

BILANS WILGOCI W ZABYTKOWYCH PRZEGRODACH

Jan KUBIK
 Politechnika Opolska

1. Wprowadzenie

Prowadzenie prac konserwatorskich powinno poprzedzać dokładne rozeznanie stanu fizycznego ścian zabytku a głównie zawilgocenia. Problem ten jest szczególnie ważny w trakcie konserwacji polichromii o trwałości, której decyduje ruch jonów w sieci kapilar oraz reakcje fotochemiczne barwników malowideł. W każdym z tych przypadków wymaga się wykonania bilansu wilgoci, który decyduje o sensowności prac konserwatorskich. Istotnie, bezcelowe są prace naprawcze, jeżeli w ich następstwie rośnie oscylujące zawilgocenie ściany. Ten oczywisty wymóg utrzymania zawilgocenia w otoczeniu stanu naturalnego jest pomijany najczęściej w diagnostyce zabytku.

W prezentowanym opracowaniu przedstawimy podstawy teoretyczne ruchu oraz kondensacji wilgoci zachodzącej w polichromiach oraz w ścianach zabytku. Podstawę stanowią równania dyfuzji oraz kondensacji pary wodnej zachodzące w przypowierzchniowych warstwach zabytku.

2. Procesy kondensacji kapilarnej

W najprostszym przypadku w ścianie zabytku należy analizować układ złożony ze szkieletu (0) o gęstości ρ^0 , wilgoci (kondensatu) (1) o gęstości ρ^1 , oraz pary wodnej (2) o gęstości ρ^2 .

Spełnione są tu parcjalne bilanse masy:

$$\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \text{div}(\rho^\alpha \mathbf{u}^\alpha) = R^\alpha \quad \text{lub} \quad (1)$$

$$\rho \frac{dc^\alpha}{dt} + \text{div}(\rho^\alpha \mathbf{u}^\alpha) = R^\alpha, \quad c^\alpha = \frac{\rho^\alpha}{\rho}, \quad \rho = \sum_\alpha \rho^\alpha, \quad \mathbf{v}^\alpha = \mathbf{w} + \mathbf{u}^\alpha \quad (2)$$

tutaj symbolami $\rho^\alpha, \rho, c^\alpha, \mathbf{v}^\alpha, \mathbf{w}, \mathbf{u}^\alpha, R^\alpha, \mathbf{j}^\alpha$ oznaczono kolejno gęstość składnika α i całego ośrodka, udział masowy, prędkość składnika, barycentryczną i dyfuzyjną oraz źródło i strumień składnika α .

Z równań tych po zsumowaniu źródeł $R^1 + R^2 = 0$, otrzymamy jedno równanie ($\alpha = 1, 2$):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho^1 + \rho^2) + \text{div}(\rho^1 \mathbf{v}^1 + \rho^2 \mathbf{v}^2) = 0, \\ \rho^1 \mathbf{v}^1 + \rho^2 \mathbf{v}^2 = \rho \mathbf{w} + \rho^1 \mathbf{u}^1 + \rho^2 \mathbf{u}^2 \approx \rho^1 \mathbf{u}^1 + \rho^2 \mathbf{u}^2. \quad (3)$$

Rozkład prędkości (3) uwzględnia łączne występowanie przepływów dyfuzyjnych z konwekcyjnymi. W masywnych ścianach zabytków najczęściej występują lokalne przepływy dyfuzyjne. Natomiast przy dużych różnicach wilgoci po obu stronach ściany, wystąpią przepływy konwekcyjne. Wynika stąd, iż oba szczególne przypadki przepływów roztworów wilgoci należy uwzględniać w badaniach konserwatorskich. Istotnie w części środkowej masywnych ścian o grubości rzędu 1m decydują przepływy dyfuzyjne wywołane różnicą konfiguracji porów. Odwrotnie w pobliżu powierzchni decydujące znaczenie będą miały uśrednienia prowadzące raczej do przepływów konwekcyjnych. Wynika stąd różnorodność przyjmowanych w badaniach modeli przepływów roztworów wilgoci w ścianach zabytków.

