

dr inż. Abdul Rahman Ali*, dr hab. inż. Vadim Nikitin**

* Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

** Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Wyznaczanie współczynników przenoszenia wilgoci w fazie ciekłej w cegle wapienno-piaskowej

Determination of moisture penetration factor in the liquid phase of lime-sand brick

1. Wstęp

Konstrukcje z ceramiki należą do najstarszych i najpopularniejszych konstrukcji budowlanych. Z elementów ceramicznych są wykonywane praktycznie wszystkie rodzaje konstrukcji murowych, tj. ściany zewnętrzne i wewnętrzne, ściany nadziemne, podziemne i ściany konstrukcyjne itp. Niezależnie od typu konstrukcyjnego, ściany murowe spełnić powinny odpowiednie wymagania w zakresie bezpieczeństwa, trwałości, odporności ogniowej, izolacyjności cieplnej i akustycznej. Elementy murowe mogą być ceramiczne, z betonu komórkowego, wapienno-piaskowe i inne. Ważny wpływ na wytrzymałość muru ma wytrzymałość, wilgotność i odkształcalność tych elementów.

Ściany piwnic z uwagi na konieczność posadowienia fundamentów poniżej poziomu zamarzanie wody, znajdują się zwykle poniżej poziomu terenu. Takie usytuowanie tworzy dodatkowe warunki środowiskowe związane z oddziaływaniem wilgoci oraz agresywnych związków chemicznych, jakie mogą być zawarte w gruncie lub mogą się przedostawać do gruntu wraz z opadami atmosferycznymi.

Wymienione okoliczności powodują, że do wykonania murów piwnic powinny być wyjątkowo starannie dobierane materiały. Mate-

1. Introduction

Ceramic building materials are the oldest and the most commonly used in constructions. Ceramic blocks are practically built in all types of wall structures, that is in the external and internal walls, situated on or under ground as well as of the constructional character. Irrespectively of the type of construction, the walls should meet the safety, durability, fire resistance, heat and acoustic insulation requirements. The wall blocks are usually produced from ceramics, cellular concrete, lime-sand or other materials. The strength of the wall is strongly affected by the strength of particular blocks, moisture content and deformability.

The walls in the cellars, because of the necessity of carrying out the foundation works below the water freezing temperature, are usually situated on some depth from the ground level. In such a way these walls are exposed on the attack of water and aggressive compounds present in the ground or infiltrating to the ground with rainfalls.

For this reason it is obvious that the cellar walls must be built of thoroughly selected materials. The materials for this purpose should exhibit particularly high freeze-thaw resistance and durability. The lime-sand brick meets successfully these requirements. Ac-

riały do tego celu powinny posiadać w szczególności: dużą odporność na zamarzanie oraz wysoką trwałość. Warunki te z powodzeniem spełniają wyroby wapienno-piaskowe. Zgodnie z regulacjami określonymi w PN-B-03002: 1999, dotyczącymi doboru materiałów budowlanych z uwagi na trwałość, wyroby te mogą być stosowane we wszystkich klasach środowiska różniących się warunkami oddziaływania otoczenia, z wyjątkiem środowiska wody morskiej i środowiska agresywnego chemicznie. W szczególności z elementów wapienno-piaskowych mogą być wykonywane mury w środowisku klasy 3, w którym mogą występować wilgoć przy równoczesnym zamrażaniu.

Mury piwnic z elementów wapienno piaskowych podobnie jak i mury z innych materiałów powinny być należycie zabezpieczone przed przenikaniem wody.

Jedną z głównych przyczyn powodujących obniżenie izolacyjności termicznej i trwałości przegród budowlanych jest zawilgocenie materiałów, z których zostały wykonane.

Dla opisu niestacjonarnych współzależnych procesów przepływu ciepła i wilgoci w kapilarno-porowatych materiałach budowlanych potrzebne są następujące dane: współczynnik wyrównywania wilgotności D_w , współczynnik wchłaniania wody A , współczynnik wnikania wody B oraz rozkład objętości porów w funkcji ich promieni.

Informacje o tych parametrach mogą być wykorzystane przy wyjaśnieniu przyczyny zawilgocenia konstrukcji, badania procesu wnikania środków konserwujących i hydrofobowych do materiałów porowatych oraz do prognozowania mrozoodporności (2) i trwałości (1).

Współczynnik wyrównywania wilgotności wyznacza się doświadczalnie, wykorzystując różne metody, których niedoskonałości powodują, że uzyskane dane obarczone są błędami. Na przykład w metodzie Brylinga (4) długość próbki prostopadłościennej powinna być większa niż wysokość podciągania kapilarnego wody, której wartość dla badanego materiału może różnić się nawet kilkakrotnie, w zależności od struktury porowatości. Według danych z pracy (3) wysokość podciągania kapilarnego w ceramice budowlanej przekracza 50 cm, co przekracza wielkość wyrobów ceramicznych stosowanych w budownictwie, uniemożliwiając przeprowadzenie badania. Ponadto w metodzie Brylinga konieczny jest podział próbki na kilka jednakowych krążków, wyciętych prostopadle do jej wysokości, co powoduje zakłócenia rzeczywistego rozkładu wilgoci. Powstają komplikacje przy różniczkowaniu krzywej doświadczalnej zmian wilgotności wzdłuż wysokości próbki.

Także do wyznaczenia współczynnika wyrównywania wilgotności Gaffner (5) zaleca wykorzystanie próbki w kształcie belki opartej na dwóch podporach, z których jedną umieszcza się na wadze. W chwili początkowej eksperymentu końce próbki powinny mieć różną wilgotność. Od wielkości różnicy zależy dokładność wyznaczenia wartości liczbowej współczynnika wyrównywania wilgotności. Nie podano jednak konkretnych wskazań dotyczących wartości wilgotności końców próbki.

W pracy (7) współczynnik wchłaniania wody A oraz współczynnik wnikania wody B wyznaczono na podstawie podciągania kapilarnego wody. Pomiar obydwu współczynników prowadzone były równocześnie, przy czym: – pomiar współczynnika A sprowadza się do rejestracji zmieniającej się masy próbki po pewnym czasie, – pomiar współczynnika B polega na wyznaczeniu zmieniającej się wysokości strefy zawilgocenia wzdłuż długości próbki. Obserwacja przemieszczającego się frontu jest związana z dużymi błędami, dlatego że woda przemieszcza się w sposób nierównomierny. Główną charakterystyką liczbową struktury materiałów kapi-

lujących do PN-B-03002: 1999 standard rules, relating to the selection of building materials as the durability is concerned, the lime-sand brick may be used in all the classes of the environment, except sea water and chemically aggressive ones. The lime-sand brick is particularly recommended for the walls being in contact with the class 3 environment, where the moisture is accompanied by freezing and thawing. The walls in cellars, similarly as the walls produced from other materials, should be fairly well protected against the infiltration of water.

