

2. Modelowanie fizyczne i energetyczne budynków mieszkalnych

2.1. Uwagi wstępne

Słowo "model" posiada kilka znaczeń. Wg *Słownika wyrazów obcych PWN* [22] jest to: "wzór, według którego coś jest wykonywane", "przedmiot będący wzorem lub kopią danego przedmiotu, wykonany w mniejszych rozmiarach, zwykle z materiałów zastępczych", "układ względnie odosobniony, możliwie mało skomplikowany, działający analogicznie do oryginału, którym może być istota żywa, maszyna, zakład przemysłowy, organizacja społeczna itd." (pominięto tutaj inne znaczenia wyrazu "model"). W odniesieniu do modelowania energetycznego budynków mieszkalnych definicji tych nie należy stosować dosłownie, tym niemniej w oddają one istotę zagadnienia. Należy tylko rozciągnąć pojęcia takie jak "wzór", "przedmiot", "materiał zastępczy" również na równania matematyczne i dane do nich. Stosownie do powyższych definicji pod określeniem **model budynku** będziemy rozumieć układ równań matematycznych opisujących procesy fizyczne i energetyczne zachodzące w realnym, istniejącym lub mającym zostać wzniesionym budynku. Procesy te opisuje się zwykle w sposób uproszczony, np. traktuje się 3 zupełnie różne mechanizmy wymiany ciepła: przewodzenie, konwekcję i promieniowanie jako jeden proces zwany "przenikaniem ciepła", zaniedbuje się na ogół przewodzenie ciepła wzdłuż powierzchni przegród budowlanych czy opisuje się wpływ promieniowania słonecznego na bilans cieplny budynku wprowadzając pojęcie "temperatury słonecznej". Tego typu uproszczone przedstawienie zjawisk fizycznych zachodzących w budynku, traktowanym jako całość, nazywa się zwykle **modelowaniem fizycznym** budynku, zaś bardziej dokładne odwzorowywanie procesów fizycznych zachodzących w poszczególnych częściach budynku nazywamy **modelowaniem procesów cieplno-wilgotnościowych**. **Model fizyczny budynku** możemy więc zdefiniować jako jakościowe i ilościowe przedstawienie procesów fizycznych zachodzących w budynku, dokonywane w celu określenia wielkości fizycznych, które w danym momencie nas interesują, np. przebiegu zmienności temperatury wewnętrznej czy rocznego zużycia energii na ogrzewanie pomieszczeń. Same równania i ich rozwiązanie nazywane są często **modelem matematycznym** budynku. Zapisuje się je zwykle w postaci algorytmów obliczeniowych przeznaczonych do uruchomienia na konkretnym typie (klasie) komputera. Po zapisaniu ich w formie programu komputerowego - zwłaszcza skompilowanego - mówimy o **implementacji** modelu lub o **modelu komputerowym** budynku. Osobno określa się **dane** do modelu. W warstwie teoretycznej rozróżnia się pomiędzy modelem a danymi do niego, natomiast po zaimplementowaniu model i jego dane

stanowią nierozłączną całość - można powiedzieć, że nie ma modelu, jeżeli brak jest danych do niego.

Celem modelowania fizycznego budynków mieszkalnych oraz modelowania procesów ciepłno-wilgotnościowych jest poznanie i opisanie dla zastosowań praktycznych procesów fizycznych zachodzących w budynkach bez wykonywania długotrwałych, żmudnych i kosztownych badań eksperymentalnych. Nie neguje to oczywiście potrzeby, czy wręcz konieczności wykonywania takich badań - wyniki obliczeń modelowych powinny być weryfikowane przez doświadczenie, zaś prawidłowe dane wprowadzane do modelu można uzyskać wyłącznie na drodze pomiarowej. Posługiwanie się natomiast symulacjami komputerowymi pozwala, dysponując prawidłowo skonstruowanym modelem obliczeniowym i sprawdzonymi danymi wejściowymi, na stosunkowo szybkie i tanie badanie współzależności pomiędzy różnorodnymi procesami fizycznymi zachodzącymi w budynku, określanie wpływu zmienności danych wejściowych (np. parametrów pogodowych) na fizykę zjawisk zachodzących wewnątrz budynku, a także pozwala na wykonywanie różnorodnych obliczeń wariantowych (badanie wpływu konstrukcji przegród zewnętrznych na mikroklimat wewnętrzny budynku, badanie optymalnej orientacji budynku względem stron świata, optymalizowanie bryły budynku itp.).