Natomiast w przypadku przepływów stacjonarnych będzie:

$$\operatorname{div}(\rho^1 \mathbf{u}^1 + \rho^2 \mathbf{u}^2) = 0 \rightarrow \operatorname{div}(\mathbf{j}^1 + \mathbf{j}^2) = 0 \quad \text{lub} \quad \operatorname{div}(\rho \mathbf{w}) = 0 \quad (4)$$

Zaś w przypadku jednowymiarowym:

$$\frac{d}{dx}(\mathbf{j}^1 + \mathbf{j}^2) = 0 \rightarrow \mathbf{j}^1 + \mathbf{j}^2 = \text{const.} \quad \text{lub} \quad \frac{d}{dx}(\rho \mathbf{w}) = 0 \quad j^0 = \rho \mathbf{w} \quad (5)$$

Wynik ten dowodzi, iż suma strumieni składników musi być stała w warstwie.

Podane poprzednio rozważania odnosiły się do przegród jednorodnych. W ścianach zabytku występuje układ kilku warstw: tynków, regularnych warstw zewnętrznych oraz niejednorodnej warstwy wewnętrznej. Rozważania poprzednie prowadzące do układów równań (4), (5) możemy uogólnić na układ (n) warstw. W układzie warstw (n) będzie zachodzić:

$$\sum_n \frac{d}{dx}(\mathbf{j}_n^1 + \mathbf{j}_n^2) = 0 \rightarrow \mathbf{j}_n^1 + \mathbf{j}_n^2 = \text{const.} \quad \sum_n \frac{d}{dx}(\rho_n \mathbf{w}_n) = 0 \quad (6)$$

W następstwie dla liniowych równań na strumień kondensatu i pary wodnej otrzymujemy liniowe rozkłady stężeń lub gęstości obu składników po grubości warstw.

Sprawa komplikuje się dla nieliniowych równań na strumienie i z takimi przypadkami mamy do czynienia w fizyce budowli zabytkowych.

3. Równania fizyczne

Jeżeli pominąć powierzchniowe źródła masy na stykach warstw, to dla liniowych równań fizycznych uzyskujemy klasyczny liniowy rozkład (łamaną) stężeń sumarycznej wilgoci. Sprawa się komplikuje, kiedy współczynniki transportu nie są stałe, a zależą od temperatury. W pierwszej kolejności analizować będziemy klasyczne przypadki równań fizycznych typu praw Ficka.

Równania te mają formę:

$$j^1 = -D \operatorname{grad}(c^1 + c^2), \quad j_2 = -D_2 \operatorname{grad}(c^1 + c^2), \quad j = -K \operatorname{grad}(c^1 + c^2) \quad (7)$$

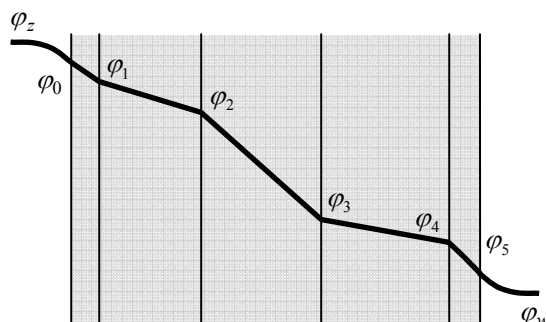
W równaniu (7) symbolami j , c , D , K oznaczono kolejno strumienie masy, stężenia migrujących składników oraz współczynniki dyfuzji.

W równaniach (7) założono, iż o przepływie decydują zarówno stężenia poszczególnych składników jak i ich suma. W bardziej złożonych przypadkach należy liczyć się też z nieliniowością równań fizycznych, odnoszących się do tych przepływów. Ta złożoność i nieliniowość przepływów powoduje, iż wstępne oceny stopnia zawilgocenia ścian zabytków ograniczymy do ujęć globalnych. O charakterze tych przepływów możemy sądzić na podstawie znajomości równań opisujących przejmowanie i oddawanie składników roztworów wilgoci z ściany do otoczenia.

4. Przybliżona ocena zawilgocenia przypowierzchniowych warstw zabytku

Analizować będziemy teraz zmiany zawilgocenia murów zabytku w wyniku przepływów wilgoci. Mamy w tym przypadku układ 3-5 warstw. Po zewnętrznej stronie występują warstwy tynku 1,5 pokryte często polichromiami decydującymi o kulturowej i historycznej wartości całej budowli. Za tymi warstwami znajdują się kolejne regularne warstwy murów (2), (4) z cegieł lub obrobionego kamienia. Natomiast w samym środku muru występuje obszar luźniej z sobą związanych elementów. W tej warstwie (3) najczęściej w sposób niekontrolowany migruje wilgoć.

