

ANALIZA TERMIČKIH KARAKTERISTIKA ZIDOVA OD LAKOAGREGATNOG BETONA ZA STAMBENE ZGRADE PRI PROCESU DIFUZIJE VODENE PARE

*V. G. Gagarin, V. A. Mogutov, Istraživački institut građevinske fizike
GOSSTROY SSSR, Moskva, SSSR*

U radu je razmatrano ponašanje jednoslojnog zidnog panela od lakoagregatnog betona pri transportu vodene pare, a data je i ocena njegovog termičkog kvaliteta. Korišćen je kompjuterizovani metod proračuna ponašanja građevinskih konstrukcija pri difuziji vodene pare. Uzete su u obzir specifične karakteristike termičkih parametara lakoagregatnih betona. Pokazano je da za vreme prve godine eksploatacije, otpor provodjenju toplote može da se smanji za oko 25% u odnosu na projektnu vrednost.

Uvod

Najveći deo stambenih zgrada u Sovjetskom Savezu izgrađen je od lakoagregatnih betona. Godišnja proizvodnja lakoagregatnih betona iznosi preko 20 miliona kubnih metara. Lakoagregatni betoni se uglavnom primenjuju za izradu jednoslojnih konstrukcija građevinskog omotača zgrade. Zbog toga, čak i mala poboljšanja termičkog kvaliteta lakoagregatnih betonskih zidova mogu znatno da uštede energiju za grejanje. Pri tome treba imati u vidu rasprostranjenost ovih konstrukcija širom zemlje. Pri projektovanju ovih elemenata omotača zgrade treba uzeti u obzir sve termičke osobine upotrebljenih lakoagregatnih betona, jer ukupan kvalitet zidne konstrukcije zavisi od svojstva lakoagregatnog betona tokom veka eksploatacije zgrade. Otpor provodjenju toplote građevinske konstrukcije definisan je toplotnom provodljivošću materijala, koji pre svega zavisi od gustine betona, a zatim, mada u manjoj meri, zavisi i od sadržaja vlage u materijalu. Za vreme veka trajanja zgrade, termička svojstva zidova i vlažnost u njima deluju medjusobno jedno na drugo. Pri projektovanju građevinskih konstrukcija ovaj uticaj treba uzeti u razmatranje. Ukoliko postoji dovoljno iskustava u primeni nekog građevinskog materijala, onda prosečan sadržaj vlage u njemu tokom korišćenja zgrade može biti odredjen na osnovu eksperimentalnih podataka. Za nove građevinske materijale, ta vrednost može biti odredjena na bazi proračuna difuzije vodene pare kroz konstrukciju tokom eksploatacije zgrade.

Metod proračuna

Za proračun difuzije vodene pare kroz građevinsku konstrukciju korišćen je kompjuterski program, baziran na matematič-

kom modelu jednodimenzionog prenosa vlage kroz jednoslojnu konstrukciju zida.

Prenos vlage kroz strukturu materijala opisan je sledećom jednačinom:

$$\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial (\varphi p_s)}{\partial x} + \beta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (1)$$

Fluks vlage kroz konstrukciju je kontinualan. Koeficijenti prenosa vlage μ i β usvajani su zavisno od sadržaja vlage u materijalu. Osim toga, oni zavise i od temperature o čemu postoje eksperimentalni podaci.

Na površini zida, razmena vlage sa okolnim vazduhom opisana je jednačinom za granični uslov treće vrste, tj. fluksom vlage od unutrašnjeg vazduha u gradjevinsku konstrukciju:

$$G_i = \frac{1}{R_{vi}} (p_{si} \varphi_i - p_{sis} \varphi_i) \quad (2)$$

i fluksom vlage iz gradjevinske konstrukcije u spoljašnji vazduh:

$$G_e = \frac{1}{R_{ve}} (p_{ses} \varphi_i - p_{se} \varphi_e) \quad (3)$$

S obzirom da je proces prenosa vlage interniji od prenosa toplote, usvojena je stacionarna raspodela temperature po celoj debljini gradjevinske konstrukcije u svakom trenutku vremena. Koeficijent provodjenja toplote smatran je zavisnim od sadržaja vlage u materijalu. Temperatura i relativna vlažnost spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha su promenljivi tokom godine.