Jednym z ważniejszych celów modelowania budynków jest określenie ilości zużywanej energii na ogrzewanie pomieszczeń i zbadanie możliwości jej ograniczenia. Stosuje się tutaj różnorodne metody obliczeniowe, od prostego statycznego bilansowania strumieni energii w przybliżeniu jednowymiarowym, poprzez metodę różnic skończonych, metodę czynników odpowiedzi i metodę Fouriera do rozwiązywania złożonych równań różniczkowych opisujących dwu- i trójwymiarowe przepływy energii. Zwięzły opis tych metod, wraz z podaniem literatury źródłowej można znaleźć u Källblada [2], a także - wraz z omówieniem badań doświadczalnych - u Laskowskiego [23].

Zazwyczaj kończymy proces modelowania fizycznego budynków mieszkalnych na określeniu rocznego (miesięcznego, dobowego) zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku. Tutaj zazwyczaj mamy na myśli tzw. **energię użyteczną**, tzn. energię ciepłą wydzielaną przez źródła ciepła znajdujące się wewnątrz pomieszczeń mieszkalnych budynku (piece, grzejniki c.o., stropy grzejne itp.). Tymczasem dostawca dostarcza energię zwykle nie wprost do pomieszczeń ogrzewanych, lecz albo w postaci ciepła, lecz do węzła cieplnego, albo wręcz w innej postaci energii (w formie paliwa) i w samym budynku następuje przemiana energii. Zapotrzebowanie na energię dostarczaną do budynku nazywa się w energetyce **zapotrzebowaniem bezpośrednim na energię**. W tym momencie wkraczamy w domenę, którą można określić jako **modelowanie energetyczne** budynków. Celem tego modelowania jest nie tylko określenie zapotrzebowania bezpośredniego na energię w budynku, lecz i obliczenie kosztu pokrycia tego zapotrzebowania (również w kategoriach inwestycyjnych), gdyż obliczenia kosztowe są

nieodłączną częścią tej dziedziny wiedzy jaką jest gospodarka energetyczna [24]. (Modelowanie energetyczne można traktować jako jedno z narzędzi gospodarki energetycznej).

Pojęcie modelowania energetycznego budynków narodziło się na początku lat 80-tych, przy czym trudno wskazać datę jego powstania i autora tego terminu, ze względu na ewolucyjny, stopniowy charakter jego powstawania. Najpierw używano terminów: obliczenia, metody obliczeniowe, metody analityczne, programy komputerowe, których z resztą używa się do dnia dzisiejszego. Słowo model pojawiło się najpierw jako synonim określenia "program komputerowy" (computer model) oraz dla nazwania układu równań matematycznych opisujących procesy termiczne zachodzące w budynku (thermal building model). Na uwagę zasługuje użycie już w 1981 r. przez Källblada i Higgsa [1] określenia "modelowanie użytkowania energii w budynkach" (building energy use modelling), aczkolwiek jeszcze w 2 lata później Källblad [2] konsekwentnie używa określenia "metody obliczeniowe" (calculation methods) w swym znanym przeglądzie badań nad - jak byśmy powiedzieli dzisiaj - modelowaniem energetycznym budynków mieszkalnych.

W każdym razie w r. 1988 termin "modelowanie energetyczne budynków" był już w powszechnym użyciu, o czym świadczy tytuł znanej monografii Augenbroe [3]. Określenie "modelowanie budynków" pojawia się też w terminologii podręczników obsługi ogólnie dostępnych programów komputerowych symulujących użytkowanie energii w budynkach [4].

