

OCENA WPLYWU ZACINAJĄCEGO DESZCZU NA ZAWILGOCENIE PŁYTY ŚCIENNEJ Z BETONU KOMÓRKOWEGO

Vadzim I. NIKITSIN^a, Valery. A. KOFANOV^b, Beata BACKIEL-BRZOZOWSKA^{c*}

^a Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża J. P. II w Białej Podlaskiej, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska

^b Brzeski Państwowy Uniwersytet Techniczny, ul. Moskovskaya 267, 224017 Brześć, Białoruś

^c Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

Streszczenie: Zbadano niestacjonarny stan zawilgocenia betonu komórkowego płyty ściennej ogrzewanego budynku gospodarczego od oddziaływań klimatycznych za pomocą eksperymentu obliczeniowego i fizycznego. Obliczenie wykonano z zastosowaniem programu komputerowego TWiND i ustalono, że wśród rozpatrywanych oddziaływań klimatycznych główną przyczyną wysokiego poziomu wilgotności betonu komórkowego jest zacinający deszcz, który intensyfikuje proces swobodnego kapilarnego transportu wilgoci. Analiza porównawcza wyników eksperymentu fizycznego i obliczeniowego pokazała, że program TWiND, po dokładnym zadaniu wartości parametrów cieplno-fizycznych materiałów i uwzględnieniu oddziaływań klimatycznych, umożliwił wystarczająco dokładną prognozę rzeczywistego zawilgocenia rozpatrywanej osłony.

Słowa kluczowe: modelowanie stanu zawilgocenia, zacinający deszcz, transport kapilarny.

1. Wprowadzenie

Wyniki licznych badań fizycznych przeprowadzonych w ostatnich dziesięcioleciach świadczą o tym, że wartości rzeczywistej wilgotności materiałów kapilarno-porowatych konstrukcji osłonowych eksploatowanych budynków zwykle kilkakrotnie przewyższają wartości przyjęte przy projektowaniu tych konstrukcji. Podwyższenie zawilgocenia materiałów powoduje obniżenie ich właściwości cieplochronnych oraz ma inne, powszechnie znane negatywne skutki. Już na etapie projektowania budynków należy więc dostatecznie ściśle prognozować poziom zawilgocenia materiałów, stosując odpowiednie metody obliczeniowe.

Autorzy licznych prac, między innymi Blocken i Carmeliet (2004), Rahman i inni (2006), podkreślają, że jedną z głównych przyczyn podwyższonej wilgotności konstrukcji osłonowych jest jednoczesne oddziaływanie na zewnętrzną powierzchnię osłony opadów atmosferycznych i wiatru, nazywane zacinającym (ukośnym) deszczem. W zależności od intensywności i czasu trwania zacinającego deszczu, jak również od właściwości kapilarnych materiałów, masa wody deszczowej padającej na powierzchnię osłony jest całkowicie lub częściowo wchłaniana przez warstwę powierzchniową materiału, podwyższając wilgotność konstrukcji osłonowej w związku z transportem kapilarnym wilgoci w głąb przegrody.

Celem niniejszej pracy jest potwierdzenie efektu

zacinającego deszczu na podstawie wyników oceny stanu zawilgocenia płyty betonu komórkowego, stanowiącej zasadniczą warstwę zewnętrznej przegrody ściennej ogrzewanego budynku gospodarczego. Wyniki uzyskano za pomocą eksperymentu obliczeniowego i fizycznego. Wybrany budynek znajduje się w północnej części miasta Brześć (Białoruś), a badana płyta ma orientację południowo-zachodnią, stąd poddawana jest najbardziej intensywnemu oddziaływaniu zacinającego deszczu.

