



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **83915** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
G01N 7/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2013 01640	(72) Винахідник(и): Чапля Євген Ярославович (UA), Голубець Тарас Володимирович (UA)
(22) Дата подання заявки: 11.02.2013	(73) Власник(и): ЦЕНТР МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ НАН УКРАЇНИ ІМ. Я.С. ПІДСТРИГАЧА, вул. Дж. Дудаєва, 15, м. Львів, 79005 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.10.2013	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.10.2013, Бюл.№ 19	

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ У ЗВОЛОЖЕНИХ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛАХ В УМОВАХ СЕРЕДЬНОГО ВАКУУМУ

(57) Реферат:

Спосіб визначення поверхневих коефіцієнтів тепломасообміну у зволожених пористих матеріалах в умовах середнього вакууму включає вимірювання температури поверхні дослідного зразка та різниці тисків пароповітряної газової суміші на краях каліброваного капілярном вакуумопроводу. Згідно теоретично встановленого виразу для потоку водяної пари через капіляр на основі даних експериментальних вимірювань відтворюють динаміку зміни молярної частки водяної пари у вакуумній камері, а поверхневі коефіцієнти тепломасообміну розраховують згідно відомих законів збереження тепла та маси з врахуванням джерел випаровування при поверхневому шарі зволоженого пористого зразка.

UA 83915 U

Корисна модель належить до способу визначення поверхневих коефіцієнтів тепломасообміну у пароповітряному середовищі вакуумної камери в умовах середнього вакууму під час викачування повітря з вакуумної камери за допомогою електричного приводу і може бути використана для розрахунку вологісних і теплових полів на поверхні та у внутрішніх

областях досліджуваного пористого зволоженого зразка, а також при проектуванні обладнання для вакуумного осушування пористих матеріалів за умов дії радіаційного (мікрохвильового або інфрачервоного) опромінення.

Відомий спосіб вакуумного осушування пористих матеріалів [1] базується на використанні дорогого і складного у використанні обладнання з внутрішнім підведенням тепла від нагрітих поверхонь у пароповітряному середовищі вакуумної камери. Характерно, що при вакуумному осушуванні пористих зволожених матеріалів відбувається значна економія енерговитрат, зберігаються механічні властивості матеріалу і значно скорочується тривалість осушування, що викликає особливий інтерес до реалізації технологічних методів вакуумної обробки матеріалів. При зменшенні температури сушіння у замкненому об'ємі вакуумної камери вимагається менше теплових витрат, ніж в умовах відкритого конвективного осушування, а також зменшується ймовірність дефектів матеріалу, які виникають внаслідок поширення і нагромадження навантажень. Проте, режими вакуумного осушування сильно залежать від властивостей пароповітряного середовища вакуумної камери (хімічного складу газової суміші, початкового вологовмісту, парціального тиску водяної пари і температури [2]) протягом процесу вакуумної обробки пористого зволоженого матеріалу. В такому випадку поверхневі коефіцієнти тепломасообміну змінюються з часом динамічно в залежності від стану пароповітряної суміші у вакуумній камері, оскільки реалізувати стаціонарний режим сушіння при вакуумній обробці пористих зволожених матеріалів достатньо складно.

Найбільш близьким за технічною суттю до запропонованого є спосіб визначення характеру тепломасообмінних процесів у забрудненому ґрунті під час вакуумно-діелектричної (мікрохвильової) обробки [3]. Він базується на вимірюваннях середніх значень маси і температури дослідного зволоженого зразка, який розміщено у циліндричній посудині виготовленій з кварцового скла і накритій тефлоновими кришками. При одночасній дії зовнішнього високочастотного опромінення та викачуванні повітря з герметичного мікрохвильового аплікатора (вакуумної камери), періодичні вимірювання усередненої температури зразка проводилися з допомогою термопари, а маса пористого зволоженого зразка фіксувалася з допомогою типової електронної ваги. Оскільки регулярне точне вимірювання температури зволоженого пористого матеріалу під час мікрохвильового нагріву є можливе лише за допомогою оптоволоконного пристрою [4], тому значення маси і температури дослідного зразка у роботі [3] вимірювались періодично, шляхом вимикання опромінювача через вилучення дослідного зразка з контейнера у вакуумній камері та дублювання початкових умов експерименту. Проводилась також чисельна екстраполяція вимірюваних величин відносно початкового стану зволоження. Хоч даний спосіб дає очікувані результати вимірювань, проте він має великі недоліки у науковому, технологічному та економічному планах застосування.

