

Kumulacja oraz transfer ciepła i wilgoci w betonie komórkowym na przykładzie dwóch różnych materiałów pochodzenia przemysłowego

Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes

1. Wprowadzenie

Projektowanie betonu komórkowego jako materiału do izolacji budynków opiera się, jak dotychczas, na zasadach wynikających z praktyki. Efekty są zróżnicowane i zdarzają się niepowodzenia wynikające z przyjęcia niewłaściwych założeń, czy błędów konstrukcyjnych. Typowym przykładem uchybień są spękania na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach ścian, odszczepienie tynku od powierzchni bloczków betonowych, niekiedy z fragmentem betonu, spękania w pobliżu okien i drzwi, zniszczenia mrozone tynku zewnętrznego.

Doświadczenie wykazało, że przyczyna defektów wywodzi się często z przyjęcia, przy projektowaniu i kształtowaniu bloczków z betonu komórkowego, metod właściwych dla cegły budowlanej. Jednakże przesłanki wynikające z technologii cegły budowlanej, doskonalszej z powodzeniem na przestrzeni wieków, powinny być stosowane wyłącznie do tego typu materiałów. Właściwości betonu komórkowego różnią się od właściwości cegły w sposób na tyle istotny, że dalece idące analogie są tu nie na miejscu.

Obowiązujące obecnie normy nie na wiele zdają się pomagać projektantom w zapobieganiu potencjalnym zniszczeniom. Analiza zawilgocenia materiału w świetle norm czeskich czy europejskich ogranicza się do określenia transferu pary wodnej w warunkach ustalonego przepływu. To oznacza ryzyko, że takie czynniki, jak podciąganie wody, transport pary wodnej przez konwekcję, zależność pomiędzy transportem wilgoci i ciepła nie będą brane pod uwagę, co może prowadzić często do przeszacowania ilości wody w otulinie izolacyjnej lub do pojawienia się strefy kondensacji pary wodnej w innym miejscu niż to można przewidzieć na podstawie standardowych obliczeń. Ruch wilgoci i ciepła jest ujęty w normach jedynie cząstkowo i od projektanta nie wymaga się oszacowania odpowiedzi termo- czy higromechanicznej ze strony warstwy zewnętrznej budynku.

Należy w tym miejscu podkreślić, że nawet dla rzetelnego i odpowiedzialnego projektanta zgromadzenie dostatecznej liczby danych w celu precyzyjnej analizy zachowania betonu komórko-

1. Introduction

The design of autoclaved aerated concrete (AAC) building envelopes has mostly been done by empirical rules for construction, until now. As a result, approaches to design have differed case by case and failures have resulted as a result of incorrect specifications and errors in construction. Typical failure examples were cracking of both external and internal finishes, detachment of renders from the AAC blocks, sometimes with the AAC itself, cracks around windows or doors, frost failure of external render.

Experience has shown that reasons of defects were often due to the use of methods for brick structures being employed by the designers for AAC blockwork. However, the brick-based technologies which were proven by their successful applications over centuries should not be applied to anything else than just brick structures. The properties of AAC differ from those of bricks to such a degree that any analogy between systems based on AAC and on bricks has always to be doubtful.

The current standards cannot help much the designers in preventing failure. Moisture analysis in both Czech and European codes is restricted to water vapor transport in steady-state conditions. This presents a risk for a designer as water suction, water vapor convection, and the cross effects between heat and moisture transport are not considered and this can often lead to the underestimation of the amount of liquid water in the envelope or the condensation zone can appear in another place than predicted by the standard calculation. Hygric and thermal movements are also considered in standards only partially and the designer is not required to evaluate the thermo- and hygro-mechanical response of the envelope.

It should be noted in this respect that even for a very active and responsible designer it would be quite difficult to gather enough data for a more precise analysis of hygrothermal and mechanical performance of AAC-based building envelope systems, nowadays. The catalogue lists of AAC producers are mostly confined to water vapor transport parameters and heat transport parameters, both given in the form of a single value. This is far from satisfactory.

wego pod względem cieplnym i wilgotnościowym byłby obecnie nietrywialnym zadaniem. Producenci betonu komórkowego podają w katalogach produktów dane ograniczone do parametrów opisujących transport pary wodnej i ciepła w postaci pojedynczej wartości, co jest dalece niewystarczające. Jednakże pełny zestaw danych charakteryzujących właściwości cieplne i wilgotnościowe dla większości popularnych wyrobów z betonu komórkowego nie jest osiągalny, nawet gdy materiały te były poddawane dodatkowym badaniom; dane te nie są na ogół dostępne w postaci dogodnej do bezpośredniego wykorzystania jako parametry wejściowe w programach komputerowych. Prawdopodobnie najczęściej badanym zagadnieniem odnoszącym się do omawianych właściwości betonu komórkowego jest przewodność cieplna (1, 2) w powiązaniu z właściwościami mechanicznymi (1, 3-5). Z drugiej strony niezwykle mała jest liczba publikacji poświęconych parametrom wilgotnościowym, gazoprzepuszczalności, transportowi ciepła. Prace Wagnera i wsp. (6) dotyczące gazoprzepuszczalności, Gottfredsena i wsp. (7) dotyczące ekspansji wilgotnościowej, Janza (8), Gouala i wsp. (9) oraz Ioannou i wsp. (10) na temat sorpcyjności czy Tady i Watanabe (11) oraz Gouala i wsp. podające izotermy sorpcji, stanowią tu wyjątek.

W niniejszej pracy zaprezentowane zostaną parametry opisujące transport i magazynowanie ciepła na przykładzie dwóch betonów komórkowych pochodzących od różnych producentów i często stosowanych w budownictwie w Czechach. Głównym celem badań było otrzymanie dostatecznie precyzyjnych danych wejściowych do programu komputerowego modelującego transport wilgoci i ciepła w ścianach zbudowanych z betonu komórkowego; program ten ma na celu ocenę potencjalnych uszkodzeń.

2. Metody doświadczalne

2.1. Podstawowe właściwości fizyczne

Podstawową charakterystykę właściwości materiału przeprowadzono w oparciu o metodę próżniowego nasączenia wodą i porozymetrię rtęciową.

Metodą nasączenia próżniowego (12) mierzono gęstość objętościową, gęstość rzeczywistą i porowatość otwartą. Każdą próbkę suszono w suszarce w celu usunięcia wody związanej fizycznie. Tak wysuszone próbki umieszczano w eksykatorze wypełnionym odpowietrzoną wodą. Ewakuacja powietrza z eksykatora za pomocą pompy próżniowej trwała 3 godziny. Następnie próbki przechowywano pod wodą przynajmniej przez 24 godziny.

Na podstawie masy próbki wysuszonej m_d , masy próbki nasyconej wodą m_w i masy próbki zanurzonej w wodzie m_a , obliczano objętość próbek V z równania:

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_l} \quad (1)$$

gdzie ρ_l jest gęstością wody.

However, complete sets of hygric and thermal properties are not available for very common types of AAC even as results of research studies, at least not in the form that they could be directly used as input parameters of computer codes. Thermal conductivity is probably the most frequently studied AAC-related topic (1, 2), together with the mechanical properties (1, 3-5). On the other hand, the number of publications on hygric parameters, gas permeability and hygric and thermal movements is extremely low. The papers by Wagner et al. (6) on gas permeability, Gottfredsen et al. (7) on hygric expansion, Janz (8), Goual et al. (9) and Ioannou et al. (10) on water sorptivity and Tada and Watanabe (11) and Goual et al. (9) for sorption isotherms belong to the very few exceptions in that respect.

In this paper, moisture and heat transport and storage parameters of two commercial AACs offered by different producers on the Czech market and frequently used in building practice as construction materials are determined. The main aim of this experimental work is to obtain sufficiently accurate input data for the computational models of coupled moisture and heat transport which can be used for damage assessment of AAC-based building envelopes.

2. Experimental methods

2.1. Basic physical properties

The basic characterization of the studied material was done using the vacuum water saturation method and mercury intrusion porosimetry.

In the vacuum water saturation method (12), bulk density, matrix density and open porosity were measured. Each sample was dried in a drier to remove majority of the physically bound water. After that the samples were placed into a desiccator with deaired water. During three hours air was evacuated with vacuum pump from the desiccator. The specimen was then kept under water not less than 24 hours.

