МЕРЕЊЕ ЕФИКАСНОСТГИ ТОПЛОТНЕ ИЗОЛАЦИЈЕ ЗГРАДА МЕТОДОМ ТОПЛОТНИХ ФЛУКСМЕТАРА

MEASUREMENT OF BUILDING THERMAL INSULATION EFFICIENCY BY THE HEAT FLOW METER METHOD

Мирјана Дрпић, дипл. инж., и Зоран Лазаревић, дипл. инж.,
Институт ИМС, Београд

Мерење отпора топлотном протоку или коефицијента пролаза топлоте методом топлотних флуксметара in situ подесан је за већину грађевинских конструкција. Овај метод подразумева да се отпор топлотном протоку може одредити дељењем средње густине топлотног протока кроз грађевинску конструкцију средњом разликом температуре.

За анализу података могу се користити два метода: тзв. метод средњих вредности, који је једноставан, или динамички метод, који је софистициранији и може да скрати трајање теста за средње тешке (до тешких) грађевинске конструкције, узимајући у обзир променљиве унутрашње и спољашње температуре.

Прорачун фактора топлотног капацитета (ефекат топлотне акумулације) представља корекциони поступак, који често омогућава краће време мерења.

Measurement of the thermal resistance or thermal transmittance by the heat flow meter method in situ is suitable for the most building constructions. This method assumes that the thermal resistance can be obtained by dividing the mean density of heat flow rate across the building construction by the mean temperature difference.

Two methods may be used for analysis of the data. The so-called average method, which is simple, or the dynamic method, which is more sophisticated and taking into consideration the variable indoor and outdoor temperatures, may shorten duration of the test for medium to heavy building constructions.

Calculation of the thermal mass factors (storage thermal effect) presents the correction procedure that often permits a shorter measurement time.

Кључне речи: топлотна изолација; мерење; мерне методе

Key words: thermal insulation; measurement; measuring method

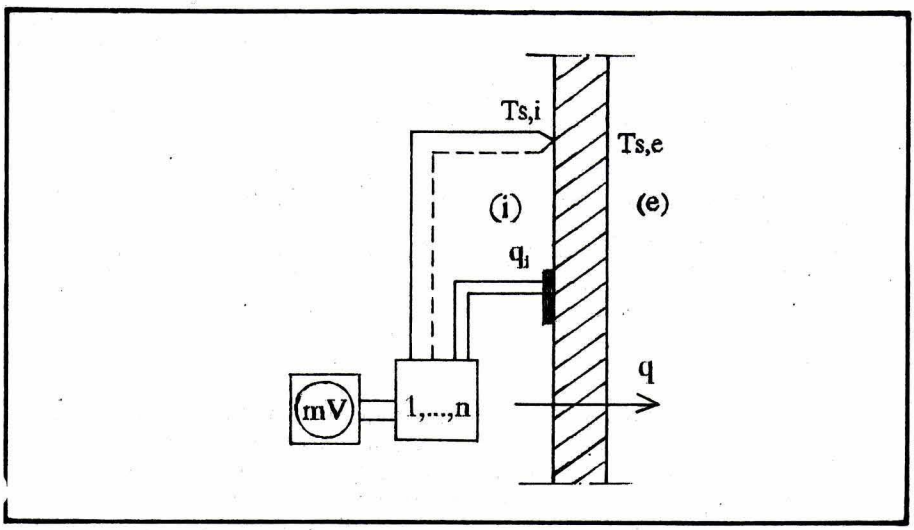
1. Увод

Топлотна заштита зграда обухвата најразличитије мере које имају за циљ смањење пролаза топлоте кроз спољни омотач објекта и кроз преградне конструкције између просторија различитих температура. На тај начин се обезбеђује низ техничких и хигијенских услова, као и мања потребна енергија за грејање и (или) хлађење објекта. Топлотна изолација зграде одређује трансмисиони топлотни губитак (добитак) и представља значајан део топлотне заштите.

Класичан метод мерења ефикасности топлотне изолације помоћу топлотних флуксметара и данас је незамењив за проверу на већ изграђеним објектима (мерење на објекту). Проблем аквизиције и обраде великог броја величина и параметара у реалним условима квазистационарног топлотног стања, успешно се решава одговарајућим мерним методима и аналитичким поступцима. Резултат је метод мерења високе поузданости, а циљ приближавање техничко-економским оптималним решењима топлотне изолације.