The moisturizing of materials is the one of the main reasons resulting in the decrease of insulation properties and durability of walls.

For the description of non-stationary, mutually relating heat and moisture transfer in building materials with capillary pores, the following parameters are needed: the moisture equilibration factor D_w , water absorption factor A , water penetration factor B and pore distribution, as the function of their radius.

The information concerning these parameters is used when the reason of moisturizing is discussed and further on, when the process of preservatives or hydrophobic agents infiltration is investigated. The freeze-thaw resistance (2) and durability of porous materials (1) can be also predicted in this way.

The moisture equilibration factor is determined experimentally using different methods, which are not good enough and show some errors. For example, in Bryling's method (4) the length of the rectangular prismatic sample should be larger than the height of capillary rise of water, which is variable, depending upon the pore structure. According to another author, (3) the height of capillary rise of water in ceramics exceeds 50 cm; that is more than the dimensions of many ceramic elements used in buildings and thus the tests become impossible. What is more inconvenient in Bryling's method: a partition of the sample into some equal discs, cut perpendicularly to its height is needed. This brings about the disturbance of real moisture distribution. The integration of moisture distribution experimental curve against the sample height becomes thus difficult.

In order to find the moisture equilibration factor Gaffner (5) recommends to use a sample in the form of the bar put on two supports; one of them is placed on the balance. At the beginning, the ends of the bar should reveal different moisture contents. The accuracy of moisture equilibration factor determination depends upon the difference between moisture content in the end parts of the sample. However, the details dealing with moisture content in these ends are not given.

In another report (7) the water absorption factor A and water penetration factor B were determined basing on the capillary rise of water. The measurements of these two factors were carried out simultaneously, in such a way that the factor A was simply registered as the sample mass change after time, while the factor B was evaluated as the change of moisturizing level in the function of sample length. The observation of moving water line is charged with a substantial error, because water transfer is not uniform. The structure of materials with capillary pores is mainly characterized by pore size distribution. For this purpose special equipment is necessary.

In this work the calculation method leading to the determination of the following parameters: moisture equilibration factor, water absorption factor, water penetration factor and pore size distribution. This calculation is based upon the rates of uniaxially capillary rise of water. In the experiments the variable mass of the sample was measured as a function of time. The lime-sand brick was used.

larno-porowatych jest rozkład objętości porów w funkcji ich promieni. Doświadczalne określenie rozkładu rozmiarów porów wymaga zastosowania kosztownej aparatury.

W pracy przedstawiono obliczeniową metodę wyznaczenia współczynników: wyrównywania wilgotności, wchłaniania wody, wnika- nia wody oraz rozkładu objętości porów w funkcji ich promieni, na podstawie danych o szybkość jednokierunkowego podciągania kapilarnego. Przeprowadzone doświadczenie objęty wykonanie pomiarów zmiennej w czasie masy próbki materiału. Jako próbkę wykorzystano cegłę wapienno piaskową z przedstawionej publi- kacji.

2. Opis doświadczeń

Przeprowadzone doświadczenie dotyczyły współczynników: wchła- niania wody A i wnika- nia wody B zdefiniowanych w normie PN- EN ISO 9346 (12).

W trakcie doświadczeń próbki były tak przedstawione aby dolną powierzchnią stykały się z lustrem wody. Ściana górna i ściany boczne próbek były izolowane. Na rysunku 1 przedstawiono sche- mat zestawu pomiarowego.

Pomiar współczynnika wchłaniania wody sprowadza się do reje- stracji zmieniającej się masy próbki w wyniku kapilarnego podcią- gania wody. Próbkę stanowiło 1/2 cegły silikatowej o wymiarach 5,8 x 6,5 x 25 cm wysuszoną do stałej masy w temperaturze $T = 105^{\circ}\text{C} \pm 110^{\circ}\text{C}$. Bezpośrednio po ochłodzeniu wszystkie powierzch- nie prostopadłościennej próbki z wyjątkiem dolnej podstawy, po- kryto preparatem uniemożliwiających wymianę wilgoci z otoczeniem w celu zabezpieczenia przed niekontrolowanym wysychaniem w trakcie prowadzenia pomiarów.

Po wyznaczeniu masy początkowej próbki wstawiono je do ku- wety z wodą (rysunek 1). W trakcie doświadczenia utrzymywano stałe zanurzenie próbki wynoszące $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Utrzymywano również niezmienną wilgotność względną i temperaturę w komo- rze klimatycznej ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 60\%$).

Umieszczenie próbki w kuwecie stanowiło rozpoczęcie pomia- rów. W ustalonych odstępach czasu próbki wyciągano z wody, ważono na wadze z dokładnością do 0,1 g i umieszczono z po- wrotem na stanowisku pomiarowym.

Pomiar prowadzono początkowo co godzinę, później co kilka go- dzin, a następnie w odstępach kilkunastu godzin. Pomiaru prowa- dzono do czasu, po którym masa próbki nie uległa zmianie, a więc materiał jest w stanie maksymalnego nasycenia wodą.