2. Eksperyment obliczeniowy i jego wyniki

Przedmiotem badań była ściana zewnętrzna z betonu komórkowego o grubości 200 mm pokryta tynkiem cementowo-wapiennym o grubości 15 mm (warstwa zewnętrzna) i 5 mm (warstwa wewnętrzna). Do obliczenia zmian cieplno-wilgotnościowych w płycie spowodowanych oddziaływaniem środowiska zastosowano program komputerowy TWiND opracowany przez autorów. Opis matematyczny procesu niestacjonarnego transportu ciepła i wilgoci zastosowany w tym programie jest taki sam, jak w powszechnie znanym programie komputerowym WUFI. Program komputerowy TWiND różni się tym, iż współczynnik wyrównywania wilgoci D_w [m^2/s], zależny od wilgotności w [kg/m^3], określa się na podstawie metody zaproponowanej przez Nikitsina i Backiel-Brzozowską (2012), a masę wody deszczowej wchłoniętej przez powierzchnię jednostkową osłony

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: b.backiel@pb.edu.pl

w jednostce czasu oddziaływania zacinającego deszczu g_w [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] wyznacza się na podstawie metody zaproponowanej przez Nikitsina i Backiel-Brzozowską (2013). Ponadto, wpływ radiacji słonecznej ocenia się z zastosowaniem metodyki opisanej przez Pašinskiego i innych (2013).

Ustalono, że wyniki obliczeń uzyskanych za pomocą programu komputerowego TWiND dobrze prognozują wyniki pomiarów badań fizycznych zawilgocenia próbek zaprawy cementowo-wapiennej przy izotermicznym suszeniu (Kofanov i Nikitsin, 2004), próbek piaskowca przy zadanych warunkach klimatycznych (Rahman Ali A. i in., 2006) oraz ziaren zbóż przy izotermicznym transporcie wilgoci (Nikitsin i in., 2006). To pozwoliło założyć, że przy dostatecznie ścisłym uwzględnieniu oddziaływań środowiska otaczającego oraz właściwości fizycznych materiału osłonowego, można uzyskać wiarygodne informacje o zmiennym w czasie zawilgoceniu rozpatrywanej konstrukcji osłonowej.

W obliczeniach uwzględniono oddziaływania środowiska na konstrukcję osłony scharakteryzowane temperaturą i wilgotnością względną powietrza oraz ilością opadów atmosferycznymi w postaci deszczu. Jako źródło informacji o wartościach zmiennych w czasie czynników zastosowano pracę pod redakcją Šver i Savikovskij (1979) i rosyjski internetowy portal meteorologiczny (meteo.infospace.ru). Opis sposobu gromadzenia, archiwizowania i opracowywania danych dyskretnych o stanie środowiska znajduje się w pracy Kofanova (2011). Przejście z danych dyskretnych do ciągłych wykonano za pomocą funkcji spline trzeciego rzędu. Przyjęty rok obliczeniowy rozpoczynał się dnia 1 lipca i kończył 30 czerwca.

Niezbędne do wykonania obliczeń wartości opisujące właściwości zaprawy cementowo-wapiennej o gęstości pozornej $\rho = 1800 \text{ kg}/\text{m}^3$ (warstwy zewnętrzne) oraz betonu komórkowego o gęstości pozornej $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ (warstwa wewnętrzna) uzyskano na drodze uogólnienia wyników prezentowanych przez Künzela (1995), Fokina (1973) oraz Bal'ana (1984) i przedstawiono w tabeli 1, w której u oznacza procentową zawartość wilgoci w jednostce masy materiału. Współczynnik sorpcji wody A wyznaczono na podstawie wyników badań własnych, wykorzystując metodę opisaną między innymi przez Janza

(2000).