Недоліками даного способу є те, що практично не можливо реалізувати один і той самий початковий стан зволоження пористого матеріалу перед кожною серією умовно подібних експериментів, згідно яких вимірюється середнє у часовому проміжку значення температури зразка. Окрім того, вимірювання температури звичайною термопарою в об'ємі вакуумної камери унеможливується внаслідок розподілу зовнішнього високочастотного електромагнітного поля у провідному матеріалі контактів термопари, що може призвести до повного руйнування приладу.

В основу корисної моделі поставлена задача розробити універсальний спосіб визначення поверхневих коефіцієнтів тепломасообміну у зволожених пористих матеріалах під час вакуумного осушування, який неперервно і постійно відображає актуальний стан пароповітряного середовища у вакуумній камері, що, в свою чергу, дає змогу на основі відомих законів збереження тепла і маси [5] розрахувати числові значення коефіцієнтів обміну теплом і масою на поверхні дослідного зразка.

Поставлена задача вирішується тим, що аналізується [6] потік водяної пари у капілярі вакуумного трубопроводу. На основі відомих законів збереження тепла і маси [5] розраховується експериментально встановлена динаміка зміни молярної частки водяної пари у пароповітряному середовищі вакуумної камери. Згідно визначеної експериментально часової залежності температури поверхні пористого зволоженого зразка розраховуються поверхневі коефіцієнти тепломасообміну.

Суть корисної моделі полягає у тому, що усі вимірювані величини, температуру поверхні зразка і тиски пароповітряної суміші на краях капіляру, отримуємо безпосередньо під час проведення експерименту.

Суттєвою відмінністю запропонованого способу є те, що по властивостях пароповітряної суміші у вакуумній камері та характеристиках потоку водяної пари у капілярі вакуумного трубопроводу під час запропонованого експерименту відтворюється реальний фізичний стан тепломасообмінних процесів у пористому зволоженому матеріалі протягом довільного неперервного часового інтервалу вимірювань.

Приклад

Досліджували процес вакуумного осушування [6] зволоженого пористого дослідного зразка за допомогою вакуумної установки, схема якої зображеної на Фіг. 1.

Пористий зволожений циліндричний зразок 2 розміщували у зовнішній до вакуумної камери 1 випуклій пробірці, яка виготовлена з кварцового скла. Матеріал зразка виготовили на основі клею для керамічної плитки Ceresit CM 11 (початкова вага зволоженого зразка - $m_{wet}=36,7$ гр; $r_s=10,5$ мм - радіус, $h_s=70$ мм - висота). При фіксованій температурі зовнішнього середовища $T_{amb}=17$ °C з вакуумної камери об'ємом $V_{amb}=1$ дм³ повітря викачували електричним насосом 7 через калібрований капіляром 5 ($r_0=1,5$ мм - радіус і $L_0=30$ мм - довжина) вакуумопровід в умовах відкритого запобіжного клапану 3. Вимірювали значення тисків $p_1(t)$ та $p_2(t)$ на краях капіляру 4 і 6 відповідно та температуру поверхні $T_A(t)$ дослідного зразка 8 (див.

Таблиця

з допомогою вакуумметра та термопари ХА Ø=0,3 мм. Тривалість осушування $\Delta t_{dry}=3,75$ год.
Вага осушеного зразка $m_{dry}=35,3$ гр.

