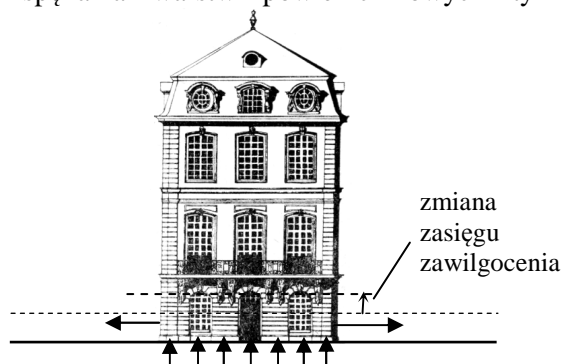


Rozdział III

IZOTERMICZNE OSUSZANIE ZAWILGOCONYCH ZABYTKÓW

1. Wstęp

Osuszanie mocno zawilgoconych zabytków niczym się w istocie nie różni od osuszania budynków po powodzi. Metody postępowania są podobne, a różnica występuje w innym postrzeganiu prędkości wysychania. O ile w zalanych wodą współczesnych budynkach mieszkalnych jesteśmy zainteresowani jak najszybszym wysychaniem murów, to w budynkach zabytkowych zbyt szybkie wysychanie może prowadzić do równie dużych strat wynikających ze spękania warstw powierzchniowych tynków czy też malowideł.



Rys. 1. Fasada zabytkowa zaatakowana przez wilgoć

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie te elementy zabytku, które są narażone na największe szkody w wyniku totalnego zawilgocenia oraz jego zmian w trakcie osuszania. Będą to najczęściej elementy bezpośrednio przyległe do fundamentów przez które wilgoć wnika do murów. Zawilgoceniu ulegają też nieosłonięte fragmenty zwieńczeń murów. Jeżeli natomiast część przyziemia jest otwarta (por. rys. 2) to zachodzi intensywne osuszanie. Osobną grupę zagadnień stanowią zalane w wyniku powodzi malowidła zabytkowe.

Szybkość z jaką zachodziło wysychanie murów budynków zalanych przez powódź w dorzeczu Odry stanowiła przedmiot zainteresowań ofiar powodzi. Stopień wysuszania murów przed zimą decydować miał bowiem o dalszej trwałości zalanych obiektów, a to z uwagi na możliwość rozsadzania zawilgoconych materiałów przez mróz. Rzeczywistej oceny skuteczności osuszania ścian dokonuje się bowiem zawsze na wiosnę po inwentaryzacji zniszczeń mrozowych zawilgoconych ścian. Zakres i powaga problemu spowodowała, iż od sierpnia 97 – tuż po powodzi w Katedrze Fizyki Materiałów Politechniki Opolskiej rozpoczęto badania kinetyki wysychania ceramiki

budowlanej poddanej uprzednio pełnemu zawilgoceniu aż do wypełnienia sieci kapilar cieczą. Z badań tych na podstawie tzw. zadań odwrotnych można obecnie ocenić podstawowe parametry określające kinetykę wysychania murów ceglanych i drewnianych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiamy wyniki tych badań, które pozwalają na oszacowanie pierwszego okresu osuszania ścian t.j. okresu w którym dochodzi do najintensywniejszego odparowania wilgoci z powierzchni ścian.

2. Opis zjawiska

Obserwacja procesu wysychania materiałów kapilarno-porowatych prowadzi do wydzielenia trzech charakterystycznych etapów procesu, a mianowicie:

- wysychania zachodzącego na powierzchniach ścian,
- konwekcyjno-dyfuzyjnego transportu wilgoci w czasie suszenia,
- dyfuzyjnego mechanizmu transportu (dyfuzja objętościowa i powierzchniowa w sieci kapilar).

Przytoczone etapy wymagają różnych opisów ruchu wilgoci w kapilarno-porowatych materiałach budowlanych. W pierwszym okresie będą to równania przepływów przypowierzchniowych zachodzących w bezpośrednim otoczeniu wysychającej ściany. Natomiast w ujęciu ogólnym podamy równania wieloskładnikowych przepływów konwekcyjno-dyfuzyjnych z przemianą fazową, z których wynikną opisy procesów szczególnych. W pierwszej kolejności będą to przepływy powierzchniowe, a następnie dyfuzyjno-konwekcyjne.