Można zauważyć, że w odniesieniu do zarówno fizycznego jak i energetycznego modelowania budynków mieszkalnych mają zastosowanie wszystkie 3 wymienione na wstępie definicje słowa "model".

Przed wszystkim model fizyczny i model energetyczny budynku są w pewnym sensie **kopiami** rzeczywistego budynku mieszkalnego "wykonanymi w mniejszych rozmiarach z materiałów zastępczych" - stąd wynika oczywista konieczność dobrej znajomości budownictwa i fizyki budowli przez osoby zajmujące się modelowaniem budynków. Ale nie tylko - model budynku jest też "**wzorem** przedmiotu (tj. budynku) wykonanym z materiałów zastępczych" - fakt ten wskazuje na szerokie możliwości zastosowania wyników modelowania fizycznego i energetycznego budynków mieszkalnych w budownictwie: projektowaniu architektonicznym, technicznym, instalatorskim i w wykonawstwie.

Z naukowego punktu widzenia niewątpliwie najciekawsza jest trzecia definicja: "**układ względnie odosobniony, możliwie mało skomplikowany, działający analogicznie do oryginału**". Tutaj wkraczamy na pole badań systemowych, gdyż jest to definicja idealnie odpowiadająca systemowemu podejściu do rzeczywistości.

Zgodnie z metodyką badań systemowych [5] o modelu można mówić, jeżeli są spełnione przynajmniej 3 warunki:

- 1) jest wyjaśnione, co się modeluje i z jakiego punktu widzenia,
- 2) podane jest pełne odwzorowanie modelowanego przedmiotu w jego abstrakcyjne wyobrażenie,

3) została dokonana weryfikacja prawidłowości odwzorowania modelowanej rzeczywistości w jej obraz modelowy.

Definiujemy zatem **model budynku** jako odwzorowanie realnego budynku (tzn. istniejącego lub mającego zostać zbudowanym) w jego abstrakcyjny obraz, będący tworem myślowym, wyrażonym jednakże w postaci słowno-matematycznego zapisu. Obraz ten ma odzwierciedlać przede wszystkim procesy energetyczne zachodzące w budynku. By można było zweryfikować prawidłowość budowy modelu, musi być on ponadto przedstawiony co najmniej w postaci algorytmu symulacji zjawisk fizycznych zachodzących w odwzorowywanym budynku. Dzisiaj (tj. po przeminięciu ery obliczeń kalkulatorowych) oznacza to, że model musi być zaimplementowany na komputer w postaci odpowiedniego programu współpracującego z bazą danych i dostępnego w użyciu nie tylko dla twórcy modelu. Weryfikację modelu najlepiej przeprowadzić poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów dokonanych na budynku doświadczalnym, a jeżeli jest to niemożliwe - poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi przy użyciu innego, sprawdzonego modelu.

Program komputerowy, umożliwiający dokonywanie obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania, wraz z towarzyszącą mu bazą danych nazywa się często **modelem komputerowym** budynku.

Każdy model komputerowy budynku współpracuje ze specyficznymi strukturami danych wzbogaconymi o informację dotyczącą sposobu ich wykorzystania - są to modele pomocnicze, np. model klimatu, model użytkowania budynku. Często są one bezpośrednio wbudowane w model budynku, czasami stoją one jak gdyby z boku modelu głównego, np. dane klimatyczne mogą być generowane na bieżąco, stosownie do przyjętej lokalizacji budynku i jego otoczenia.

Zużycie energii w budynkach mieszkalnych jest bardzo istotnym zagadnieniem dla krajowego kompleksu paliwowo-energetycznego. Samo ogrzewanie budynków mieszkalnych i towarzyszących im budynków użyteczności publicznej pochłania w Polsce 25% zużywanej energii (mowa o zużyciu bezpośrednim), zaś wszystkie potrzeby energetyczne budynków i ich mieszkańców pochłaniają blisko 34 - 38 % zużywanej w kraju energii [6].