Таблиця

Динаміка зміни тисків пароповітряної суміші p_1 і p_2 [mmHg] на краях капіляру та числові значення приросту ΔE термо - Е.Р.С. [mV] на поверхні дослідного зразка

t[s]	p_1 [mmHg]	p_2 [mmHg]	ΔE [mV]	t[s]	p_1 [mmHg]	p_2 [mmHg]	ΔE [mV]
60	3,20	0,350	0,12	1980	0,75	0,130	0,31
120	2,25	0,260	0,16	2580	0,70	0,120	0,27
180	1,90	0,200	0,20	3180	0,68	0,110	0,25
240	1,50	0,170	0,21	3780	0,65	0,105	0,24
300	1,30	0,168	0,25	4980	0,60	0,100	0,20
420	1,20	0,165	0,30	6180	0,49	0,090	0,16
630	1,05	0,160	0,31	7380	0,48	0,080	0,14
660	1,02	0,157	0,33	8580	0,42	0,073	0,12
780	1,01	0,156	0,34	10980	0,37	0,066	0,08
900	0,90	0,155	0,35	13380	0,36	0,060	0,06
1380	0,80	0,140	0,32				

Після інтерполяції експериментальних даних (див. Таблиця) отримали неперервні значення крайових тисків $p_1(t)$ та $p_2(t)$ (Фіг. 2 Падіння тисків пароповітряної суміші на краях капіляру) $\{ \langle p(t) \rangle$ - середньо арифметичне) та температури поверхні $T_A(t)$ (Фіг. 3 Динаміка зміни температури поверхні зволоженого зразка).

Згідно виразу [6] для молярного потоку $\langle N_v \rangle$ водяної пари через капіляр вакуумного трубопроводу

$$\langle N_v \rangle = - \frac{1}{RT_{amb}} \frac{\frac{\partial [x_v \langle p \rangle]}{\partial x} + \frac{x_v}{D_0 \langle p \rangle} \left(D_a^K + \frac{B_0}{\kappa_a} \right) \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x}}{\frac{1}{D_v^K + \frac{B_0}{\kappa_v}} + \frac{1}{D_0 \langle p \rangle} \left\{ x_v \left[\frac{D_a^K + \frac{B_0}{\kappa_a}}{D_v^K + \frac{B_0}{\kappa_v}} - 1 \right] + 1 \right\}},$$

$$D_a^K = \frac{2}{3} r_0 \sqrt{\frac{8RT_{amb}}{\pi M_a}}$$

(де D_a^K - коефіцієнт дифузії Кнудсена [6] для $\alpha=\{v, a\}$ - компоненти пароповітряної бінарної пароповітряної суміші з молярною масою M_a у капілярі вакуумного трубопроводу з радіусом r_0 , κ_a - коефіцієнти в'язкого тертя, для яких виконується умова

$$\sum_{\alpha} \kappa_{\alpha} x_{\alpha} = \eta / \langle p \rangle$$

- 5 η - динамічна в'язкість суміші за Вільке [7], $\langle p \rangle$ - сумарний тиск газової суміші вздовж капіляру, $x_v = \langle p_v \rangle / \langle p \rangle$ - молярна частка водяної пари у камері осушування при парціальному тиску $\langle p_v \rangle$, $B_0 = r_0^2 / 8$ - проникність капіляру, D_0 - коефіцієнт дифузії водяної пари у повітря і R - універсальна газова постійна) та закону збереження маси

$$\dot{\rho}_v(t) = S_0 \frac{M_v}{RT_{amb}} \langle N_v(t) \rangle + \dot{i}$$

- 10 (де $\dot{i} = c_{pv} m_v(t) \dot{T}_A(t) / r$ - інтенсивність джерел випаровування у при поверхневому шарі зволоженого пористого зразка, $m_v(t) = \rho_v(t) V_{amb}$ - маса водяної пари у вакуумній камері $\rho_v(t) = M_v x_v(t) p_1(t) / RT_{amb}$ - густина, c_{pv} - теплоємність при адіабатичному процесі, $S_0 = \pi r_0^2$ - площа поперечного перерізу капіляра і r - прихована теплота випаровування) відтворили динаміку зміни молярної частки $x_v(t)$ (Фіг. 4) ($x_v(t_0)$ - початкове значення) водяної пари у вакуумній камері під час проведеного експерименту.