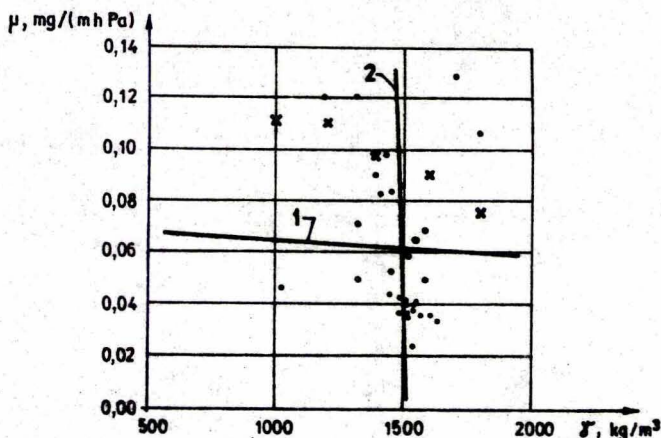
Usvojeni matematički model je sasvim uobičajen za ovu vrstu problema. Jednačina (1) je rešena metodom konačnih razlika primenom eksplicitnog postupka. Rešenje ove jednačine je osnov za računarski program kojim se ispituje ponašanje gradjevinske konstrukcije pri difuziji vodene pare. Poredjenje rezultata dobijenih ovim metodom, u najvećem broju slučajeva, pokazalo je dosta dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima.

Osnovne postavke

U cilju numeričkog izračunavanja prethodno opisanog matematičkog modela neophodno je poznavati termičko-fizičke karakteristike gradjevinskih materijala, kao što su: koeficijent provodjenja toplote, koeficijent propustljivosti pare (paropropustljivost, permeabilnost), koeficijent provodjenja vlage i izoterme sorpcije i desorpcije vodene pare.

Koeficijent provodjenja toplote je meren poznatim stacionarnim metodom u zavisnosti od sadržaja vlage u betonu. Slična merenja i analize dobijenih rezultata izvršeni su veliki broj puta u različitim državama [1, 2, 3]. Na osnovu dobijenih rezultata merenja može se zaključiti da je koeficijent provodjenja toplote potpuno suvog lakoagregatnog betona određen ne samo gustinom betona, nego i obradom i finoćom agregata i može da varira u opsegu do 30%. Koeficijent provodjenja toplote lakoagregatnih betona povećava se za 3 do 6% za svaki težinski procenat sadržaja vlage u odnosu na gustinu betona posle sušenja u peći.

Paropropustljivost, μ , je merena poznatom stacionarnom metodom "wet cup". Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezulta-



Slika 1. Eksperimentalne vrednosti paroprostljiivosti betona od šljake različite gustine

1 - grafički prikaz jednačine linearne regresije

$$\mu = -7,5 \cdot 10^{-6} \gamma + 0,07$$

2 - grafički prikaz jednačine linearne regresije

$$\gamma = 250\mu + 1508$$

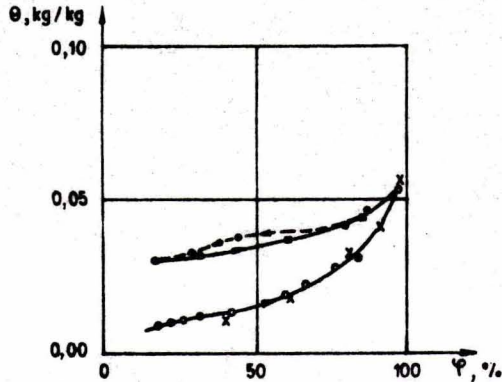
· - eksperimentalni podaci

x - vrednosti preporučene sovjetskim propisima

ta može se zaključiti da ne postoji korelacija između propustljivosti lakoagregatnih betona i njihove gustine (slika 1). Propustljivost je, do određenog stepena, definisana tipom agregata i različitim hemijskim aditivima.

