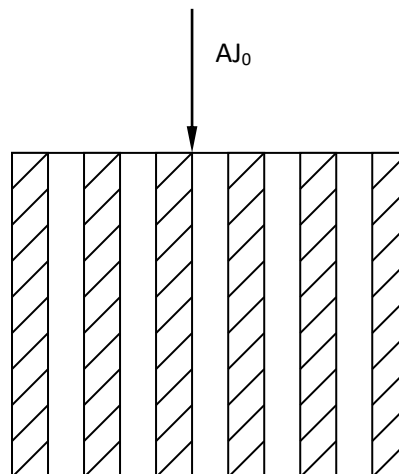


П пористість матеріалу.



**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).



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

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  $\lambda_s$  і теплопровідності газу  $\lambda_g$ , але і додаткове перенесення тепла випромінюванням. При цьому вважається, що випромінювання входить в ефективний коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{\Sigma}$  у вигляді доданку  $\lambda_R$ . Стінки пір можна представити у вигляді екранів, що сприймають енергію випромінювання і що одночасно випускають її.

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:

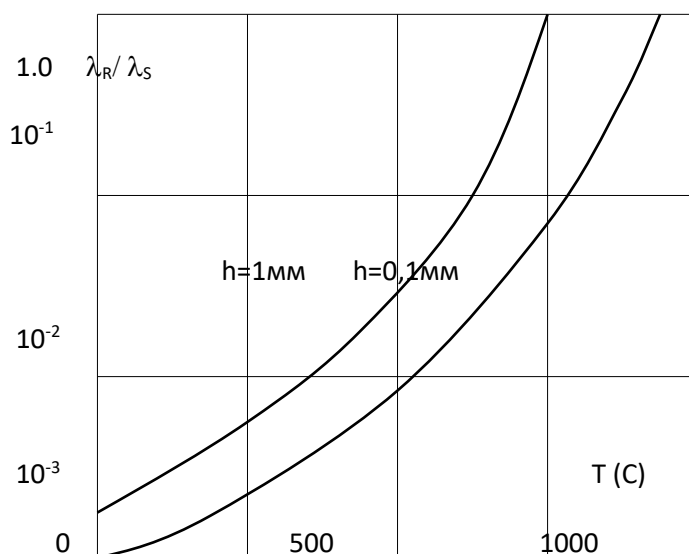
$$q_R^{(1-2)} = \lambda_R \frac{T_1 - T_2}{h} = (4\varepsilon^2 \sigma T_1^3 h) \frac{T_1 - T_2}{h}; \quad (2.3)$$

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

При низьких температурах  $\lambda_R$  зазвичай набагато менше ніж  $\lambda_s$  (рис.2.3).

Із зростанням температури спостерігається швидка зміна співвідношення між радіаційною  $\lambda_R$  і молекулярною  $\lambda_s$  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  $\lambda_R$ . 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  $\lambda_R / \lambda_S$  від температури для двох розмірів пір  $h$**

Із зростанням температури спостерігається швидка зміна. На підставі аналізу різних методів визначення  $\lambda_R$  [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  $\Pi$ , від розміру і форми пір [3]. Вплив цих двох параметрів пов'язаної з появою вільної

конвекції в порах і зазвичай лежить в пре-справі  $10 \div 15 \%$  [1].

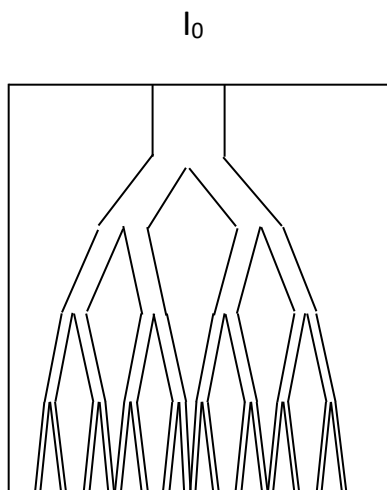
Відмітимо, що при малій щільності пористих систем вільна конвекція може стати основним механізмом перенесення тепла в них, причому коефіцієнт ефективною теплопровідності  $\lambda_{\Sigma}$  при зменшенні  $\rho S$  може навіть збільшуватися [1].

