



Получена: 10.10.2022 г.

Приета: 04.11.2022 г.

КОЛИЧЕСТВЕН АНАЛИЗ ЧРЕЗ ТЕРМОГРАФСКИ СНИМКИ НА ИЗПЪЛНЕНОТО ТОПЛОИЗОЛИРАНЕ НА ОГРАЖДАЩА КОНСТРУКЦИЯ

Л. Чобанова¹, Пл. Чобанов²

Ключови думи: топлинни характеристики, инфрачервена термография, топлинни потоци, температурни разлики, саниране

РЕЗЮМЕ

Огромният съществуващ сграден фонд и необходимостта от осигуряване на енергийна ефективност на сградите налагат все по-сериозни изисквания към ограждащите конструкции. Това е възможно само при добро познаване на използваните материали и техните топлотехнически свойства, за да се намали използваната енергия за отопление и охлаждане. Методът на заснемане с инфрачервена термография (Infrared Thermography) може да бъде важен инструмент при оценката и изследването на заснетата външна обвивка на сградите.

Заснетата с инфрачервена (IR) фотография сграда се подлага на анализ, което подпомага числената проверка на топлоизолационните свойства на ограждащата я конструкция. Така термографските изображения се използват не само за качествен анализ, но и за количествено определяне на топлотехнически характеристики на заснетите фасадни елементи. Целта на настоящата статия е да покаже как получените параметри (площи, температури, топлинни потоци) дават допълнителни възможности за числено изследване, оценка и контрол на изпълненото топлоизолиране.

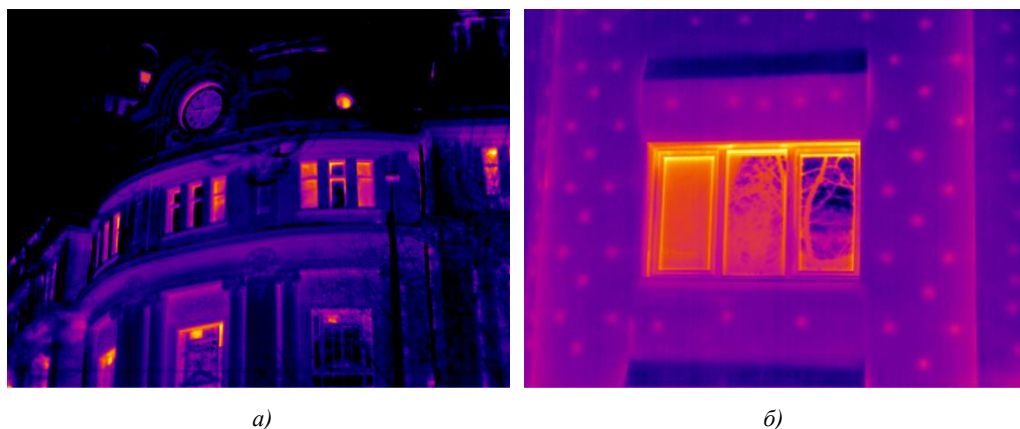
¹ Лидия Чобанова, докт. арх., кат. „Технология на архитектурата”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: L.Chobanova_far@uacg.bg

² Пламен Чобанов, проф. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: Chobanov_fce@uacg.bg

1. Въведение

Сградите в цял свят консумират приблизително една трета от общите първични енергийни ресурси. Около 50% от разходите за постигане на топлинен комфорт [1] в едно жилище или сграда са за отопление, охлаждане или вентилация. Това са най-големите контролируеми разходи в бюджета на всяка една сграда. Сред критериите, касаещи намаляването на потреблението на енергия в жилищата, е изборът на правилни материали за изолиране на сградната обвивка.

Инфрарчервената термография представлява заснемане на електромагнитно излъчване в спектъра между $7,5 \div 14 \mu\text{m}$. Това е неразрушителен и ефективен метод за визуализация на топлинните вълни, излъчвани или отразявани от заобикалящата ни среда. Термографските снимки позволяват да се извърши бърз качествен анализ на къщи, жилища и сгради за наличието на температурни аномалии, свързани с топлофизически проблеми след тяхното изграждане или саниране – вж. фиг. 1.