Koeficijent provodjenja vlage, β , može se izmeriti pomoću dva, principijelno različita metoda: stacionarni i nestacionarni metod. Stacionarni metod je razvio O. Krišer [4]. Prema ovom metodu, pretpostavlja se da je prenos vlage u materijalu stacionaran u trenutku merenja raspodele vlage u uzorku i proračuna koeficijenta provodjenja vlage. Nasuprot tome, prema nestacionarnom metodu pretpostavlja se da postoji prenos vlage u uzorak betona osušen u peći, koji je u kontaktu sa vodenom površinom, ali u trenutku merenja deo uzorka je još uvek suv [5, 6]. Provodljivost vlage u lakim betonima, merena nestacionarnom metodom je približno za red veličine veća od vrednosti izmerene stacionarnom metodom, što je prikazano u literaturi [6]. Tokom realnih uslova eksploatacije zgrade, mehanizam prenosa vlage u gradjevinskim materijalima je bliži uslovima u stacionarnom metodu. Zbog toga su u daljim proračunima ponašanja gradjevinskih elemenata pri prenosu vlage usvojeni koeficijenti provodjenja vlage određeni stacionarnom metodom.

Sorpciono-desorpcione izoterme vodene pare za lake betone su određene pomoću relevantnih izoterma za očvrnuti cementni sloj. Histerezis sorpcije je suštinski karakteristika ovog sloja, što je objašnjeno u radu R. Feldmana i P. Serede [7]. U najvećem broju slučajeva izoterme sorpcije vodene pare su merene u uzorcima "potpuno" suvog materijala (osušenog u peći). Ispitivanja su pokazala, da ako se neposredno pošto je u materijalu procesom sorpcije dostignut maksimalan sadržaj higroskopne vlage, ostvari proces desorpcije vodene pare do približno 20% relativne vlažnos-



Slika 2. Eksperimentalne izoterme sorpcije, desorpcije i druge sorpcije vodene pare u lakoagregatnom betonu gustine 800 kg/m³

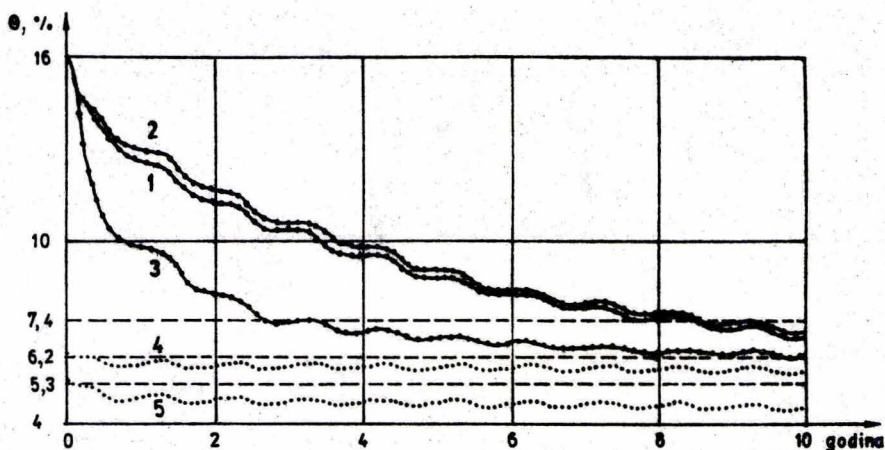
ti, a zatim opet ponovi proces sorpcije bez prethodnog sušenja uzorka u peći, onda je ova druga izoterma sorpcije vrlo bliska izotermi desorpcije (slika 2). Ostale izmerene izoterme nalaze se između ovih krivih. Obavljena teorijska i eksperimentalna istraživanja omogućavaju metod proračuna druge izoterme sorpcije na osnovu preliminarnih veličina. Intenzitet sorpcije vlage u lakoagregatnim betonima zavisi, u najvećoj meri, od tehnoloških faktora.

