

**PRZESTRZENNA WIZUALIZACJA DOBOWYCH ZMIAN ROZKŁADU  
TEMPERATURY NA ZEWNĘTRZNEJ POWIERZCHNI BUDYNKU**

**SPATIAL VISUALISATION OF DAILY CHANGES IN TEMPERATURE  
DISTRIBUTION ON THE OUTER WALL OF A BUILDING**

**Aleksandra Rejowicz<sup>1</sup>, Alina Wróbel<sup>2</sup>, Andrzej Wróbel<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,  
Akademia Górniczo-Hutnicza (absolwent)

<sup>2</sup>Katedra Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa,  
Akademia Górniczo-Hutnicza

<sup>3</sup>Katedra Geoinformacji Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,  
Akademia Górniczo-Hutnicza

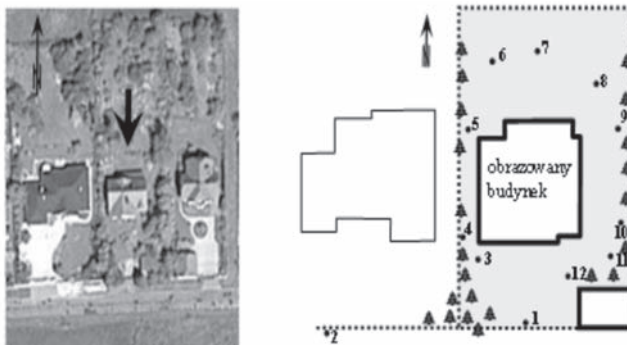
**SŁOWA KLUCZOWE:** termografia, promieniowanie słoneczne, bilans cieplny, wizualizacja, animacja

**STRESZCZENIE:** Właściwa ocena energetyczna budynku powinna uwzględniać oddziaływanie energii promieniowania słonecznego w ciągu całego roku. W sezonie grzewczym termiczna energia promieniowania słonecznego zmniejsza zapotrzebowanie na energię do celów grzewczych, a w porze letniej zwiększa zapotrzebowanie na chłód do klimatyzacji. Oddziaływanie energii słonecznej na budynek zależy od wielu czynników takich jak: forma architektoniczna budynku, możliwość zacieniania elementami budynku lub sąsiednich obiektów, rodzaj powierzchni zewnętrznych ścian, refleksyjność otoczenia itp. Zagadnienie oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek jest przedmiotem badań naukowych z zakresu energetyki słonecznej i energooszczędności w budownictwie. Rozwijają się metody modelowania matematycznego i symulacji procesów cieplnych w budynku w skali całego roku. W pracy przedstawiono wizualizację dobowego rozkładu temperatury na ścianach zewnętrznych i dachu budynku jednorodzinne. Model przestrzenny zbudowano w programie AutoCAD korzystając z projektu budynku uzupełnionego danymi z pomiaru bezpośredniego w tych miejscach, w których istniały niezgodności z projektem. W programie 3D-Studio Max nałożono tekstury z setek obrazów, które uzyskano z pomiaru termograficznego wykonywanego przez okres jednej doby. W czasie szybkich i dużych zmian rozkładu temperatury obserwacje termograficzne całej zewnętrznej powierzchni budynku wykonywano co godzinę lub półtorej, natomiast po zachodzie słońca okres ten wydłużono do kilku godzin. Wizualizacja ta umożliwia analizę stopnia nagrzania różnych powierzchni zewnętrznych budynku w zależności między innymi od strony świata, kąta padania promieni słonecznych, pory dnia, cienia tworzonego przez wystające elementy budynku, rodzaju materiału, z którego wykonana jest analizowana powierzchnia.