Zużycie energii w budynkach można zmniejszyć. W tym celu należy po pierwsze posiadać dobre rozeznanie, co do aktualnego zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym w kraju i jego wpływu na krajowy bilans paliwowo-energetyczny obecnie i w przyszłości, po drugie zaś - ocenę efektywności inwestowania w oszczędność energii w budynkach mieszkalnych. Modelowanie energetyczne budynków umożliwia rozwiązywanie obu tych grup problemów.

Budynki mieszkalne można traktować jako części krajowego kompleksu paliwowo-energetycznego. W tradycyjnym ujęciu metodycznym są one rozpatrywane jako punktowe odbiorniki energii, elementy końcowe systemu energetycznego. Dokładniejsze przyjrzenie się im pozwala jednak dostrzec w nich podsystemy krajowego systemu energetycznego, mające swoją złożoność, strukturę i relacje zachodzące pomiędzy elementami tych podsystemów. W dalszym

ciągu pracy pokażemy, że budynki mieszkalne, zarówno te realnie istniejące, jak i ich abstrakcyjne odwzorowania - modele - posiadają wszystkie cechy charakteryzujące systemy energetyczne.

Mówiąc o systemie, trzeba na wstępie stwierdzić, że nie istnieje dobra definicja systemu. Różni badacze różnie go definiują [5]. W ścisłym podejściu metodologicznym reprezentowanym przez teorię systemów przyjmuje się na ogół, że system nie istnieje sam przez się. To badacz kreuje system z otaczającej go rzeczywistości, wybierając te elementy i te relacje pomiędzy nimi, które go interesują najbardziej lub częściej tworząc model tej rzeczywistości w oparciu o cechy, które dla danego badania są najbardziej istotne.

W języku teorii systemów mówimy, że budujemy system ze względu na daną relację R i jej własność W . Tworom rzeczywistym odpowiadają elementy modelu. Spośród nich wybieramy te, o takich cechach r , które spełniają relację R . Ponadto w budowie systemu zazwyczaj dążymy do tego, aby był on w maksymalnym stopniu efektywny ze względu na kryterium efektywności E w warunkach U [5].

Aby zdefiniować system energetyczny budynku musimy więc:

- 1) ustalić relację R i jej własność W oraz związane z nimi cechy r elementów systemu,
- 2) ustalić kryterium efektywności E i warunki W ,
- 3) wskazać dziedzinę, której system dotyczy.

Jak było powiedziane, w oparciu o tę samą rzeczywistość materialną można budować różne systemy, stosownie do wybranej relacji R i pozostałych cech systemu podanych powyżej. Można podać przynajmniej 3 przykłady relacji, przydatne do budowania systemów energetycznych budynków.

Przykład 1.

Relacja R jest relacją logicznie uzasadnionej przynależności. Mówimy, że element należy do systemu wtedy i tylko wtedy, gdy odpowiadający mu twór rzeczywisty przynależy (w zwykłym sensie tego słowa) do budynku w sposób logicznie uzasadniony (w tym przypadku uzasadniony poprzez wymogi konstrukcji budynku).

Jest to relacja znajdująca zastosowanie w kosztorysowaniu. Kosztorys budowlany jest tutaj modelem budynku, a jego pozycje - elementami modelu. Możemy łatwo wprowadzić kryterium efektywności E , żądając aby wartość kosztorysu była jak najmniejsza w warunkach cenowych U - czyli tak dobierając technologię budowlaną, aby łączny koszt materiałów, robocizny i pracy sprzętu był jak najmniejszy.

Jaki to ma związek z energią? Wystarczy wyposażyć relację logicznej przynależności R w taką własność, że zażądamy aby do systemu przynależały nie wszystkie elementy niezbędne do wzniesienia budynku, lecz tylko te spośród nich, których materialne odpowiedniki są energochłonne w produkcji. Możemy wówczas zamiast kosztu inwestycyjnego budynku wyznaczyć

skumulowane zużycie energii na wzniesienie tego budynku. Znajduje to zastosowanie w analizach energetycznych budownictwa przeprowadzanych w skali makro [17]. Można także badać wpływ różnych technologii budowlanych na środowisko [7].