Фиг. 1. Термографски снимки на сгради в гр. София без и с топлоизолирана фасада:
а) Министерство на земеделието; б) Саниран жилищен блок

Настоящата статия има за цел да покаже как заснетата с инфрарчервена (IR) фотография сграда може да се подложи на количествен анализ за проверка на топлоизолационните свойства на ограждащата я конструкция. При наличие на подходящ софтуер това може да бъде лесен способ за проверка, доколко сградната обвивка отговаря на съвременните нормативни изисквания за топлосъхранение и за ограничаване на топлинните загуби. Вследствие на този анализ е възможно да се предприемат допълнителни мерки за намаляване на енергопотреблението в сградата.

2. Предмет на изследването

Съществуващите сгради у нас (стари, нови и санирани) са реализирани с различни по вид ограждащи конструкции, като се започне от зидария с класически тухли (всички видове), блокове, стоманобетонни панели и се стигне до съвременните панели и окачени фасади. Поради тази разнообразност на видовете фасади и материалите за изграждането на външната им обвивка съществуват различни критерии за анализиране на състоянието им. Методът, приложен в настоящата статия, се базира на заснемане на сгради с инфра-

червена термография за определяне на качеството на изпълнената фасадна обвивка. За целта на този анализ разглеждаме съществуващ изграден обект.

Избраният обект е сегмент от сградата на Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), гр. София (вж. фиг. 2). Методиката използва налични термографски снимки, за да се даде **количествен** отговор на въпроса за качеството на изпълнението на ограждащата конструкция (вж. фиг. 3).



Фиг. 2. Южна фасада на УАСГ, гр. София – вечерна фотография във видима светлина

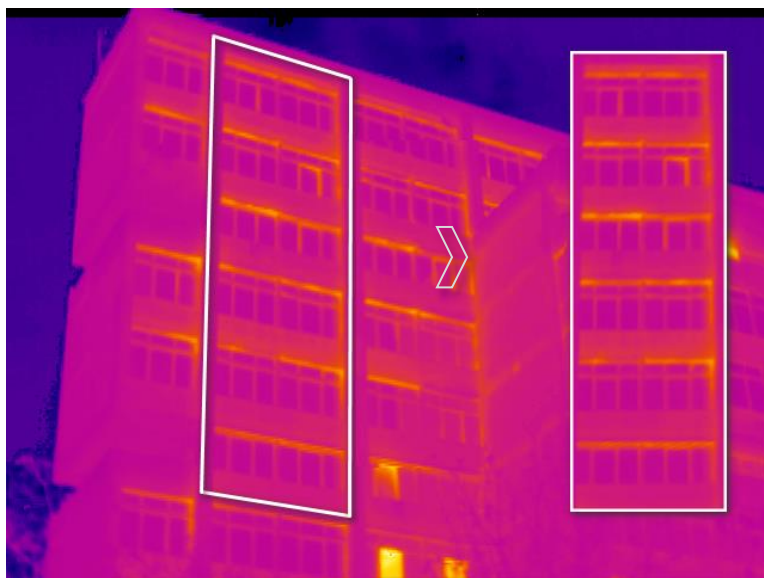


Фиг. 3. Южна фасада на УАСГ, гр. София – вечерна инфрачервена термография

Анализът на топлинните потоци е извършен за сегмент от фасадата с 6 етажа (вж. фиг. 4), при следните предпоставки, посочени в табл. 1.