From the mass of the dry sample m_d , the mass of water saturated sample m_w and the mass of the immersed water saturated sample m_a , the volume V of the sample was determined from the equation

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_l} \quad (1)$$

where ρ_l is the density of water.

The open porosity ψ_0 , the bulk density ρ and the matrix density ρ_{mat} were calculated according to the equations

$$\psi_0 = \frac{m_w - m_d}{V\rho_l} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_d}{V} \quad (3)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{(1 - \psi_0)V} \quad (4)$$

Porowatość otwartą ψ_0 , gęstość objętościową ρ i gęstość rzeczywistą ρ_{mat} obliczano w oparciu o równania:

$$\psi_0 = \frac{m_w - m_d}{V\rho_l} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_d}{V} \quad (3)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{(1-\psi_0)V} \quad (4)$$

Strukturę porów scharakteryzowano w oparciu o badania porozymetryczne, za pomocą porozymetru Pascal 140 i 440 (Thermo Scientific).

2.2. Właściwości termiczne

Właściwościami termicznymi badanymi w pracy było przewodność cieplna i ciepło właściwe materiałów. Przewodność cieplną wyznaczano za pomocą przyrządu Isomet 2104 (Applied Precision, Ltd.). Urządzenie to wyposażone jest w różnego typu czujniki, w kształcie igły – dla materiałów porowatych, w postaci włókna – dla materiałów miękkich, płaskie – dla materiałów twardych. Pomiar opiera się na analizie odpowiedzi termicznej materiału na impuls cieplny. Ciepło dostarczane jest za pomocą rezystora przylegającego do powierzchni próbki. Pomiar w temperaturze pokojowej wykonano dla różnych zawartości wilgoci u (w stosunku do masy próbki):

$$u = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (5)$$

gdzie m_w jest to masa próbki wilgotnej, a m_d – masa próbki suchej. Określano również przewodność cieplną próbek wysuszonych w funkcji temperatury, w zakresie od 2 do 40°C.

Ciepło właściwe próbek wysuszonych mierzono również za pomocą przyrządu Isomet 2104. Pojemność cieplną w odniesieniu do objętości próbek wilgotnych $\rho_{wet}c_{wet}$ [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] obliczano zakładając liniowy charakter zależności w mieszaninie, oraz że ciepło właściwe jako parametr określający zdolność do akumulowania ciepła w procesie jego przenoszenia jest wielkością addytywną w taki sposób, że

$$\rho_{wet}c_{wet} = \rho_{dry}c_{dry} + \rho_w c_w W \quad (6)$$

$$\rho_{wet} = \rho_{dry} + \rho_w W \quad (7)$$

gdzie ρ_{wet} jest gęstością objętościową materiału wilgotnego, ρ_{dry} jest gęstością objętościową materiału suchego, ρ_w jest gęstością wody [$kg \cdot m^{-3}$], a w – zawartością wilgoci w jednostce objętości [$m^3 \cdot m^{-3}$],

$$w = \frac{V_w}{V} \quad (8)$$

V_w jest objętością wody w porach, V jest objętością całej próbki, c_{wet} , c_{dry} i c_w – są to ciepła właściwe odpowiednio: materiału wilgotnego, materiału suchego i wody, [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Tak więc zależność pomiędzy ciepłem właściwym i zawartością wilgoci można zapisać w następującej postaci:

Characterization of the pore structure was performed by mercury intrusion porosimetry. The experiments were carried out using the instruments Pascal 140 and 440 (Thermo Scientific).

2.2. Thermal properties

The thermal conductivity and specific heat capacity were the thermal properties determined for the studied materials. The thermal conductivity was measured in laboratory conditions using the commercial device Isomet 2104 (Applied Precision, Ltd.). Isomet 2104 is equipped with various types of optional probes, needle probes are for porous, fibrous or soft materials, and surface probes are suitable for hard materials. The measurement is based on the analysis of the temperature response of the analyzed material to heat flow impulses. The heat flow is induced by electrical heating using a resistor heater having a direct thermal contact with the surface of the sample. The measurements at room temperature were done in dependence on moisture content by mass, u ,

$$u = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (5)$$

where m_w is the mass of wet specimen and m_d the mass of the dry specimen. Thermal conductivity of dry specimens was also measured as a function of temperature from 2 to 40°C.

The specific heat capacity of dry specimens was determined by Isomet 2104 as well. The volumetric heat capacity of wet specimens $\rho_{wet}c_{wet}$ [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] was calculated using the linear theory of mixtures, under assumption that the specific heat capacity as the storage parameter of heat transfer is an additive quantity,

$$\rho_{wet}c_{wet} = \rho_{dry}c_{dry} + \rho_w c_w W \quad (6)$$

$$\rho_{wet} = \rho_{dry} + \rho_w W \quad (7)$$

where ρ_{wet} is the bulk density of the wet material, ρ_{dry} the bulk density of the dry material, ρ_w the density of water [$kg \cdot m^{-3}$], w the moisture content by volume [$m^3 \cdot m^{-3}$],

$$w = \frac{V_w}{V} \quad (8)$$

V_w is the volume of water in the pores, V is the volume of the whole specimen, c_{wet} , c_{dry} and c_w are the specific heat capacities of the wet material, the dry material and water, respectively, [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

So, the specific heat capacity vs. moisture content function could be written as

$$c_{wet}(W) = \frac{\rho_{dry}c_{dry} + \rho_w c_w W}{\rho_{dry} + \rho_w W} \quad (9)$$

The relation between the moisture content by mass u and moisture content by volume w reads

$$u = w \frac{\rho_w}{\rho_{dry}} \quad (10)$$

Therefore, equation (9) can be expressed in terms of the moisture content by mass as

$$c_{wet}(u) = \frac{c_{dry} + c_w u}{1 + u} \quad (11)$$

$$c_{wet}(W) = \frac{\rho_{dry} C_{dry} + \rho_w C_w W}{\rho_{dry} + \rho_w W} \quad (9)$$

Zależność pomiędzy zawartością wilgoci w przeliczeniu na jednostkę masy u i zawartością wilgoci w przeliczeniu na jednostkę objętości w wynosi:

$$u = w \frac{\rho_w}{\rho_{dry}} \quad (10)$$

A zatem równanie (9) może być przekształcone, z uwzględnieniem zawartością wilgoci w przeliczeniu na jednostkę masy, do następującej postaci:

$$c_{wet}(u) = \frac{C_{dry} + C_w u}{1 + u} \quad (11)$$

2.3. Właściwości wilgotnościowe

Do określenia parametrów przenikania pary wodnej zastosowano metodę miseczkową (wagową) (12) w suchych i wilgotnych warunkach pomiaru. W metodzie suchej próbkę w zamkniętym pojemniku zawierającym żel krzemionkowy umieszcza się w komorze klimatycznej w atmosferze o wilgotności względnej 50% i waży w ustalonych odstępach czasu. Natomiast w metodzie mokrej - próbkę przechowuje się w komorze klimatycznej, w atmosferze o wilgotności względnej 50% w zamkniętym pojemniku nad powierzchnią wody. Pomiar prowadzony w temperaturze 25°C trwa 2 tygodnie. Wartość stałej masy, czy to przy wzroście czy ubytku, ustala się na podstawie przynajmniej 5 odczytów metodą regresji. Wyniki służą do scharakteryzowania materiału pod względem przepuszczalności pary wodnej.

Przepuszczalność pary wodnej δ [s] obliczano podstawiając dane doświadczalne do równania:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p} \quad (12)$$

gdzie Δm jest to ilość pary wodnej przenikającej przez próbkę, d – grubość próbki, S – pole powierzchni próbki, τ – czas odpowiadający przeniknięciu masy pary wodnej Δm powiązany z różnicą ciśnienia cząstkowego pary wodnej Δp_p w powietrzu pod i nad powierzchnią próbki.

