

Halina GARBALIŃSKA¹
Magdalena BOCHENEK²

POMIARY ROZKŁADU WILGOTNOŚCI I PARAMETRÓW CIEPLNYCH BETONU KOMÓRKOWEGO KLAS 400 i 700 W TRAKCIE 6-MIESIĘCZNEGO WYSYCHANIA

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zrealizowanych na próbkach z betonu komórkowego o gęstości 400 kg/m³ i 700 kg/m³. W pierwszym etapie próbki poddano działaniu ciekłej wody, która wprowadzana była do ich wnętrza siłami podciągania kapilarnego. Następnie przystąpiono do pomiarów podstawowych parametrów cieplnych, prowadzonych na próbkach o różnym poziomie zawilgocenia. Wyznaczano współczynnik przewodzenia ciepła λ oraz objętościową pojemność cieplną c_p . Równocześnie część próbek poddano nasycaniu wodą, aż do momentu ustabilizowania się ich masy. Następnie próbki poddano suszeniu w warunkach laboratoryjnych, rejestrując tempo tego procesu przez okres pół roku. Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu było wyznaczenie obydwu parametrów cieplnych dla próbek o różnym stanie zawilgocenia, a następnie odwzorowanie czasowych zmian zachodzących w parametrach cieplnych testowanych betonów komórkowych w trakcie ich wysychania z zawilgocenia powodziowego. Zmienne rozkłady wilgotności oraz przewodności i pojemności cieplnej po grubości przegrody odtworzono po upływie 1, 2, 3, 4 oraz 6 miesięcy trwania procesu wysychania. Dane zebrane w przypadku obydwu badanych klas betonów 400 i 700 wskazują na wyraźnie różny przebieg procesu – tak pod względem jakościowym, jak i ilościowym. Badania dotyczące betonu klasy 400 dowodzą silnego zróżnicowania w rozkładzie badanych wielkości fizycznych (λ , c_p oraz U_v) zarówno po miesięcznym, jak i 2-miesięcznym okresie wysychania oraz powrót do stanu zbliżonego do wyjściowego pod względem wilgotnościowym i cieplnym po upływie około 3-miesięcznego okresu wysychania. W przypadku betonu komórkowego klasy 700 okres 6 miesięcy okazał się być niewystarczający, aby uzyskać parametry cieplne i wilgotnościowe zbliżone do wartości, jakie miałby materiał w stanie naturalnej wilgotności.

Słowa kluczowe: beton komórkowy, przepływ kapilarny, przewodność cieplna, pojemność cieplna, wysychanie

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 42 91; Halina.Garbalińska@zut.edu.pl

² Magdalena Bochenek, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 43 41; mbochenek@zut.edu.pl

1. Wprowadzenie

We współczesnym budownictwie kładzie się duży nacisk na podniesienie trwałości realizowanych obiektów budowlanych, poprzez dobór właściwych materiałów, o parametrach ściśle dostosowanych do specyficznych warunków występujących w trakcie eksploatacji obiektu. Jednocześnie duże znaczenie przypisuje się problemom energooszczędnego projektowania budynków. Świadomy dobór właściwych materiałów do wznoszenia budynków wymaga pełnej znajomości ich właściwości fizycznych i mechanicznych. Właściwości te mogą ulegać silnym wahaniom w zależności od nasilenia działających na nie czynników, np. zawilgocenia. Do podstawowych parametrów termicznych, decydujących o przydatności danego materiału do zastosowania w przegrodach zewnętrznych, należą jego przewodność cieplna oraz objętościowa pojemność cieplna. Materiały w stanie suchym wykazują jednak zupełnie inne właściwości, niż w przypadku gdy poddane zostaną działaniu wilgoci. Wraz ze wzrostem zawilgocenia zwiększa się współczynnik przewodzenia ciepła i jednocześnie pogarszają się właściwości mechaniczne [1]. Według [5] projektowanie przegród budowlanych powinno uwzględniać wysychanie z zawilgocenia początkowego oraz wyeliminowanie możliwości trwałego ich zawilgocenia w warunkach eksploatacji. Znaczenie praktyczne ma nie tylko zdefiniowanie zmienności parametrów materiałowych w wyniku zawilgocenia, ale również ocena tempa rozprzestrzeniania się zawilgocenia, jak również powrotu do stanu wyjściowego, stąd pomysł zaaranżowania kilkietapowego eksperymentu opisanego poniżej.