- 15 Користуючись наближеними виразами для похідних

$$\begin{aligned} \frac{\partial [x_v \langle p \rangle]}{\partial x} &\cong \frac{1}{L_0} [x_{v2}(t) p_2(t) - x_{v1}(t) p_1(t)] = \\ &= \frac{1}{L_0} [\bar{x}_v(t) [p_2(t) - p_1(t)] + 2 \langle \Delta \bar{p}(t) \rangle [\bar{x}_v(t) - \Delta \bar{x}_v(t)]] \\ \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} &\cong \frac{1}{L_0} [p_2(t) - p_1(t)] \end{aligned}$$

(тут $x_{vs}(t) = \rho_v(t) / \rho_{vs}(t)$ - молярні частки водяної пари з парціальними тисками $p_{vx}(t)$, де $s=\{1,2\}$,

- на края капіляру 4 і 6 (Фіг. 1) відповідно, $\bar{x}_v(t) = \langle \bar{p}_v(t) \rangle / \langle \bar{p}(t) \rangle$ - аналогічні усереднені по довжині капіляру величини, $\langle \bar{p}(t) \rangle = [p_1(t) + p_2(t)] / 2$ - середнє арифметичне значення тиску і $\langle \Delta \bar{p}(t) \rangle = [p_1(t) - p_2(t)] / 2$ - відхилення крайових значень від середнього рівноважного) при умові

$$\Delta \bar{x}_v(t) = \frac{x_{v1}(t) p_1(t) - x_{v2}(t) p_2(t)}{p_1(t) - p_2(t)} = \frac{p_{v1}(t) - p_{v2}(t)}{p_1(t) - p_2(t)} = 0$$

з допомогою відомих [5] законів збереження тепла

$$c_{pv} m_v(t) \dot{T}_A(t) = A h_t (T_A(t) - T_{amb})$$

- 25 і маси

$$\dot{m}_v(t) = A h_m(t) \left(\frac{M_v p_1(t)}{RT_A(t)} - \rho_v(t) \right) + \dot{i}$$

(де A - площа поверхні дослідного зразка, а крапка над символьним позначенням фізичних величин означає похідну) розраховали коефіцієнти обміну теплом $h_t(t)$ (Фіг. 5 Поверхневий коефіцієнт масообміну) та масою $h_m(t)$ (Фіг. 6 Поверхневий коефіцієнт теплообміну) на поверхні матеріалу.

- 30 Беручи до уваги вираз $\langle J_v^m(t) \rangle = \pi r_0^2 M_v \langle N_v(t) \rangle / RT_{amb}$ для сумарного потоку маси водяної пари через капіляр, отримали наступну (Фіг. 7) графічну залежність згідно якої внаслідок інтегрування втрата маси зволоженим дослідним зразком протягом вказаної тривалості осушування становить $\Delta m_{dry} = 1,38$ гр.

- 35 Таким чином експериментальні дані отримали належне теоретичне обґрунтування.

- Дослідження показали, що термодинамічний стан водяної пари у вакуумній камері під час викачування повітря з вакуумної камери суттєво впливає на характеристики тепломасообміну у при поверхневому шарі зволоженого пористого зразка. При цьому процеси тепломасообміну є сильно нерівноважними. Максимум молярної частки водяної пари у вакуумній камері відповідає мінімальній температурі поверхні. Це дає підставу стверджувати, що у часовому інтервалі до

досягнення поверхнею мінімального значення температури домінують процеси фазового перетворення рідини у водяну пару, які викликані стрімким падінням тиску у вакуумній камері. Тоді, як у часовому інтервалі після досягнення поверхнею мінімуму температури, стають вирішальними процеси теплообміну з зовнішнім оточенням.

Дослідженнями встановлено [6], що відоме стаціонарне співвідношення між поверхневими коефіцієнтами для конвективного тепломасообміну $(h_m(t)/h_t(t)=D_0/\lambda_a(t)\approx 0,001[\text{K}\cdot\text{m}/\text{J}]$ [8], де $\lambda_a(t)$ - теплопровідність пароповітряної газової суміші) у випадку вакуумного осушування (Фіг. 8) має зміст лише після досягнення температурою поверхні мінімального значення. Протягом вказаного часового інтервалу основна кількість не адсорбованої (вільної) вологи є фактично вилучена з пористого матеріалу зволоженого зразка, а характер протікання процесів тепломасообміну визначається температурою і незначним насиченням водяною парою газової суміші у вакуумній камері.