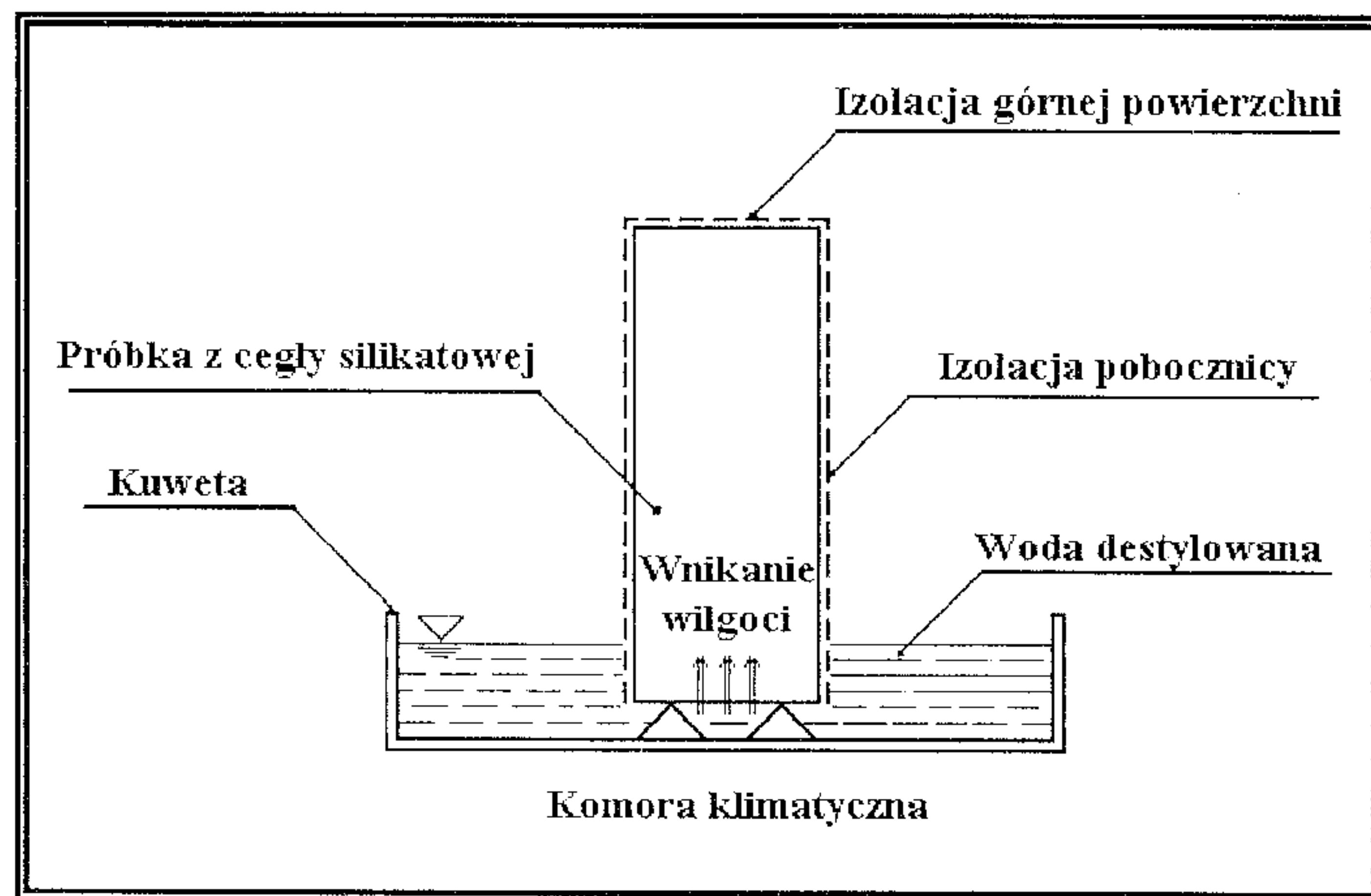
Na rysunku 2 pokazano wyniki pomiarów oraz obliczeń na posta- wie opisu matematycznego zmian masy próbki w czasie.

3. Opis matematyczny

Niestacjonarny, jednokierunkowy ruch wilgoci opisany jest rów- naniem dyfuzji [4, 5]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad [1]$$

w którym: $u = u(x,t)$ oznacza masową zawartość wilgoci na jed- nostkę masy materiału, zależną od współrzędnej x i czasu t , a D_w to współczynnik wyrównywania wilgotności.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego.

Fig. 1. Scheme of test stand.

2. Experimental

The water absorption factor A and water penetration factor B were defined according to the standard PN-EN ISO 9346 (12).

The samples were placed in such a way that they touched the surface of water with their bottom part. The upper and side walls were insulated. In Figure 1 the scheme of experiment stand is shown.

The measurement of water absorption factor consists in registra- tion of sample mass change, resulting from water rise through capillaries. 1/2 of silicate brick, dried to the constant mass at tem- perature $T = 105^{\circ}\text{C} \pm 110^{\circ}\text{C}$ served as a sample. Directly after co- oling, all the surfaces of the brick, apart from the bottom one, were covered with a substance insulating the sample against the mois- ture transfer to the surrounding space (uncontrolled drying).

At first the initial value of sample mass was measured and then the samples were placed in a vessel filled with water (Fig. 1). The samples were immersed in water at constant depth of $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. The relative humidity and temperature in a curing chamber were also kept constant ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 60\%$).

The measurements started from sample immersing in water. The samples were subsequently put out and weighted with accuracy 0.1 g after the assumed, constant periods of time and put back to the vessel.

At the early stage the measurements were carried out every 1 hour, later on every few hours and finally every more hours until the constant mass was attained, that meant the full saturation with water.

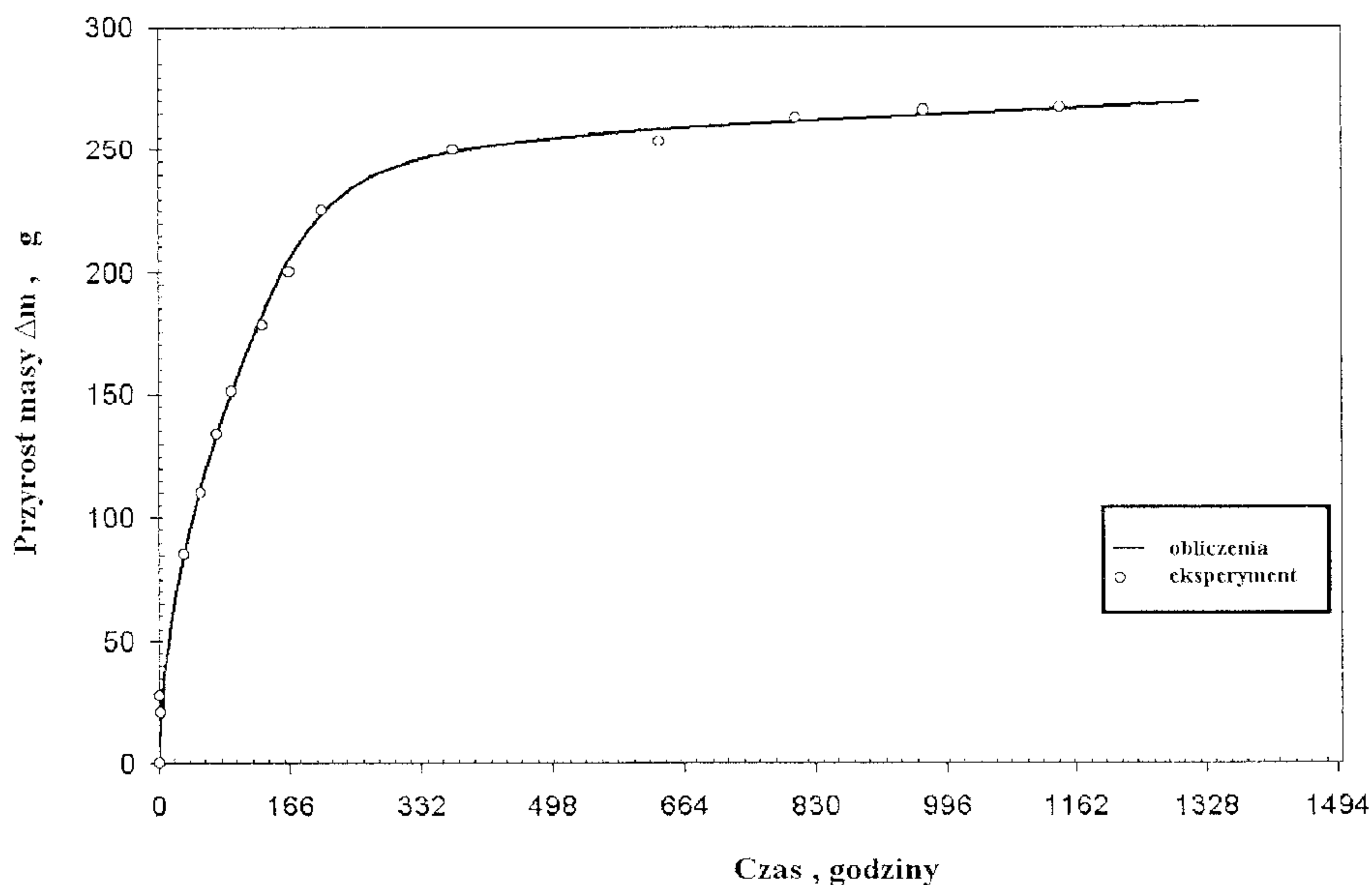
In Figure 2 the results of measurements and calculations are shown.