2. Eksperyment

2.1. Badania podciągania kapilarnego i parametrów cieplnych

W pierwszym eksperymencie zaaranżowano sytuację, w której przegrody wykonane z betonu komórkowego klas 400 i 700 kg/m³ zostają narażone na intensywne działanie ciekłej wody, np. w warunkach powodziowych. Z każdej odmiany przygotowano po osiem próbek prostopadłościennych o wymiarach 12x12x24 cm. Próbki wycinano z bloczków w takim kierunku, w jakim wilgoć migrowałaby przez nie po grubości przegrody. Próbki zinwentaryzowano pod względem wyjściowej masy i wymiarów geometrycznych, określając równocześnie wyjściową gęstość objętościową. Następnie po trwałym oznaczeniu, zaizolowano próbki prostopadłościenne na powierzchniach bocznych bezbarwnym silikonem, aby zapewnić jednokierunkowy transport wody i zabezpieczyć próbki przed niekontrolowanym wysychaniem przez pobocznicę (rys. 1.).

Zaizolowane na pobocznicach próbki wstawiono do wcześniej przygotowanych kuwet wypełnionych wodą destylowaną (rys. 1.). Próbki zanurzono na głębokość ok. 2–5 mm. Utrzymywano stały poziom zanurzenia próbek przez cały okres trwania badań.



Rys. 1. Badania kapilarne

Fig. 1. Capillary measurements

Po miesięcznym okresie kapilarnego podciągania wody pocięto po trzy próbki z każdej odmiany betonu komórkowego na 6 próbek składowych, które przeznaczone zostały do badań współczynnika λ i pojemności cieplnej c_p . Badania te miały dostarczyć informacji nt. wpływu rozprzestrzeniającego się zawilgocenia kapilarnego na parametry cieplne badanych betonów komórkowych.

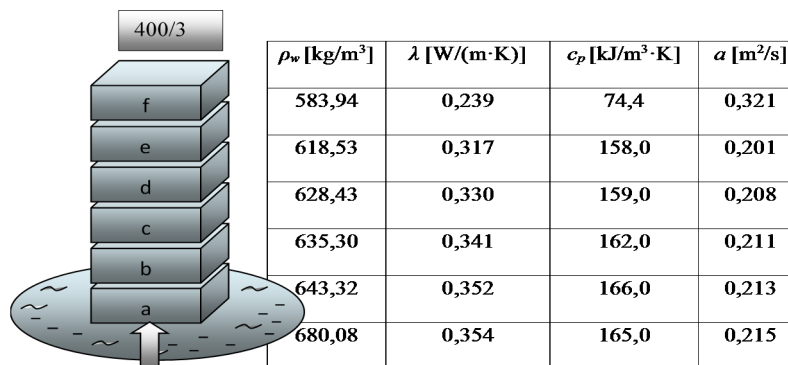
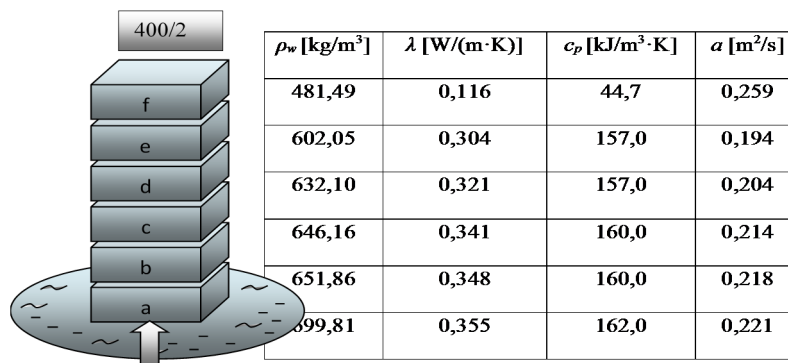
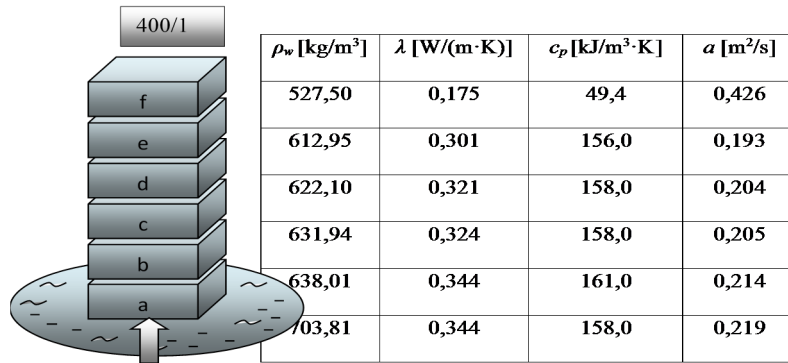
Badania przeprowadzono metodą niestacjonarną. Zastosowano aparat pomiarowy ISOMET 2104, służący do bezpośredniego pomiaru właściwości termofizycznych szerokiej gamy materiałów. W badaniach zastosowano sondy przyłgowe o odpowiednio dobieranych zakresach pomiarowych. Mimo, że badany był materiał tego samego rodzaju, to zmienny stan zawilgocenia próbek niejednokrotnie wymagał doboru innej sondy pomiarowej, dostosowanej pod względem parametrów do panujących warunków strukturalno-wilgotnościowych. Pomiar na każdej próbce wykonywany był dwukrotnie, a wynik rejestrowany automatycznie przez przyrząd pomiarowy, zaprezentowany na rys. 2.



