

УДК 621-74

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛО- ТА МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ СУШІННІ СТРИЖНІВ ІНФРАЧЕРВОНИМИ ПРОМЕНЯМИ***М. І. Прилуцький, О. О. Вольф**Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*

*В роботі представлена установка для дослідження процесу сушіння ливарних стрижнів інфрачервоними променями, яка дає можливість визначити розподіл температури по об'єму стрижня та зміну його вологості при різних теплових потоках від генератора випромінювання*

*В статье представлена установка для исследования процесса сушки литейных стержней инфракрасными лучами, которая дает возможность определить распределение температуры по объему стержня и изменение влажности при разных тепловых потоках от генератора излучения.*

*In article installation for exploration of process of drying of foundry cores by infra-red beams which gives the chance to define temperature distribution on volume of a core and humidity change at different thermal streams from the radiation generator is presented*

**Вступ**

Нагрів інфрачервоними променями знайшов широке застосування в різних областях промисловості. В ливарному виробництві сушіння інфрокрасними лучами широко використовується для поверхневої підсушування форм [1]. Дана робота присвячується кінетиці сушіння стрижнів виготовлених з пластичних сумішей.

**Тепло- і масообмін при нагріві інфрачервоними променями**

Відсутність тепло- і масообміну між вологим стрижнем і навколишньою середою говорить про те, що стрижень знаходиться у рівновазі по відношенню до середовища. Теплообмін відсутній при однаковій температурі стрижня і середовища, а масообмін – при рівновазі парціального тиску на поверхні

стрижня, навколишнього середовища і концентрації речовин. Процес сушіння починається тоді, коли створюється різниця парціального тиску над поверхнею стрижня і в середовищі, а також різниця температур, зумовлююча підвід тепла до стрижня, необхідного для зміни агрегатного стану вологи в ньому.

Механізм сушіння вологих матеріалів визначається формою зв'язку вологи з матеріалом і режимом сушіння. Для ливарних стрижнів механізм сушіння визначається також і природою зв'язуючого.

При сушінні стрижнів видаляється волога зв'язана механічно та фізико-хімічно. Основним законом переміщення вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах є узагальнений закон вологопровідності. Якщо в середині матеріала є перепад вологи і температури, то густина потоку вологи рівна:

$$i = -k\gamma_0(\Delta u + \delta\Delta t) \quad (1)$$

де  $\gamma_0$  – густина сухого матеріала,  $\text{кг}/\text{м}^3$  ;  
 $\Delta U$  і  $\Delta t$  – відповідно градієнти вологи і температури ;  
 $K$  – коефіцієнт потенціалопровідності,  $\text{м}^2/\text{год}$  ;  
 $\delta$  – термоградієнтний коефіцієнт,  $\text{кг}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ .

Перший член цього рівняння враховує кількість рухомої вологи під дією градієнта вологи, а другий - під дією градієнта температури [1].

Диференціальне рівняння теплопередачі Фур'є для найбільш загального випадку, коли матеріал містить всередині вологу, внутрішні додаткові джерела теплоти. За рахунок проникнення інфракрасних променів і внутрішніх джерел тепла, коли всередині відбувається випаровування, має вигляд:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \nabla^2 t + \frac{q_{\text{вип}}}{C_n \gamma_0 R} e^{-bx} - z \frac{D}{C_n \gamma_0} \quad (2)$$

де  $C_n = C_0 + C_v$  – приведена питома теплоємність вологого тіла,  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$  ;  
 $C_0$  – питома теплоємність абсолютно сухої речовини,  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$  ;  
 $C_v$  – питома теплоємність води,  $4,187 \text{ кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$   
 $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{год}$ .