Współczynnik dyfuzji pary wodnej D [m²·s⁻¹] obliczano wykorzystując zmierzoną przepuszczalność pary wodnej i podany niżej związek:

$$D = \delta \frac{RT}{M} \quad (13)$$

Na podstawie współczynnika dyfuzji D , określano wartość czynnika oporu dyfuzji μ (liczba niemianowana) jako

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad (14)$$

gdzie D_a jest współczynnikiem dyfuzji pary wodnej w powietrzu.

Współczynnik (stałą) dyfuzji wilgoci mierzono stosując dwie różne metody. Najpierw określano wartość efektywnego współczynnika dyfuzji w eksperymencie polegającym na absorpcji wody. Następ-

2.3. Hydric properties

The wet cup method and dry cup method were employed in the measurements of water vapor transport parameters (12). In the dry cup method the sealed cup containing silica gel was placed in a controlled climatic chamber with 50% relative humidity and weighed periodically. For wet cup method sealed cup containing water was placed in an environment with 50% relative humidity. The measurements were done at 25°C in a period of two weeks. The steady state values of mass gain or mass loss determined by linear regression for the last five readings were used for the determination of water vapor transport properties.

The water vapor diffusion permeability δ [s] was calculated from the measured data according to the equation

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p} \quad (12)$$

where Δm is amount of water vapor diffused through the sample, d the sample thickness, S the specimen surface, τ the period of time corresponding to the transport of mass of water vapor Δm and Δp_p the difference between partial water vapor pressure in the air under and above specific specimen surface.

The water vapor diffusion coefficient D [m²·s⁻¹] was calculated using the measured water vapor diffusion permeability by the following relation

$$D = \delta \frac{RT}{M} \quad (13)$$

On the basis of the diffusion coefficient D , the water vapor diffusion resistance factor μ [dimensionless] was determined,

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad (14)$$

where D_a is the diffusion coefficient of water vapor in the air.

The moisture diffusivity was measured using two different methods. At first, the apparent value of moisture diffusivity was determined using a water absorption experiment. Then, the dependence of moisture diffusivity on moisture content was calculated using an inverse analysis of moisture profiles.

The water sorptivity was measured using a standard experimental setup (13). The specimen was water and vapor-proof insulated on four lateral sides and the face side was immersed 1–2 mm in the water, constant water level in tank was achieved by a Mariotte bottle with two capillary tubes. One of them, inside diameter 2 mm, was ducked under the water level, second one, inside diameter 5 mm, was above water level. The automatic balance allowed recording the increase of mass. The water absorption coefficient A [kg·m⁻²·s^{-1/2}] was then calculated using the formula

$$i = A \cdot \sqrt{t} \quad (15)$$

where i [kg/m²] is the cumulative water absorption, t is the time from the beginning of the suction experiment. The water absorption coefficient was then used for the calculation of the apparent moisture diffusivity in the form (14)

nie obliczano zależność pomiędzy współczynnikiem dyfuzji, a zawartością wilgoci analizując profile zawartości wilgoci.

Sorpcyjność wody w materiałach określano za pomocą standardowego zestawu pomiarowego (13). Próbkę zabezpieczano przed dostępem wody do ścian bocznych, a jedna ze ścian czołowych zanurzano w wodzie na głębokość 1–2 mm. Stały poziom wody w naczyniu utrzymywano za pomocą butli Mariotte'a z dwiema rurkami kapilarnymi. Jedna z nich, o średnicy wewnętrznej 2 mm, była zanurzona pod powierzchnią wody, natomiast druga, o średnicy wewnętrznej 5 mm, znajdowała się ponad powierzchnią wody. Waga automatyczna umożliwiała zmierzenie i zapisanie zmiany masy. Współczynnik absorpcji wody A [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$] obliczano stosując wzór

$$i = A \cdot \sqrt{t} \quad (15)$$

gdzie i [kg/m^2] oznacza zakumulowaną ilość wody, to znaczy ilość wody zaabsorbowaną przez jednostkę powierzchni w czasie t od zapoczątkowania eksperymentu. Współczynnikiem absorpcji posłużono się następnie w obliczeniach efektywnego współczynnika dyfuzji według (14):

$$K_{app} \approx \left(\frac{A}{\rho_w (w_c - w_0)} \right)^2 \quad (16)$$

gdzie w_c [m^3m^{-3}] oznacza ilość wody zaabsorbowaną w wyniku nasączenia w próżni, a w_0 [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$] – początkową zawartość wilgoci.

Zależną od wilgotności stałą dyfuzji określano na podstawie analizy zmierzonych profili wilgotności. Profile te uzyskano za pomocą przyrządu do pomiarów pojemności elektrycznej (15). W urządzeniu tym zasilany niskim napięciem oscylator o częstotliwości 400 kHz daje prąd stały zasilający obwód, w którym znajduje się kondensator pomiarowy (z próbką analizowaną jako dielektrykiem), połączony szeregowo z opornikiem. Mierzy się spadek napięcia na oporniku; jego wartość zależy w znacznym stopniu od zawartości wilgoci w dielektryku. Związek pomiędzy zawartością wilgoci i napięciem ustala się metodą kalibracji. Napięcie wzrasta z pojemnością, a poprzez odpowiedni dobór opornika możliwe jest uzyskanie zależności liniowej pomiędzy zmierzonym napięciem i pojemnością (która jest w przybliżeniu większa o 1 – 2 rzędy wielkości). Wskazania woltomierza są zapisywane w zadanych interwałach czasowych w pamięci urządzenia. Wilgotnościomierz pojemnościowy jest wyposażony w elektrody w kształcie płytek o wymiarach 20 x 40 mm.

W zestawie doświadczalnym próbkę umieszczano w pozycji horyzontalnej w celu wyeliminowania wpływu siły ciężkości na przeniesienie wilgoci. Ściany boczne próbki izolowano przed wnikaniem wody i pary wodnej tak, aby zasymulować transport wody tylko w jednym kierunku. Dobry kontakt powierzchni wyeksponowanej na działanie wody w komorze Perspex umożliwiła gąbka wiskozowa, która zasysała wodę z poziomu położonego 10 mm poniżej dolnej powierzchni próbki. Stały poziom wody w komorze pomiarowej utrzymywano za pomocą pływaka. Gdy poziom wody obniżał się z uwagi na podciąganie przez próbkę, poziom wody w komorze zmieniał się w taki sam sposób. Wtedy igła pływaka otwiera-

$$K_{app} \approx \left(\frac{A}{\rho_w (w_c - w_0)} \right)^2 \quad (16)$$

where w_c [m^3m^{-3}] is the vacuum saturated moisture content and w_0 [m^3m^{-3}] the initial moisture content.

Moisture dependent moisture diffusivity was determined by an inverse analysis of measured moisture profiles. The capacitance device designed in (15) was used for the measurements of moisture profiles. The low-voltage supply drives an oscillator of 400 kHz working frequency which has constant output voltage feeding a circuit where the measuring capacitor (with the analyzed sample as a dielectric) is connected in series with a resistance. On this resistance, the voltage after rectifying is determined which depends on the moisture content of the dielectric in a significant way. A relation between moisture content and voltage measured on the resistance can be determined by a calibration. The measured voltage increases with increasing capacity. By a proper choice of the resistance it is possible to achieve that the dependence of the measured voltage on the capacity is linear in the range of approximately one or two orders of magnitude of the capacity. Voltage is recorded in specified time intervals by data logger. The capacitance moisture meter is equipped with electrodes in the form of parallel plates with the dimensions of 20 x 40 mm.

In the experimental setup a specimen was fixed in horizontal position in order to eliminate the effect of gravity on moisture transport. The lateral sides of the specimen were water and vapor-proof insulated in order to simulate 1-D water transport. A viscous sponge arranging for a good contact of the specimen surface with water was put into a Perspex water-filling chamber and applied to one face side of the specimen. The sponge sucked water from a free surface being about 10 mm below the lower side of the specimen. Water in the chamber was maintained on constant level using a float. If water level in the filling chamber decreased due to water suction by the specimen, water level in the float chamber decreased in the same way. The needle of the float opened the hole in the cover of the float chamber and water from a burette flowed through the hole into the float chamber until the needle closed the hole again due to water level increase. In this way, a continuous water supply to the measured specimen was achieved.