Rys. 2. Pomiary parametrów cieplnych próbek o różnym poziomie zawilgocenia

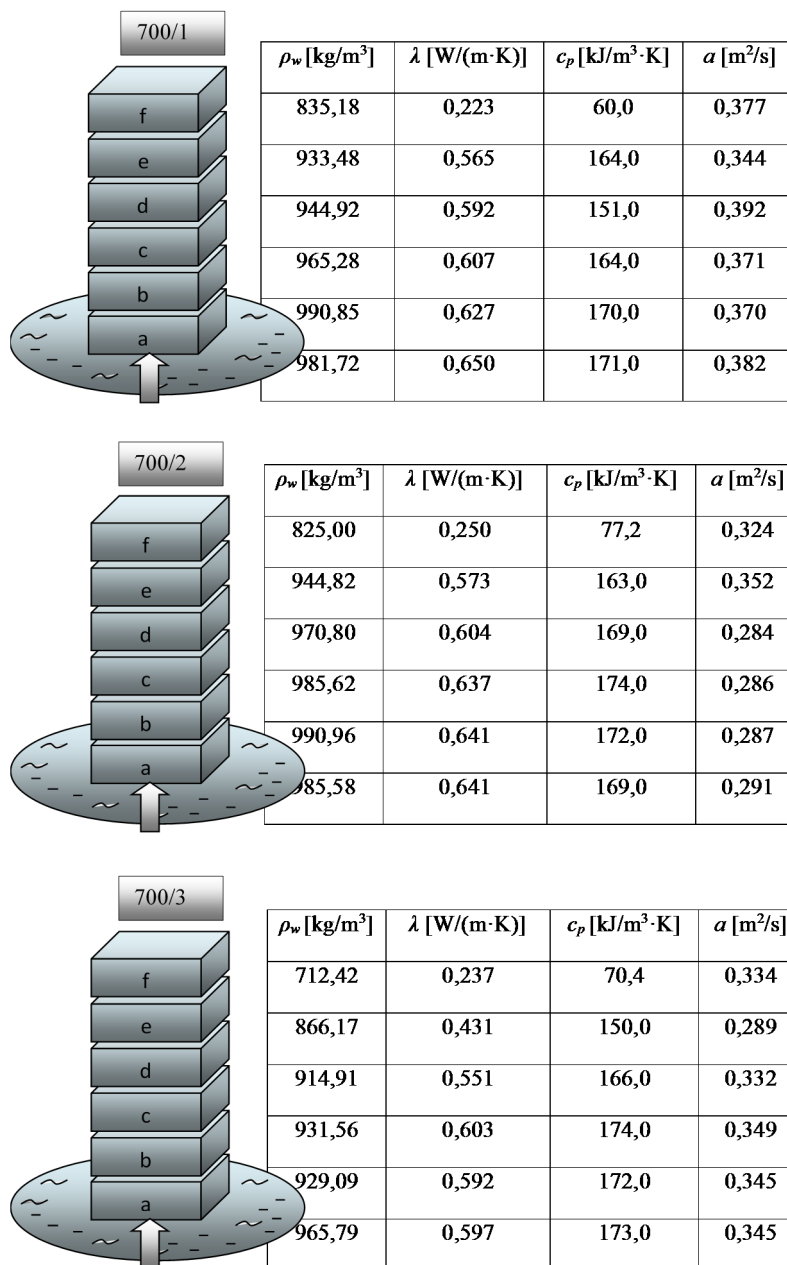
Fig. 2. Measurements of thermal parameters on samples with various moisture contents