При радіаційному сушінні кількість тепла, необхідного для випаровування вологи вологого матеріала, що нагрівається від генератора випромінювання, може бути розраховано із виразу:

$$Q = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_{\text{вип}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пв}}}{100} \right)^4 \right] \cdot N, \text{ кДж}/\text{год} \quad (3)$$

та має вигляд:

$$Q = \iint_F C_n \varphi_{-2} \left[ \left( \frac{T_{\text{ВИП}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{ПЛ}}}{100} \right)^4 \right] \cdot d \cdot F \quad (4)$$

Ця кількість тепла витрачається на випаровування вологи та нагрівання волого тіла, а також на втрати в навколишнє середовище. При вологості матеріала більше гігроскопічного теплота десорбції може бути прийнята рівна прихованій теплоті пароутворення води. Інтегрування рівняння (4) проходить по об'єму V та по поверхні тіла F:

$$Q = \iiint_V C_V \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot dV + r \frac{dM}{d\tau} + \iint_F \alpha (t_{\text{НМ}} - t_{\text{В}}) \cdot dF \quad (5)$$

Якщо знехтувати усадкою матеріала в процесі сушіння, визначити середню по об'єму вологість у відсотках через  $\omega = \frac{M}{I_{\text{сух}}} \cdot 100$ ; ввести в температурні різниці індекс "С<sub>p</sub>", що означає – прийнята середня різниця температур по об'єму; визначити через C і  $\square$  середнє значення питомої теплоємності і густини по об'єму, то отримаємо :

$$r \frac{d\omega}{d\tau} \cdot \frac{1}{100} + (C_0 + \omega_0) \frac{dt_{\text{кр}}}{d\tau} + \frac{Fd}{I_{\text{сух}}} (t_{\text{нм}} - t_{\text{с}})_{\text{ср}} = \frac{FC_n \varphi_{1-2}}{I_{\text{сух}}} \left[ \left( \frac{T_{\text{сун}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{нм}}}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

Це співвідношення є основним рівнянням кінетики радіаційного сушіння: швидкості сушіння і нагрівання. Розв'язуючи це рівняння відносно швидкості сушіння одержимо вираз:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{100 \cdot F}{r \cdot I_{\text{сух}}} \left\{ C_n \varphi_{1-2} \left[ \left( \frac{T_{\text{сун}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{нм}}}{100} \right)^4 \right] + \alpha (t_{\text{с}} - t_{\text{нм}}) \right\} - \left( C_0 + \frac{\omega}{100} \right) \frac{dt_{\text{ср}}}{d\tau} \quad (7)$$

що дозволяє визначити швидкість сушіння в будь-який момент часу. Для періоду постійної швидкості сушіння  $t_{\text{нм}} = \text{const}$ , останній член правої частини рівняння дорівнює нулю.

Якщо в рівняння (7) швидкості сушіння замінити інтенсивністю сушіння, то воно буде мати вигляд:

$$rm + \left( C_0 + \frac{\omega}{100} \right) \frac{I_{\text{сух}} + dt}{F \cdot d\tau} + \alpha (t_{\text{нм}} - t_{\text{с}}) = C_n \cdot \varphi_{1-2} \left[ \left( \frac{T_{\text{сун}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{нм}}}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

або в скороченому вигляді:

$$q_{\text{випар}} + q_{\text{пот}} + q_{\text{нагр}} = q_{\text{вип}} \quad (9)$$

Рівняння (9) використовується як гранична умова для вирішення диференціальних рівнянь термовологопровідності, тепло- і масообміну при радіаційному нагріві.

### **Методика дослідження**

Для дослідження процесів тепло- і масообміну при радіаційному нагріванні була розроблена експериментальна установка (рис. 1), що представляє собою збірну металічну конструкцію, головною частиною якої є камера 1 висотою 1000 мм і перерізом прямокутної форми 420×480 мм. Для створення теплової ізоляції камера 1 футерована азбестовим листом 2, а внутрішня частина облицьована алюмінієвим листом 3. Верхня стінка є опорою на якій за допомогою рухомого пристрою 4 монтується генератор випромінювання 5. Рухомий пристрій дозволяє встановлювати на вказаній висоті генератор випромінювання від досліджуваного зразка 6. Відстань між поверхнею зразка і генератором можна змінювати від 0 до 500 мм, що дозволяє створювати різну щільність променевого потоку на зразку при постійній температурі генератора.

Досліджуємих зразок встановлюється на платформу 7, виготовлену з алюмінієвого сплаву с азбестовою прокладкою, яка виключає передачу тепла від нагрітої платформи до нижньої частини зразка. Це забезпечує односторонній підвід тепла до зразка.