Таблица 1. Параметри за количествен анализ

Размери, условия и предпоставки	Числени стойности
Размери на сегмента от фасадата	$F_h = 6,3$ m (ширина), $F_v = 18,0$ m (височина)
Площ на сегмента от фасадата	$A = F_h \cdot F_v = 113,4$ m ² (1 134 000 cm ²)
Температура на вътрешния въздух	$\theta_i = +25$ °C
Температура на външния въздух	$\theta_e = -7$ °C
Температурна разлика между вътрешен и външен въздух	$\Delta\theta = 32$ K
Съпротивление при топлопредаване за вътрешна повърхност	$R_{si} = 0,13$ (m ² ·K)/W
Съпротивление при топлопредаване за външна повърхност	$R_{se} = 0,04$ (m ² ·K)/W
Прозорци – нормативен коефициент на топлопреминаване	$U_{np} = 1,40$ W/(m ² ·K), $R_{np} = 1/U_{np} = 0,714$ (m ² ·K)/W
Стени – нормативен коефициент на топлопреминаване	$U_{ct} = 0,28$ W/(m ² ·K), $R_{ct} = 1/U_{ct} = 3,571$ (m ² ·K)/W
Размери на снимката към работния сегмент	$I_h = 160$ px (ширина), $I_v = 480$ px (височина)
Общ брой пиксели на снимката	$P = I_h \cdot I_v = 76\ 800$ px
Площ на един пиксел	$A_p = A/P = 1\ 134\ 000/76\ 800 = 14,8$ cm ² /px



Фиг. 4. Южна фасада на УАСГ, гр. София – избран работен сегмент

3. Анализ

3.1. Анализ на температурите и топлинните потоци според Наредба № 7 [2]

3.1.1. Прозорци – числов анализ

Съгласно BDS EN ISO 6946:2008 [3] съпротивлението на топлопреминаване за прозорци се определя с помощта на форм. (1):

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{U_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

където $R_{\text{пр}}$ е съпротивление на топлопреминаване на прозорец в $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;

$U_{\text{пр}}$ – коефициент на топлопреминаване за прозорец, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

От $U_{\text{пр}} = 1,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ следва, че $R_{\text{пр}} = 0,714 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$. Количеството топлина за ограждащ елемент се определя с помощта на форм. (2) [4]:

$$Q_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} \Delta \theta, \quad (2)$$

където $Q_{\text{пр}}$ е количеството топлина за ограждащ елемент в W/m^2 ;

$\Delta \theta$ – температурна разлика на въздуха, K .

При температурна разлика на въздуха $\Delta \theta = 32 \text{ K}$, съгласно методика, описана в [1], се получава $Q_{\text{пр}} = 44,8 \text{ W}/\text{m}^2$:

- $\Delta t_i = 5,8 \text{ }^\circ\text{C}$, където Δt_i е изчислената (вж. табл. 1) температурна разлика между вътрешния въздух и вътрешната повърхност на прозореца;
- $\Delta t = 24,4 \text{ }^\circ\text{C}$, където Δt е изчислената (вж. табл. 1) температурна разлика между външни и вътрешни повърхности на дограмата;
- $\Delta t_e = 1,8 \text{ }^\circ\text{C}$, където Δt_e е изчислената (вж. табл. 1) температурна разлика между външния въздух и външната повърхност на прозореца.

Изчислената температура по външната повърхност на прозореца е $T_e = \theta_e + \Delta t_e = -5,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Площта на прозорците за разглеждания сегмент е равна на производението от броя на етажите по броя на прозорците на етаж, по площта на един прозорец (хоризонтален по вертикален размер) $A_{\text{пр}} = 6_{\text{ет}} \cdot 2_{\text{бр}} \cdot 3_h \cdot 1,9_v = 68,4 \text{ m}^2$.

3.1.2. Стени – числов анализ

Съгласно BDS EN ISO 6946:2008 [3] съпротивлението на топлопреминаване на стените се определя с помощта на форм. (3):

$$R_{\text{ст}} = \frac{1}{U_{\text{ст}}}, \quad (3)$$

където $R_{\text{ст}}$ е съпротивление на топлопреминаване на стена в $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;

$U_{\text{ст}}$ – коефициент на топлопреминаване за стената, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

От $U_{\text{ст}} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ следва, че $R_{\text{ст}} = 3,571 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$. Количеството топлина за ограждащ елемент се определя с помощта на форм. (4) [4]:

$$Q_{\text{ст}} = U_{\text{ст}} \Delta \theta, \quad (4)$$

където $Q_{\text{ст}}$ е количеството топлина за стена в W/m^2 ;

$\Delta \theta$ – разлика в температурите на вътрешния и външния въздух, K.