Wyniki uzyskane na próbkach betonu komórkowego klas 400 i 700 kg/m³ pokazano na rysunkach 3. i 4.



Rys. 3. Schemat ideowy podziału próbek wyjściowych 12x12x24 cm na próbki składowe 12x12x4 cm, beton komórkowy klasy 400 kg/m³

Fig. 3. Schematic diagram of 12x12x24 cm AAC blocks division for samples 12x12x4 cm, aerated concrete of density class 400 kg/m³



Rys. 4. Schemat ideowy podziału próbek wyjściowych 12x12x24 cm na próbki składowe 12x12x4 cm, beton komórkowy klasy 700 kg/m³

Fig. 4. Schematic diagram of 12x12x24 cm AAC blocks division for samples 12x12x4 cm, aerated concrete of density class 700 kg/m³

Na rysunkach 3. i 4. w odniesieniu do każdej próbki prostopadłościennej o wymiarach 12x12x24 cm podano schemat podziału na próbki składowe 12x12x4 cm oraz zamieszczono przypisane im średnie wartości gęstości objętościowej ρ_w w stanie zawilgocenia osiągniętym po 1 miesiącu trwania procesu oraz średnie wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ i objętościowej pojemności cieplnej c_p oraz współczynnika wyrównywania temperatury a , odpowiadające różnym poziomom nasycenia wodą badanego materiału. Wyniki dla czterech klas gęstości (400, 500, 600, 700) przedstawione zostały w pracy [2], a częściowe wyniki dla klasy 400 w artykule [3].

2.2. Nasycenie próbek i symulacyjne pomiary wysychania

Kolejny eksperyment rozpoczęto tak samo jak pierwszy – od poddania próbek z betonu komórkowego o klasie gęstości 400 i 700 kg/m³ działaniu podciągania kapilarnego, realizowanego przez okres jednego miesiąca. Po upływie miesiąca próbki zanurzone w wodzie, aż do osiągnięcia stanu pełnego nasycenia (rys. 5.). Próbki nasycone wodą najpierw docięto na wymiar 10x10x24 cm, a następnie przecięto na dwie połowy (każda o wymiarze 10x10x12 cm).



Rys. 5. Nasycenie próbek wodą, a następnie izolacja próbek

Fig. 5. Soaking of samples and next insulation of samples

Każdy bloczek zaizolowano z pięciu stron oraz dodatkowo owinięto folią, tak aby wysychaniu podlegała tylko jedna powierzchnia (10x10 cm) – rys. 5. Systematycznie mierzono masę wysychających próbek, a po upływie 30 dni wytypowano 4 próbki z każdej klasy gęstości, które pocięto po długości na 10 plastrów o zbliżonej grubości h . Po zinventaryzowaniu wszystkie plastry suszono do uzyskania stałej masy. Po 60 dniach wytypowano kolejne 4 próbki z każdej klasy gęstości i tak jak poprzednio pocięto je na 10 jednakowych plastrów i wysuszono do stałej masy. Następnie po 90 dniach pocięto na plastry kolejne cztery bloczki. Po 120 dniach pocięto dwa bloczki na 10 jednakowych plastrów, a kolejne dwa bloczki pocięto po 180 dniach.