Z pomiarów par względnego zawilgocenia przypowierzchniowego φ_0 i w otoczeniu φ_2 (φ_0, φ_2) oraz analogicznie po wewnętrznej stronie ściany (φ_5, φ_w) można oszacować zmiany zawilgocenia przypowierzchniowych warstw zabytku. Należy w tym celu wprowadzić równania na strumienie wilgoci w bezpośrednim otoczeniu ścian od strony zewnętrznej i wewnętrznej.



Rys.1. Rozkład stężeń wilgoci po grubości muru

Równania przejmowania i oddawania wilgoci mają klasyczną postać:

$$j_2 = -\beta_2(\varphi_0 - \varphi_2) \qquad j_w = -\beta_w(\varphi_5 - \varphi_w) \qquad (8)$$

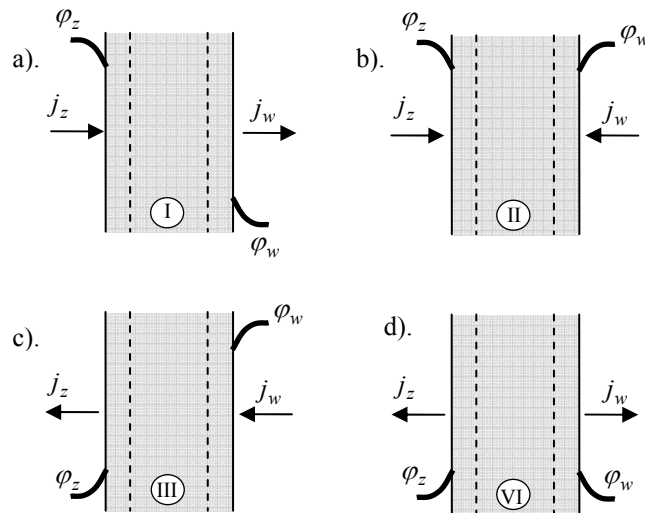
W równaniach tych symbolami j , β , φ oznaczono kolejno strumienie masy, współczynniki przejmowania i oddawania wilgoci oraz zawilgocenia po zewnętrznej oraz wewnętrznej stronie ściany. Z równań tych można wyznaczyć ilość wnikającej do ściany wilgoci oraz jej zawartość w ścianie, a dalej jej globalne bilanse.

Zachodzą tu 4 przypadki możliwych przepływów, które przedstawiono na rys.2a mianowicie kumulacji i oddawania wilgoci po stany pośrednie między przepływami a kumulacją wilgoci. Kolejne komplikacje wywołuje średnia wartość gradientu zawilgocenia.

Ilość całkowitej masy wilgoci M zawartej w ścianie o powierzchni F , po czasie t w wyszczególnionych czterech przypadkach podają poniższe wzory:

$$M_I = (j_2 - j_w)Ft \quad M_{II} = (j_2 + j_w)Ft \quad M_{III} = (j_w - j_2)Ft \quad M_{IV} = -(j_2 + j_w)Ft \quad (9)$$

Z przytoczonych równań można uzyskać zmiany czasowe zawilgocenia jednostki powierzchni zabytkowego muru.



Rys.2. Podstawowe przypadki przepływów wilgoci w ścianie zabytku
 a) przepływ z zewnątrz do wewnątrz, b) akumulacja (namakanie),
 c) przepływ z wewnątrz na zewnątrz, d) oddawanie (suszenie)

Równania te w dalszej kolejności pozwalają oceniać zmiany zawilgocenia zabytku w czasie i co najważniejsze prognozować trwałość polichromii.

Literatura

- [1] Kubik J. Przepływy wilgoci w materiałach budowlanych, OWPO, Opole 1999 r.
- [2] Kucharczyk A. . Przepływ roztworów soli w ścianach zabytkowych budowli, dysertacja Opole 2010
- [3] Kubik J. Trwałość zabytków, Studia z Fiz. Bud. KILiW PAN Warszawa-Łódź 2006r.

MOISTURE BALANCE IN MONUMENTAL WALLS

Summary

The moisture transport Abstract In monumental walls was analysed. The simplified approach have been proposed for estimation of moisture content in capillary-porous monumental wall.