При температурна разлика на въздуха $\Delta \theta = 32 \text{ K}$, съгласно методика, описана в [1], се получава $Q_{\text{ст}} = 9,0 \text{ W}/\text{m}^2$:

- $\Delta t_i = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$, където Δt_i е изчислената (вж. табл. 1) температурна разлика между вътрешен въздух и вътрешната повърхност на стената;
- $\Delta t = 30,5 \text{ }^\circ\text{C}$, където Δt е изчислената (вж. табл. 1) температурна разлика между външни и вътрешни повърхности на ограждащата конструкция;
- $\Delta t_e = 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, където Δt_e е изчислената (вж. табл. 1) температурна разлика между външен въздух и външна повърхност на стената.

Изчислената температура по външната повърхност на стена е $T_e = \theta_e + \Delta t_e = -6,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Площа на стените за разглеждания сегмент е равна на общата площ, без тази на прозорците $A_{\text{ст}} = A - A_{\text{пр}} = 45,0 \text{ m}^2$.

3.1.3. Общ числов анализ за сегмента (прозорци и стени)

За преминалото общо количество топлина за един час за разглеждания сегмент от фасада се получава $Q = Q_{\text{пр}} \cdot A_{\text{пр}} + Q_{\text{ст}} \cdot A_{\text{ст}} = 3467,5 \text{ W}$. Следователно, ако са изпълнени нормативните изисквания за ограждащата конструкция, разглежданият сегмент с площ от $113,4 \text{ m}^2$ ще губи **3,5 kW** топлина за час.

3.2. Анализ на температурите и топлинните потоци по термографска (IR) снимка с помощта на софтуер

3.2.1. Кратки сведения за софтуера PLCh Thermography

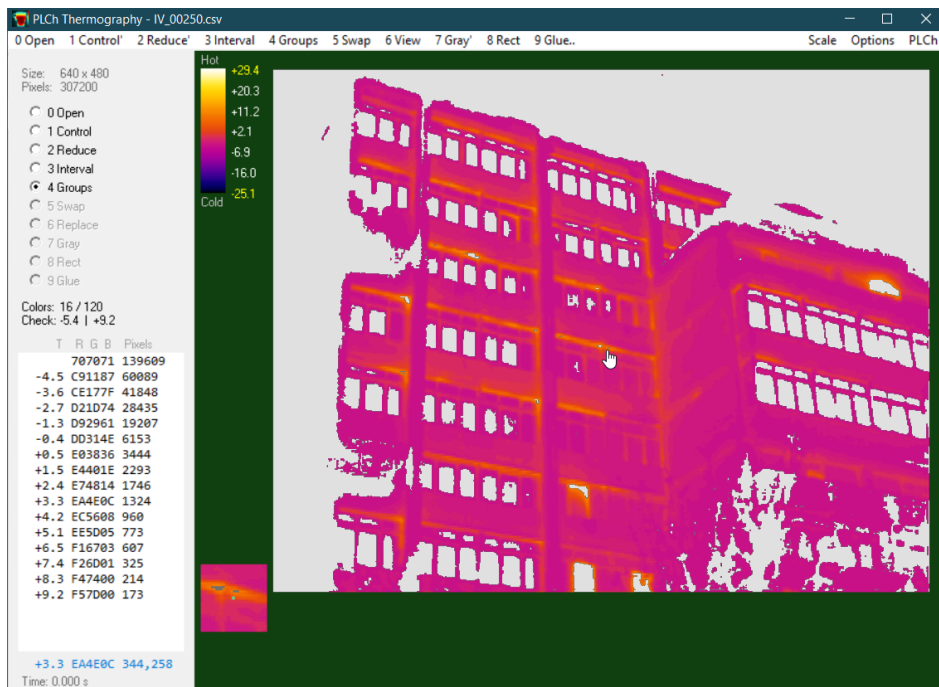
PLCh Thermography е софтуер на автора², обработващ и изчисляващ термографски снимки (вж. фиг. 5). Той дава възможности за групиране и изчисляване на топлинните потоци за зони от повърхността с еднаква или близка температура. За обособените сегменти се определят площите им в m^2 и количеството топлина, преминаваща през тях в kW.