3. Mathematical description

Non-stationary uniaxial transfer of moisture is given by diffusion equation [4, 5]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad [1]$$

where: $u = u(x,t)$ means the moisture content in mass unit of ma- terial, dependent on x coordinate and time t ; D_w is the moisture



Rys. 2. Przebieg przyrostu masy próbki w czasie.

Fig. 2. The mass increase with time.

Aby rozwiązać równanie [1] należy przyjąć odpowiednie warunki początkowe oraz warunki brzegowe na powierzchniach próbki. Warunek początkowy oznacza, że próbka o wysokości L w chwili początkowej (przy $t = 0$) jest sucha

$$u(x,0) = 0, \quad 0 < x \leq L, t = 0. \quad [2]$$

Na górnej, zaizolowanej powierzchni próbki nie przepływa wilgoć, a więc wektor gęstości strumienia wilgoci jest równy 0.

$$-D_W \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad x = L \text{ i } t \geq 0. \quad [3]$$

gdzie: $w = \rho_m \cdot u$ to masowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości materiału o gęstości pozornej ρ_m .

Na dolnej powierzchni próbki materiał znajduje się w stanie maksymalnego nasycenia wodą (stopień nasycenia $S = 1$)

$$u(x,t) = u_{\max}, \quad x = L \text{ i } t \geq 0 \quad [4]$$

gdzie: u_{\max} to masowa zawartość wody w stanie maksymalnego nasycenia materiału na jednostkę masy materiału. Jej wartość można określić jako nasiąkliwość lub obliczając iloraz maksymalnego przyrostu masy do początkowej masy próbki. Jeśli funkcja $u(x,t)$ jest znana, to zmianę masy próbki w czasie można określić na podstawie równania

$$m(t) - m_0 = \rho_m \cdot S \int_0^L u(x,t) dx, \quad [5]$$

gdzie: m_0 – masa początkowa próbki w czasie $t = 0$; ρ_m – gęstość pozorna materiału, S – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki.

Sformułowane zagadnienie polega na wyznaczeniu nieznannej funkcji D_w na podstawie wzorów [1-5].

Przy znanej funkcji D_w można określić różniczkową funkcję rozkładu objętości porów po promieniu r_v na podstawie zależności ustalonej pracy [6]

$$D_w = \frac{\sigma \cdot \psi \cdot \cos\theta}{\rho_w \cdot v \cdot \xi(\psi) \cdot S_V^2(r_u) \cdot f_v(r_u) \cdot r_u^2}. \quad [6]$$

equilibration factor.

In order to solve the equation [1] one should assume some initial conditions as well as some boundary conditions relating to the sample surfaces. The initial condition means that the sample of height L is dry at

$$u(x,0) = 0, \quad 0 < x \leq L, t = 0.$$

[2]

On the upper insulated surface there is no moisture transport, so the vector of density of moisture flux is equal to 0.

$$-D_W \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad x = L \text{ and } t \geq 0. \quad [3]$$

where: $w = \rho_m \cdot u$ is the mass moisture content per volume unit of material of apparent density equal to ρ_m .

On the bottom surface of the sample material is fully saturated with water (saturation degree $S = 1$)

$$u(x,t) = u_{\max}, \quad x = L \text{ i } t \geq 0 \quad [4]$$

where: u_{\max} is the mass water content per volume unit of material. This value can be determined as absorbability or calculated as a maximum mass increase and initial sample mass ratio. When the function $u(x,t)$ is known, the change of sample mass within time can be calculated from the following equation

$$m(t) - m_0 = \rho_m \cdot S \int_0^L u(x,t) dx, \quad [5]$$

where: m_0 – initial mass of sample at $t = 0$; ρ_m – apparent density of material, S – the cross sectional area of sample.

The unknown function D_w should be found basing on formulas [1-5].

Having the function D_w one can find the differential function of pore size distribution vs. pore radius r_v , taking into account the relationship given in [6]

$$D_w = \frac{\sigma \cdot \psi \cdot \cos\theta}{\rho_w \cdot v \cdot \xi(\psi) \cdot S_V^2(r_u) \cdot f_v(r_u) \cdot r_u^2}. \quad [6]$$

where: δ – surfacial tension on the liquid phase - gaseous phase interface, Ψ – the volume content of moisture per volume of material; θ – wetting angle; ρ_w – density of water; ν – kinematic viscosity of moisture; x – shape factor of capillary, S_v – surface area of capillaries per volume unit of material (contact with material matrix); f_v – differential function of pore size distribution vs. pore radius, r_u – maximum radius of capillary pores where the menisci occur at moisture content u . The Ψ , ρ_u , S_v and ξ values are determined using the following formulas:

$$\psi = \frac{\rho_m}{\rho_w} u, \quad [7]$$

$$\psi = \int_0^{r_u} f_v(r) dr, \quad [8]$$

$$S_V(r_u) = 2 \int_0^r \frac{f_v(r)}{r} dr, \quad [9]$$

gdzie: δ – napięcie powierzchniowe między fazą ciekłą i gazową, Ψ – objętościowa zawartość wilgoci na jednostkę objętości materiału; θ – kąt zetknięcia się (zwilżenia) fazy stałej i ciekłej; ρ_w – gęstość wody; n – lepkość kinematyczna wilgoci; x – współczynnik kształtu kapilary, S_v – pole powierzchni kapilar w jednostce objętości materiału (pole kontaktu ze szkieletem materiału); f_v – różniczkowa funkcja rozkładu objętości porów po promieniu, r_u – maksymalny promień kapilar, w których są meniski przy zawartości wilgoci u . Wartości Ψ , ρ_w , S_v i ξ określamy wykorzystując wzory:

$$\psi = \frac{\rho_m}{\rho_w} u, \quad [7]$$

$$\psi = \int_0^{r_u} f_v(r) dr, \quad [8]$$

$$S_v(r_u) = 2 \int_0^{r_u} \frac{f_v(r)}{r} dr, \quad [9]$$

$$\xi(\psi) = \psi \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin(2\psi - 1)}{3} \right] \right\}^{-2}, \quad [10]$$

Ze wzorów [6-10] wynika, że wartość współczynnika D_w , który przy danej zawartości wilgoci u zależy tylko od wartości funkcji f_v w przedziale promienia od 0 do r_u i odwrotnie, wartość funkcji f_v przy danym promieniu r_u zależy tylko od wartości współczynnika D_w w przedziale zawartości wilgoci od 0 do u .

4. Wyniki analizy obliczeniowej

Proces podciągania kapilarnego wody w próbce cegły wapienno-piaskowej poddano analizie obliczeniowej według przedstawionego opisu matematycznego [1-10], zrealizowanego w programie komputerowym BPUT opracowanym przez autorów pracy (3). W programie od początku zadawano funkcję D_w . Pierwszą postać funkcji określono na podstawie danych literaturowych oraz własnych doświadczeń. Przy znanej funkcji D_w rozwiązywano równanie [1] z warunkami [2-4] i określono funkcję $u(x,t)$. Znalezione rozwiązanie $u(x,t)$ całkowano zgodnie z równaniem [5] i wyznaczono zmianę masy próbki w czasie $\Delta m = m(t) - m_0$. Uzyskaną krzywą $\Delta m(t)$ porównywano z danymi doświadczalnymi i jeżeli wyniki tego porównania nie były zbieżne zmieniano wartość funkcji D_w i ponownie wykonano obliczenia. Procedurę powtarzano do momentu, w którym wyniki uzyskane w sposób doświadczalny i obliczeniowy były zbliżone. Ostatecznie uzyskane wyniki pokazano na rysunkach 2-4.

Rysunek 3 przedstawia zmiany wartości współczynnika wyrównywania wilgoci D_w , w zależności od stopnia zawilgocenia próbki. Postać tej zależności ma wygląd jak w metodzie Brylinga.

Na rysunku 4 przedstawiona została wilgotność masowa w zależności od współrzędnej (x) zmienia się ($0 \div L$)

$$\xi(\psi) = \psi \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin(2\psi - 1)}{3} \right] \right\}^{-2}, \quad [10]$$

As it results from formulas [6-10], the D_w factor value at given moisture content u is affected only by the function f_v value in the range between 0 and r_u and inversely, the function f_v value at a given r_u radius depends only on the factor D_w value in the range of moisture content from 0 to u .