Przykład 2.

Relacja R jest relacją oddziaływania fizycznego. Tutaj również mamy spory wybór. Powiedzmy, że relacje polegające na przenoszeniu naprężeń nas nie interesują, ale te polegające na transporcie ciepła i masy - tak. Przykładem elementu będącego częścią systemu jest tutaj ściana zewnętrzna (również w rozumieniu jej modelowego odpowiednika), oddziałująca poprzez procesy konwekcji i promieniowania długofalowego z powietrzem zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz budynku. Okno oddziałuje z wnętrzem budynku nie tylko poprzez konwekcję i promieniowanie długofalowe, ale przepuszcza wprost krótkofalowe promieniowanie słoneczne, a poprzez nieuszczelnności - również powietrze zewnętrzne. Tutaj, jak widać, poszczególne elementy systemu mają różne cechy r , tak że własności ogólnej relacji R polegającej na wzajemnym oddziaływaniu fizycznym różnią się w zależności od elementu (oczywiście zawsze można skonstruować ogólną własność W , którą będą spełniać wszystkie elementy, kładąc w opisie liczbowym zerowe współczynniki dla niektórych z nich).

W tak zdefiniowanym systemie istotną rolę odgrywa otoczenie budynku, oddziałujące fizycznie na budynek. W modelowaniu tego typu zwykle pomija się oddziaływanie samego budynku na otoczenie, chociaż w pewnym stopniu występuje ono w rzeczywistości.

Kryterium efektywności możemy dobrać stosownie do potrzeb. W badaniach prowadzonych w Zakładzie Problemów Energetyki IPPT PAN jest nim minimalizacja całkowitego rocznego kosztu eksploatacji energetycznej budynku w zakresie ogrzewania pomieszczeń (będącego sumą zdyskontowanych rocznych kosztów izolacji termicznej i instalacji ogrzewczej oraz bieżących kosztów zużywanych nośników energii), ale można też stosować i inne funkcje kryterialne, np. sumaryczną energochłonność skumulowaną wzniesienia i eksploatacji. Badania tego typu systemów rozpoczęto w ZPE IPPT PAN w 1986 r. [8]. Zostaną one pokrótce opisane w dalszym ciągu pracy.

Przykład 3.

Relacja R jest relacją zużywania jednych elementów systemu w procesie produkowania drugih. Typowym przykładem jest tutaj zużywanie energii, w postaci np. ciepła w parze i wodzie przy produkcji usługi "ogrzewanie pomieszczeń". Grzejnik centralnego ogrzewania w pomieszczeniu jest tutaj naturalnym zakończeniem ścieżki biegnącej od kopalni węgla

kamiennego, poprzez transport kolejowy do elektrociepłowni, przemianę energii w elektrociepłowni, transport ciepła siecią ciepłowniczą do budynku, wymiennik ciepła w węźle cieplnym i wewnętrzne orurowanie do pomieszczenia. Samo pomieszczenie należy już do otoczenia systemu, chociaż rozpatrywane jest w ścisłym powiązaniu z systemem właściwym i z otoczeniem zewnętrznym budynku, ze względu na zmienność zapotrzebowania na ciepło w zależności od warunków zewnętrznych (głównie temperatury).

Taki system również można by nazwać systemem energetycznym budynku, ale właściwsza jest nazwa nieco inna - system pokrycia potrzeb energetycznych budynku. Uwzględnić się bowiem tutaj nie tylko ogrzewanie pomieszczeń ale również takie potrzeby energetyczne jak: przygotowanie ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), przygotowanie posiłków, potrzeby elektroenergetyczne gospodarstw domowych (oświetlenie, RTV, drobne napędy) oraz infrastruktury technicznej budynku (zasilanie wentylatorów, wind, pomp wody zimnej, oświetlenie pomieszczeń ogólnodostępnych).