2.3. Ocena zmienności parametrów cieplnych w procesie wysychania

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę rozkładu zmienności parametrów cieplnych po grubości przegrody w procesie jej wysychania.

W tabelach 1-5 zestawiono dane odnoszące się do kolejnych plastrów składowych o uśrednionej grubości h , wycinanych z wysychających bloczków betonu komórkowego klasy 400 i 700. Poniższe tabele prezentują zmiany zawartości wilgoci U_v , jak również zmiany parametrów cieplnych λ oraz c_p , wyznaczone po upływie 1, 2, 3, 4 i 6-miesięcznego procesu wysychania. Wszystkie wartości zamieszczone w poniższych tabelach są wartościami średnimi, uzyskanymi z pocięcia bloczków zgodnie z opisem przedstawionym w p. 2.2.

Wstępne wyniki dotyczące pojedynczych, wybranych próbek betonu komórkowego klasy 400 prezentowane były wcześniej w artykule [4].

Tabela 1. Średnie wartości zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ i objętościowej pojemności cieplnej c_p betonu komórkowego klasy 400 i 700 po 1 miesiącu wysychania

Table 1. The mean moisture content of U_v , thermal conductivity λ , and heat capacity c_p of aerated concrete of density class 400 and 700 after 1 month drying

400										
h	9,06	9,30	9,38	9,18	9,07	9,16	9,18	9,10	9,14	9,08
U_v	0,020	0,031	0,069	0,113	0,131	0,140	0,145	0,148	0,146	0,139
λ	0,136	0,149	0,194	0,247	0,269	0,280	0,286	0,289	0,287	0,278
c_p	0,691	0,750	0,954	1,190	1,287	1,335	1,362	1,378	1,368	1,330
700										
h	8,97	9,27	9,17	9,16	9,05	9,12	9,04	8,94	9,18	8,88
U_v	0,021	0,068	0,135	0,158	0,168	0,173	0,179	0,183	0,183	0,185
λ	0,222	0,294	0,398	0,434	0,449	0,457	0,466	0,472	0,472	0,476
c_p	0,929	1,070	1,270	1,338	1,368	1,383	1,401	1,413	1,413	1,419

Tabela 2. Średnie wartości zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ i objętościowej pojemności cieplnej c_p betonu komórkowego klasy 400 i 700 po 2 miesiącach wysychania

Table 2. The mean moisture content of U_v , thermal conductivity λ and heat capacity c_p of aerated concrete of density class 400 and 700 after 2 months drying

400									
h	10,30	9,65	9,56	9,61	9,83	9,92	10,06	9,62	10,37
U_v	0,016	0,019	0,022	0,031	0,045	0,063	0,008	0,090	0,093
λ	0,131	0,134	0,138	0,149	0,166	0,187	0,208	0,220	0,223
c_p	0,669	0,685	0,701	0,750	0,825	0,922	1,013	1,067	1,083
700									
h	10,22	10,23	9,74	10,36	10,15	10,22	10,21	10,02	9,82
U_v	0,017	0,024	0,053	0,092	0,119	0,133	0,142	0,144	0,147
λ	0,215	0,226	0,271	0,331	0,373	0,395	0,409	0,412	0,417
c_p	0,917	0,938	1,025	1,141	1,222	1,264	1,291	1,297	1,306

Tabela 3. Średnie wartości zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ i objętościowej pojemności cieplnej c_p betonu komórkowego klasy 400 i 700 po 3 miesiącach wysychania

Table 3. The mean moisture content of U_v , thermal conductivity λ , and heat capacity c_p of aerated concrete of density class 400 and 700 after 3 months drying

400										
h	8,67	8,64	8,82	8,87	8,50	8,39	8,49	8,23	8,47	8,30
U_v	0,015	0,016	0,018	0,019	0,020	0,021	0,023	0,026	0,027	0,028
λ	0,130	0,131	0,133	0,134	0,136	0,137	0,139	0,143	0,144	0,145
c_p	0,664	0,669	0,680	0,685	0,691	0,696	0,707	0,723	0,728	0,734
700										
h	8,37	8,79	8,60	8,33	8,41	8,48	8,80	8,14	8,30	8,34
U_v	0,015	0,018	0,023	0,033	0,051	0,074	0,094	0,11	0,121	0,123
λ	0,212	0,217	0,225	0,240	0,268	0,304	0,335	0,359	0,376	0,380
c_p	0,911	0,920	0,935	0,965	1,019	1,087	1,147	1,195	1,228	1,234