In the determination of moisture profiles, scanning by the capacitance moisture meter along the specimen was done in 5 mm steps, so that certain space averaging was done (the width of the probe was 20 mm). The time intervals were chosen to cover the moisture penetration process by a sufficient number of curves. Calibration curve of the capacitance moisture meter is for a particular material usually determined in advance using the gravimetric method. In this case, we have chosen another method. The calibration was done after the last moisture meter scan when the moisture penetration front was at about one half of the length of the specimen, using this last scan and the results of the standard gravimetric method measurements after cutting the specimen into 10 mm wide pieces. The calibration curve was constructed as the dependence of the

ła otwór w pokrywie komory pływaka i przez ten otwór do komory przedostawała się z biurety woda wyrównując poziom wody, co powodowało zamknięcie dopływu wody wskutek podniesienia igły. W taki sposób osiągnano stały dopływ wody do próbki.

Przy określaniu profili zmian wilgotności skanowano próbki za pomocą wilgotnościomierza pojemnościowego co 5 mm, dokonując przy tym przestrzennego uśrednienia (szerokość sondy wynosiła 20 mm). Interwał czasowy dobierano tak, aby objąć proces penetracji próbki dostateczną liczbą krzywych pomiarowych. Krzywa kalibracyjna wilgotnościomierza pojemnościowego jest określana dla danego materiału zanim zastosuje się metodę grawimetryczną. W tym przypadku obrano jednak inną procedurę. Kalibrację przeprowadzano po ostatnim pomiarze wykonanym za pomocą wilgotnościomierza, w chwili gdy czoło penetracji znajdowało się w połowie długości próbki, biorąc pod uwagę ten ostatni wynik oraz wyniki standardowej metody grawimetrycznej, po podzieleniu próbki na fragmenty o szerokości 10 mm. Krzywe kalibracyjne konstruowano jako wykres zależności zawartości wilgoci w funkcji wskazań wilgotnościomierza w oparciu o dane dla 3 próbek. Wykresy próbek wynosiły 20x40x300 mm.

W celu obliczenia stałej dyfuzji w oparciu o profile wilgotnościowe wybrano metodę Matano (16). Metoda ta polega na zastosowaniu transformacji Boltzmana, co można przyjąć w przypadku dostatecznie krótkich interwałów czasowych, gdy wpływ warunków panujących w strefie suchego końca próbki nie jest znaczący. Korzyść z przyjęcia takiego podejścia polega na tym, że dokonuje się konwersji równania różniczkowego cząstkowego, stosowanego w ogólnym przypadku przy opisywaniu transportu wilgoci, do postaci równania różniczkowego zwyczajnego (17). Jeżeli rozkład zawartości wilgoci $u(x)$ w czasie $t = t_0$ jest znany, to jest możliwe określenie dyfuzyjności $\kappa(u)$ na podstawie równania

$$\kappa(u_x) = \frac{1}{2t_0 \left(\frac{du}{dx} \right)_{x_0}} \int_{x_0}^{\infty} x \frac{du}{dx} dx \quad (17)$$

gdzie u jest zawartością wilgoci na jednostkę masy, u_x jest zawartością wilgoci w położeniu $x = x_0$.

Pomiary izoterm adsorpcji przeprowadzono po umieszczeniu próbek w komorze klimatycznej, w której symulowano określone warunki wilgotnościowe, odpowiadające 20%, 40%, 60%, 80%, 97% wilgotności względnej; eksperymenty prowadzono w temperaturze 25°C. Próbki przetrzymywano przez czas potrzebny do osiągnięcia stałej masy. Następnie obliczano zawartość wilgoci i wykreślano izotermę adsorpcji.

3. Materiały i przygotowanie próbek

Badano 2 rodzaje betonu komórkowego: AAC P2-350 λ produkcji Xella CZ, Ltd. oraz P2-400, produkcji H+H Czech Republic, Ltd. Pierwszy z nich jest przeznaczony na ściany działowe i nośne, przegrody ogniotwale i wykładziny wewnętrzne (18). Drugi – na wewnętrzne i zewnętrzne ściany działowe i nośne (19).

moisture content on the moisture meter reading using the data for 3 samples. The dimension of the specimens was 20 x 40 x 300 mm.

For calculation of moisture diffusivity from measured moisture profiles, the transient Matano method (16) was chosen. The method consists in application of Boltzmann transformation, which can be used in sufficiently short time intervals, when the boundary condition on the dry end of the specimen is not yet effective. The advantage of the Boltzmann transformation lies in conversion of a solution of partial differential equation generally applied for description of moisture transport, to a solution of an ordinary differential equation (17). If the moisture distribution $u(x)$ in time $t = t_0$ is known, it is possible to find the moisture diffusivity $\kappa(u)$ according to the relation

$$\kappa(u_x) = \frac{1}{2t_0 \left(\frac{du}{dx} \right)_{x_0}} \int_{x_0}^{\infty} x \frac{du}{dx} dx \quad (17)$$

where u is the moisture content by mass, u_x is the value of moisture content at the position $x = x_0$.

In the adsorption isotherms measurement, the samples were placed into a climatic chamber to simulate specific values of relative humidity (20%, 40%, 60%, 80%, 97%). The experiment was performed at 25°C. The mass of samples was measured in specified periods of time until steady state values of mass were achieved. Then, the moisture content was calculated and adsorption isotherm of each tested material was plotted.

3. Materials and samples

Two different autoclaved aerated concretes were studied. The first AAC P2-350 λ was produced by Xella CZ, Ltd., and the second one, P2-400, by H+H Czech Republic, Ltd. The supposed application of P2-350 λ is for non-bearing- and load-bearing walls, fireproof walls and retention walls and linings in the interior (18). P2-400 should be used as load-bearing and non-bearing external and internal walls (19).

The measurement of material parameters was done in a conditioned laboratory at the temperature of 25±1°C and 25-30% relative humidity. The following specimens were used in the experiments: basic physical properties – 6 specimens 50 x 50 x 50 mm, water vapor transport properties – 2 x 3 cylindrical specimens with diameter of 100 mm and height of 20 mm, adsorption isotherms – 3 specimens 40 x 40 x 10 mm, water absorption coefficient – 2 x 3 specimens 50 x 50 x 50 mm, moisture diffusivity as a function of moisture content – 3 specimens 20 x 40 x 300 mm, thermal properties – 3 specimens 70 x 70 x 70 mm. In order to test the homogeneity of analyzed materials, the water vapor transport properties and water absorption coefficient were measured for two sets of specimens which were cut from the original AAC blocks in two directions; A was along the block (within the plane of the wall) and B across the block (across the wall).

Pomiary prowadzono w klimatyzowanym laboratorium, w temperaturze of $25\pm 1^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej 25–30%. Przygotowano kilka zestawów próbek: do oceny podstawowych właściwości fizycznych – 6 próbek 50x50x50 mm, do badań przenikania pary wodnej – po 3 cylindryczne próbki o średnicy 100 mm i wysokości 20 mm, izotermy adsorpcji opracowywano dla 3 próbek 40x40x40 mm, współczynnik absorpcji wody oznaczano dla każdego materiału na 3 próbkach 50x50x50 mm, stałą dyfuzji w funkcji zawartości wilgoci oznaczano dla 3 próbek 20x40x300 mm, właściwości termiczne dla 3 próbek 70x70x70 mm. W celu określenia wpływu ewentualnego odstępstwa od jednorodności materiału do badań przenikania pary wodnej i współczynnika absorpcji wody przygotowano po 2 serie próbek, które wycięto z oryginalnych bloczków betonowych w dwóch kierunkach; A wzdłuż ściany bloczka (w płaszczyźnie ściany) i B w poprzek bloczka (w poprzek ściany).

4. Wyniki i dyskusja

Podstawowe właściwości fizyczne badanych betonów komórkowych są bardzo podobne (tablica 1, rys. 1); porowatość otwarta P2-350 λ jest jedynie nieco wyższa niż porowatość P2-400, a rozkłady wielkości porów ujawniają takie same piki odpowiadające zwiększonym udziałom porów o średnicy 20 nm i 200 nm. Dane te pozostają w zgodności z małym ciężarem objętościowym wyrobów i świadczą o podobieństwie technologii.