Pregled rezultata proračuna

Opisani metod je korišćen za sprovođenje brojnih proračuna ponašanja zidova od lakoagregatnog betona u stambenim zgradama pri transportu vlage. Proračuni pokazuju da u početnom periodu korišćenja zgrade, sadržaj vlage u betonskim zidovima se povećava, jer beton još uvek sadrži tehnološku vodu. Posle nekoliko godina sadržaj vlage u zidovima od betona se stabilizuje. U zimskom periodu je, do određenog stepena, veći nego u letnjem. Dužina perioda isušivanja zidnih panela zavisi u velikoj meri od klimatskih uslova lokacije. Generalno, što je toplija i suvlja klima, kraći je period isušivanja leti i obrnuto. Na primer, kada se gradi u klimatskim uslovima u polarnoj oblasti, period sušenja može biti i duži od 20 godina, i za vreme tog perioda toplotni gubici kroz zid će biti veći nego u kasnijem periodu trajanja zgrade. Osim od klimatskih karakteristika, na dužinu perioda isušivanja građevinske konstrukcije utiče i veličina koeficijenta prenosa vlage. Što su veće vrednosti koeficijenta paroprovodljivosti i provodjenja vlage u materijalu, kraći je period isušivanja zida.

U kvazistacionarnim uslovima, na realnu vlažnost građevinskih konstrukcija utiču izoterma ravnotežnog sadržaja vlage i , u manjoj meri, koeficijent paropropustljivosti materijala. Paropropustljivost utiče na fluktuaciju amplitude sadržaja vlage u materijalu između leta i zime. Što je veća paropropustljivost, veća je i i amplituda.

Za srednje i severne delove Sovjetskog Saveza, intenzitet promene sadržaja vlage u betonskim zidovima pri kvazistacionarnim uslovima, odgovara uglavnom u zimskim uslovima sadržaju



Slika 3. Predviđene varijacije eksploatacionog sadržaja vlage u lakoagregatnom betonu gustine 900 kg/m^3 zida stambene zgrade u Norilsku

- 1, 5 - korišćenje izoterma preliminarne sorpcije
- 2, 4 - korišćena izoterma naknade (druge) sorpcije
- 3 - korišćen koeficijent provodjenja vlage izmeren nestacionarnom metodom
- 1, 2, 3 - početni period korišćenja zgrade
- 4, 5 - kvazistacionaran period korišćenja zgrade

Vrednosti:

- 7,4 - maksimalni sadržaj apsorbovane vlage u lakoagregatnom betonu
- 5,3 - sadržaj apsorbovane vlage u betonu pri 90% relativne vlažnosti, na osnovu izoterme preliminarne sorpcije
- 6,2 - sadržaj apsorbovane vlage u betonu pri 90% relativne vlažnosti, na osnovu izoterme naknadne sorpcije.

vlage koji odgovara izoterma sorpcije pri 80-90% relativne vlažnosti. Ovo je u saglasnosti sa 80% relativne vlažnosti, što je dato u radu [3]. Ako se u proračunima uzmu izoterme desorpcije, onda je sadržaj vlage u betonu u kvazistacionarnim uslovima veći u poredjenju sa vrednostima dobijenim na osnovu preliminarne izoterme sorpcije.