Tabela 4. Średnie wartości zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ i objętościowej pojemności cieplnej c_p betonu komórkowego klasy 400 i 700 po 4 miesiącach wysychania

Table 4. The mean moisture content of U_v , thermal conductivity λ , and heat capacity c_p of aerated concrete of density class 400 and 700 after 4 months drying

400										
h	8,00	7,68	7,93	7,93	8,48	7,48	9,17	8,50	8,97	9,34
U_v	0,017	0,017	0,018	0,019	0,018	0,018	0,018	0,019	0,019	0,020
λ	0,132	0,132	0,133	0,134	0,133	0,133	0,133	0,134	0,134	0,136
c_p	0,675	0,675	0,680	0,685	0,680	0,680	0,680	0,685	0,685	0,691
700										
h	8,61	7,96	7,92	8,66	8,12	8,01	8,99	8,81	8,39	7,39
U_v	0,018	0,022	0,026	0,031	0,043	0,056	0,071	0,085	0,092	0,097
λ	0,217	0,223	0,229	0,237	0,256	0,276	0,299	0,321	0,331	0,339
c_p	0,920	0,932	0,944	0,959	0,995	1,034	1,078	1,120	1,141	1,156

Tabela 5. Średnie wartości zawartości wilgoci U_v , przewodności cieplnej λ i objętościowej pojemności cieplnej c_p betonu komórkowego klasy 400 i 700 po 6 miesiącach wysychania

Table 5. The mean moisture content of U_v , thermal conductivity λ , and heat capacity c_p of aerated concrete of density class 400 and 700 after 6 months drying

400										
h	8,82	9,40	9,56	9,48	9,40	9,16	9,23	8,88	9,31	8,54
U_v	0,018	0,016	0,016	0,016	0,015	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
λ	0,133	0,131	0,131	0,131	0,130	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
c_p	0,680	0,669	0,669	0,669	0,664	0,669	0,669	0,669	0,669	0,669
700										
h	9,08	9,35	8,98	9,25	8,90	9,10	9,56	8,66	9,00	8,34
U_v	0,014	0,015	0,017	0,021	0,025	0,031	0,036	0,041	0,047	0,053
λ	0,211	0,212	0,215	0,222	0,228	0,237	0,245	0,253	0,262	0,271
c_p	0,908	0,911	0,917	0,929	0,941	0,959	0,974	0,989	1,007	1,025

3. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pozwalają ocenić skalę zmian parametrów cieplnych, wywołanych po pierwsze działaniem ciekłej wody rozprzestrzeniającej się w obrębie przegrody, a po drugie zachodzących w trakcie trwającego wiele miesięcy procesu wysychania.

Zrealizowany eksperyment jednoznacznie wskazuje, że przebieg analizowanych procesów w obydwu klasach betonów różnił się znacząco, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. W przypadku betonu klasy 400 wykazano silne zróżnicowanie w rozkładzie badanych wielkości fizycznych (λ , c_p oraz U_v) zarówno po 1-miesięcznym, jak i 2-miesięcznym okresie wysychania oraz powrót do stanu zbliżonego do wyjściowego pod względem wilgotnościowym i cieplnym po upływie przynajmniej 3-miesięcznego okresu wysychania. W przypadku betonu komórkowego klasy 700 okres 6 miesięcy okazał się być niewystarczający, aby uzyskać parametry cieplne i wilgotnościowe zbliżone do wartości, jakie miałby materiał w stanie naturalnej wilgotności.

Im dłużej trwa proces wysychania, tym dłużej przegroda wykazuje gorsze parametry techniczne, m.in. związane z izolacyjnością termiczną.