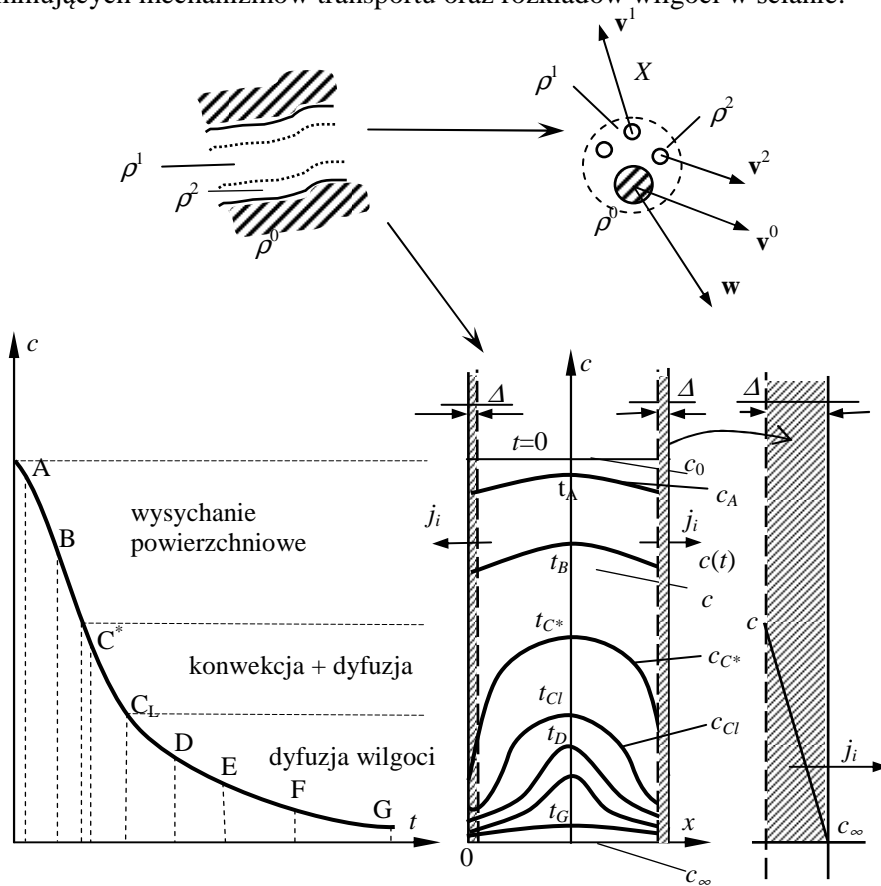
Rys. 2. Łądek - rynkowe domy podcieniowe

W miarę postępu wysychania wilgoci granica między strefą suchą a zawilgoconą przesuwa się w głąb ściany. Obserwujemy część wyschniętą przez pory w której zachodzi transport wilgoci z wnętrza ściany. Między częścią o pełnym zawilgoceniu a częścią wyschniętą należy zlokalizować strefę przejściową, która ma charakter rozmytej fazy typowej w obszarach gdzie

dochodzi do odparowania wilgoci ze ścian kapilar. Warto tu zwrócić uwagę, że w kapilarach o średnicach mniejszych od 10^{-7}m ($2r < 10^{-7}\text{m}$) w normalnych warunkach zawsze występuje wilgoć w całej objętości kapilary. Ponadto zasadniczy jest udział zjawisk powierzchniowych w procesach wysychania cegły co wynika z dużej powierzchni właściwej rzędu $(1,1-2,1) \cdot 10^6 \text{m}^2/\text{m}^3$ oraz porowatości ($\varepsilon=0,12-0,40$). Znaczna jest również przepuszczalność gazów $5 \cdot 10^{-15} - 2 \cdot 10^{-13} \text{m/s}$ przez ceramikę

Oczywiście w pierwszym okresie przy pełnym zawilgoceniu ścian występują zbyt małe różnice stężeń wilgoci aby uwzględniać mechanizmy dyfuzyjne. Dominuje wówczas wysychanie powierzchniowe.

Natomiast w następnym okresie występuje złożony konwekcyjno-dyfuzyjny przepływ z przemianą fazową, a w okresie końcowym dyfuzyjny przepływ pary wodnej co odpowiada pełnemu wysuszeniu murów i powrotowi do stanu sprzed powodzi. Poszczególne etapy procesu przedstawiono na rys. 2 z zaznaczeniem dominujących mechanizmów transportu oraz rozkładów wilgoci w ścianie.



Rys. 3. Etapy suszenia ścian ceglanych.

3. Równania transportu

W ogólnym przypadku proces wysychania w zadaniach izotermicznych powinny opisywać równania konwekcyjno-dyfuzyjnego transportu wilgoci w materiałach kapilarno-porowatych wraz z przemianą fazową wilgoci. Opis procesu wymaga wyspecyfikowania faz i składników przepływu. Przyjmuje się przy tym nieodkształcalność szkieletu, a rozważania dotyczące przepływów w wieloskładnikowym ośrodku ograniczymy tylko do dyfuzyjno-konwekcyjnej części opisu, pomijając bilanse pędu oraz energii. W pierwszym okresie wysychania wobec pomijalnie małego gradientu stężeń proces lokalizuje się w bezpośrednim otoczeniu powierzchni zewnętrznej muru.

W makroskopowym opisie procesu wyszczególnimy szkielet (o) o gęstości ρ^o , wilgoć objętościową wypełniającą pory o gęstości ρ^1 , wilgoć powierzchniową w kapilarach o gęstości ρ^2 oraz parę wodną o gęstości ρ^3 .

Parcjalne bilanse masy wyszczególnionych składników mają formę

$$\frac{d}{dt} \int_V \varepsilon^\alpha \rho^\alpha dV = \int_V R^\alpha dV \quad (3.1)$$

stąd lokalna postać parcjalnego bilansu masy

$$\varepsilon^\alpha \left(\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha) \right) = R^\alpha \quad (3.1')$$

lub po wprowadzeniu stężenia $c^\alpha = \rho^\alpha / \rho$

$$\rho \frac{dc^\alpha}{dt} + \operatorname{div} \mathbf{j}^\alpha = \frac{R^\alpha}{\varepsilon^\alpha} \quad \alpha = 0,1,2,3 \quad (3.2)$$