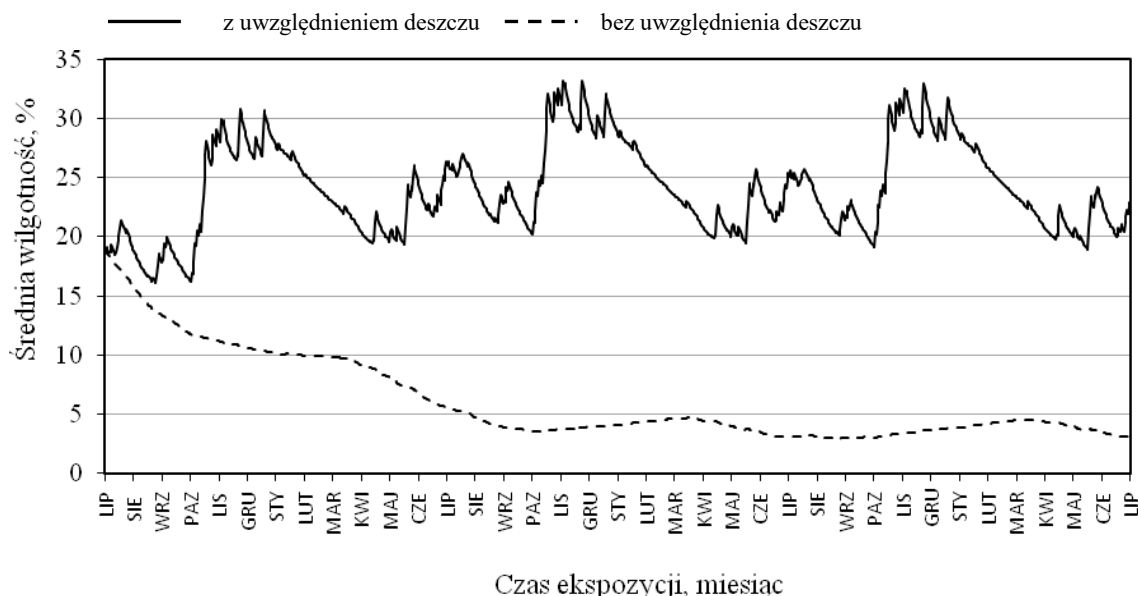
Wartości współczynników oddawania ciepła oraz oporu wymiany wilgoci na powierzchni zewnętrznej osłony wynoszą odpowiednio $\alpha_e = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{s})$ i $R_e = 13,3 \text{ m}^2\text{hPa}/\text{g}$, a na powierzchni wewnętrznej $\alpha_i = 8,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{s})$ i $R_i = 26,6 \text{ m}^2\text{hPa}/\text{g}$. W czasie sezonu grzewczego, od 1 listopada do 31 marca, przyjęto stałe wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza na powierzchni wewnętrznej osłony $t_i = 18^\circ\text{C}$ i $\Phi = 55\%$. W pozostałym okresie wskazane parametry również były stałe, równe $t_i = 20^\circ\text{C}$ i $\Phi = 70\%$. Z uwzględnieniem wyników eksperymentu fizycznego początkowe zawilgocenie w warstwie betonu komórkowego przyjęto na stałym poziomie równym $u = 20\%$.

W związku z tym, że przyjęty początkowy rozkład wilgotności warstwy betonu komórkowego osłony bezsprzecznie różni się od rzeczywistego, to obliczenie roczne przy przyjętych warunkach klimatycznych było kontynuowane jeszcze dla dwóch kolejnych lat. Dla wyjaśnienia wpływu opadów deszczu na wilgotność betonu komórkowego płyty obliczenia wykonano dwukrotnie, uwzględniając dane meteorologiczne o ilości opadów deszczu i pomijając te dane. Należy przy tym podkreślić, że przejście od ilości opadów deszczu w mm do masy wilgoci deszczowej wchłoniętej przez jednostkowe pole powierzchni osłony w jednostce czasu oddziaływania zacinającego deszczu g_w ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną przez Nikitsina i Backiel-Brzozowską (2013). Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 1.

Jak widać na rysunku 1 zmiany wartości wilgotności warstwy betonu komórkowego w kolejnych latach powtarzają się, przy tym średnie zawilgocenie w drugim i w trzecim roku obliczeniowym zmienia się w przybliżeniu od 18% do 33%, a w pierwszym roku obliczeniowym od 16% do 31%. Łatwo zauważyć, że powtórzenie mogłoby być obserwowane również i w pierwszym roku obliczeniowym, pod warunkiem, że początkowa średnia wilgotność betonu byłaby przyjęta na poziomie 25%. Należy podkreślić, iż wartości średniej wilgotności betonu komórkowego znacznie przewyższają normową wartość zakładaną dla warunków eksploatacyjnych, równą 4,5%.