Температуру генератора випромінювання можна збільшувати чи зменшувати, змінюючи напругу за допомогою лабораторного автотрансформатора типу РНО250-10. Температура генератора випромінювання контролювали і підтримували в заданій величині за допомогою потенціометра КСП-4.

### **Контроль зменшення вологи із зразків в процесі дослідження сушіння інфрачервоними променями**

Початкову вологість стрижневої суміші визначаємо косвеним методом. Спеціальним щупом відбиралась навіска масою 0,4 - 0,5 г, яка поміщається в бюксу з відомою масою.

Бюкса з навіскою взвіщується на аналітичній вазі з точністю до 0,0001 г. Потім бюкса переміщується в сушильний шкаф, де при температурі 105-110 °С висушувалась до постійної маси. По різниці маси навіски до і після сушіння визначаємо середню вологість суміші.

Зменшення вологи в досліджуємому зразку під час проведення досліду сушіння інфрочервоними променями контролювалась за допомогою лабораторної ваги типу ВЯТК-500. Показники зменшення вологи записувались через кожні три хвилини. Зразок сушили до постійної маси.

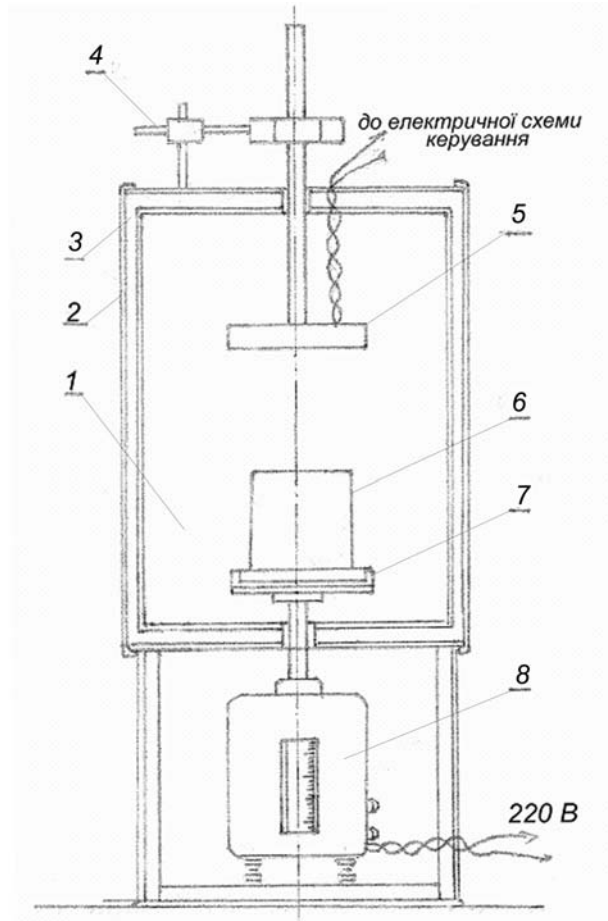


Рис. 1. Установа для дослідження тепло- та масопереносу при сушінні стрижнів інфрочервоними променями  
 1-камера; 2-азбестовий лист; 3-алюмінієвий лист; 4-рухомий пристрій; 5-генератор випромінення; 6-досліджуємый зразок; 7-платформа; 8-технічні ваги

Для дослідження розподілення вологи по перерізу зразка під час досліду з нього спеціальним щупом в різних точках по його перерізу відбирались проби вагою 0,2 - 0,3 г та косвеним методом визначали вологість в даних точках зразка.

### **Контроль температури досліджуваного зразка**

Вимірювання температурного поля зразка одночасно проводилось в

шести точках, розміщених рівномірно по висоті зразка, за допомогою хромель-константинових термопар, які підключені до багатопозиційного потенціометра КСП-4.

Вимірювання теплових потоків генератора випромінювання проводиться за допомогою батарейного датчика при різних режимах сушіння зразків [2].

### **Висновок**

Розроблена методика та устаткування для дослідження режимів сушіння різних матеріалів інфрачервоними променями.

### **Література**

1. Лыков А.В. Теория сушки – М.; «Энергия», 1968
2. Геращенко О.А. Основы теплотрии – Киев, «Наукова думка», 1971