Przedstawione równania bilansów po zsumowaniu prowadzą do zasady zachowania masy

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{w} = 0 \quad (3.3)$$

gdzie

$$\rho = \sum_\alpha \varepsilon^\alpha \rho^\alpha, \quad \rho \mathbf{w} = \sum_\alpha \varepsilon^\alpha \rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha, \quad \sum_\alpha R^\alpha = 0, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{j}^\alpha = \rho^\alpha \mathbf{u}^\alpha, \quad \mathbf{v}^\alpha = \mathbf{w} + \mathbf{u}^\alpha$$

Symbolami $\rho^\alpha, c^\alpha = \frac{\rho^\alpha}{\rho}, \mathbf{j}^\alpha, R^\alpha, \mathbf{w}, \mathbf{v}^\alpha, \mathbf{u}^\alpha, \varepsilon^\alpha$ oznaczono kolejno gęstość i koncentrację składnika (α), strumień i źródło masy oraz prędkość barycentryczną, komponenty i dyfuzyjną a ε^α określa stopień wypełnienia porów i wpływ ich geometrii na przepływy.

Jeżeli posumujemy parcjalne przepływających składników $\alpha=1,2$ to uzyskamy układ równań

$$\rho \frac{dc}{dt} + \operatorname{div} \mathbf{j} = \frac{R}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

lub

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \mathbf{w} \cdot \operatorname{grad} c + \operatorname{div} \mathbf{j} = \frac{R}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

gdzie: $c = c^1 + c^2, \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}^1 + \mathbf{j}^2, \quad \frac{R}{\varepsilon} = \frac{R^1}{\varepsilon^1} + \frac{R^2}{\varepsilon^2}$

Równanie (3.6) ujmuje wszystkie mechanizmy transportu wilgoci w materiale w trakcie suszenia, a więc wysychanie powierzchniowe a dalej składowe konwekcyjne $\rho \mathbf{w}$, dyfuzyjne \mathbf{j} i źródła masy wynikające z przemiany fazowej. W szczególności z równania tego określimy zależność zmian stężeń wilgoci w pierwszym etapie procesu o dominacji przepływów konwekcyjnych.

Równania (3.6) ujmują też przepływy w pozostałych obszarach suszenia, np. w obszarze dyfuzyjnym zachodzi $c = c^2 + c^3, \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}^2 + \mathbf{j}^3$.

W dalszych częściach pracy do równań szczególnych wynikających z (3.6) dołączymy równania fizyczne określające strumienie masy oraz warunki początkowo-brzegowe.

4. Wysychanie powierzchniowe

W pierwszym okresie suszenia, kiedy pory materiału są w pełni nasycone występuje bardzo intensywna wymiana wilgoci przy powierzchni. Wobec znikomych różnic stężeń po grubości ściany (porównaj rys. 2) można wówczas pominąć dyfuzyjne przepływy i ograniczyć się tylko do przepływów konwekcyjnych na powierzchni ściany. Jest to tzw. obszar o stałej prędkości suszenia.

Równania określające ten etap wysychania otrzymamy z bilansu (3.5) lub (3.6) po scałkowaniu po objętości warstwy przyściennej $V = A\Delta$ gdzie A jest powierzchnią wysychania a Δ grubością warstewki intensywnego wysychania

$$\int_V \rho \dot{c} dV = \int_A j_1 n_1 dA \quad (4.1)$$

Zakładając z kolei stałość strumienia i prędkości \dot{c} po grubości warstwy otrzymamy uproszczoną postać bilansu

$$\rho \dot{c} V = j_1 n_1 A \quad (4.1')$$

Bilans wilgoci przypowierzchniowej (4.1') w warstwie zewnętrznej muru musi być uzupełniony równaniem fizycznym określającym strumień masy $j_1 n_1$.

Równania te dla muru ceglanego mają postać

$$\mathbf{j}_1 n_1 = -k \left(\frac{c_0 - c_\infty}{\Delta} \right) \quad (4.2)$$

gdzie k – jest ilością wyparowywującej z powierzchni ściany wilgoci w jednostce czasu przy jednostkowej różnicy stężeń wilgoci na początku wysychania $c_0 = c(0; \varphi)$ oraz po ustaleniu się równowagowego stężenia $c_\infty = c(t = \infty; \varphi)$, czyli $\frac{1}{\Delta}(c_0 - c_\infty) = 1$. Stężenie c_∞ parametrycznie zależy od wilgotności względnej φ w otoczeniu ściany. Tą postać równań fizycznych potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych wysychania ceramiki budowlanej.

Podstawiając równania fizyczne (4.2) do bilansu (4.1') otrzymamy uproszczone równania opisujące wyparowanie wilgoci ze ściany ceglanej

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{kA}{m\Delta}(c_0 - c_\infty), \quad c(0) = c_0, \quad m = \rho V \quad (4.3)$$

W tym przypadku odparowanie zachodzi tylko na zewnętrznej powierzchni ściany tak, że ulatniająca się z tej powierzchni wilgoć zostaje natychmiast uzupełniona cieczą płynącą bez oporu z wnętrza materiału. Problem sprowadza się więc w istocie do analizy przepływu na brzegu przy założeniu łatwego dopływu wilgoci z wnętrza ściany.