Таким чином, порівнюючи отримані результати з описаними в літературі [1-3] методами означення граничних умов тепломасообміну та керування режимами вакуумного осушування, приходимо до висновку, що запропонований спосіб визначення поверхневих коефіцієнтів тепломасообміну дозволяє контролювати довільний процес вакуумного осушування та, згідно визначених числових значень поверхневих коефіцієнтів тепломасообміну, моделювати явища перенесення тепла і маси у внутрішніх областях пористого зволоженого матеріалу. Запропонований спосіб є неперервним у часовому проміжку експериментальних вимірювань, більш доступний і надійний, ніж розглянуті методики досліджень. Його можна застосувати до вивчення дифузійних властивостей будь якого зволоженого пористого матеріалу при вакуумному осушуванні за умови дії зовнішнього мікрохвильового або інфрачервоного опромінення, якщо нагрів дослідного зразка запобігає процесам конденсації водяної пари на внутрішніх стінках капіляра та кристалізації рідини на поверхні пористого матеріалу.

Позначення

A - площа поверхні дослідного зразка $[\text{m}^2]$

B_0 - власна проникність капіляру $[\text{m}^2]$

c_{pv} - теплоємність водяної пари при адіабатичному процесі $[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$

D_α^K - коефіцієнт дифузії Кнудсена $[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$

D_0 - коефіцієнт дифузії водяної пари в сухе повітря $[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$

ΔE - величина термо-Е.Р.С. $[\text{V}]$

h_m - поверхневий коефіцієнт масообміну $[\text{ms}^{-1}]$

h_t - поверхневий коефіцієнт теплообміну $[\text{m W K}^{-1}]$

h_s - висота зразка $[\text{m}]$

\dot{I} - інтенсивність випаровування у при поверхневому шарі зразка $[\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}]$

$\langle J_v^m \rangle$ - потік маси водяної пари через капіляр $[\text{kg s}^{-1}]$

L_0 - довжина капіляру у вакуумному трубопроводі $[\text{m}]$

M_α - молекулярна вага компонент газової суміші $[\text{kg kmol}^{-1}]$

m_{dry} - маса осушеного зразка $[\text{kg}]$

m_{wet} - маса зволоженого зразка $[\text{kg}]$

m_α - маса компонент газової суміші $[\text{kg}]$

$\langle N_v \rangle$ - молярний потік водяної пари $[\text{kmol kg}^{-1} \text{s}^{-1}]$

p_s - значення загального тиску на краях капіляру $[\text{Pa}]$

$\langle p \rangle$ - усереднене значення тиску вздовж капіляру $[\text{Pa}]$

$\langle \bar{p} \rangle$ - середнє арифметичне значення тиску у капілярі $[\text{Pa}]$

$\langle \Delta \bar{p} \rangle$ - відхилення крайових значень тиску від середнього арифметичного $[\text{Pa}]$

p_{as} - парціальний тиск компонент суміші на краях капіляру $[\text{Pa}]$

p_α - парціальний тиск компонент суміші $[\text{Pa}]$

r_s - радіус циліндричного зразка $[\text{m}]$

r_0 - радіус капіляра у вакуумному трубопроводі $[\text{m}]$

R - універсальна газова постійна $[\text{J kmol}^{-1} \text{K}]$

r - прихована теплота випаровування $[\text{J kg}^{-1}]$

S_0 - площа поперечного перерізу капіляра $[\text{m}^2]$

T_{amb} - температура зовнішнього середовища $[\text{K}]$

T_A - температура поверхні зразка $[\text{K}]$

Δt_{dry} - тривалість вакуумного осушування $[\text{s}]$

V_{amb} - об'єм вакуумної камери [m^3]

x_a - молярна частка компонент суміші

x_{as} - молярна частка компонент суміші на краях капіляру

Грецькі символи

5 κ_a - коефіцієнт в'язкого тертя [s]

η - динамічна в'язкість [$Pa \cdot s$]

ρ_a - густина компонент [$kg \cdot m^{-3}$]

Індекси

$\alpha=\{v, a\}$ водяна пара і сухе повітря

10 $S=\{1,2\}$ верхній 4 і нижній 6 (Фіг. 1) край капіляра відповідно

Джерела інформації:

15 1. Sattho T., Yamsaengsung R. Vacuum drying of rubberwood // PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment (ICEE-2005).-2005. – T11-3.4, - P. 1-5.