С помощта на разработения софтуер се реализира топлотехнически анализ за сегмент от фасада, за който е направена термографска снимка.

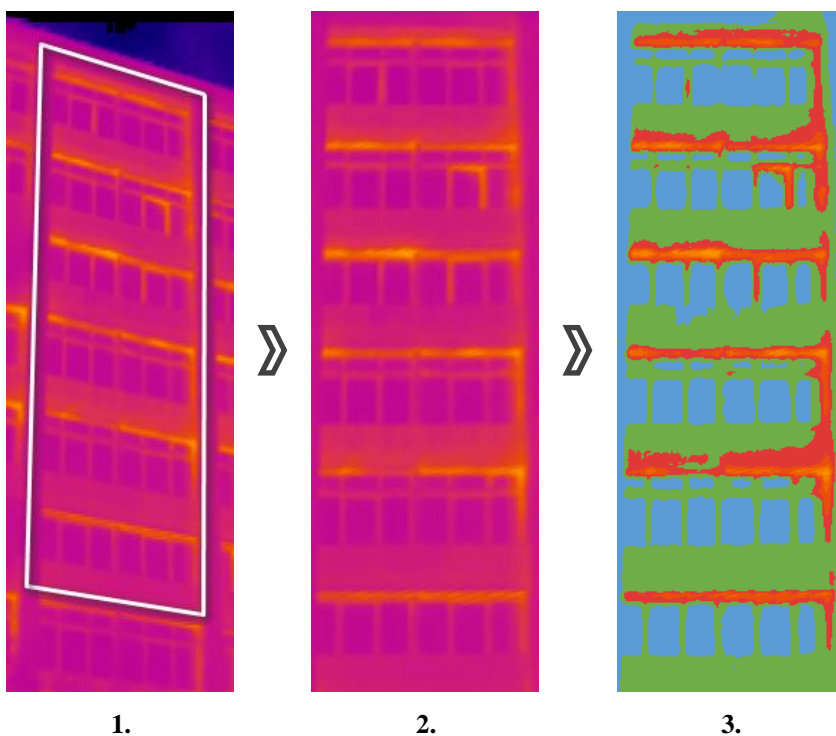
3.2.2. Изчисления със софтуера

Като първа стъпка към изчисленията се изрязва (вж. фиг. 4 и фиг. 6-1) избраната част от фасадата, която ще се анализира. На снимката тя е с перспективни деформации. Те се коригират с трансформиране на избраната зона (с размери I_h (височина) = 160 px, I_v (широчина) = 480 px) в правоъгълна такава (вж. фиг. 6-2). Реалните геометрични размери на тази зона от снимката са $F_h = 6,3$, $F_v = 18,0 \text{ m}$. Следователно на един пиксел в случая отговаря площ $A_p = 14,8 \text{ cm}^2/\text{px}$.

Цветовете на термографската снимка отразяват температурите по външната повърхност на сградата. Те се групират в характерни зони, като техният брой се свежда до „разумно“ и удобно за работа число, в този случай 7 (вж. фиг. 6-3).



Фиг. 5. Екран от софтуера PLCh Thermography



Фиг. 6. Обработка на избрания работен сегмент от фасада

Получените резултати и изчислените топлинни потоци са дадени в табл. 2.