Przewodność cieplna obydwu materiałów (tablica 2) wzrasta z temperaturą w całym badanym zakresie temperatur 2–40 °C. Wartości przewodności materiału P2-400 są większe niż dla P2-350 λ , a różnice wzrastają z temperaturą (stosunek λ_{40}/λ_2 wynosi 1,18 dla P2-400 i jedynie 1,077 dla P2-350 λ). Wyniki te są zgodne z wynikami oznaczeń gęstości.

Wpływ zawartości wilgoci na przewodność betonów komórkowych (rys. 2) jest o wiele większy niż wpływ temperatury. Przewodność obydwu materiałów w stanie nasycenia wodą jest w przybliżeniu 4 razy większa niż w stanie suchym. Funkcja $\lambda(u)$ wykazuje charakter liniowy a przewodność P2-400 jest w całym badanym zakresie większa niż przewodność P2-350 λ .

Ciepło właściwe P2-350 λ w stanie suchym wynosi 1160 J/kg·K, podobną wartość – 1210 J/kg·K uzyskano dla P2-400. Korzystając z równania (11), można wyrazić funkcję $c(u)$ jako

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE

BASIC PHYSICAL PARAMETERS

Materiał / Material	Zawartość wilgoci w stanie nasycenia wodą w próżni Vacuum saturation moisture content [kg m ⁻³]	Gęstość Matrix density [kg m ⁻³]	Porowatość otwarta Open porosity [% m ³ m ⁻³]	Gęstość objętościowa Bulk density [kg m ⁻³]
P2 – 350 λ	818	2048	81.9	363
P2 – 400	805	2140	80.7	407

4. Experimental results and discussion

Basic physical parameters of analyzed AAC were very similar (Table 1, Fig. 1); the open porosity of P2-350 λ was only slightly higher than P2-400 and the pore size distribution exhibited the same two main peaks at 20 nm and 200 nm. This corresponded with their low differences in bulk density and reflected the apparent similarities in production technology.

The thermal conductivity of both materials (Table 2) increased with temperature in whole the studied temperature range of 2–40 °C. The thermal conductivity values of P2-400 were higher than for P2-350 λ ; the differences increased with increasing temperature (the ratio λ_{40}/λ_2 was 1.18 for P2-400 and only 1.077 for P2-350 λ). This was in accordance with the bulk densities of both materials.

The effect of moisture content on thermal conductivity of studied AAC (Fig. 2) was far more important than the effect of temperature. The thermal conductivity of both materials in capillary water saturated state was approximately four times higher than in the dry state. Both $\lambda(u)$ functions were approximately linear and the thermal conductivity of P2-400 was in the whole moisture range higher than P2-350 λ .

The specific heat capacity of P2-350 λ in dry state was 1160 J/kg·K, for P2-400 a similar value was obtained, 1210 J/kg·K. According to Eq. (11), the $c(u)$ functions could be expressed as

$$c_{P2-350}(u) = \frac{1160 + 4180 u}{1 + u} \quad (18)$$

$$c_{P2-400}(u) = \frac{1210 + 4180 u}{1 + u} \quad (19)$$

The water vapor diffusion permeability δ of P2-350 λ was in both dry cup (Table 3) and wet cup (Table 4) arrangements slightly higher than for P2-400 which corresponded with its lower bulk density. However, the differences were very low, on the edge of the error range of the measuring method. Pronounced anisotropy in water vapor transport was not observed. The water vapor diffusion permeabilities in two different directions A, B differed within the same range as the δ values of the two studied AAC if compared each other. Also, the differences found in the wet-cup and dry-cup setups had opposite sign.

The water vapor diffusion permeabilities measured using the wet cup method were systematically higher than the corresponding δ

Tablica 2 / Table 2

PRZEWODNOŚĆ CIEPLNA W FUNKCJI TEMPERATURY [W/mK]

THERMAL CONDUCTIVITY AS A FUNCTION OF TEMPERATURE [W/mK]

Material Material	2 °C	10 °C	15 °C	25 °C	30 °C	40 °C
P2 – 350 λ	0.0802	0.0814	0.0837	0.0843	0.0856	0.0864
P2 – 400	0.0839	0.0857	0.0921	0.0927	0.0985	0.0991

$$c_{P2-350}(u) = \frac{1160 + 4180 u}{1 + u} \quad (18)$$

$$c_{P2-400}(u) = \frac{1210 + 4180 u}{1 + u} \quad (19)$$

Współczynnik dyfuzji pary wodnej δ betonu komórkowego P2-350 λ określany metodą wagową (miscozkową) zarówno w warunkach suchych, jak i wilgotnych (tablice 3 i 4) jest nieco wyższy niż dla P2-400, co można powiązać z mniejszym ciężarem właściwym. Jednakże różnice te są bardzo małe, w granicach błędów metody. Nie stwierdza się wyraźnej anizotropii przenikania pary wodnej. Współczynniki dyfuzji mierzone wzdłuż drogi A czy B dla danego materiału różnią się tak samo nieznacznie jak wartości δ dla obydwu betonów komórkowych. Podobnie, różnice stwierdzone w pomiarach w stanie suchym i w warunkach wilgotnych potwierdzają te tendencje.

Współczynniki dyfuzji określone metodą wagową (miscozkową) w stanie wilgotnym wzrastają systematycznie w porównaniu z odpowiadającymi im wartościami δ otrzymanymi w stanie suchym. Wynika to stąd, że współczynnik dyfuzji pary wodnej określony w stanie wilgotnym obejmuje dodatkowo transport wody wnikałej w materiał wskutek kondensacji kapilarnej, a nie tylko dyfuzję pary wodnej „luzem”.

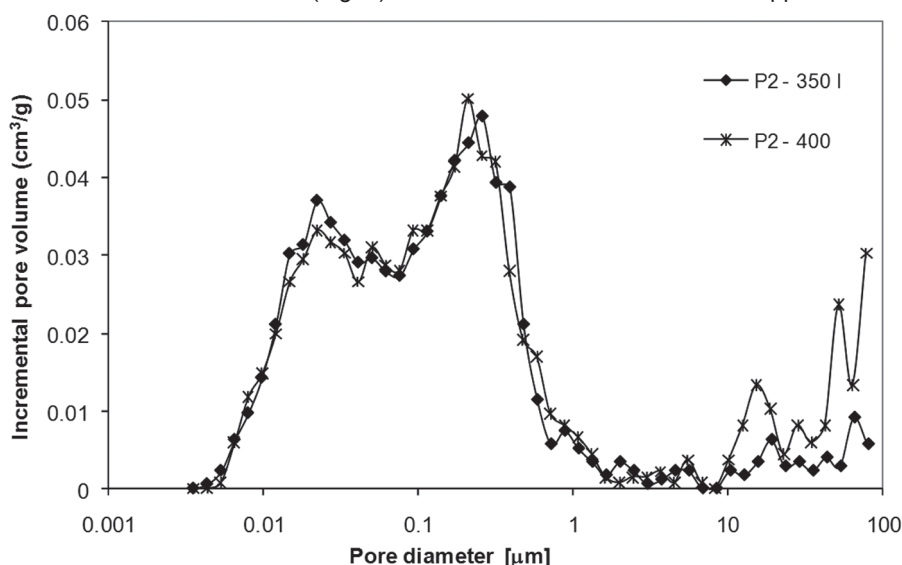
Parametry odnoszące się do transportu wody ciekłej określone na podstawie pomiarów sorpcyjności wykazują większe wartości liczbowe w przypadku P2-350 λ niż P2-400 (tablica 5). Wyniki te można powiązać z większą porowatością P2-350 λ (tablica 1). W badaniach tych nie stwierdza się również anizotropii właściwości.

Stała dyfuzji w funkcji zawartości wilgoci $\kappa(w)$ okazała się dla P2-350 λ wyższa w zakresie większych zawartości wilgoci niż dla P2-400 (rys. 3), ale dla mniejszych zawartości wilgo-

values acquired in the dry cup method. The apparent reason for this finding was that the water vapor transport coefficients measured in the wet-cup setup partially include also hydrodynamic transport of capillary condensed water in the pore system, besides the bulk water vapor diffusion.