Całka równania (4.2) ma postać $c - c_0 = -\frac{kA}{m\Delta}(c_0 - c_\infty)t$. Z zależności tej wyznaczmy czas pierwszego, przypowierzchniowego etapu suszenia τ_1 , który odpowiada stężeniu wilgoci $c = \bar{c}$

$$\tau = \frac{m\Delta}{kA} \frac{(c_0 - \bar{c})}{(c_0 - c_\infty)} \quad (4.4)$$

Bardziej złożoną formę mają równania fizyczne opisujące kinetykę wysychania kamienia, które można przedstawić w postaci

$$j_1 n_1 = -KA \frac{c_0 - c(t)}{\Delta} \quad (4.5)$$

gdzie c_0 i $c(t)$ są stężeniami wilgoci w kamieniu na początku wysychania i w chwili t zaś K określa wartość strumienia wydalonej ze ścianki wilgoci przy jednostkowym gradiencie stężeń $\left(\frac{c - c_0}{\Delta} = 1\right)$.

Równanie opisujące powierzchniowe wysychanie kamienia ma postać

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{KA}{m\Delta}(c_0 - c(t)) \quad \text{lub} \quad \dot{c} - \beta c = -c_\infty H(t) \quad (4.6)$$

Całka tego równania, czyli zmienne stężenie wilgoci wynosi

$$c(t) = (c_0 - c_\infty)e^{-\beta t} + c_\infty \quad (4.7)$$

gdzie $\beta = \frac{c_\infty}{c_0} = \frac{KA}{m\Delta}$ jest ułamkiem określającym stosunek stężenia wilgoci równowagowej c_∞ dla danego stężenia wilgoci w otoczeniu wysychającego betonu do pierwotnego stężenia wilgoci.

Z całki (4.7) można dla określonego poziomu zawilgocenia $c(t) = \bar{c}$ wyznaczyć czas potrzebny do wysuszenia betonu do poziomu \bar{c}

$$t = -\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\bar{c} - c_\infty}{c_0 - c_\infty}\right) \quad (4.8)$$

5. Przepływ fazy ciekłej

W wypełnionej wilgocią ciekłą sieci kapilar występuje składnik objętościowy o gęstości ρ^1 i powierzchniowy ρ^2 . Przepływ tych składników rozpoczyna się po około 300 godzinach po wytworzeniu się gradientu stężeń po grubości ściany.

Równania przepływów składników mają tu postać

$$\text{faza ciekła - objętościowa} \quad \varepsilon \left(\frac{\partial \rho^1}{\partial t} + \text{div}(\rho^1 \mathbf{v}^1) \right) = R^1 \quad (5.1)$$

$$\text{faza ciekła - powierzchniowa} \quad (1 - \varepsilon) \left(\frac{\partial \rho^2}{\partial t} + \text{div}(\rho^2 \mathbf{v}^2) \right) = R^2$$

Parcjalne bilanse masy po zsumowaniu prowadzą do zasady zachowania masy

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \mathbf{w} &= 0, \quad \rho = \varepsilon \rho^1 + (1 - \varepsilon) \rho^2, \\ \rho \mathbf{w} &= \varepsilon \rho^1 \mathbf{v}^1 + (1 - \varepsilon) \rho^2 \mathbf{v}^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Jeżeli ograniczyć się w tym przypadku do przybliżenia dyfuzyjnego na strumień $\rho \mathbf{w}$, czyli $\rho \mathbf{w} = -L \text{grad} \rho$ to otrzymamy następujące równanie dyfuzji

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \text{div} L \text{grad} \rho = 0 \quad (5.3)$$

Do równania tego należy dołączyć warunki początkowe $\rho(t=0) = \rho_0$ oraz warunki brzegowe, sprowadzające się do zgodności strumieni masy na zmiennej granicy obszaru fazy ciekłej z obszarami przemiany fazowej, czyli odparowania.

6. Przepływ w obszarze odparowania

Obszar ten zajmuje pośrednie położenie między wysuszoną częścią muru a częścią zawilgoconą. W tej części dochodzi do przemiany fazowej wilgoci tj. (odparowania jej z powierzchni menisków i ścianek kapilar). Obszar ten w przypadku idealnym byłby powierzchnią rozdzielającą dwie fazy a analizowane zadanie sprowadzone byłoby do zadania Stefana. W naszym przypadku z uwagi na zakłócający udział zjawisk powierzchniowych w procesie przemiany w kapilarach musimy analizować rozmyty obszar tej przemiany.

Parcjalne bilanse masy mają formę

$$\text{faza ciekła - objętościowa} \quad \varepsilon k \left(\frac{\partial \rho^1}{\partial t} + \text{div} \rho^1 \mathbf{v}^1 \right) = R^1 < 0$$

$$\begin{array}{ll}
 \text{dyfuzja powierzchniowa} & (1-\varepsilon) \left(\frac{\partial \rho^2}{\partial t} + \text{div } \rho^2 \mathbf{v}^2 \right) = R^2 < 0 \\
 \text{para wodna} & \varepsilon(1-k) \left(\frac{\partial \rho^3}{\partial t} + \text{div } \rho^3 \mathbf{v}^3 \right) = R^3 > 0 \quad (6.1)
 \end{array}$$

Z powyższego układu równań po zsumowaniu otrzymamy równanie formalnie podobne do (5.2), ale określające mieszany (ciecz i jej para) transport wilgoci

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{w} = 0 \quad (6.2)$$

gdzie: k – stopień wypełnienia porów, $\rho = \varepsilon k \rho^1 + (1-\varepsilon) \rho^2 + \varepsilon(1-k) \rho^3$,
 $\rho \mathbf{w} = \varepsilon k \rho^1 \mathbf{v}^1 + (1-\varepsilon) \rho^2 \mathbf{v}^2 + \varepsilon(1-k) \rho^3 \mathbf{v}^3$.