Таблица 2. Резултати и топлинни потоци

PLCh Thermography						
t_e , °C	Pixels, px	A_i , cm ²	Δt_e , K	Q , W/m ²	Q , W	фиг. 6, 7
-2,2	36680	541603	4,8	120,0	6499,2	(а)
-5,4	27726	409392	1,6	40,0	1637,6	(б)
0,5	7915	116870	7,5	187,5	2191,3	(в)
3,3	3127	46172	10,3	257,5	1188,9	
6,0	962	14205	13,0	325,0	461,6	
9,2	336	4961	16,2	405,0	200,9	
12,0	54	797	19,0	475,0	37,9	
	76800	1134000			12217,5	12,2 kW



(а)



(б)



(в)

Фиг. 7. Зони с близка температура

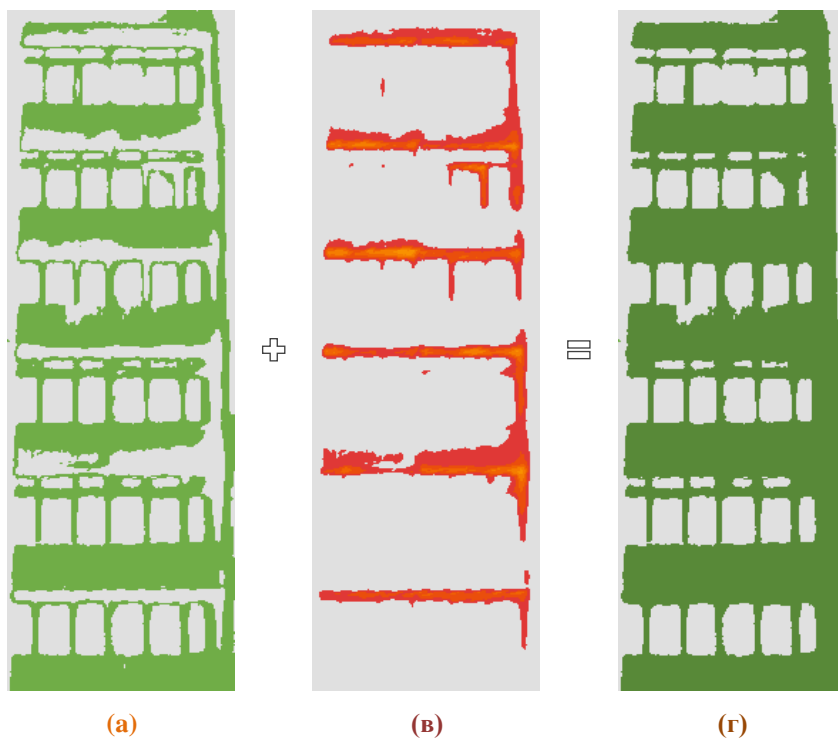
Изчисленото количество топлина, получено от анализа на термографската снимка, възлиза на **12,2 kW** за час (вж. табл. 2). Следователно действителната загуба на топлина надвишава около **3,5** пъти тази, изчислена по референтни стойности в Наредба № 7 – вж. т. 3.1.3.

Ако се сравнят отчетените от термографската снимка температури по външната повърхност с очакваните (получени чрез изчисление), се вижда какво е топлофизичното поведение на съответните зони в действителност.

За прозорците получената по норми температура по външната им повърхност е $T_e = -5,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (вж. т. 3.1.1), докато при термографската снимка на фиг. 7(б) се отчита $T_e = -5,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (вж. табл. 2). Това близко съвпадение дава основание да се смята, че стъкло-пакетът изпълнява добре своята функция и е с нормативни характеристики.

Не така стои въпросът със стените. Очакваната (по нормативни изчисления) температура по външната повърхност на стената е $T_e = -6,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (вж. т. 3.1.2), при термографската снимка на фиг. 7(а) се отчита $T_e = -2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (вж. табл. 2). Това убедително доказва, че стените не притежават заложените в съвременните нормативни документи топлофизични характеристики.