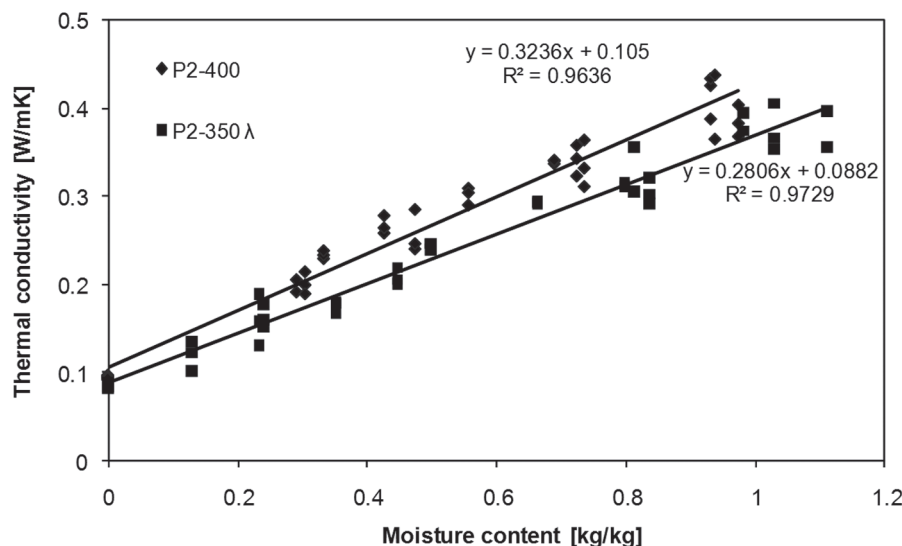
The liquid water transport parameters determined using the water sorptivity experiment were for P2-350 λ higher than for P2-400 (Table 5). This was in accordance with the higher porosity of P2-350 λ (Table 1). Also in this measurement, any pronounced anisotropy was not found.

The moisture diffusivity vs. moisture content function $\kappa(w)$ of P2-350 λ was in the range of higher moisture content higher than for P2-400 (Fig. 3) but for lower moisture contents an opposite trend



Rys. 1. Rozkład wielkości porów

Fig. 1. Pore distribution



Rys. 2. Przewodność cieplna w funkcji zawartości wilgoci

Fig. 2. Thermal conductivity as a function of moisture content

Tablica 3 / Table 3

PARAMETRY OPISUJĄCE TRANSPORT PARY WODNEJ METODĄ WAGOWĄ W WARUNKACH SUCHYCH (5-50%)

WATER VAPOR TRANSPORT PARAMETERS IN THE DRY-CUP ARRANGEMENT (5-50%)

Materiał Material	Przepuszczalność pary wodnej Water vapor diffusion permeability [s]	Współczynnik dyfuzji pary wodnej Water vapor diffusion coefficient [m ² ·s ⁻¹]	Opór dyfuzyjny Water vapor diffusion resistance factor [-]	Przepuszczalność pary wodnej Water vapor diffusion permeability [s]	Współczynnik dyfuzji pary wodnej Water vapor diffusion coefficient [m ² ·s ⁻¹]	Opór dyfuzyjny Water vapor diffusion resistance factor [-]
	Kierunek A / Direction A			Kierunek B / Direction B		
P2 – 350 λ	1.12·10 ⁻¹¹	1.52·10 ⁻⁶	15.3	1.41·10 ⁻¹¹	1.93·10 ⁻⁶	12.0
P2 – 400	1.09·10 ⁻¹¹	1.49·10 ⁻⁶	15.5	1.18·10 ⁻¹¹	1.61·10 ⁻⁶	14.4

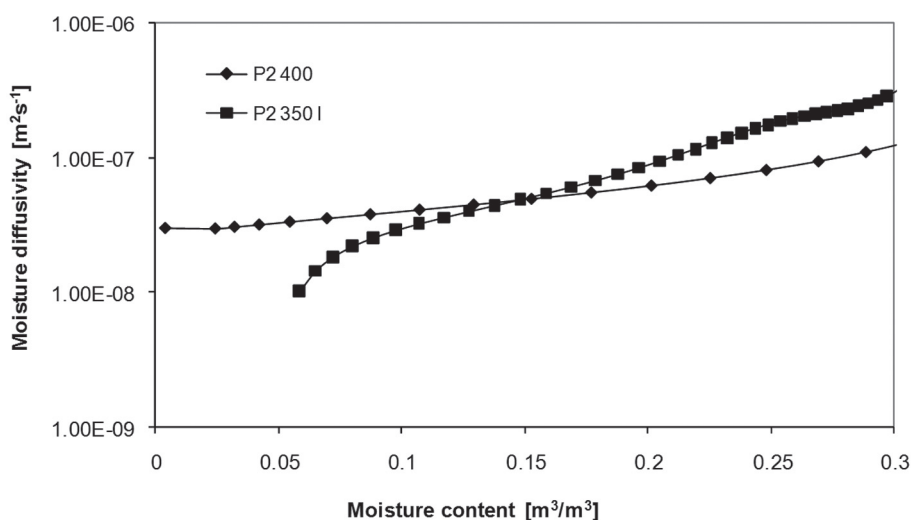
Tablica 4 / Table 4

PARAMETRY OPISUJĄCE TRANSPORT PARY WODNEJ METODĄ WAGOWĄ W WARUNKACH WILGOTNYCH (97-50%)

WATER VAPOR TRANSPORT PARAMETERS IN THE WET-CUP ARRANGEMENT (97-50%)

Material Material	Przepuszczalność pary wodnej Water vapor diffusion permeability [s]	Współczynnik dyfuzji pary wodnej Water vapor diffusion coefficient [m ² ·s ⁻¹]	Opór dyfuzyjny Water vapor diffusion resistance factor [-]	Przepuszczalność pary wodnej Water vapor diffusion permeability [s]	Współczynnik dyfuzji pary wodnej Water vapor diffusion coefficient [m ² ·s ⁻¹]	Opór dyfuzyjny Water vapor diffusion resistance factor [-]
	Kierunek A / Direction A			Kierunek B / Direction B		
P2 – 350 λ	5.64·10 ⁻¹¹	7.69·10 ⁻⁶	3.0	5.12·10 ⁻¹¹	6.98·10 ⁻⁶	3.3
P2 – 400	5.35·10 ⁻¹¹	7.29·10 ⁻⁶	3.2	4.56·10 ⁻¹¹	6.22·10 ⁻⁶	3.7

ci zaobserwowano odwrotny trend. Wartość κ na rys. 3 jest o wiele większa niż wartość efektywnego współczynnika dyfuzji obliczonego na podstawie współczynników absorpcji wilgoci (tablica 4). Może to wynikać z obecności pewnej puli porów zamkniętych w badanych betonach komórkowych. W celu zweryfikowania tej hipotezy zmierzono również zawartości wilgoci oznaczone po nasyceniu porów kapilarnych w eksperymencie polegającym na przetrzymywaniu próbek betonów komórkowych w wodzie przez 48 godzin. Zawartość wilgoci po wyjęciu z wody $w_{sat, cap}$ okazała się o wiele niższa niż w eksperymencie z nasycaniem próbek w próżni. Dla betonu P2-350 λ otrzymano $w_{sat, cap} = 0.385 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, odpowiednio dla P2-400 $w_{sat, cap} = 0.372 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Oznacza to, że nawet tak mała różnica ciśnień jak 100 kPa okazuje się skuteczna, aby otworzyć znaczną część porów zamkniętych. Posługując się wartościami $w_{sat, cap}$ obliczonymi na podstawie równania (16), można otrzymać następujące wartości parametrów charakteryzujących transport wilgoci: dla P2-350 λ w kierunku A $\kappa_{app} = 6.9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, w kierunku B $\kappa_{app} = 6.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 3. Współczynnik dyfuzji w funkcji zawartości wilgoci

Fig. 3. Moisture diffusivity as a function of moisture content

was observed. The κ values in Fig. 3 were substantially higher than the apparent moisture diffusivities calculated using water absorption coefficients in Table 4. The possible reason was presence of some partially closed pores in the studied AAC materials. In order to verify this hypothesis, also moisture contents at capillary saturation were determined in an experiment where the analyzed

i dla P2-400 w kierunku A $\kappa_{app} = 4.9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, w kierunku B $\kappa_{app} = 3.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Jednakże wartości te są jeszcze o wiele niższe od wartości $\kappa(w)$ pokazanych na rys. 3. Ponieważ metody określania współczynnika (stałej) dyfuzji na podstawie profili zawartości wilgoci są w oczywisty sposób bardziej niezawodne niż szacunkowe metody w oparciu o współczynnik absorpcji (13), to wartości $\kappa(w)$ pokazane na rys. 3 powinny być przede wszystkim brane pod uwagę w dalszych rozważaniach.