Podobnie jak poprzednio przyjmiemy, iż strumień konwekcyjny $\rho \mathbf{w}$ można przybliżyć zależnością

$$\rho \mathbf{w} = -N \text{ grad } \rho \quad (6.3)$$

gdzie N jest uśrednionym współczynnikiem transportu w strefie odparowania, równym strumieniowi konwekcyjnemu przy $\text{grad } \rho = 1$.

Stąd równanie przepływu w tej fazie przyjmie postać

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div}(N \text{ grad } \rho) \quad (6.4)$$

Do równania (6.4) należy dołączyć warunki brzegowe (zgodności strumieni na brzegach obszarów) oraz warunek początkowy $\rho(t=0) = \rho_0$

7. Przepływ w części wyschniętej

W tej przylegającej do brzegu zewnętrznego ściany części muru występuje wilgoć ciekła tylko w formie warstw cieczy na powierzchni kapilar. Natomiast w części objętościowej obserwujemy knudsenowską dyfuzję pary wodnej.

Problem opisuje następujący układ parcjalnych bilansów masy

$$\text{przepływ objętościowy pary wodnej } \varepsilon \left(\frac{\partial \rho^3}{\partial t} + \text{div}(\rho^3 \mathbf{v}^3) \right) = R^3 > 0 \quad (7.1)$$

$$\text{dyfuzja po powierzchni kapilar } (1 - \varepsilon) \left(\frac{\partial \rho^2}{\partial t} + \text{div}(\rho^2 \mathbf{v}^2) \right) = R^2 < 0$$

Z równań tych po zsumowaniu otrzymamy równania przepływu wilgoci w części wyschniętej

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho^s}{\partial t} + \text{div}(\rho^s \mathbf{w}^s) &= 0, \\ \rho^s &= \varepsilon \rho^3 + (1 - \varepsilon) \rho^2, \\ \rho^s \mathbf{w}^s &= \varepsilon \rho^3 \mathbf{v}^3 + (1 - \varepsilon) \rho^2 \mathbf{v}^2 \end{aligned} \quad (7.2)$$

Podobne do poprzedniego przybliżenie dyfuzyjne na strumień wilgoci w części wyschniętej (S) $\rho^s \mathbf{w}^s = -S \text{ grad } \rho^s$ prowadzi do równania przepływów uśrednionych w postaci

$$\frac{\partial \rho^s}{\partial t} = \text{div}(S \text{ grad } \rho^s) \quad (7.3)$$

do którego należy dołączyć warunki początkowo-brzegowe, czyli $\rho^s(0_+) = \rho_0^s$ oraz $\rho^s \mathbf{w}^s|_A = j^s$.

Warunki te odpowiadać powinny charakterowi wymiany masy na granicy z obszarem przemiany fazowej oraz z drugiej strony z brzegiem ściany.

Zauważmy, iż wyznaczenie stężeń wszystkich form wilgoci występujących w zadaniu wymaga rozwiązania trzech wzajemnie ze sobą sprzężonych warunkami zgodności na granicach obszarów zadań brzegowych. Problem, wobec zmienności obszarów należy do złożonych zagadnień fizyki matematycznej i wymaga zbudowania procedur numerycznych. Następnie należy wykonać obliczenia komputerowe pozwalające określić cały przebieg procesu suszenia.

8. Badania laboratoryjne

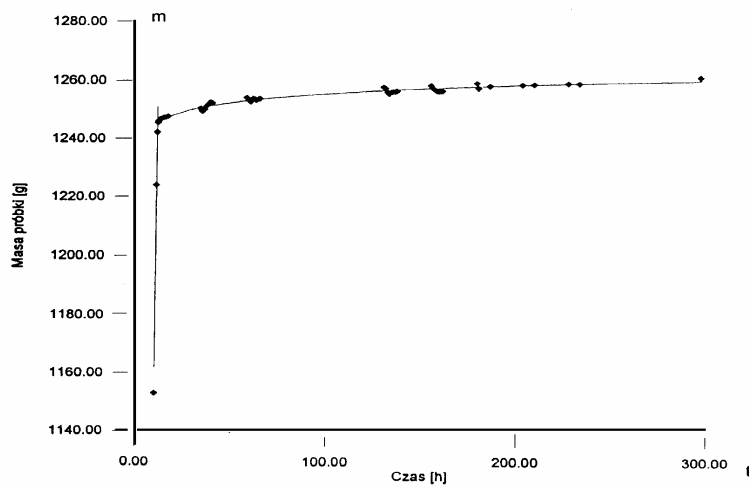
W celu określenia czasu suszenia zawilgoconych materiałów budowlanych przeprowadzono kilka cykli pomiarowych, określających parametry kinetyki suszenia.

Badania wstępne prowadzone były dla typowego materiału ceramicznego (cegły pełnej), a następnie były wykonane również dla próbek z betonu. Próbki ceglane po wysuszeniu w suszarce do stałej masy zostały zanurzone całkowicie w naczyniu z wodą (co miało symulować warunki powodzi). Krzywa moczenia wybranej próbki została przedstawiona na rys. 4.