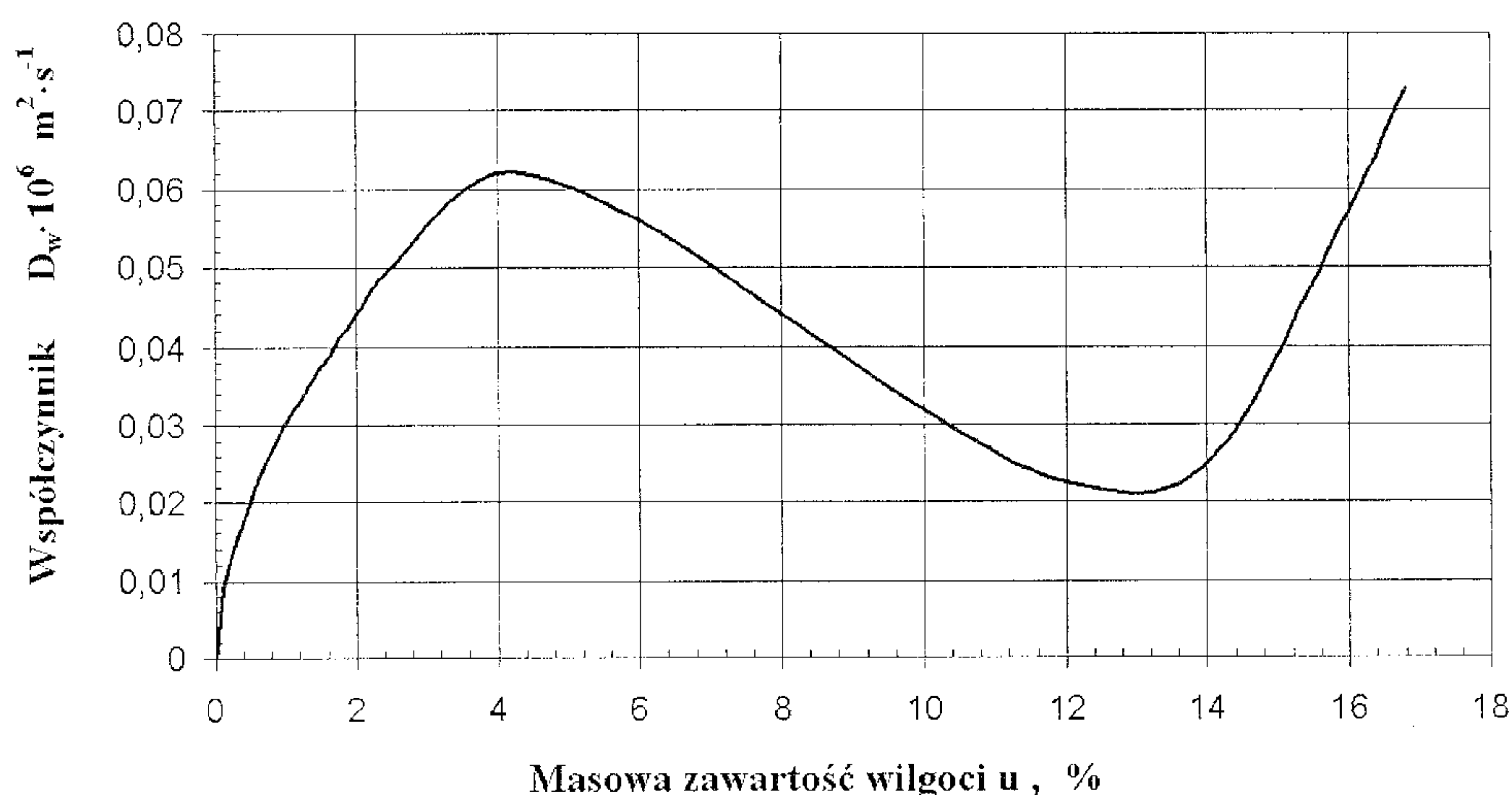
4. Results

The capillary rise of water process in the lime-sand brick sample was analyzed following the formulas presented above [1-10], using the author's computer program BPUT (3). The function D_w was introduced as the first step. The primary form of this function was determined basing on the data reported earlier and author's experience. At a given function D_w the equation [1] was resolved taking into account the conditions [2-4] and subsequently the function $u(x,t)$ was determined. The resolution for $u(x,t)$ thus found was integrated according to the equation [5] and the change of sample mass with time was determined as $\Delta m = m(t) - m_0$. The $\Delta m(t)$ curve thus produced was compared to the experimental data and when the results were not consistent, the value of D_w function was changed and the calculations were repeated. This procedure was repeated until the interference of experimental results with calculation was attained. The final results are shown in Figures 2-4.

In Figure 3 the moisture equilibration factor D_w , vs. moisture content in the sample is presented. This relationship is identical as in Bryling's method.

In Figure 4 the mass of moisture as a function of (x) coordinate, variable with ($0 \div L$) and time (t) is shown. This is in accordance with the other results, for example (8).

In the BPUT program the algorithm of reproduction for the function basing on the given values of factor value was assumed. The radius of capillary was changed from 0, with constant step; for every i -value the value of function was calculated, using the Newton method for solution of the following equation:



Rys. 3. Zależność wartości współczynnika wyrównywania wilgotności w próbce.

Fig. 3. The moisture equilibration factor values.

oraz czasu (t). Prawidłowość ta pozostaje w zgodzie z wynikami innych badań, np. (8).

W programie BPUT opracowano algorytm odnowienia (odtworzenia) funkcji f_v na podstawie zadanych wartości współczynnika D_w . Zmieniano promień kapilary r_u materiału począwszy od 0 ze stałym krokiem Δr i na każdym i-tym kroku obliczono wartości funkcji f_{vi} , rozwiązując za pomocą metody Newtona równanie:

$$D_W^a(u_i(f_{vi})) - D_W^b(f_{vi}) = 0 \quad [11]$$

gdzie: D_W^a jest wynikiem rozwiązania zagadnienia [1-5],

D_W^b jest wynikiem rozwiązania równań [6-10].

Rysunek 5 prezentuje różniczkową funkcję rozkładu objętości porów po promieniu f_v obliczoną za pomocą tego algorytmu. Charakter uzyskanego rozkładu jest zgodny z danymi zamieszczonymi w pracy (11).

Do scharakteryzowania procesu podciągania kapilarnego wody wykorzystuje się zazwyczaj współczynnik wchłaniania wody A. Wyznaczono go ze wzoru w postaci:

$$A = \frac{\Delta m}{S\sqrt{t}} \quad [12]$$

Generalnie stwierdza się występowanie, w pierwszym okresie trwania procesu liniowego związku między masą wchłaniania wody i pierwiastkiem czasu trwania procesu (13÷15).

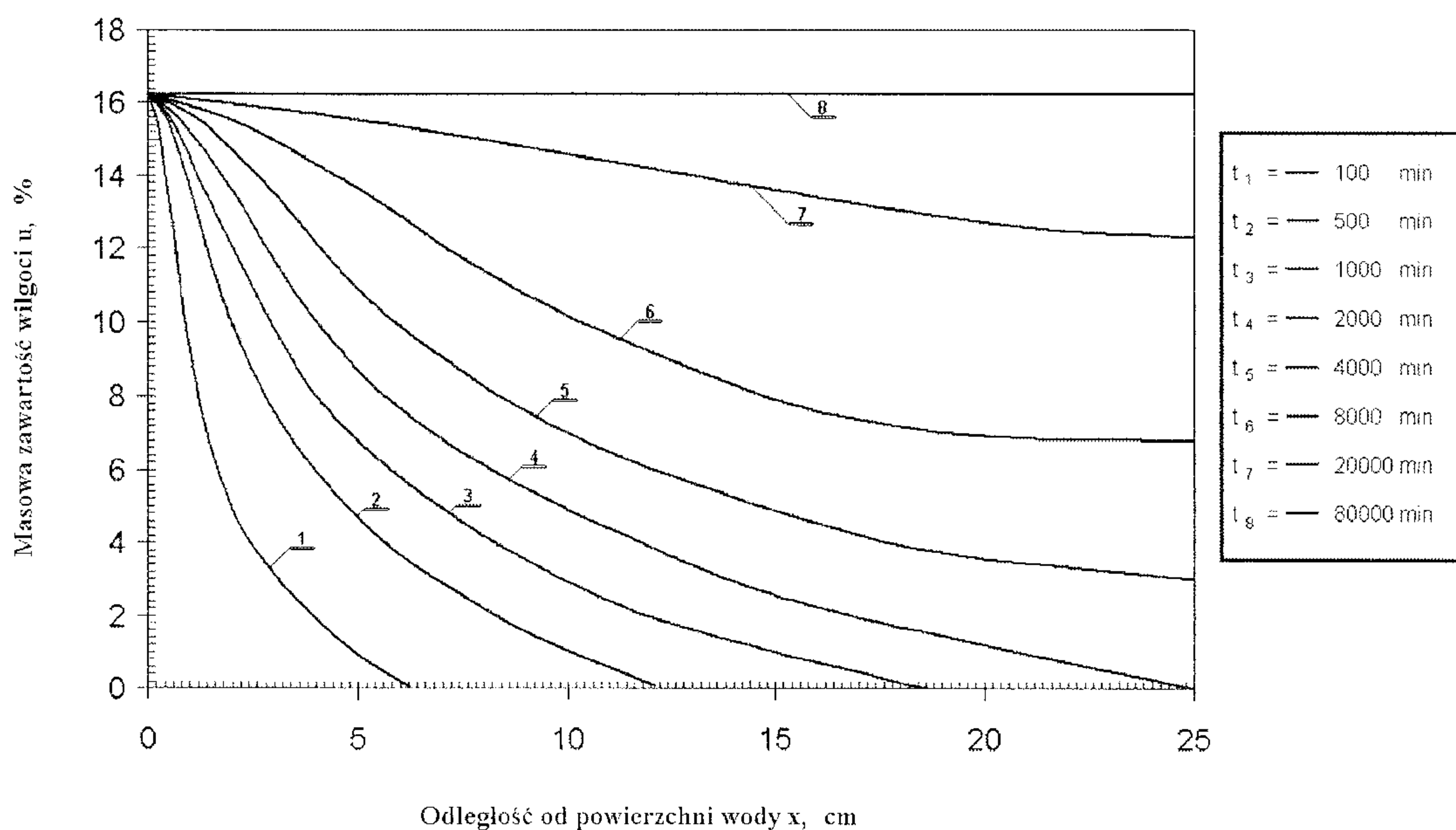
Wartość współczynnika A oblicza się na podstawie danych przedstawionych na rysunku 2.