Beton komórkowy P2-350 λ wykazuje większą pojemność sorpcyjną, jeżeli chodzi o adsorpcję wody, w porównaniu z betonem P2-400 (rys. 4). Różnice sięgają 50%, co jest wartością znaczącą. Wyniki te nie są skorelowane z wynikami badania porowatości (rys. 1) i wynikami eksperymentów z nasączaniem próbek wodą w próżni (tablica 1). Przyczyną tego może być różna struktura porów w badanych materiałach i/lub różny udział porów zamkniętych czy częściowo otwartych na transport wody, w tym też transport powierzchniowy. Jednakże w chwili obecnej to tylko hipoteza.

Porównania danych udostępnionych przez producenta z otrzymanymi w laboratorium badawczym dokonać można jedynie w ograniczonym zakresie, ponieważ nie ma na ten temat odniesienia w literaturze.

Betony komórkowe, które są przedmiotem dostępnych opracowań różnią się bardzo gęstością i prawdopodobnie technologią (co jest trudno ocenić z uwagi na brak danych). Spośród betonów komórkowych, które z grubsza odpowiadałyby materiałom badanym w pracy można wymienić beton opisany w pracy (1) o gęstości $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ i $\lambda = 0.12 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$, którego przewodność cieplna była o 11% większa niż betonu P2-400 opisanego w niniejszej pracy (tablica 2). Współczynnik absorpcji betonu komórkowego o gęstości objętościowej 450 kg/m^3 z pracy (10) wynosił (po przeliczeniu jednostek) $0.045 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ co jest wartością o przeszło 50% większą wartością dla kierunku A próbki betonu P2-400 (tablica 5). Maksimum adsorpcji betonu o gęstości 480 kg/m^3 opisanego w pracy (11) wynosiło 0.04 kg/kg , co jest wartością o około 5% niższą w porównaniu z betonem P2-400.

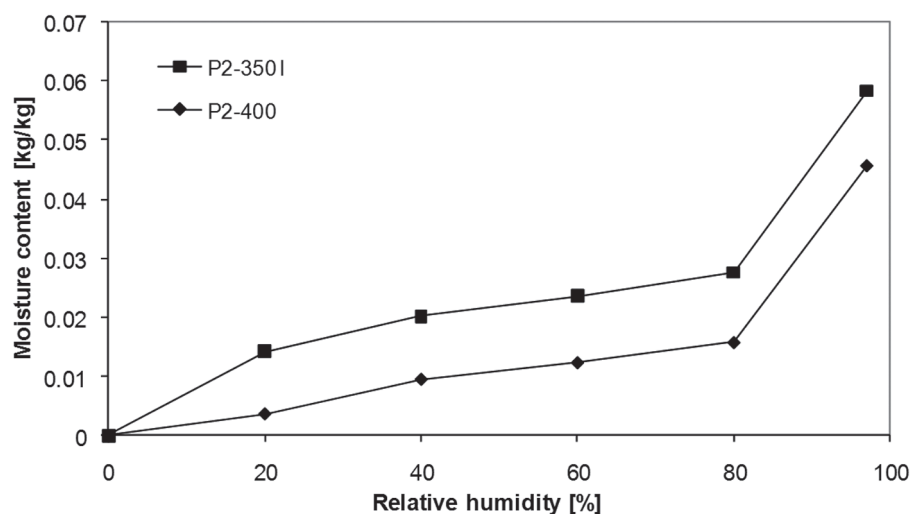
Stała dyfuzji w funkcji zawartości wilgoci $\kappa(w)$ w przypadku betonu opisanego w pracy (8) była około 20–5% mniejsza w porównaniu z betonem P2-400, w całym zakresie wilgotności; przebieg zmian tej funkcji był bardzo podobny. Można więc stwierdzić, że wyniki otrzymane w prezentowanej pracy są pod względem jakościowym zgodne z danymi uzyskanymi wcześniej dla podobnych materiałów. Producenci betonów komórkowych badanym w pracy (18), (19) podali jedynie gęstość objętościową, przewodność cieplną, ciepło właściwe w stanie suchym i opór dyfuzyjny pary wodnej. Stąd jedynie te parametry można porównać z wynikami doświadczalnymi; porównanie takie zamieszczono w tablicy 6. Różnice są nieomal niedostrzegalne. Zadeklarowane przez pro-

specimens were immersed in water for 48 hours. The capillary saturation moisture content $w_{sat, cap}$ was much lower than in the water vacuum saturation experiment. For P2-350 λ we obtained $w_{sat, cap} = 0.385 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, for P2-400 $w_{sat, cap} = 0.372 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. This meant that even such a relatively low pressure difference as 100 kPa was sufficient to open a very substantial part of originally closed pores. Using the data for $w_{sat, cap}$ in Eq. (16), we obtained for the apparent moisture diffusivities the following values: for P2-350 λ in A-direction $\kappa_{app} = 6.9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, in B-direction $\kappa_{app} = 6.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and for P2-400 in A-direction $\kappa_{app} = 4.9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, in B-direction $\kappa_{app} = 3.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. However, these values were still substantially lower than the $\kappa(w)$ data in Fig. 3. As the methods of determination of moisture diffusivity using moisture profiles are clearly more reliable than the simple apparent moisture diffusivity estimates using water absorption coefficient (13), the data for $\kappa(w)$ in Fig. 3 should be given preference in further considerations.

The AAC material P2-350 λ exhibited higher water vapor adsorption capability, as compared with P2-400 (Fig. 4). The differences were up to 50% which was very substantial. These results did not correlate well with the pore distribution measurements (Fig. 1) and water vacuum saturation experiments (Table 1). The possible reason could be different topology of the pore space of both materials and/or different extent of partial opening of a part of originally closed pores for water vapor transport and surface water transport. However, this is merely a hypothesis at the moment.

Comparisons with the material data given by the producers and measured by other investigators could be done in a limited extent only as complete sets of parameters were not found in any reference.

The AAC materials studied by other investigators which were found in common reference sources differed widely by the density and probably also the production technology (this was often difficult to assess due to the lack of necessary information). Among the AAC which at least roughly corresponded to the materials studied in this paper, the commercial AAC with $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ in (1)



Rys. 4. Izotermi adsorpcji

Fig. 4. Adsorption isotherms

Tablica 5 / Table 5

PARAMETRY OPISUJĄCE TRANSPORT WODY W MATERIALE

LIQUID WATER TRANSPORT PARAMETERS

Materiał Material	Współczynnik absorpcji wody Water absorption coefficient [kg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	Efektywny współczynnik dyfuzji wody Apparent moisture diffusivity [m ² ·s ⁻¹]	Współczynnik absorpcji wody Water absorption coefficient [kg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	Efektywny współczynnik dyfuzji wody Apparent moisture diffusivity [m ² ·s ⁻¹]
	Kierunek A		Kierunek B	
P2-350 λ	0.032	1.525·10 ⁻⁹	0.031	1.454·10 ⁻⁹
P2-400	0.026	1.062·10 ⁻⁹	0.022	7.120·10 ⁻¹⁰

ducenta gęstości są nieco niższe w obydwu przypadkach. Zadeklarowane przez producenta przewodności cieplne w stanie suchym są do 8% wyższe, co dobrze świadczy o producentach. Podawanie rzetelnych danych dotyczących tak istotnego parametru jak przewodność cieplna jest odzwierciedleniem współzawodnictwa wymuszonego przez rynek. Zmierzone w laboratorium pojemności cieplne w stanie suchym okazały się dla obydwu materiałów do 20% większe od wartości deklarowanej (1000 J/kg·K), która wydaje się raczej szacunkową niż wyznaczoną doświadczalnie. Dane odnoszące się do oporu dyfuzyjnego różnią się o około 20–50% i też są prawdopodobnie szacunkowe, ponieważ podane wartości μ są takie same dla materiałów znacznie różniących się gęstością (300–500 kg·m⁻³).