За допомогою моделей пористого тіла можна визначати не лише степінь впливу  $\lambda R$  на  $\lambda_{\Sigma}$ , 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 ЛІИ 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 досягнє 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

$\lambda_{\Sigma}$  – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК;

$\lambda_s$  – коефіцієнти теплопровідності твердої фази, Вт/мК;

$\lambda_g$  – коефіцієнти теплопровідності газооб’язаної фази, Вт/мК;

$\Pi$  - 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

$\varepsilon$  – міра чорноти;

$\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;

$T$  – 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;

$\zeta$  – координата в рухливій системі координат, м;

$VS$  – лінійна швидкість віднесення поверхні ТЗП, м/с;

$Gg$  – витрата газоподібних продуктів руйнування, кг/м<sup>2</sup>с;

$Q^*$  – об'ємний стік тепла, обумовлений тепловим ефектом фізико-хімічних перетворень, Вт/м<sup>3</sup>;

$\Pi_M$  – масова пористість;

$(\rho c)_g$  – щільність кг/м<sup>3</sup> і теплоємність Дж/кгК газоподібної фази;

$(\rho c)_s$  – щільність кг/м<sup>3</sup> і теплоємність Дж/кгК твердої фази;

$\varphi_{CM}$  – масова доля смоли;

$h_g$  - масова доля газоподібних продуктів реакції.

Граничні умови мають вигляд:

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

де

$A$  – поглинальна здатність поверхні;

$I_0$  – щільність ТП, Вт/м<sup>2</sup>;

$k_E$  – коефіцієнт поглинання ТП в парах;

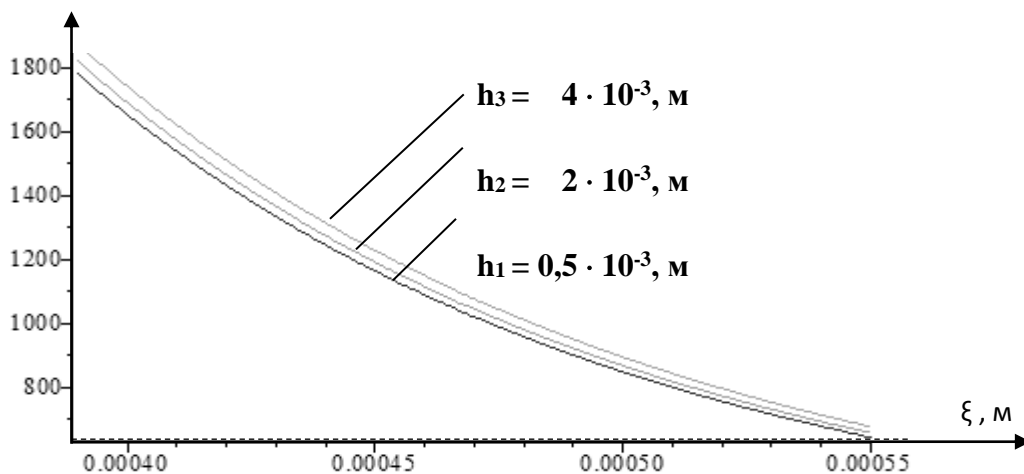
$\Gamma$  – параметр газифікації;

$H$  – прихована теплота руйнування ТЗП, Дж/кг;

$q_{ВД}$  – тепловий ефект вдуву газів, що утворилися, Вт/м<sup>2</sup>;

$T_0$  – початкова температура КТЗП, К.

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



Матеріал КТЗП - рефразил [1], величина ТП :  $I_0 = 108$ , Вт/м<sup>2</sup>. 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  $\lambda_R$  і молекулярною  $\lambda_g$  складовими коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\Sigma}$ .

Збільшення розмірів пір призводить до віку-тній вкладу випромінювання в частку перенесення тепла углиб теплозахисного покриття.

#### 4. ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Визначено механізм теплового руйнування композиційного теплозахисного покриття при впливі високо-інтенсивних теплових потоків.

Розглянута фізична картина теплового руйнування композиційного теплозахисного покриття.

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

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

Показано вплив розмірів пор на глибину прогріву композиційного теплозахисного покриття.

## ЛИТЕРАТУРА

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.