Tab. 1. Właściwości materiałów zastosowanych w przegrodzie ściennej

Wskaźnik	Jednostka	Zaprawa cementowo-wapienna	Beton komórkowy
λ – współczynnik przewodności cieplnej	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$0,8 + 0,064u$	$0,14 + 0,01u$
c – ciepło właściwe materiału	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$0,85 + 0,042u$	$0,85 + 0,042u$
δ_p – współczynnik przepuszczalności pary wodnej	$\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})$	$0,9\cdot 10^{-4}$	$1,7\cdot 10^{-4}$



Rys. 1. Zmiany średniej wilgotności warstwy betonu komórkowego w ścianie osłonowej w ciągu trzech lat obliczeniowych

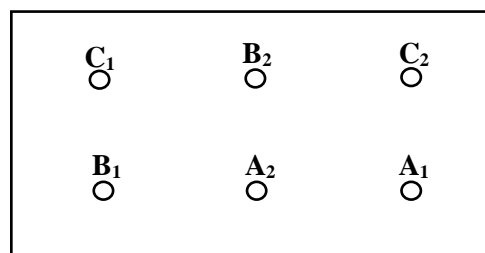
Obliczenia wykonane z zastosowaniem programu komputerowego TWiND bez uwzględnienia oddziaływań deszczu (rys. 1) pokazują, że po zakończeniu pierwszego roku obliczeniowego średnia wilgotność warstwy betonu komórkowego obniżyła się do wartości normowej i dalej wahała się w przybliżeniu od 3 do 5%, przy tym wyniki uzyskane w kolejnych latach są porównywalne. Analogiczną sytuację zaobserwowano przy obliczeniach z wykorzystaniem tradycyjnych, normowych metod inżynierskich. W taki sposób przez eksperyment obliczeniowy pokazano, że przy uwzględnieniu zacinającego deszczu wilgotności betonu komórkowego istotnie przewyższają wartość obliczone bez uwzględnienia danych o ilości opadów atmosferycznych.

3. Eksperyment fizyczny i jego wyniki

Dla sprawdzenia możliwości programu TwiND do odpowiednio dokładnego prognozowania rzeczywistego zawilgocenia wybranej konstrukcji przeprowadzono eksperyment fizyczny w warunkach rzeczywistych. Próbkę betonu komórkowego były pozyskane poprzez wycięcie otworów w wybranej płycie ściennej za pomocą specjalnej korony wiertniczej. Z każdego otworu wyjęto po 4 walcowe próbki o średnicy $d = 45$ mm i wysokości $h = 50 \pm 2$ mm. W ten sposób płyta betonu komórkowego o grubości 200 mm była podzielona na 4 warstwy o grubości około 50 mm z numerem porządkowym i ($i = 1, 2, 3, 4$), gdzie $i = 1$ przypisano warstwie z zewnętrznej strony osłony. Pobór prób przeprowadzono w ciągu jednej doby, 27 grudnia pierwszego roku obliczeniowego z otworów A₁, B₁, C₁ (pierwsza seria składająca się z 12 próbek) oraz 11 września drugiego roku obliczeniowego z otworów A₂, B₂, C₂ (druga seria składająca się również z 12 próbek). Schemat rozmieszczenia wskazanych otworów na powierzchni płyty pokazano na rysunku 2. W taki

sposób do badań pozyskano 24 próbki. Dla zabezpieczenia przed odparowaniem wilgoci każdą próbkę po wyjęciu z otworu zamykano w oddzielnej torebce polietylenowej. Masę wilgotnych próbek m_w wyznaczano w tym samym dniu, w warunkach laboratoryjnych, za pomocą wagi elektronicznej o dokładności 0,01 g. Następnie próbki wysuszono w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 105°C do stałej masy m_s i wyznaczano wilgotność:

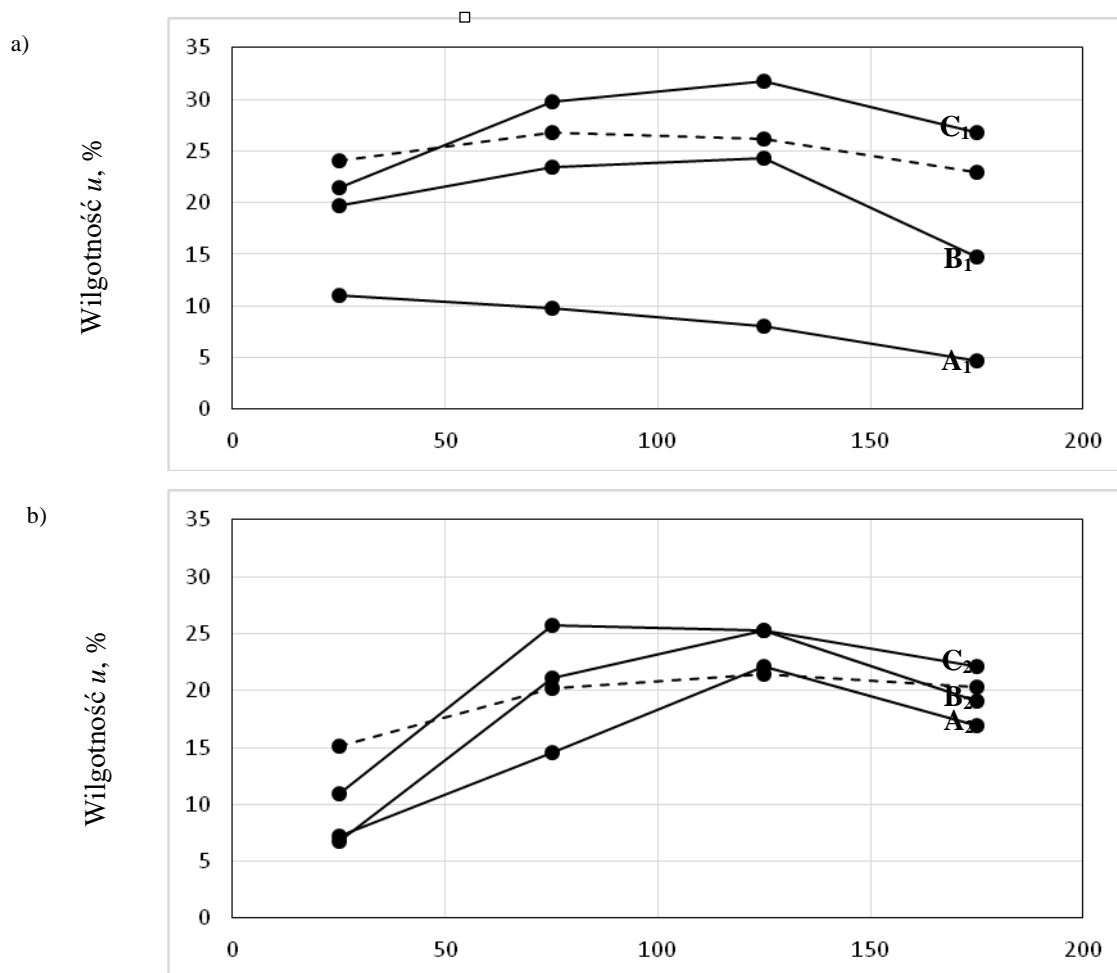
$$u = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (1)$$



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia otworów na powierzchni płyty o wymiarach 300×140 cm

Ustalono, że gęstość pozorna próbek zmieniała się w zakresie od 891 do 1009 kg/m³ z wartością średnią $\rho = 1009$ kg/m³. Jak podano wcześniej (punkt 2) w eksperymencie obliczeniowym przyjęto $\rho = 1000$ kg/m³.

Wyniki pomiarów wilgotności próbek pobranych ze wszystkich otworów przedstawiono na rysunku 3 w postaci punktów połączonych liniami ciągłymi. Dane te charakteryzują rozkład wilgotności betonu komórkowego w czterech warstwach po grubości płyty dla każdego z otworów na dzień wykonania eksperymentu. Z rysunku 3 widać, że w sezonie grzewczym zbieżność wyników pomiarów wilgotności dowolnej i -tej warstwy betonu komórkowego ($i = 1, 2, 3, 4$) o grubości 50 mm jest znacznie większa niż poza sezonem grzewczym.