## 1. WPROWADZENIE

Ważnym aspektem przy projektowaniu współczesnych budynków jest energooszczędność. Pojawiły się nowe technologie służące nie tylko ograniczaniu strat ciepłych z budynków, ale także pozyskiwaniu energii z otaczającego środowiska (Kisilewicz, 2008). Właściwa ocena energetyczna budynku powinna uwzględniać zarówno oddziaływanie energii promieniowania słonecznego, jak też radiacyjną wymianę ciepła z otoczeniem w ciągu całego roku. W sezonie grzewczym termiczna energia promieniowania słonecznego zmniejsza zapotrzebowanie na energię do celów grzewczych, a w porze letniej zwiększa zapotrzebowanie na chłód do klimatyzacji. Oddziaływanie energii słonecznej na budynek zależy od wielu czynników takich jak: forma architektoniczna budynku, możliwość zacieniania elementami budynku lub sąsiednich obiektów, rodzaj powierzchni zewnętrznych ścian, refleksyjność otoczenia itp. Zagadnienie oddziaływania energii promieniowania słonecznego i radiacyjnej wymiany ciepła na budynek jest przedmiotem badań naukowych z zakresu energetyki słonecznej i energooszczędności w budownictwie (Nichol, Wong, 2005). Rozwijają się różne metody modelowania matematycznego i symulacji procesów cieplnych w budynku (Asawa *et al.*, 2008; He *et al.*, 2009b). Badania doświadczalne rzeczywistych budynków są kosztowne i pracochłonne, toteż podejmowane są rzadko. Rzeczywisty rozkład temperatury na powierzchniach przegród budowlanych można otrzymać poprzez zobrazowanie termograficzne. Prezentacja rozkładu temperatury na przestrzennym modelu budynku ułatwia analizę i interpretację termiki budynku.

W pracy przedstawiono wizualizację dobowego rozkładu temperatury na ścianach zewnętrznych i dachu budynku jednorodzinnego. Wybrany do badań budynek jednorodzinny znajduje się w rejonie o średnio gęstej zabudowie. Z dwóch stron (południowej i północnej) budynek jest odsłonięty, ale od strony wschodniej i zachodniej w odległości kilku metrów znajdują się krzewy i drzewa, a niedaleko za nimi sąsiednie budynki (Rys. 1).

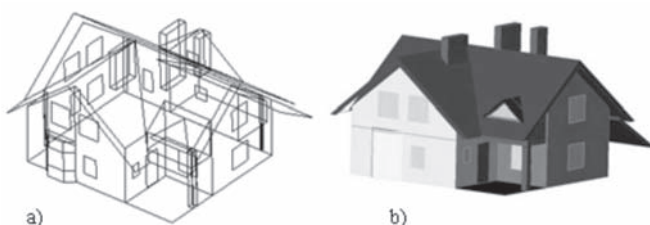


**Rys. 1.** Otoczenie badanego budynku i rozmieszczenie stanowisk kamery termograficznej

Źródło obraz satelitarny: <http://maps.google.com>).

## 2. MODEL PRZESTRZENNY

Model szkieletowy budynku wykonano w programie AutoCAD w lokalnym układzie współrzędnych. Podstawowe informacje o kształcie i wymiarach budynku przyjęto na podstawie projektu technicznego. Fragmenty dobudowane do budynku później i nieujęte w projekcie pomierzono bezpośrednio. Starano się oddać wiernie wszystkie ważniejsze elementy. Dla ułatwienia późniejszego opracowania uproszczono rysunek okien przedstawiając je, jako prostokąty bez parapetów, ram i innych drobnych szczegółów. Modelując powierzchnię dachu nie uwzględniono też rysunku dachówek (Rys. 2).



**Rys. 2.** Modele: szkieletowy (a) i bryłowy (b) wykonane w programie AutoCAD.

Do wykonania teksturowania potrzebny był model bryłowy. Wobec tego z modelu szkieletowego, w którym obiektami elementarnymi były odcinki, utworzono płaszczyzny wykorzystując funkcję programu AutoCAD o nazwie „Region”. Poleceniem tym obiekty proste zostały przekształcone w Regiony. Regiony są to płaskie odpowiedniki brył. Niosą one informację o brzegu i o obszarze wewnątrz konturu. Poprzez modyfikację tych płaskich obiektów (głównie za pomocą polecenia „Wyciągnij”) otrzymano proste bryły. Połączenie prostych brył z wykorzystaniem operacji: suma, różnica, iloczyn, przenikanie, itp. umożliwiło utworzenie brył złożonych. W ten sposób powstał model bryłowy (Rys. 2)

Ponieważ program AutoCAD posiada stosunkowo ubogie funkcje i narzędzia do renderingu, dalsze etapy wizualizacji wykonano w programie 3-D Studio Max. Zmiana programu spowodowała konieczność importu modelu bryłowego z programu AutoCAD do 3-D Studio Max.