2. Основни принцип мерења

Метод мерења топлотног флукса помоћу топлотних флуксметара заснива се на постављању топлотног флуксметра познате топлотне проводљивости на мерну преграду кроз коју пролази непознати топлотни флукс. Пошто исти топлотни флукс пролази и кроз мерну преграду и кроз топлотни флускметар, а он је пропорционалан градијенту температуре, до вредности непознатог (мереног) топлотног флукса кроз мерну преграду долази се мерењем градијента температуре кроз флуксметар. Мерењем површинских температура (унутрашњих и спољашњих) мерне преграде одређује се одговарајућа разлика температура. На крају, одређује се отпор топлотном протоку R [m^2K/W] мерне преграде. Уколико се мере разлике температура ваздуха, или уколико се знају вредности коефицијента прелаза топлоте (унутрашњег, R_{si} и спољашњег, R_{se}), могуће је одредити коефицијент пролаза топлоте к [$W/(m^2K)$]. На слици 1 је шематски приказ принципа мерења.



Слика 1. Метод помоћног зида – шематски приказ

Користе се ознаке и величине, као и изведене (израчунате) величине према таблици 1.

Таблица 1. Ознаке, величине и јединице

Основне величине			Изведене величине
Ознака	Величина	Јединица	Отпор топлотном протоку: $R = (T_{si} - T_{se})/q$ [m^2K/W].Коефицијент пролаза топлоте: $k = q/(T_i - T_e)$ или $k = (R_{si} + R + R_{se})^{-1}$ [$W/(m^2K)$]
Φ	топлотни флукс	[W]	
A	површина	[m^2]	
$q = \Phi/A$	густина топлотног флукса	[W/m^2]	
T_i	температура унутрашњег ваздуха	[°C; K]	
T_e	температура спољашњег ваздуха	[°C; K]	
T_{si}	температура унутрашње површине	[°C; K]	
T_{se}	температура спољашње површине	[°C; K]	
Корекционе величине			Изведене величине
ρ	густина материјала	[kg/m^3]	Кориговане вредности:
d	дебљина слоја	[m]	
c	специфична топлота	[J/(kgK)]	
$C = \rho cd$	топлотни капацитет слоја	[$J/(m^2K)$]	q_{cor}
F_i, F_e	фактори топлотног капацитета	[$J/(m^2K)$]	R_{cor}; k_{cor}

2.1. Мерна опрема

Мерна опрема садржи:

– сензоре топлотног флукса – топлотне флуксметре,

– сензоре температуре,

– регистрационе и мерне инструменте.

Избор и распоред сензора врши се тако да се узму у обзир, у одговарајућој сразмери, све термичке нехомогености мерне преграде, тако да се обезбеди резултат који је репрезентативан за целу мерну преграду.

а) Топлотни флуксметри

Топлотни флуксметар је претварач који даје електрични сигнал као директну функцију густине топлотног протока кроз мерну преграду. Потребно је обезбедити:

– ниску термичку отпорност флуксметра;

– довољно високу осетљивост;

– сигнал који представља монотону функцију густине топлотног протока.

Топлотни флускметри се периодично калибришу. Константа калибрације треба да одговара релативним условима у погледу: температуре, врсте материјала (подлоге), као и вредности топлотног флукса.

б) Сензори температуре

Температурни сензори са претварачима дају електрични сигнал који је монотона функција одговарајуће температуре (мерне преграде, или околине). Примењују се:

– танки термопарови,

– равни отпорнички термометри,

– температурни сензори са заштитом од сунчевог и топлотног зрачења, са вентиациојом (за мерење температуре околине).

в) Регистрациони и мерни инструменти

Користе се регистрациони и мерни инструменти високе осетљивости и тачности (посебно при примени динамичког метода мерења).

Електрични сигнали са сензора се континуално региструју у одређеним временским интервалима, 24-часовним периодима. Максимални временски интервал између два мерења и минимално трајање испитивања зависе од:

– природе елемента (тежак, лак, са унутрашњом изолацијом, са спољашњом изолацијом);

– температуре (разлике температура) ваздуха-унутрашњег и спољашњег (просечна вредност и флуктуације);

– примењеног метода мерења.

Минимално трајање аквизиције података износи 72 h (3 дана), а у неким случајевима прелази 7 дана.