Kao što se vidi sa slike 3, za vreme prve zime korišćenja zgrade, sadržaj vlage u zidu je oko 13 težinskih procenata, što je za 7 (apsolutinih) težinskih procenata iznad uobičajenog sadržaja vlage pri kvazistacionarnim uslovima. Zbog toga je otpor provodjenju toplote u tom periodu za oko 25% niži nego u kvazistacionarnom režimu (pretpostavljajući da se provdjenje toplote povećava za 4% za svaki težinski procenat sadržaja vlage u odnosu na materijal osušen u peći). U kvazistacionarnim uslovima sadržaj vlage u lakoagregatnom betonu ("azerit" - vrsta agregata koja

podseća na ekspandiranu šljaku) je zimi oko 4,5 težinskih procenata, ako se u proračunu usvoji izoterma preliminarnе sorpcije, odnosno 6% ako se računa sa izotermom naknadne sorpcije. U drugom slučaju, procenjeni eksploatacioni koeficijent provodjenja toplote betona je za 5% veći, jer je otpor provodjenju toplote niži nego u prvom slučaju.

Korišćenje izoterme desorpcije i naknadne sorpcije povećava na određeni način primenljivost proračuna, mada treba imati u vidu da proračunom predviđene vrednosti mogu odstupati od mogućih vrednosti na objektu, s obzirom da su one određene za srednje vrednosti parametara gradjevinskih konstrukcija od betona.

Zaključak

Može se zaključiti da je preciznost merenja koeficijenta prenosa vlage važna za predviđanje trajanja perioda isušivanja, ali je skoro bez značaja za određivanje sadržaja vlage u zidu tokom godine. Za precizno određivanje ove druge veličine važna je izoterma ravnotežnog stanja vlage. Pri projektovanju panela od betona treba računati sa sadržajem vlage koji odgovara izotermi ravnotežnog stanja pri 90% relativne vlažnosti. Koeficijent provodjenja toplote treba da odgovara ovom sadržaju vlage u zidu. Rezultati proračuna pokazuju da u početnom periodu eksploatacije zgrade, otpor provodjenju toplote kroz zidove od lakoagregatnog betona može da ima značajno niže vrednosti od projektnih.

Korišćene oznake

- G - gustina fluksa vlage ($\text{kg/m}^2\text{h}$),
- P_s - pritisak zasićenja vodene pare (Pa),
- R - otpor propustljivosti pare ($\text{m}^2\text{h Pa/kg}$),
- t - temperatura ($^{\circ}\text{C}$),
- x - dužinska koordinata (m),
- β - koeficijent provodjenja vlage (kg/m h),
- γ - gustina materijala (kg/m^3),
- φ - relativna vlažnost vazduha u porama materijala ili vazduha sa bilo koje strane konstrukcije (delovi jedinice ili %),
- τ - vreme (h),
- μ - koeficijent propustljivosti pare (paropropustljivost permeabilitet) (kg/mh Pa),
- θ - sadržaj vlage u materijalu (kg/kg , ili %).

I n d e k s i

- e - spoljašnji,
- i - unutrašnji,
- si - unutrašnja površina,
- se - spoljašnja površina.

Literatura

- |1| VALORE, R.C., Jr: Calculation of U-values of Hollow Concrete Masonary - Concrete International, No 2, 1980., pp 40-63
- |2| KUNG Lo-shu, SU Man-ging, Shi Xing-sheng and Li Yun-xiu: Research on several physico-mechanical properties of lightweight aggregate concrete. The International Journal of Lightweight, Concrete, Vol. 2, No. 4, 1980, p. 185-191
- |3| KÜNZEL, H.: Wie ist der Feuchteinfluss auf die Wärmeleit-fähigkeit von Baustoffen unter heutigen Bedingungen zu bewerten? Bauphysik, 11, H. 5, 1989, S. 185-189
- |4| KRISCHER, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs-technik, Springen Verlag, 1956.
- |5| KRUS, M., KIESSL, K.: Kapillartransportkoeffizienten von Baustoffen aus NMR-Messungen. IBP-Mitteilung, 16 (1989), Nr. 175.
- |6| GAGARIN, V.G., MOGUTOV, V.A.: Unsteady movement of fluid in building materials. Proceedings of the ICHMT symposium - "Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structure", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990, p. 43-62.
- |7| FELDMAN, R.F., SEREDA, P.J.: A new model for hydrated Portland cement and its practical implications. Engineering Journal, 1970, v. 53, N. 8-9, p. 53-59.