## 3. POMIAR TERMOGRAFICZNY I TEKSTUROWANIE

### 3.1. Pomiar termograficzny

Przy rejestracji obrazów przeznaczonych do tworzenia tekstur najlepiej jest, gdy oś kamery jest prawie prostopadła do ściany budynku. Obraz posiada wówczas najmniejsze zniekształcenia, co ułatwia tworzenie tekstur. Niestety jak można zauważyć na rysunku 1

tylko z dwóch stron, południowej i północnej jest większa otwarta przestrzeń. Po stronie zachodniej w odległości około trzech metrów znajduje się ogrodzenie z żywopłotem, natomiast od strony wschodniej w odległości około sześciu metrów rosną drzewa. Wykonanie termogramów chociażby w przybliżeniu prostopadłe do ścian było z tych dwóch stron niemożliwe.

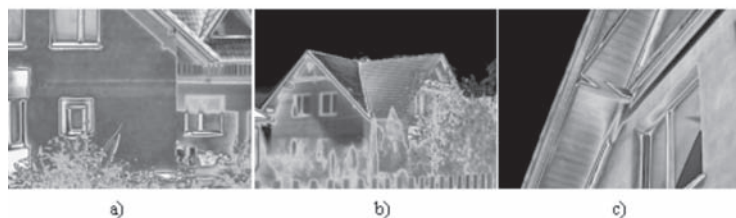
Aby jak najlepiej dobrać położenie stanowisk wykonano wstępny pomiar termograficzny całego budynku i próbnę teksturowanie. Następnie przygotowano ostateczny projekt rozmieszczenia stanowisk (Rys. 1).

Do rejestracji termogramów wybrano słoneczny październikowy dzień. Pierwsza seria pomiarów została wykonana jeszcze przed wschodem słońca, w godzinach 5<sup>45</sup>+6<sup>45</sup>. Następna tuż po wschodzie słońca, w godzinach 7<sup>30</sup>+8<sup>30</sup>. Odstęp pomiędzy kolejnymi seriami wynosił około półtorej godziny. Przedostatnią serię pomiarów wykonano tuż po zachodzie słońca w godzinach 17<sup>30</sup>+18<sup>30</sup>. Ostatnią w godzinach 20<sup>00</sup>+21<sup>00</sup>. Do pomiarów użyto kamery termograficznej ThermaCAM S65.

Zarejestrowane termogramy przetwarzano wstępnie w programie ThermaCAM Reporter. Po analizie rozpiętości temperatur na obiekcie ustalono jednolitą dla wszystkich termogramów skalę temperatur i paletę barwną. W godzinach rannych temperatury powietrza i ścian budynku wynosiły około 5°C, natomiast w godzinach południowych temperatura powietrza w cieniu wzrosła maksymalnie do wartości 17°C. Niektóre elementy budynku, absorbujące najbardziej promieniowanie słoneczne, rozgrzały się do temperatury około 50°C. Ustalono, więc że skala temperatur będzie obejmować zakres od 0°C do 50°C. Przyjęto paletę barwną tęczy, ponieważ zapewnia ona najlepszą wizualną rozróżnialność temperatury.

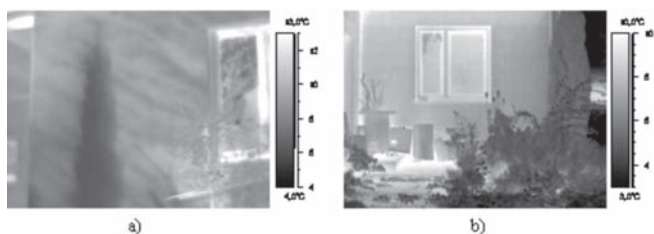
### 3.2. Teksturowanie

Warunki terenowe wymusiły konieczność wykonania termogramów o bardzo różnej orientacji w stosunku do obrazowanych ścian. Termogramy ze stanowiska nr 2 ze względu na dużą odległość od budynku miały wyraźnie mniejszą skalę niż pozostałe. Dla sporej części termogramów oś kamery znacznie odbiegała od normalnej do płaszczyzny ściany i obejmowała niewielkie jej fragmenty (Rys. 3). Zobrazowanie pojedynczej ściany na wielu termogramach spowodowało zwiększenie nakładu pracy w czasie tworzenia tekstur.