Współczynnik wnikania wody B wyznaczono stosując wzór w postaci:

$$B = \frac{x}{\sqrt{t}}, \quad [13]$$

gdzie: x – oznacza poziom frontu wody w chwili t.

Wartość poziomu frontu wody w chwili (t) określono z warunku $u(x,t) = 0$ dla $t \geq 0$ lub na podstawie danych z rysunku 4, np. dla $t_1 = 100$ min $u(x,t) = 0$ przy $x = 7,1$ cm; dla $t_2 = 500$ min $u(x,t) = 0$ przy $x = 13,2$ cm itd.



Rys. 4. Zmiany wilgotności próbki na jej wysokościach w zależności od czasu.

Fig. 4. The moisture changes as a function of sample height and time.

$$D_W^a(u_i(f_{vi})) - D_W^b(f_{vi}) = 0 \quad [11]$$

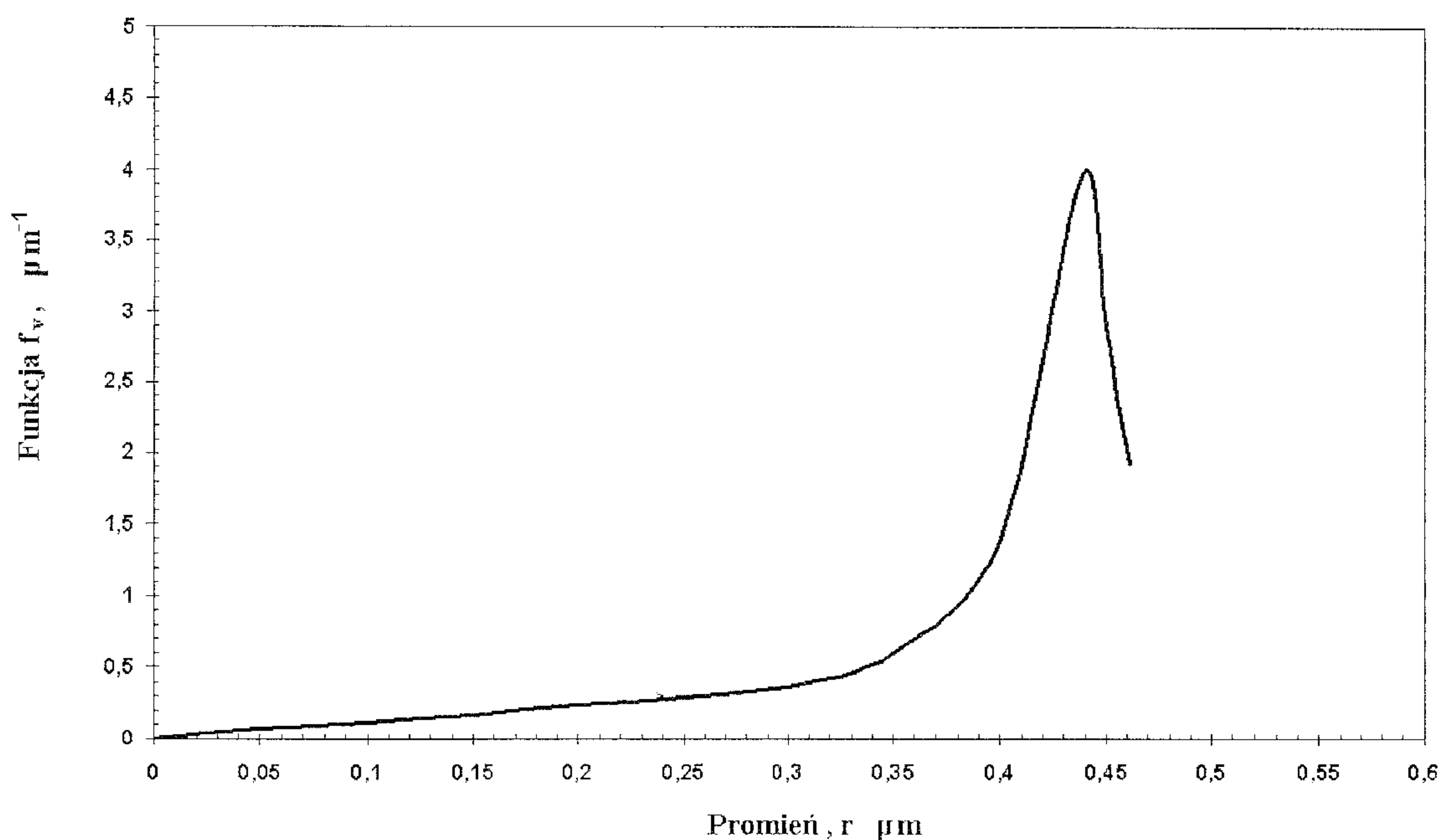
where: D_W^a is the result of the solution of the equations [1-5],

D_W^b relates to the equations [6-10] respectively.

In Figure 5 the differential pore size distribution vs. f_v calculated following this algorithm is presented. The form of distribution thus produced is coherent with the data reported in (11).

The water absorption factor is usually applied to characterize the capillary rise. It was determined using the following formula:

$$A = \frac{\Delta m}{S\sqrt{t}} \quad [12]$$



Rys. 5. Rozkład objętości por w funkcji promienia.

Fig. 5. Pore size distribution.