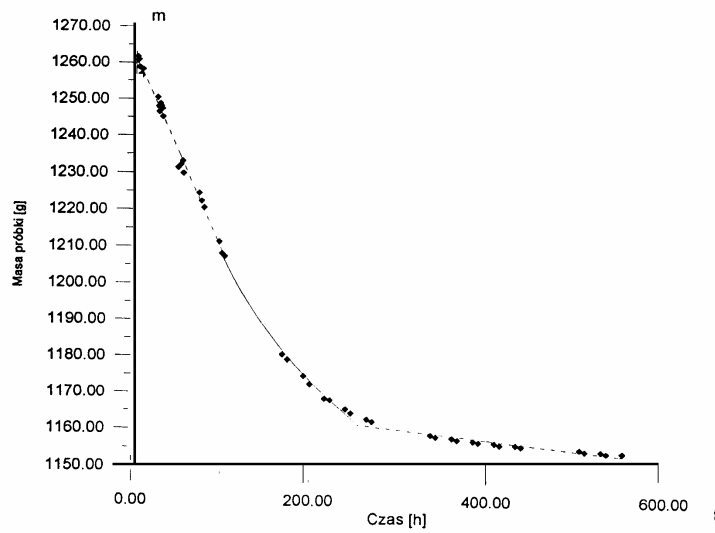
Po osiągnięciu stanu całkowitego nasycenia wodą każda z próbek została umieszczona w szczelnym opakowaniu tak, że tylko powierzchnia jednej ścianki miała kontakt z czynnikiem suszącym, co miało odpowiadać sytuacji suszenia elementu rzeczywistej przegrody budowlanej. Suszenie materiału trwało do czasu osiągnięcia przez próbkę stałej masy. Krzywa opisująca zmianę masy próbki w czasie suszenia wraz z aproksymacją wyników pomiarowych została przedstawiona na rys. 5. Na podstawie tej krzywej sporządzono wykresy koncentracji wilgoci w czasie suszenia, wilgotności właściwej, stężenia wilgoci (krzywe suszenia) oraz szybkości suszenia. Charakterystyczne krzywe suszenia sporządzone dla różnych wilgotności czynnika suszącego zostały przedstawione na rys. 6 (cegła). Krzywa szybkości suszenia stanowiła podstawę do wyznaczania czasu suszenia zawilgoconego materiału. Podkreślić należy, że czas suszenia określony na podstawie badań laboratoryjnych jest minimalnym czasem suszenia w warunkach naturalnych. W warunkach rzeczywistych przy zmiennych wilgotnościach względnych powietrza czas suszenia może się znacznie wydłużyć.

Warunki laboratoryjne nie uwzględniają również negatywnego wpływu czynników atmosferycznych (głównie opadów deszczu), których działanie może powodować znaczne zwiększenie zawilgocenia niedosuszonych ścian wydłużając tym samym czas ich wysychania. Nie bez znaczenia pozostają również dobowe wahania temperatur powietrza.

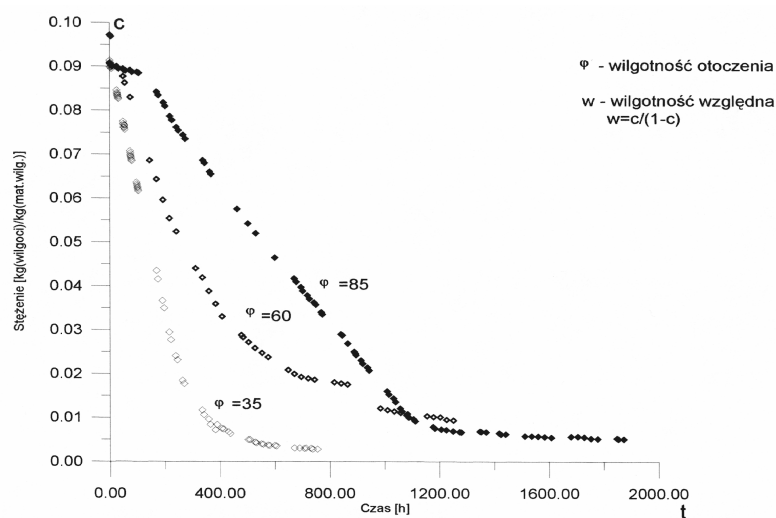
W oparciu o badania laboratoryjne można zauważyć, że proces suszenia różnych materiałów budowlanych w odmiennych warunkach przebiega ze zróżnicowaną szybkością. Określenie konkretnego czasu suszenia przegrody budowlanej jest rzeczą dosyć skomplikowaną ze względu na duże wahania parametrów, które mają wpływ na przebieg procesu suszenia.



Rys. 4. Krzywa moczenia wybranej próbki ceglanej – badania laboratoryjne



Rys. 5. Krzywa opisująca zmianę masy wybranej próbki ceglanej w czasie suszenia – badania laboratoryjne.



Rys. 6. Spadki stężenia wilgoci w cegle w czasie suszenia

9. Powierzchniowy czas suszenia

Na podstawie badań laboratoryjnych wykonanych na próbkach ceramiki budowlanej (cegły pełnej) podjęto próbę oszacowania minimalnego czasu potrzebnego do przejścia od stanu całkowitego nasycenia materiału wodą do momentu w którym zaczyna dominować przepływ wilgoci wywołany gradientem stężeń. Ten pierwszy okres odpowiada w zasadzie tylko pełnemu wyschnięciu powierzchniowemu.