Интервал мерења у просеку износи 0,5 до 1,0 h при примени метода средњих вредности, а испод 0,5 у случају динамичког метода.

3. Метод мерења

Када се говори о мерењу ефикасности топлотне изолације зграда методом топлотних флуксметара, могу се користити два метода за анализу података – метод средњих вредности и динамички метод. Метод средњих вредности је у суштини једноставан, али захтева испуњење одређених термичких услова.

Динамички метод је софистициранији и омогућава скраћење трајања испитивања, нарочито средње тешких и тешких елемената, и мерења у случају значајних промена (колебања) унутрашње и спољашње температуре.

3.1. Метод средњих вредности

Метод средњих вредности подразумева да се величине R, односно к, добијају из средњих густина топлотног флукса и средњих разлика температура. Релацијама (1) и (2) одређене су вредности мерених величина: отпора

топлотном протоку, односно коефицијента пролаза топлоте мерне преграде.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left(T_{Sij} - T_{Sej}\right)}{\sum_{j=1}^{n} q_j} \quad (1) \qquad k = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} \left(T_{ij} - T_{ej}\right)} \quad (2)$$

(j је индекс појединачног мерења од укупно n мерења).

Метод средњих вредности даје довољно тачне податке, уколико је испуњено неколико услова:

– топлотни садржај мерне преграде је исти на крају као и на почетку мерења (исте температуре и иста расподела влажности у мерној прегради);

– топлотни флуксметри нису изложени директном сунчевом зрачењу;

– топлотна проводљивост мерне преграде (тј. појединих слојева) је константна за време испитивања.

При испитивању лаких грађевинских конструкција, ублажавање ефекта сунчевог зрачења могуће је постићи уколико се релевантни период мерења ограничи на ноћни период.

3.1.1. Побољшање метода средњих вредности

Побољшање метода средњих вредности постиже се уважавањем ефекта акумулације топлоте. Овај ефекат је посебно значајан у случају грађевинских конструкција великих вредности отпора топлотном протоку и великог топлотног капацитета (термичке масе). Израчунавају се фактори топлотног капацитета – унутрашњи (F_i) и спољашњи (F_e).

За грађевинску конструкцију са N слојева (слој 1 – унутрашњи, слој N – спољашњи) израчунавају се отпори топлотном протоку и топлотни капацитет за m-ти слој конструкције, R_m и C_m. Збирни отпори топлотном протоку (унутрашњи и спољашњи) до m-тог слоја износе:

$$R_{i,m} = \sum_{j=1}^{m-1} R_j \quad (3) \qquad R_{e,m} = \sum_{j=m+1}^{N} R_j \quad (4)$$

Фактори топлотног капацитета (спољашњи и унутрашњи) m-тог слоја тада износе:

$$F_{e,m} = C_m \cdot \left\{ \frac{R_m}{R} \left[\frac{1}{6} + \frac{R_{i,m} + R_{e,m}}{3R} \right] + \frac{R_{i,m} \cdot R_{e,m}}{R^2} \right\} \quad (5)$$

$$F_{i,m} = C_m \cdot \left(\frac{R_{e,m}}{R} + \frac{R_m^2}{3R^2} - \frac{R_{i,m} \cdot R_{e,m}}{R^2} \right) \quad (6)$$

где је R [m^2K/W] укупан отпор топлотном протоку мерне преграде са N слојева.

На крају, израчунавају се фактори топлотног капацитета (унутрашњи и спољашњи) за мерну преграду:

$$F_i = \sum_{m=1}^{N} F_{i,m} \quad (7) \qquad F_e = \sum_{m=1}^{N} F_{e,m} \quad (8)$$

Коригована вредност густине топлотног протока (топлотног флукса) тада износи:

$$q_{cor} = \sum_{j=1}^{n} q_1 - \frac{\left(F_t \cdot \delta T_t + F_e \cdot \delta T_e\right)}{\Delta t} \quad (9)$$

где је Δt [s] временски интервал између појединачних очитавања, а αT_i [K] разлика између унутрашње просечне температуре за 24 h пре j-тог очитавања и унутрашње просечне температуре за прва 24 h релевантног мерног периода; αT_e [K] је разлика између спољашње просечне температуре за 24 h пре j-тог очитавања и спољашње просечне температуре за прва 24 h релевантног мерног периода.