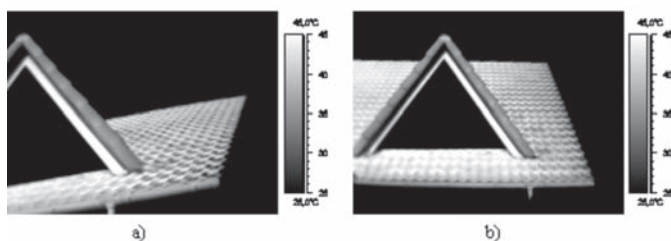
**Rys. 3.** Przykładowe termogramy: a) oś kamery prawie prostopadła - stanowisko nr 1, b) w małej skali i ukośny ze stanowiska nr 2, c) bardzo ukośny ze stanowiska nr 9.

Dodatkowym problemem były zakłócenia rozkładu temperatury na ścianach budynku spowodowane cieniem drzew oraz zasłonięciem przez krzewy i drzewa. Tam, gdzie blisko budynku znajdowały się krzewy i drzewa powodowały one chwilową zmianę temperatury w tych miejscach gdzie padał cień od nich. Na termogramach rejestrowanych z dalszej odległości drzewa i krzewy na pierwszym planie zasłaniały ścianę. W obydwu tych sytuacjach na termogramach (Rys. 4) pojawiały się obszary, na których należało poprawić obraz. Przed opracowaniem tekstur wykonano edycję tych termogramów w programie Adobe Photoshop. Miała ona na celu usunięcie z obrazu ścian budynku cieni i zasłonięć. W miejscach takich najczęściej przekopioywano obraz z sąsiednich rejonów ściany.



**Rys. 4.** Zakłócenia obrazu rozkładu temperatury na ścianie: a) cień krzewu na ścianie, b) zasłonięcie ściany przez krzewy.

Wiele tekstur powstało w ten sposób, że na powierzchni jednej płaszczyzny łączono obraz z kilku termogramów. Gdy były to termogramy wykonane z jednego stanowiska przeważnie nie było z tym większych problemów. Inaczej wyglądała sytuacja, gdy teksturowana powierzchnia miała w naturze wyraźną przestrzenną fakturę (np. dach pokryty dachówką), a łączono ze sobą termogramy wykonane z różnych stanowisk. Z jednego stanowiska widać było na przykład zacienione a przez to zimniejsze fragmenty dachówki, a z innego te zacienione fragmenty były widoczne w znacznie mniejszym stopniu (Rys. 5).



**Rys. 5.** Zróżnicowanie obrazu rozkładu temperatury na nierównej powierzchni dachówki w zależności od kąta patrzenia: a) termogram ze stanowiska 11, b) termogram ze stanowiska 12.

Opracowanie tekstur przeprowadzono w sposób, który bazuje na podziale modelu obiektu na mniejsze powierzchnie, tak, aby do powstałych mniejszych powierzchni można było przypisać jeden termogram. Nie było wówczas konieczności wcześniejszego łączenia kilku termogramów w jeden obraz, co byłoby dość pracochłonne. Połączenie i dokładne dopasowanie kolejnych termogramów wykonano w następnym etapie podczas przypisywania materiałów do powierzchni elementarnych.

#### 4. RENDERING I ANIMACJA

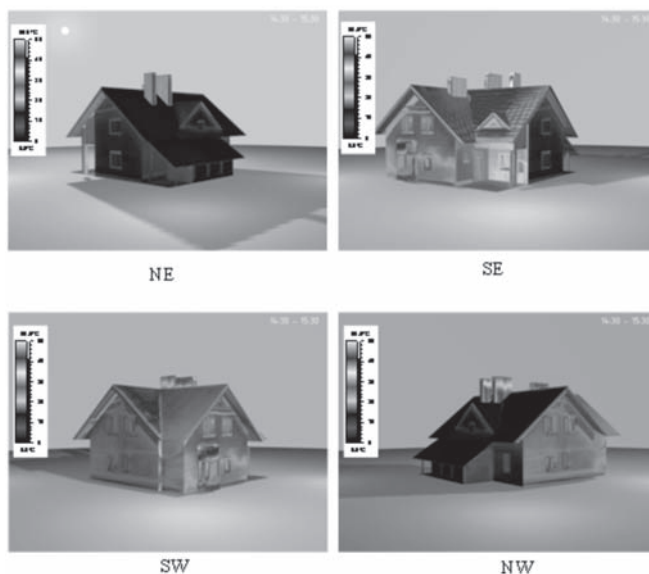
Renderowanie jest procesem obliczania geometrii obiektów, światła, materiałów i warunków atmosferycznych, którego wynikiem jest utworzenie obrazu.