Otrzymano następujące wartości:

$$A = 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{h}}, \quad \text{ i } \quad B = 0,03873 \frac{\text{m}}{\sqrt{h}}$$

zbliżone wartości podają Mukhopadhyaya i inni (16). Znalezione wartości są bardzo blisko wyników dotyczących zaprawy cementowej (7). Współczynnik A zmienia się od 1,0 do 2,5, natomiast współczynnik B zmienia się od 0,0075 do 0,013.

Wyroby wapienno-piaskowe mają większe wartości współczynników A oraz B i w związku z tym wykazują mniejszą mrozoodporność oraz trwałość, ze względu na wyższy stopień wilgotności oraz szybką przemianę wilgoci w zmiennych warunkach atmosferycznych.

5. Zakończenie

W artykule wykazano, że metodę doświadczalno-obliczeniową można wykorzystać w badaniach materiałów kapilarno-porowatych prowadzących do oceny współczynnika wyrównywania wilgotności, współczynników wnikania i wchłaniania wody oraz rozkładu wielkości porów w materiale. Pomiar nie wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury, a wykorzystując tylko jedną próbkę, np. wyjętą ze ściany obiektu cegłę pełną, można uzyskać dostateczną liczbę danych doświadczalnych. Możliwe jest również kilkakrotne badanie próbki, na przykład po wielokrotnym oddziaływaniu wilgoci lub ujemnych temperatur, oraz możliwa jest obserwacja wpływu czynników na wartość współczynników opisujących ruch wilgoci oraz porowatość materiału, co w efekcie pozwala ocenić trwałość różnych materiałów budowlanych.

Literatura / References

1. J. Bochen, Ocena trwałości mineralnych tynków elewacyjnych na podstawie zmiany ich porowatości w warunkach przyspieszonego starzenia. Materiały Konferencyjne IX Konferencji Naukowo-Technicznej "Fizyka budowlanej w teorii i praktyce", Łódź, 2003, s. 67-71.
2. M. Zgadło, Z. Piasta, Prognozowanie mrozoodporności ceramicznych materiałów budowlanych na podstawie ich właściwości kapilarnych, Inżynieria i Budownictwo 2/1989, s. 56-57.
3. M. Wesołowska, Wpływ krętości kapilar na proces wnikania wody w materiale ceramicznym, Materiały Konferencyjne IX Konferencji Naukowo-Technicznej "Fizyka Budowlanej w teorii i praktyce" Część 2; Łódź, 2003, s. 705-711.
4. K. F. Fokin, Stroitel'naja tepłotiehnika ogradzajuszczich czastiej zdaniij, Strojizdat, Moskwa, 1973.
5. J. Wyrwał, J. Świrski, Problemy zawilgocenia przegród budowlanych, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, IPPT, Warszawa, 1998.
6. A. V. Afonin, V. I. Nikitin, Wyznaczenie koefficientow perenosa židkoi vlagi v kapilarno-poristykh stroitel'nykh materialach, Vestnik Brestkogo GTU "Stroitel'stvo i architektura", 1 (13), Brześć, 2002, s. 10-15.
7. H. Garbalińska, Badania współczynników podciągania kapilarnego zapraw cementowych, Materiały konferencyjne VIII konferencji Naukowo-Technicznej, "Fizyka Budowlanej w Teorii i Praktyce", Łódź, 2001, s. 89-97.
8. W. Płoński, Problem wilgoci w przegrodach budowlanych, Wydawnictwo Arkady, ITB Warszawa, 1968.
9. H. Garbalińska, Izotermiczne współczynniki transportu wilgoci porowatego materiału budowlanego, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2002.
10. A. Afonin, V. Nikitin, D. Szabanov, Ocenka parametrov vlagoprovodnosti stroitel'nykh materialov dla teplotehniczeskikh rasczotov, Vestnik BGTU "Vodohoziajstvienneje stroitel'stvo, teploenergetika, ekologija, 2 (20), Brześć, 2003, s. 98-100.

The linear relationship between the mass of absorbed water and the time square root was generally found at the first stage of the process (13÷15). The factor A value is calculated from the data presented in Figure 2.

The water penetration factor B was determined using the following formula:

$$B = \frac{x}{\sqrt{t}}, \quad [13]$$

where: x – the level of water surface at time t.

The value of water surface position at time (t) was determined taking the condition $u(x,t) = 0$ for $t \geq 0$ or using the data from Figure 4, for example for $t_1 = 100$ min $u(x,t) = 0$ at 7.1 cm; for $t_2 = 500$ min $u(x,t) = 0$ at x - 13.2 cm.

The following values were produced:

$$A = 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{h}}, \quad \text{ and } \quad B = 0,03873 \frac{\text{m}}{\sqrt{h}}$$

the similar values are reported by Mukhopadhyaya and co-workers (16). These values are nearly the same as for cement mortar (7). Factor A changes from 1,0 to 2,5, while B value is between 0,0075 and 0,013 respectively.

The lime-sand brick materials exhibit higher A and B factors values and therefore they show lower freeze-thaw resistance as well as durability, because of higher moisture content and quick moisture transfer in variable atmospheric conditions.

5. Summary

The experimental-calculation methods can be applied in the studies of porous materials for determination of the moisture equilibration factor, water absorption factor, water penetration factor and pore size distribution.

For this, the special equipment is not necessary; by use of the only one sample, for example pull out from the wall, one can produce a sufficient number of experimental data. The sample can be tested many times, for example after repeated exposure of humid environment, or low temperature. It is possible to investigate the effect of different conditions on the values of moisture transport determining factors or porosity. This can give the evaluation of durability of many building materials.

11. E. Brylska, J. Hejmo, Powstanie i właściwości "czarnego rdzenia" w ceramicznych materiałach budowlanych, Polski Biuletyn Ceramiczny, 80; Kraków (2003), s. 599-604.
12. PN-EN ISO 9346 Izolacja cieplna - Wymiana masy - Wielkości fizyczne i definicje.
13. M. Bomberg, Water flow through porous materials: Part I: Methods of water transport measurements, Part II: Relative suction model, Part III: Application of the relative suction model. Lund 1971-1972 (Rapport/Institutionen for byggnadsteknik, Tekniska hogskolan Lund No. 19 -21).
14. M. Leśniewska, J. A. Pogorzelski, Badania ruchu kapilarnego wody w niektórych materiałach budowlanych, Archiwum Inżynierii Lądowej, 22, Tom XXII, z. 2/1976, s. 333-343.
15. G. Hedenblad, Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste. Division of Building Materials Lund Institute of Technology, Lund 1993.
16. P. Mukhopadhyaya, K. Kumaran, N. Normandin, P. Goudreau, Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials, Journal of Thermal Envelope and Building Science, v. 26, no. 2, Oct. 2002, pp. 179-195.