2. Zang Z., Kong N. Nonequilibrium thermal dynamic modeling of porous medium vacuum drying process // Mathematical problems in engineering. Hindawi publishing corporation.-2012.-2012. - No. 347598. - P. 1-22.

20 3. Di P., Chang D.P.Y., Dwyer H.A. Heat and mass transfer during microwave steam treatment of contaminated soils // Journal of Environment Engineering.-2000.-1108. - P. 1108-1115.

4. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-електронные системы измерения температуры. - Москва: Энергоатомиздат, 1988.-246 с.

5. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. - Москва: Мир, 1974.-303 с.

25 6. Голубець Т., Сосновий Ю. Феноменологічний опис і експериментальні дослідження процесів тепломасообміну під час вакуумного осушування пористих матеріалів // Фіз.-мат. моделювання та інформ.і технології. Науковий збірник. Львів, 2012. - Вип. 15. – С. 7-19.

7. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The Properties of Gases and Liquids. - New York: McGraw-Hill, 1977.

30 8. Incropera F.P., Witt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. - NewYork: Wiley, 1990.-997р.

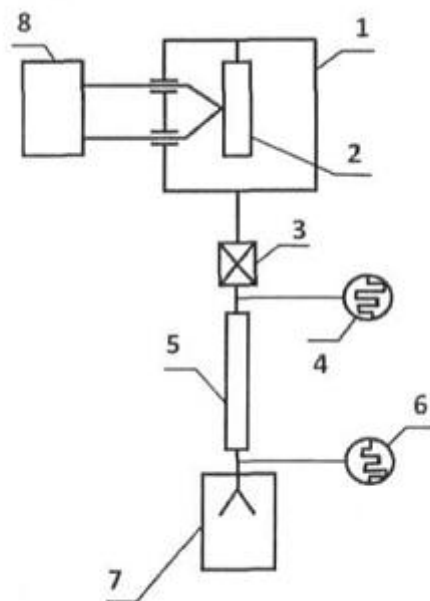
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

35 1. Спосіб визначення поверхневих коефіцієнтів тепломасообміну у зволжених пористих матеріалах в умовах середнього вакууму, який включає вимірювання температури поверхні дослідного зразка та різниці тисків пароповітряної газової суміші на краях каліброваного капіляром вакуумопроводу, який **відрізняється** тим, що згідно теоретично встановленого виразу для потоку водяної пари через капіляр на основі даних експериментальних вимірювань

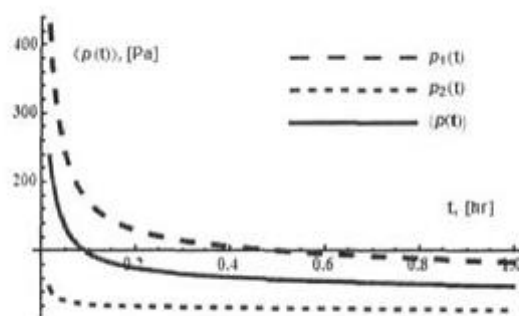
40 відтворюють динаміку зміни молярної частки водяної пари у вакуумній камері, а поверхневі коефіцієнти тепломасообміну розраховують згідно відомих законів збереження тепла та маси з врахуванням джерел випаровування при поверхневому шарі зволоженого пористого зразка.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що для запобігання процесів конденсації водяної пари у вакуумній камері або кристалізації рідини на поверхні дослідного зразка використовують

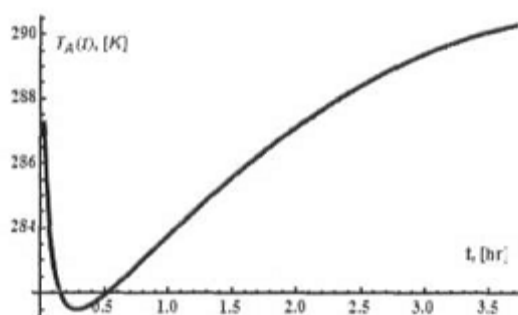
45 мікрохвильовий або інфрачервоний нагрів.