Jak już wspomniano poprzednio całkowity czas suszenia materiału należy podzielić na kilka okresów. Pierwszy okres, w którym wymiana wilgoci między materiałem a otoczeniem zachodzi praktycznie wyłącznie w fazie ciekłej z powierzchni materiału oraz okres drugi, w którym wymiana wilgoci zachodzi w fazie konwekcyjno – dyfuzyjnej z wewnętrznych powierzchni materiału (konwekcja - odparowanie - dyfuzja).

Na podstawie badań laboratoryjnych (otrzymanych dla danych warunków krzywych szybkości suszenia) szacowano czas wysychania ściany ceglanej. Założono, że ściana ma grubość półtorzej cegły (około 40 cm), a warunki suszenia odpowiadają warunkom laboratoryjnym (wilgotność względna powietrza około 30-85%, temperatura powietrza około 20°C). Ten rząd wilgotności względnej $\varphi=30-50\%$ odpowiada bardzo niskiemu zawilgoceniu powietrza co umożliwia bardzo intensywne usuwanie wilgoci ze ścian. Uzyskane przy tych założeniach oszacowanie czasu suszenia określi w istocie

dolną granicę tego okresu, a dokładnie wysuszenie powierzchniowe. Gdyby po obu stronach takiej ściany panowały takie same warunki temperaturowe i wilgotnościowe to wilgoć z połowy grubości ściany dyfundowałaby do powietrza po stronie wewnętrznej, a z drugiej połowy na zewnątrz.

Podane rysunkach 4 ÷ 6 wykresy wysychania próbek ceglanych i betonowych o wymiarach 6 x 12 x 12 cm pozwalają na wyznaczenie współczynnika dyfuzji powierzchniowej k , który określa fizyczne własności cegły w pierwszym powierzchniowym okresie wysychania.

Wartość tego współczynnika występującego w równaniu fizycznym określającym zależność strumienia ulatniającej się z powierzchniowych warstw wilgoci od różnicy stężeń zależy parametrycznie od wilgotności powietrza otoczenia φ oraz od grubości Δ warstwy przypowierzchniowej.

Współczynnik k wyznaczmy na podstawie całki (4.4) równania (4.3)

$$k = \frac{m\Delta}{\tau A} \frac{c_0 - \bar{c}}{c_0 - c_\infty} \left[\frac{g}{\text{godz. cm}} \right]$$

We wzorze tym m (1260 g) – jest masą całego układu tej wilgoci, szkieletu i gazu zawartego w próbce ceglanej, Δ - (1 ÷ 2 cm) średnią grubością warstwy przypowierzchniowej, A - (6 x 12 cm²) powierzchnią wysychania, c_0, \bar{c}, c_∞ - stężeniami wilgoci – początkowym, po zakończeniu I etapu wysychania oraz stężeniem wilgoci w wysuszonym murze.

Podstawiając dane z rysunku 5 otrzymano następujące wartości współczynnika k dla różnych stężeń wilgoci w otoczeniu ($\varphi = 35, 60, 85\%$)

$$k_{35} = 0,035, \quad k_{60} = 0,015, \quad k_{85} = 0,008 \quad \left[\frac{g}{\text{godz. cm}} \right]$$

Podane wartości stężeń dotyczą trzech typowych warunków a mianowicie:

- $\varphi = 35\%$ - intensywnego wysychania w lecie,
- $\varphi = 60\%$ - wysychania w okresie jesienno - zimowym,
- $\varphi = 85\%$ - powolnego wysychania, kiedy w atmosferze znajduje się dużo wilgoci.

Występująca w tych rozważaniach grubość warstwy przypowierzchniowej oszacowano na podstawie obserwacji zmian grubości obszaru wyschniętego od 5 ÷ 20 mm w pierwszym okresie wysychania.

Znajomość współczynnika k pozwala wyznaczać czas wysychania przypowierzchniowego murów posiadającą zasadnicze znaczenie dla tempa suszenia ścian po powodzi.

Przykładowo wyznaczmy typowy czas wysychania przypowierzchniowego ściany ceglanej o grubości 40 cm i wilgotności otoczenia $\varphi = 35\%$ (warunki suche – lato)

$$\tau_{35} = \frac{\rho\Delta}{k} \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{c_0 - c}{c_0 - c_\infty} = \frac{1,46 \times 2}{0,035} \cdot \frac{100 \times 100 \times 20}{100 \times 100} \cdot 0,9 = 1490h \sim 62dni$$

Podobne wyliczenia dla wilgotności otoczenia $\varphi = 60\%$ i $\varphi = 85\%$ prowadzą do następujących okresów wysychania przypowierzchniowego

$$\tau_{60} = \frac{1,46 \times 2}{0,015} \cdot \frac{100 \times 100 \times 20}{100 \times 100} \cdot 0,83 = 3230h \sim 134dni$$

$$\tau_{85} = \frac{1,46 \times 2}{0,008} \cdot \frac{100 \times 100 \times 20}{100 \times 100} \cdot 0,9 = 6570h \sim 273dni$$

W przytoczonych wzorach V jest objętością wysychającej ściany, A – powierzchnią wysychania, ρ - gęstością zawilgoconej ściany ceglanej.