Интересно е да се анализира и приносът на топлинните мостове и дефектите при изпълнението, които са видими върху термографската снимка. За тази цел се приема, че зоните на топлинните мостове са с температура като тази на стените, т.е. (а) + (в) = (г) – вж. фиг. 8.



Фиг. 8. Изключване на ефекта на топлинните мостове

Получените резултати при този вариант (вж. фиг. 8) и изчислените топлинни потоци за него са дадени в табл. 3.

Таблица 3. Резултати и топлинни потоци без топлинни мостове и дефекти

PLCh Thermography						
t_e , °C	Pixels, px	A_i , cm ²	Δt_e , K	Q , W/m ²	Q , W	фиг. 7, 6
-2,2	49074	724608	4,8	120,0	8695,1	(г)
-5,4	27726	409392	1,6	40,0	1637,6	(б)
	76800	1134000			10332,7	10,3 kW

След анализа на този вариант вече може да се определи ефектът от топлинните мостове и дефектите на изпълнението. Изчислява се разликата между загубената топлина от **12,2 kW** за час (вж. табл. 2) и тази, получена при горното предположение, която е **10,3 kW** за час (вж. табл. 3). Получената разлика между тях от **18,2%** дава приноса на топлинните мостове и дефектите към загубата на топлина.

4. Изводи

Чрез термографски снимки може да се изпълнява бърза полева оценка, при това с достатъчна точност, доколко топлинните характеристики на сградната обвивка отговарят на съвременните нормативни изисквания за топлосъхранение с цел ограничаване на топлинните загуби и намаляване на енергопотреблението.

Анализът на сегмент от фасада на УАСГ дава убедителни доказателства за потенциала на предложения метод, който може да се представи накратко със следните изводи:

- При разгледаните по-горе определени условия може да се извършва количествен анализ и контрол на топлофизическото поведение на сградите.
- Може да се оценява и поведението в топлотехническо отношение на отделни елементи от ограждащата конструкция (в случая – на вложения стъклопакет).
- Може да се извърши и количествена оценка на отделни локални дефекти или зони от ограждащата конструкция на сградата.

Следователно термографските снимки, като съвременен подход, дават не само визуална оценка на състоянието на ограждащата конструкция в топлофизично отношение, но и при определени предпоставки и софтуерни средства за дигитална обработка могат да се използват за количествен анализ и оценка на фасадата в цялост или на елементи от нея.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chobanov, Pl.* Energy Efficiency In Construction. Sofia, 2016.
2. Ordinance № 7. Energy Efficiency of Buildings. Bulgaria, 2004.
3. BDS EN ISO 6946:2008. Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance. Calculation Method.
4. *Nazarski, D.* Building Insulation. Sofia, 2004.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMED THERMAL INSULATION OF AN ENCLOSURE STRUCTURE THROUGH THERMOGRAPHIC PHOTOGRAPHS

L. Chobanova¹, Pl. Chobanov²

Keywords: thermal characteristics, infrared thermography, heat flows, temperature differences, renovation of buildings

ABSTRACT

The huge existing building stock and the need to ensure energy efficiency of the buildings impose increasingly serious thermal requirements on the surrounding structures. This requires a good knowledge of the materials used and their thermal properties in order to reduce the energy used for heating and cooling. The infrared thermography imaging method can be an important tool in the assessment and investigation of the photographed exterior envelope of buildings.

The building captured with infrared (IR) photography is analyzed, which supports the numerical verification of the thermal insulation properties of its enclosing structure. In this way, thermographic images are used, not only for qualitative analysis, but also for quantitative determination of thermotechnical characteristics of the photographed facade elements. The purpose of this paper is to show how the obtained parameters (areas, temperatures, heat flows) provide additional opportunities for numerical research, evaluation and control of the performed thermal insulation.

¹ Lidiya Chobanova, Arch. PhD Student, Dept. "Architecture Technology", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: l.chobanova_far@uacg.bg

² Plamen Chobanov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Building Materials and Insulations", UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: chobanov_fce@uacg.bg