Кориговане вредности отпора топлотном протоку, односно коефицијенту пролаза топлоте, изражене су следећим изразима:

$$R_{cor} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left(T_{Sij} - T_{Sej}\right)}{q_{cor}} \quad (10) \qquad k_{cor} = \left(R_{Si} + R_{cor} + R_{Se}\right)^{-1} \quad (11)$$

3.2. Динамички метод

Динамички метод може да се користи у циљу добијања стационарних карактеристика мерне преграде, чак и у случајевима када се дешавају велике промене (варијације) у температурама и топлотним флуксевима. Варијације се решавају коришћењем једначине топлотног биланса.

Мерна преграда се представља у моделу помоћу коефицијента пролаза топлоте, к [$W/(m^2K)$], и неколико временских константи τ [s]. Непознати параметри (к, τ_1, τ_2,...) се добијају идентификационом техником, користећи измерене густине топлотног протока и температуре. Са овим прилазом, резултат се добија решавањем скупа линеарних једначина.

4. Нека практична искуства

Мерење топлотне изолације методом топлотних флуксметара врши се на различитим грађевинским конструкцијама, као што су:

– фасадни зидови;

– преградни зидови;

– таванице (међуспратне, изнад отвореног пролаза, изнад подрума, према тавану);

– кровови,

као и на местима термичких нехомогености – на топлотним мостовима (спојеви панела, ивице, еркери, стубови и сл.). Могућности исправног пројектовања топлотне заштите су ограничене у оквиру постојеће техничке регулативе, па је провера мерењем на објекту најпоузданији путоказ за будућа решења, или санацију.

Ова мерења се изводе на новим – неусељеним објектима, као и на усељеним објектима и објектима у реконструкцији. Изведено стање се често разликује од пројектованог решења. Узрок може да буде грешка у пројектовању и (или) извођењу. Оваквим мерењима се утврђују и нивои смањених ефеката топлотних изолација услед погоршавања топлотноизолационих својстава материјала, која су настала због прекомерног засићења влагом различитог порекла (провлаживања услед процуривања, кондензације водене паре, капиларног упијања и сл.).

У комбинацији са инфрацрвеном методом снимања термичких нехомогености у омотачу објекта, мерење ефикасности топлотне изолације на објекту омогућава да се одреди стварни ниво изолације на критичним местима.

Најтачнија мерења изводе се у периодима године када су дневне осцилације температуре ниже – јесен, зима, пролеће. Тада се постижу значајне температурне разлике између унутрашње (догревање ваздуха у просторији) и спољашње стране мерне преграде. Успостављено квазистационарно топлотно стање у тим условима представљено је правилним колебањима температуре и топлотног флукса (идеализоване криве одговарају синусоидалним променама у времену).

Поред уобичајених показатеља – измерене вредности отпора топлотном протоку (или коефицијента пролаза топлоте) мерене преграде, ова мерења омогућавају и утврђивање карактеристика топлотне стабилности мерене преграде у летњем периоду, одређених фактором пригушења амплитуде осцилација температуре ν [-], или фазним померајем η [h].

Избор мерних преграда се првенствено ограничава на неосунчану (северну) страну објекта. Поред тога, мерна опрема постављена са спољне стране додатно се штити различитим заклонима (екранима).

3. Закључак

Мерење топлотне изолације на објекту представља незаобилазан пут одређивања трансмисионих топлотних губитака објекта. Метод мерења помоћу топлотних флуксметара омогућава мерење на најразличитијим грађевинским конструкцијама и деловима конструкција. Побољшањем метода у смислу квалитетније аквизиције и обраде података, као и узимањем у обзир различитих корекционих фактора, повећава се поузданост мерења и постиже висока тачност.

Литература

[1] **Dubin, S., Fred; Long, G., Chalmers:** *Energy Conservation Standards*. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1978.

[2] **Cammerer, S., J.:** *Der Waerme-und Kaelteschutz in der Industrie*, Springer-Verlag, Berlin, 1962.

[3] *** * *:** ISO 9869: *Thermal insulation – Building elements – In-situ measurements of thermal resistance and thermal transmittance* (1994)

[4] *** * *:** ЈУС У.Ј5 – Група стандарда из области топлотне технике у грађевинарству

[5] **ISO 6781:** *Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method* (1983).