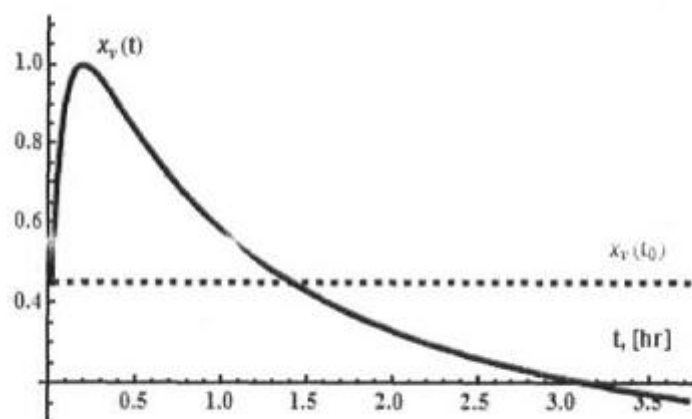
Фиг.1



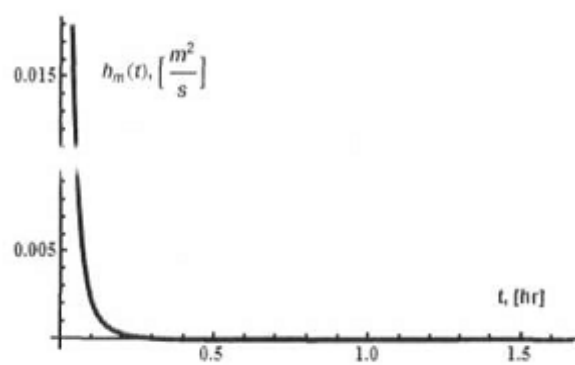
Фиг.2



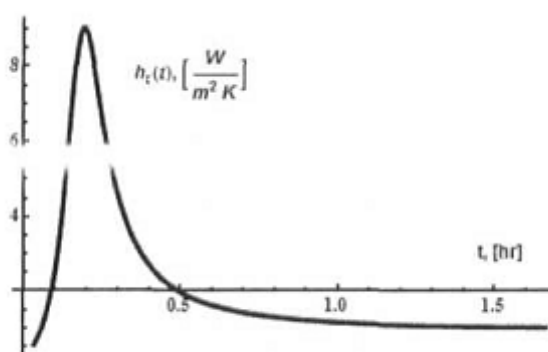
Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5



Фиг.6

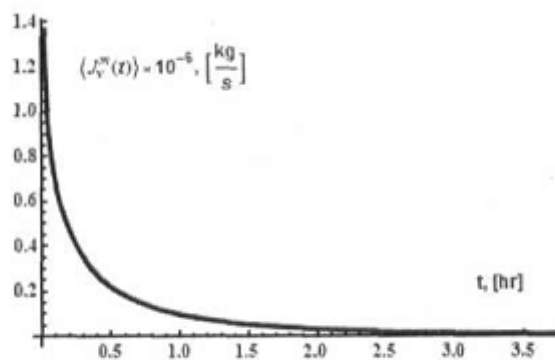


Fig.7

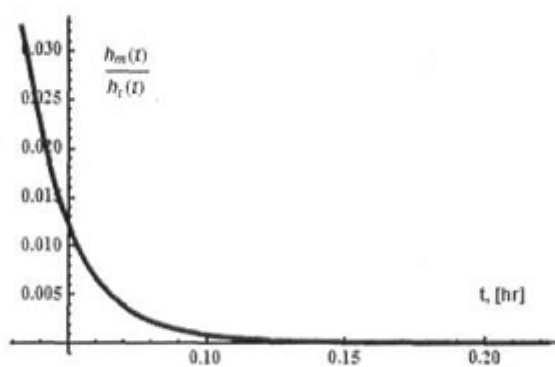


Fig.8

Комп'ютерна верстка Д. Шеверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601