5. Wnioski

W pracy wyznaczono wartości parametrów odnoszących się do przenikania i akumulacji ciepła oraz wilgoci w dwóch betonach komórkowych pochodzących z produkcji na skalę przemysłową. Badania przeprowadzono w zakresie temperatur i wilgotności niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń praktycznych. O ile zależność przewodności cieplnej od temperatury kształtowała się w sposób dość umiarkowany, to wpływ zawartości wilgoci okazał się znacznie poważniejszy. Przewodność cieplna obydwóch betonów w stanie nasycenia wodą porów kapilarnych była w przybliżeniu czterokrotnie większa niż w stanie suchym. Również bardzo ważny okazał się wpływ zawartości wilgoci na stałą dyfuzji $\kappa(w)$, różnica w przypadku skrajnych zawartości wilgoci sięgała rzędu wielkości. Podobnie zaobserwowano znaczny wpływ zawartości wilgoci na ciepło właściwe. Wilgotność względna otoczenia jest ważnym czynnikiem kontrolującym zarówno współczynnik dyfuzji pary wodnej, jak i przebieg izoterm adsorpcji.

Otrzymane wyniki stanowią dowód na to, że brak w deklaracji producenta niektórych danych dotyczących właściwości wilgotnościowych materiału, a więc danych

had $\lambda = 0.12$ kcal/m·h·°C which was 11% higher than for P2-400 in this paper (Table 2). The water absorption coefficient of AAC with 450 kg/m³ in (10) was (after recalculation into corresponding physical units) 0.045 kg m⁻²·s^{-1/2} which was more than 50% higher than the A value determined for P2-400 (Table 5). The maximum water adsorption in the hygroscopic range of the AAC with 480 kg/m³ in (11) was 0.04 kg/kg which was about 5% lower than for P2-400. The moisture diffusivity determined as a function of moisture content, $\kappa(w)$, of the AAC with 490 kg/m³ in (8) was 20–50% lower than for P2-400 in this paper in the whole moisture range and the shape of the function was very similar. Therefore, it could be stated that the data measured in this paper qualitatively agreed with the previous measurements on similar materials.

In the producers' declarations of the AAC materials studied in this paper (18), (19), only bulk density, thermal conductivity and specific heat capacity in the dry state and water vapor diffusion resistance factors were found. Therefore, just these parameters could be compared with the measurements done in the paper. Results of this comparison are summarized in Table 6. The differences between measured and declared material characteristics were almost imperceptible. The declared bulk density was a little lower than its real value in both cases. Declared values of thermal conductivity in dry state were up to 8% higher than measured values. This was a good result for both producers. It may reflect the competition on the market forcing the producers to give quite reliable data for

Tablica 6 / Table 6

PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW Z DANYMI DEKLAROWANYMI PRZEZ PRODUCENTA

COMPARISON OF MEASURED PARAMETERS WITH PRODUCERS' DECLARATIONS

	Xella P2-350 λ		H+H P2-400	
	zmierzony measured	deklarowany declared	zmierzony measured	deklarowany declared
ρ [kg·m ⁻³]	363	350	407	400
c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	1160	1000	1210	1000
λ_{dry} [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0.0843	0.0850	0.0927	0.100
$\mu_{dry\ cup}$ [-]	12.0	10	14.4	10
$\mu_{wet\ cup}$ [-]	3.3	5	3.7	5

charakteryzujących transport i sorpcję wody ogranicza w znacznym stopniu rzetelność analizy właściwości materiału pod względem wilgotnościowym, jaką należałoby przeprowadzać na etapie projektowania w praktyce budowlanej.

References

1. M. Albayrak, A. Yorukoglu, S. Karahan, S. Atlihan, H.Y. Aruntas, I. Girgin, Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Building and Environment* 42, 3161-3165 (2007).
2. G. Zapotoczna-Sytek, J. Zmywaczyk, P. Koniorczyk, K. Lubińska, B. Górka, Investigations of 'thickness effect curve' in sand autoclaved aerated concrete (SAAC 500). *Cement Wapno Beton* 14, 301-307 (2009).
3. H. Kurama, I.B. Topcu, C. Karakurt, Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 767-773 (2009).
4. A. Laukaitis, J. Keriene, D. Mikulskis, M. Sinica, G. Sezemanas, Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. *Construction and Building Materials* 23, 3034-3042 (2009).
5. C. Karakurt, H. Kurama, I.B. Topcu, Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cement & Concrete Composites* 32, 1-8 (2010).
6. F. Wagner, G. Schober, H. Mortel, Measurement of the gas-permeability of autoclaved aerated concrete in conjunction with its physical-properties. *Cement and Concrete Research* 25, 1621-1626 (1995).
7. F.R. Gottfredsen, H.H. Knutsson, A. Nielsen, Determination of length changes due to moisture variations in autoclaved aerated concrete. *Materials and Structures* 30, 148-153 (1997).
8. M. Janz, Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests. *Materials and Structures* 35, 141-148 (2002).
9. M.S. Goual, A. Bali, F. de Barquin, R.M. Dheilly, M. Quéneudec, Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. *Cement and Concrete Research* 36, 1768-1776 (2006).
10. I. Ioannou, A. Hamilton, C. Hall, Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research* 38, 766-771 (2008).
11. S. Tada, K. Watanabe, Dynamic determination of sorption isotherm of cement based materials. *Cement and Concrete Research* 35, 2271-2277 (2005).
12. S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, O. Adan, H. Brocken, R. Černý, Z. Pavlík, C. Hall, K. Kumaran, L. Pel, R. Plagge, Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27, 307-325 (2004).
13. E. Vejmelková, M. Pavlíková M. Jerman, R. Černý, Free Water Intake as Means of Material Characterization. *Journal of Building Physics* 33, 29-44 (2009).
14. M.K. Kumaran, Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 22, 349-355 (1999).
15. P. Semerák, R. Černý, A Capacitance Method for Measuring Moisture Content of Building Materials. *Stavební obzor* 6, 102-103 (1997) (in Czech).
16. C. Matano, On the relation between the diffusion coefficient and concentration of solid metals. *Jap. J. Phys.* 8, 109-115 (1933).
17. R. Černý, P. Rovnaníková, *Transport Processes in Concrete*. Spon Press, London 2002.
18. Xella – technical parameters of products. URL: <http://www.xella.cz/downloads/czk/product/ytong-lambda.pdf>
19. H+H – technical parameters of products. URL: http://www.hplush.cz/c/document_library/get_file?folderId=528926&name=DLFE-11218.pdf

the most important parameters such as thermal conductivity. The measured specific heat capacity in dry state was for both materials up to 20% higher but the declared data (1000 J/kg·K) seemed to be just estimated values rather than exactly measured. The data for water vapor diffusion resistance factor given by the producers differed from the measured data in the range of 20–50% but also in this case the producers probably used only some estimated data because their μ values were the same for products with large differences (300–500 kg m⁻³) in bulk density.

5. Conclusions

The heat and moisture transport and storage parameters of two commercially produced autoclaved aerated concretes were measured in temperature and moisture ranges necessary for practical hygrothermal calculations. While the temperature dependence of thermal conductivity was found relatively moderate, the moisture content was a more important factor; the thermal conductivity of both AAC materials in capillary water saturated state was approximately four times higher than in the dry state. The dependence of moisture diffusivity κ on moisture content was also very significant; up to one order of magnitude difference between the κ values for lowest and highest moisture contents was observed. The moisture content widely affected the specific heat capacity as well. The relative humidity was found important factor for both water vapor diffusion coefficient and water adsorption isotherm.

The obtained results give evidence that the absence of some important hygric properties such as liquid water transport parameters and water sorption parameters in the producers' declarations greatly limits the quality of any hygric analysis which can be done in the common design process in building practice.

Acknowledgement

This research has been supported by the Czech Science Foundation, under grant No. 103/09/0016.