Duże znaczenie przy określaniu czasu wysychania powierzchniowego odgrywa wilgotność względna powietrza, która powinna być możliwie niska aby wilgoć ze ściany mogła intensywnie dyfundować do otoczenia. W rzeczywistości warunki podwyższonej wilgotności (oraz dodatkowo opady atmosferyczne) szczególnie w okresie jesienno-zimowym, znacznie różnią się od warunków laboratoryjnych. Tak więc czas wysychania zawilgoconych przegród może się znacznie wydłużyć.

Oszacowany powyżej czas wysychania powierzchniowego takiej ściany w sposób naturalny można uznać raczej za minimalny, ponieważ rzeczywiste warunki klimatyczne nie są tak sprzyjające. Skrócenie czasu wysychania ścian można osiągnąć przez zastosowanie urządzeń, które zapewnią uzyskanie możliwie niskiej wilgotności powietrza w otoczeniu zewnętrznym przegrody przy równoczesnym podwyższeniu temperatury. Nie należy wszakże oczekiwać, że czas ten można skrócić do dwóch miesięcy (60dni) ze względu na złożony i skomplikowany mechanizm wymiany wilgoci między kapilarno-porowatym materiałem przegrody budowlanej, a czynnikiem suszącym. W chwili obecnej w Katedrze Fizyki Materiałów Politechniki Opolskiej opracowywany jest program obliczeń pozwalający symulować pierwszy okres wysychania ściany dla dowolnych zmian wilgotności φ w otoczeniu.

10. Szacowanie dyfuzyjnego okresu suszenia

Podane w tej pracy równania określające poszczególne etapy procesu wysychania ściany po powodzi w warunkach izotermicznych wymagają rozwiązania złożonych zadań brzegowych ustawionych dla poszczególnych etapów wysychania.

Ponadto za wyjątkiem pierwszego i drugiego okresu, w których dominuje wysychanie powierzchniowe i przepływ konwekcyjny w dalszym etapie procesu dominuje dyfuzyjny mechanizm transportu. Fizykalnie są to różne zjawiska.

Jeżeli jednak pominąć pierwszy powierzchniowy etap transportu, to pozostałą część procesu wysychania można w przybliżeniu ująć równaniami dyfuzji. Tak też postąpimy obecnie podając przybliżone formuły pozwalające szacować czas całkowitego wysychania.

W ujęciu takim problem opisany jest równaniem dyfuzji postaci

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (10.1)$$

z warunkami początkowo – brzegowymi

$$c(x, t=0) = c_0 \quad c(x=0, t) = c_b \quad 0 < x < \infty \quad (10.2)$$

gdzie poszukiwana funkcja $c = c_0 - \tilde{c}(x, t)$ jest różnicą między koncentracją wilgoci nasyconego materiału po powodzi, a \tilde{c}_0 jej ubytkiem w wyniku migracji.

Całka tego równania dla półnieskończonej przestrzeni ma postać

$$\frac{c - c_0}{c_b - c_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (10.3)$$

Przyjmując dalej, że końcowa koncentracja wilgoci po wysuszeniu wynosi $c = 0,05 c_0$ czyli że ubytek wilgoci jest równy 95% określamy po obliczeniach wartość bezwymiarowego parametru $a = \frac{h}{\sqrt{Dt}}$

$$\operatorname{erf} \left(\frac{2h}{2\sqrt{Dt}} \right) = 0,99000 \quad \text{czyli} \quad \frac{2h}{2\sqrt{Dt}} = 4,66 \quad (10.4)$$

gdzie $2h$ jest grubością wysychającej ściany, zaś wilgotność otoczenia wynosi 50% ($\varphi = 50\%$).

Z zależności $\frac{h}{\sqrt{Dt}} = 4,66$ można dla znanej grubości ściany wyznaczyć czas

wysychania znając uśredniony współczynnik dyfuzji lub też odwrotnie znając czas wysychania oszacować współczynnik dyfuzji wilgoci.

Z badań eksperymentalnych wynika, iż wysychanie ściany o grubości 2 cegieł (55 cm) przy stosunkowo małej wilgotności otoczenia $\varphi = 50\%$ i $T = 25^\circ\text{C}$ trwało ok. 450 dni.

Z przeliczeń wynika wówczas, że uśredniony współczynnik dyfuzji D należy wyliczyć z równania

$$\frac{h}{\sqrt{Dt}} = 4,66 \rightarrow (4,66)^2 Dt = h^2 \rightarrow D = \frac{h^2}{21,7t} = \frac{(27)^2}{21,7 \times 450} \quad (10.5)$$

$$D = 0,075 \frac{\text{cm}^2}{\text{doba}} \quad \text{dla } \varphi = 50\% \text{ i } T = 25^\circ\text{C}$$

Natomiast współczynnik D przy wysychaniu w temperaturze $T = 18^\circ\text{C}$ i wilgotności otoczenia $\varphi = 75\%$ wynosi $0,058 \text{ cm}^2/\text{doba}$. Znając z kolei wartość współczynnika dyfuzji dla różnych temperatur oraz wilgotności powietrza otoczenia jesteśmy w stanie określić czas wysychania konkretnych ścian.

Literatura

- [1] STRUMIŁŁO CZ.: Podstawy teorii i techniki suszenia. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1975
- [2] PRZESMYCKI Z., STRUMIŁŁO CZ.: Model matematyczny procesu suszenia materiałów kapilarno-porowatych uwzględniający mechanizm ruchu wilgoci. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 4/1983
- [3] HARMATHY T.Z.: Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying. National Research Council of Canada, 1969.