Badania nad tak zdefiniowanymi systemami prowadzone są w Zakładzie Problemów Energetyki IPPT PAN od 1986 r. Kryterium efektywności jest tutaj również minimalizacja pełnego kosztu eksploatacji energetycznej budynku, przy czym w odróżnieniu od poprzedniej sytuacji jako koszt eksploatacji przyjmuje się nie tylko koszt ogrzewania pomieszczeń, lecz również przygotowania c.w.u., przygotowania posiłków oraz zaspokojenia innych potrzeb energetycznych opisanych powyżej.

Oba opisane wyżej podejścia dają podobne rezultaty, a nawet są do uzyskania identyczne wyniki liczbowe jeśli tylko wziąć na warsztat ten sam budynek, te same dane klimatyczne, techniczne i ekonomiczne oraz przyjąć takie same założenia obliczeniowe. Należy jednak pamiętać o pewnych różnicach "filozoficznych", mających swoje odbicie w terminologii - grzejnik c.o. w opisanym powyżej systemie energetycznym budynku jest źródłem energii [8], natomiast w systemie pokrycia potrzeb energetycznych budynku - odbiornikiem energii [9].

Często celem obliczeń modelowych jest optymalizacja, tj. znalezienie optymalnego rozwiązania technicznego rozpatrywanego budynku, rozumianego tutaj jako wybór technologii wykonania zewnętrznych przegród budynku i stopnia ich izolacyjności oraz rodzaju instalacji ogrzewczej. Jest to możliwe jedynie dla konkretnej formy budynku (traktowanej tutaj nadrzędnie w stosunku do rozwiązania technologicznego), warunków klimatycznych i lokalnych, sposobu użytkowania, a także poziomów cen energii, materiałów budowlanych i instalacyjnych oraz kosztów robocizny. Duży wpływ mają także założenia ekonomiczne (czas zwrotu kredytu, stopa procentowa). Nie ma tutaj rozwiązania uniwersalnego.

Jak się można zorientować [18, 19, 25], modelowanie energetyczne może być cennym uzupełnieniem procesu projektowania budynków. Poprzez swoje z natury rzeczy popelniane uproszczenia nie może ono zastąpić ani projektowania architektoniczno-budowlanego, ani projektu instalacji, ani kosztorysowania, jednakże dzięki swej elastyczności (przy użyciu gotowego

programu komputerowego można uzyskiwać i porównywać ze sobą różne rozwiązania w ciągu dosłownie sekund) umożliwia sprawdzanie koncepcji twórczych w czasie nieporównanie krótszym od czasu, który należałoby poświęcić stosując tradycyjne metody obliczeniowe używane przez projektantów. Pozwala ono ponadto jeśli nie na znalezienie, to przynajmniej na sugerowanie optymalnego rozwiązania technicznego.

Schemat klasycznej procedury optymalizacyjnej stosowanej w ZPE IPPT PAN znaleźć można w opracowaniu [11].

2.2. Budynek jako system energetyczny

Jak zostało wyjaśnione na wstępie, w modelowaniu energetycznym budynków modeluje się budynek z punktu widzenia procesów energetycznych, jakie w nim zachodzą. Procesy te możemy podzielić na 3 rodzaje:

- 1) przepływy energii samoistne,
- 2) przepływy energii związane z przepływami masy,
- 3) przemiany energetyczne.

Z samoistnymi przepływami energii mamy do czynienia przede wszystkim w przegrodach zewnętrznych budynku, a także przy wymianie ciepła pomiędzy źródłami ciepła znajdującymi się w budynku a powietrzem wewnętrznym. Przepływy energii związane z przepływami masy występują przy wentylacyjnej wymianie powietrza w budynku, wymianie wilgoci w przegrodach oraz odprowadzaniu zużytej ciepłej wody sanitarnej. Przemiany energii zachodzą w takich elementach budynku jak: kocioł c.o., piec kaflowy, piec elektryczny, ale nie tylko - energia słoneczna ulega przemianie w energię cieplną w procesie absorpcji promieniowania słonecznego na powierzchni przegród budynku, podobnie energia wypromieniowana z grzejnika radiacyjnego.