Rys. 3. Wilgotność próbek walcowych z betonu komórkowego o wysokości $h = 50$ mm wyciętych z otworów płyty zlokalizowanych w punktach: a) A₁, B₁ i C₁; b) A₂, B₂ i C₂ (punkty połączone linią ciągłą) oraz obliczone uśrednione wartości wilgotności na odcinkach po 50 mm (punkty połączone linią przerywaną)

Obserwuje się jakościowe i ilościowe różnice profili wilgotności uzyskanych na podstawie wartości zawilgocenia próbek z otworu A₁ (rys. 3a) od profili wilgotności dla otworów B₁ i C₁. Można to wytłumaczyć tym, że w pobliżu otworu A₁ znajdowało się stacjonarne urządzenie grzewcze powodujące intensywne lokalne osuszenie materiału osłony w okresie grzewczym. W związku z tym, dane o wilgotności 4 próbek betonu komórkowego z otworu A₁ nie zostały uwzględnione w dalszej analizie statystycznej.

Na rysunku 3 pokazano uśrednione wartości wilgotności betonu komórkowego uzyskane na drodze obliczeniowej na 4 odcinkach po 50 mm (punkty połączone linią przerywaną). Następnie przeprowadzono analizę porównawczą średnich doświadczalnych i obliczonych wartości wilgotności betonu komórkowego w i -tej warstwie. Największą różnicę w wartościach można zaobserwować w pierwszej warstwie ($i = 1$). W pierwszym eksperymencie (rys. 3a) w pierwszej warstwie średnia arytmetyczna zawilgocenia jest równa 20,55%, a obliczona 24,1%. Różnica tych wartości wynosi 3,55% i nie przekracza odchylenia standardowego $\sigma = 4,253\%$, tak więc nie należy jej uznawać za statystycznie istotną. W kolejnych warstwach takie różnice mają jeszcze mniejsze wartości.

W drugim eksperymencie (rys. 3b) największą różnicę zaobserwowano również w pierwszej warstwie. Przy średniej doświadczalnej 8,3% i wartości obliczonej 15,1% mamy różnicę 6,8%, która nie przekracza podwójnej wartości odchylenia standardowego $2\sigma = 8,506\%$. Możemy więc traktować tę różnicę jako statystycznie nieistotną. Kolejną największą różnicę uzyskano w trzeciej warstwie i jej wartość wynosi tylko 2,9%.

Wykonano porównanie obliczonych i doświadczalnych średnich wartości wilgotności w całej warstwie betonu komórkowego. W pierwszym eksperymencie średnia doświadczalna wartość wilgotności wynosi $\bar{u}_{exp} = (20,55 + 26,6 + 28,0 + 20,25)/4 = 23,98\%$ i jest nieznacznie (o 1%) mniejsza niż obliczeniowa $\bar{u} = (24,1 + 26,8 + 26,2 + 22,9)/4 = 25\%$. W drugim eksperymencie uzyskano wartość doświadczalną $\bar{u}_{exp} = (18,3 + 20,43 + 24,3 + 19,37)/4 = 18,1\%$ oraz wartość obliczeniową $\bar{u} = (15,1 + 20,2 + 21,4 + 20,3)/4 = 19,25\%$. W drugim eksperymencie wartość obliczeniowa również nieznacznie przewyższa wartość doświadczalną.

W ten sposób obliczone wartości wilgotności betonu komórkowego adekwatnie prognozują średnie wartości doświadczalne wilgotności zarówno dla poszczególnych warstw o grubości $h = 50$ mm, jak i dla całego przekroju płyty betonu komórkowego o grubości 200 mm. Średnie

wartości doświadczalne wilgotności warstwy betonu komórkowego \bar{u}_{exp} w sezonie zimowym (23,98%) i letnim (18,1%) kilkakrotnie przekraczają wartość normową 4,5%. Przy zimowych pomiarach ten stosunek wynosi 5,3 razy, a dla sezonu letniego 4 razy. Przy podwyższeniu wilgotności warstwy betonu komórkowego o grubości $\delta = 0,2$ m z 4,5% do 23,98%, przyjęty przy projektowaniu konstrukcji osłonowej opór przewodzenia ciepła $R = \delta/\lambda$ (m^2K/W) tej warstwy zmniejsza się o 42%.