Przed utworzeniem ostatecznej postaci wizualizacji wielokrotnie wykonywano próbny rendering z wykorzystaniem funkcji *Quick render*. Po wykonaniu próbnego renderingu zwracano uwagę nie tylko na dopasowanie tekstur, ale również na pozostałe efekty wizualne. Na podstawie analizy otrzymanych obrazów poprawiano niektóre elementy jak np. dobór źródeł światła. Wybrano światło punktowe i jego źródła rozmieszczono w taki sposób, aby obiekt z każdej strony był dobrze widoczny. Dodatkowo umieszczono jedno punktowe źródło światła oświetlające cały obiekt, obrazujące efekt słońca. Aby osiągnąć efekt ciągłości wykonywanych pomiarów ustawiono zmienność jasności tych źródeł światła w czasie. Opracowano ścieżkę, po której słońce zmieniało swoje położenie w ciągu dnia. Aby jeszcze bardziej zwiększyć realność animacji do elementu słońca przypisano dodatkowy efekt – świecenie. Elementami pośrednio związanymi ze światłami są cienie, dlatego też przypisano je do budynku. Tworzone cienie również zmieniają się zgodnie z ruchem słońca. Zmiana koloru nieba, ruch słońca oraz cienie obrazują zmienność w czasie rozkładu temperatury na ścianach budynku. Tym sposobem opracowana scena jest bardziej realistyczna.

Wizualizację rozkładu temperatury na ścianach budynku wykonano stosując prezentację metodą animacji dynamicznej. Animację wykonano w dziesięciu częściach połączonych ze sobą za pomocą odpowiednich narzędzi programu. Każda z tych części obrazuje jeden niezależny pomiar. Połączenie tych części sprawia, że prezentowany jest dobowy cykl zmian temperatury zewnętrznej powierzchni budynku. Na rysunku 6 przedstawiono cztery przykładowe pojedyncze sceny opracowane na podstawie termogramów wykonanych w godzinach 14<sup>30</sup>÷15<sup>30</sup>. Sceny te pokazują rozkład temperatury od stron: północno-wschodniej, południowo-wschodniej, południowo-zachodniej i północno-zachodniej.

Obserwując przygotowaną wizualizację można zauważyć pewne prawidłowości wynikające z konstrukcji, ułożenia i lokalizacji budynku:

- najwyższe temperatury, co jest logiczne, występowały na elementach budynków wystawionych na bezpośredni wpływ promieniowania słonecznego, ale nastąpiło duże ich zróżnicowanie w zależności od materiału i wystawy. Płytki klinkierowe posiadały wyższą temperaturę niż pozostałe tynkowane powierzchnie ścian i to zróżnicowanie utrzymywało się jeszcze długo po zacho-



**Rys. 6.** Przykładowe sceny ukazujące rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni budynku w godzinach 14<sup>30</sup>÷15<sup>30</sup>.

dzie słońca. Temperatura dachu pokrytego dachówką betonową, była nawet o 30°C wyższa niż temperatura ścian,

- w porze nocnej (seria pomiarowa 5<sup>45</sup>÷6<sup>45</sup>) obserwuje się pewne obniżenie temperatury ścian wystawionych na promieniowanie dochodzące od zimnego nieboskłonu w stosunku do rejonów ścian znajdujących się pod okapami dachu. Przy całkowitym zachmurzeniu chmurami niskimi tego zjawiska nie obserwuje się; temperatura zewnętrznych powierzchni przegród wynika wtedy z przenikania ciepła od wnętrza budynku.

Dobowy rozkład temperatury przedstawiony na wizualizacji jest wynikiem oddziaływania zmieniających się w czasie termicznych parametrów otoczenia na budynek. Ten fakt powinien zostać uwzględniony przy interpretacji rozkładu temperatury budynku.

Opracowana wizualizacja w postaci animowanej jest dostępna na stronie internetowej [http://home.agh.edu.pl/~awrobel/xml/page\\_visualization.xml](http://home.agh.edu.pl/~awrobel/xml/page_visualization.xml).