Nie zawsze zdajemy sobie sprawę ze złożoności procesów energetycznych w budynku. Wyliczmy na początek rodzaje energii, z którymi mamy do czynienia:

- 1) energia doprowadzana do budynku w postaci zasilania:
 - energia chemiczna zawarta w paliwach stałych, ciekłych lub gazowych,
 - energia cieplna w postaci gorącej wody lub pary,
 - energia elektryczna,
- 2) energia pozyskiwana z otoczenia:
 - energia promienista, zwana potocznie energią słoneczną, występująca w postaci krótko i długofalowego promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego,
 - energia cieplna, pozyskiwana z otoczenia na drodze przewodzenia i konwekcji, a także transportowana bezpośrednio z powietrzem do wnętrza budynku,

3) energia z tzw. źródeł darmowych:

- oddawanie ciepła przez ludzi znajdujących się w budynku,
- ciepło pozyskane przez budynek w wyniku użytkowania ciepłej wody sanitarnej,
- ciepło pozyskiwane przy okazji przygotowania posiłków,
- ciepło wydzielające się w budynku w wyniku oświetlenia pomieszczeń, użytkowania urządzeń radiowo-telewizyjnych i innego sprzętu gospodarstwa domowego,

4) energia tracona do otoczenia:

- promieniowanie krótkofalowe, pochodzące z oświetlenia budynku, tracone przez okna,
- promieniowanie długofalowe, emitowane przez zewnętrzne ściany i dach budynku, a także częściowo przez wewnętrzne przegrody za pośrednictwem okien,
- ciepło, oddawane otoczeniu na drodze konwekcji (ściany zewnętrzne i dach), przewodzenia (do gruntu) oraz poprzez wymianę masy (straty ciepła na wentylację).

Nie zawsze mamy do czynienia ze wszystkimi rodzajami energii na raz, nie wszystkie też postacie energii są jednakowo istotne. Na przykład promieniowanie długofalowe atmosfery ma dużo mniejsze znaczenie ilościowe niż bezpośrednie promieniowanie słoneczne, jeżeli jednak żądamy, aby budowany model wystarczająco dokładnie oddawał procesy fizyczne zachodzące w realnym budynku, musimy zdawać sobie z nich sprawę. Znane są przypadki bardzo intensywnego oddawania ciepła przez stropodachy w czasie bezchmurnych nocy, przy czym temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu spada poniżej temperatury otoczenia. Jest to efekt wypromieniowania ciepła, którego nie da się opisać w modelu, jeżeli się nie wprowadzi do niego wymiany ciepła poprzez promieniowanie długofalowe.

Zwykle mówi się o transporcie (przenikaniu) ciepła przez przegrody budowlane. Jest to duże uproszczenie, gdyż na ogół zachodzi na powierzchni przegród konwersja energii promienistej w ciepłą i na odwrót. W bardziej dokładnym opisie zjawisk fizycznych zachodzących w przegrodach budowlanych wyróżnia się składową konwektywną i składową radiacyjną współczynnika przejmowania ciepła [2].

Ramy niniejszej pracy nie pozwalają na szerszy opis podstaw fizycznych modelowania energetycznego budynków mieszkalnych, są one opisane w licznych podręcznikach z zakresu fizyki budowli (np. [10]), a także w następnych rozdziałach niniejszej pracy. Celem powyższych uwag było jedynie zasygnalizowanie niektórych zagadnień dla zainteresowania Czytelnika problemem.

Jak pokazano w opracowaniu [8], realnie istniejący budynek można rozpatrywać jako zbiór źródeł, odbiorników oraz akumulatorów energii. W oparciu o to będziemy budować model energetyczny budynku, będący systemem energetycznym - podsystemem modelu krajowego systemu energetycznego. Zgodnie z przedstawionymi powyżej zasadami modelowania energetycznego w budynku interesuje nas wszystko i tylko to, co ma związek z procesami energetycznymi zachodzącymi w nim. Wybór elementów przynależnych do systemu zależy w dużej mierze od stopnia złożoności modelu, a co za tym idzie - od definicji systemu. Jeżeli ograniczymy