4. Podsumowanie

Za pomocą obliczeniowego i fizycznego eksperymentu zbadano niestacjonarny stan zawilgocenia betonu komórkowego płyty ściennej ogrzewanego budynku gospodarczego od oddziaływań klimatycznych. Obliczenie wykonano za pomocą programu komputerowego TWiND. Ustalono, że wśród rozpatrywanych oddziaływań klimatycznych główną przyczyną wysokiego poziomu zawilgocenia betonu komórkowego jest zacinający deszcz, który intensyfikuje proces swobodnego kapilarnego transportu wilgoci. Analiza porównawcza wyników fizycznego i obliczeniowego eksperymentu pokazała, że program TWiND przy dokładnym zadaniu wartości właściwości cieplno-fizycznych materiałów i oddziaływań klimatycznych, umożliwił dostatecznie ściśle prognozowanie rzeczywistego zawilgocenia rozpatrywanej osłony.

Literatura

- Bal'ân L. G. (1984). Rukovodstvo po rasčetu vlažnostnogo režima ograždauših konstrukcij zdannij. L.G. Bal'ân (red.). NIISF Gosstroâ SSSR. *Strojizdat*, Moskva.
- Blocken B. J., Carmeliet J. E. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, Is. 13, 1079-1130.
- Fokin K. F. (1973). Stroitel'naâ teplotnika ograždauših častej zdannij. *Strojizdat*, Moskva.
- Janz M. (2000). Moisture transport and fixation in porous materials at high moisture levels. Doctoral dissertation, Report TVBM-1018, Division of Building Materials, *Lund University*, Lundt.
- Kofanov V. A. (2011). Avtomatizaciâ etapa podgotovki ishodnyh dannyh dlâ komp'üternoj programmy „TWiND”, Sovremennye problem matematyk i ivyčislitel'noj tehniki. W: BGTU. V. C. Rubanov (red.), Brest, 42-44.
- Kofanov V. A., Nikitsin V. I. (2004). Polâ vlagosoderžaniâ i napreženij v uvlažennoj stenke pri izotermičeskoj suške, *Vestnik BrGTU, Stroitel'stvo i arhitektura*, Vol. 1, 122-125.
- Künzel H. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two- dimensional calculation using simple parameters. *Fraunhofer IRB Verlag*, Stuttgart.
- Nikitsin V. I., Backiel-Brzozowska B. (2012). Methods of determination of liquid transfer coefficient in building materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Is. 15-16, 4318-4322.
- Nikitsin V. I., Backiel-Brzozowska B. (2013). On taking wind-driven rain and capillary characteristics of materials into account while calculating dampness of shielding structures for buildings. W: Modern materials, installations and construction technologies. S. Fic (red.), PSW JPPII, Biała Podlaska, 36-46.
- Nikitsin V.I. I in. (2006). Ocenka izotermičesko govlogo perenosa v zernovoj srede, zapolnâušej silosy i sklady, *Vestnik BrGTU, Stroitel'stvo i arhitektura*, Vol. 1, 100-104.
- Pašinskij V. i in. (2013), Empiričeskaâ ocenka postupleniâ meščnyh summ pŕamoj i rasseânojj solnečnojj radiacii. *Energoeffektivnost'*, Vol. 1, 26-29.
- Rahman Ali A., Nikitsin V., Kofanov V. (2006). Wpływ opadów atmosferycznych oraz parametrów przenoszenia wilgoci materiałów konstrukcji osłonowych na ich wilgotność. *Przegląd budowlany*, Vol. 77, No. 6, 39-42.
- Ŝver C. A., Savikovsij I.A (1979). Klimat Bresta. W: Gidrometeoizdat. C. A. Ŝver, I. A Savikovsij (red.), Brest.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF WIND-DRIVEN RAIN ON MOISTURE CONTENT IN CELLULAR CONCRETE WALL BOARDS

Abstract: The non-stationary moisture level of a cellular concrete wall board in a heated utility building located in the northern part of the town of Brest (Belarus), depending on climatic influence, was assessed in this work. The results were obtained both in a calculation experiment and a physical test. The calculation experiment was performed using TWiND computer application elaborated by the authors. It was observed that wind-driven rain intensifying the process of free capillary moisture transfer is the main reason for the high moisture levels in cellular concrete. A comparative analysis of the results of the physical test and the calculation experiment showed that the THSS application elaborated by the authors enabled to predict the actual moisture levels of the shielding structure under study accurately enough when precise data concerning the thermal and physical characteristics of the materials as well as the occurring climatic influences had been submitted.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiIS/1/16 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.