Sucha ściana wykonana z badanego betonu komórkowego klasy 400 o współczynniku $\lambda \approx 0,11$ [W/(m·K)], spełni aktualne wymagania [6] dotyczące wartości granicznej współczynnika przenikania ciepła $U = 0,23$ [W/(m²·K)] – przy grubości minimalnej wynoszącej 46 cm. Ta sama przegroda w stanie kapilarnego nasycenia wodą, tj. przy współczynniku $\lambda \approx 0,35$ [W/(m·K)], będzie cechowała się współczynnikiem $U = 0,67$ [W/(m²·K)], tj. wykaże niemal 3-krotne przekroczenie dopuszczalnej wartości $U_{c(max)}$. Natomiast w przypadku suchego betonu komórkowego klasy 700, tj. przy $\lambda \approx 0,19$ [W/(m·K)], aktualne wymagania dotyczące współczynnika przenikania ciepła spełniłaby ściana jednowarstwowa o minimalnej grubości 79 cm. Tak gruba przegroda nie jest współcześnie akceptowalna zarówno ze względów praktycznych, jak i mentalnych. Gdyby hipotetycznie założyć wykonanie takiej przegrody, to w wyniku zawilgocenia kapilarnego, tj. przy $\lambda \approx 0,63$ [W/(m·K)], jej współczynnik U osiągnąłby wartość około 0,70 [W/(m²·K)], czyli przekroczyłby więcej niż 3-krotnie aktualnie dopuszczalny poziom $U_{c(max)}$.

Literatura

- [1] Autoclaved aerated concrete. Properties, Testing and Design. RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC, 1993.
- [2] Bochenek M.: Ocena zmienności parametrów higro-termicznych betonu komórkowego o zróżnicowanej gęstości. Praca doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2016.
- [3] Garbalińska H., Bochenek M.: Wpływ podciągania kapilarnego na przewodność cieplną betonu komórkowego, Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2013, s. 260-262.

- [4] Garbalińska H., Bochenek M.: Popowodziowe wysychanie przegród wykonanych z betonu komórkowego i zachodzące zmiany przewodności cieplnej. *Czasopismo Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), lipiec-wrzesień 2014, s. 155-162, DOI: 10.7862/rb.2014.83.
- [5] Grabarczyk S.: *Fizyka budowli. Komputerowe wspomaganie projektowania budownictwa energooszczędnego*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12.04.2004 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. Nr 75, poz. 690 (z późniejszymi zmianami).

MEASUREMENTS OF MOISTURE AND THERMAL PARAMETERS DISTRIBUTION IN AUTOCLAVED AERATED CONCRETES OF 400 AND 700 CLASS DURING A SIX MONTH PERIOD OF DRYING

Summary

The paper describes the results of experimental studies which were conducted on the samples of aerated concrete of density class 400 kg/m³ and 700 kg/m³. Initially, the samples were exposed to a strong effect of liquid water which was introduced into their interior by capillary forces. Next, basic thermal parameters were measured and some tests were carried out on samples of various degree of moisture. The coefficient of thermal conductivity λ and the heat capacity c_p were determined. At the same time, a part of the samples was saturated with water until they stabilized. Next, the samples were dried under laboratory conditions, recording the rate of this process for a period of half a year. The main goal of the experiment was to determine both thermal parameters for the samples of various degree of moisture and then to map the temporal changes in the thermal parameters of the tested aerated concretes during the drying out of post flood moisture. The variables of moisture distribution, thermal conductivity and heat capacity across the width of wall were reconstructed after 1, 2, 3, 4 and finally 6 months of drying process. In case of the both classes researched (400 and 700), all collected data indicate at clearly different courses of the process in qualitative and quantitative character. Research concerning 400 class concrete proves strong differentiation in the distribution of the tested physical parameters (λ , c_p and U_v) after both, 1 and 2 month periods of drying and return after 3 months to the state similar to the initial one regarding moisture and heat distribution. In case of 700 class aerated concrete, a period of 6 month drying proves to be too short in order to obtain thermal and moisture parameters similar to the values which the material would have in the state of natural conditions.

Keywords: autoclaved aerated concrete, capillary transport, thermal conductivity, heat capacity, drying

Przesłano do redakcji: 20.06.2017 r.

Przyjęto do druku: 01.09.2017 r.