## 5. PODSUMOWANIE

Wymiana ciepła pomiędzy zewnętrzną powierzchnią budynku a otoczeniem jest bardzo złożona. Zachodzi na drodze wymiany konwekcyjnej z bliskim otoczeniem i na drodze promieniowania z otoczeniem dalekim, które jest utworzone przez nieboskłon



i otaczające obiekty. Obiekty tworzące otoczenie budynku mogą mieć różne temperatury i różną konfigurację geometryczną. Pewne znaczenie dla wymiany ciepła odgrywa rodzaj zewnętrznej powierzchni budynku oraz kształt jego bryły.

W związku z rozwojem budownictwa pasywnego zwraca się uwagę na wykorzystanie promieniowania słonecznego. Z drugiej strony promieniowanie zimnego nieboskłonu powoduje nieraz obniżanie się temperatury zewnętrznej powierzchni budynku poniżej temperatury otaczającego powietrza. Zwłaszcza w budynkach ocieplonych na zewnątrz efekt ten może powodować wykraplanie się wilgoci na zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych i w efekcie rozwój glonów i pleśni. Do analizy tych zjawisk często używa się modelowania matematycznego tworząc też symulowane wizualizacje (np. ThermoAnalytics Inc., 2009). Modele obliczeniowe cieplnego oddziaływania środowiska na budynek są niejednokrotnie uproszczeniem rzeczywistej sytuacji.

Rzeczywisty dobowy rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni trójwymiarowej bryły budynku otrzymany na drodze przestrzennej wizualizacji termogramów może służyć do weryfikacji modeli obliczeniowych (He, Hoyano, 2009a). Na jego przykładzie możliwa jest analiza zależności rozkładu temperatury na zewnętrznej powierzchni budynku od różnych czynników.

Opracowanie wykonane zostało w ramach badań statutowych AGH nr. 11.11.150.949, 11.11.150.005

## 6. LITERATURA

Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K., 2008. Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system. *Building and Environment*, Vol. 43, s. 2112-2123.

He J., Hoyano A., 2009a. Measurement and simulation of the thermal environment in the built space under a membrane structure. *Building and Environment*, Vol. 44, s. 1119-1127.

He J., Hoyano A., Asawa T., 2009b. A numerical simulation tool for predicting the impact of outdoor thermal environment on building energy performance. *Applied Energy*, Vol. 86, s. 1596-1605.

Kisilewicz T., 2008. *Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

Nichol J., Wong M., 2005. Modeling urban environmental quality in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, Vol.73, s. 49-58.

ThermoAnalytics, Inc., 2009. [www.thermoanalytics.com/applications/gallery/building.html](http://www.thermoanalytics.com/applications/gallery/building.html)



## **SPATIAL VISUALISATION OF DAILY CHANGES IN TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE OUTER WALL OF A BUILDING**

**KEY WORDS:** Thermography, sun radiation, thermal balance, visualization, animation

**SUMMARY:** Proper thermal assessment of a building should take into account the impact of solar radiation during the whole year. In the heating season the energy from solar radiation reduces the demand for heating energy, and in the summer it increases demand for air conditioning energy. The influence of solar radiation on the building depends on many factors, such as its architectural form, shading by the building's elements and neighbouring features, properties of the building's surface, environmental reflectivity etc. The influence of solar radiation on the building is a subject of research in the area of solar energy and thermal efficiency in buildings. There are methods for mathematical modelling and simulation of thermal processes in buildings over the scale of a whole year. In the paper, we present a visualization of the daily distribution of temperature on the outer surface of a building. A three-dimensional model has been created in AutoCAD. It was based on the plan of the building, supplemented by the results from direct measurement in points where the building differed from its plan. Textures were created in 3D-Studio Max from hundreds of images. These images have been obtained by thermal measurements over the course of twenty four hours. During large and rapid changes in the temperature distribution, observations were made every 60 or 90 minutes. After sunset, this period increased to a few hours. This visualization enables one to analyse the level of warming of several surfaces of the building, depending on its orientation, the angle of incidence of solar radiation, time of the day, shade caused by protruding elements of the building and the properties of the materials of the property analysed.

mgr inż. Aleksandra Rejowicz  
arejowicz@gmail.com

dr inż. Alina Wróbel  
alibel@agh.edu.pl  
telefon: +48 12 6172269

dr inż. Andrzej Wróbel  
awrobel@agh.edu.pl  
telefon: +48 12 6173826