się do najważniejszych procesów energetycznych - na przykład wykluczmy z rozważań akumulację ciepła w przegrodach wewnętrznych, która ma znikomy wpływ na roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania - pozostaną "na placu boju" jedynie przegrody zewnętrzne, przez które budynek oddaje ciepło na zewnątrz. Przy obliczaniu wpływu promieniowania słonecznego na roczne zapotrzebowanie na energię można na przykład ograniczyć się do rozpatrywania jedynie przegród przezroczystych (tj. okien i drzwi balkonowych), wtedy w zasadzie odpadają kłopotliwe zagadnienia promieniowania długofalowego.

Nie zawsze jednak takie uproszczenia są możliwe. Gdy bada się budynek konstruowany specjalnie z myślą o pozyskiwaniu dużych ilości energii słonecznej (np. w tzw. systemie zysków bezpośrednich) zagadnienia akumulacji ciepła w wewnętrznych przegrodach stają się niezmiernie istotne, tylko bowiem przy dostatecznie dużej bezwładności termicznej pomieszczenia można w tych warunkach uniknąć przegrzania.

Uwagi powyższe dostatecznie chyba ilustrują wyrażoną w [5] tezę, że model jest niezwykle wyspecjalizowanym narzędziem badawczym, dostosowanym do ściśle określonego, wąskiego celu poznawczego. Nie ma sensu porównywanie ze sobą 2 różnych modeli i orzekanie np. który z nich jest lepszy, jeżeli cele, które stawiali sobie ich twórcy były różne.

Wróćmy jednak do modeli energetycznych energooszczędnych budynków mieszkalnych tworzonych w ZPE IPPT PAN. Szczupłe ramy niniejszego rozdziału nie pozwalają na ich dokładne opisanie. Czytelnika zainteresowanego szczegółami musimy odesłać do wykonanych opracowań [8], [9] oraz [11-14]. Poniżej opiszemy jedynie zagadnienia fundamentalne oraz krótko poinformujemy o wykonanych do tej pory konkretnych realizacjach komputerowych modeli.

Zgodnie z wyłożonymi wyżej zasadami modelowania, budynek mieszkalny przedstawiamy w postaci zbioru źródeł, odbiorników i akumulatorów energii. W pierwszym kroku interesujemy się przede wszystkim tzw. energią użyteczną, tj. energią cieplną wewnątrz budynku. Źródłami jej są piece, grzejniki c.o. i grzejniki elektryczne, ale również ściany i stropy wewnętrzne nagrzane promieniami słonecznymi wpadającymi przez okna. W tym ostatnim przypadku, ponieważ otoczkę bilansową najwygodniej umieścić na zewnętrznych przegrodach budynku, dokonujemy pewnego uproszczenia i mówimy, że okno jest źródłem energii. Przemiana energii radiacyjnej promieniowania słonecznego w energię cieplną (energię ruchu drobin ośrodka absorbującego) na powierzchniach przegród odbywa się praktycznie ze 100% sprawnością, co czyni dopuszczalnym uczynione powyżej uproszczenie.

W szczególnych przypadkach, jako źródła energii użytecznej mogą być rozpatrywane także przegrody nieprzezroczyste (zwłaszcza nagrzany przez Słońce dach), a nawet samo powietrze infiltrujące do środka budynku (gdy ma ono temperaturę wyższą niż temperatura wewnątrz budynku), ale są to w polskim klimacie sytuacje bardzo szczególne i z zasady nie będziemy ich tutaj rozpatrywać.

Uwzględnia się natomiast tzw. darmowe źródła energii użytecznej, którymi są urządzenia służące przygotowywaniu posiłków (kuchnie), urządzenia sanitarne (ciepła woda), elektryczne urządzenia gospodarstwa domowego i wreszcie sami ludzie przebywający w budynku. Darmowe źródła energii, zaniechane w obliczeniach dotyczących budynków tradycyjnych, odgrywają ważną rolę w budynkach energooszczędnych, ich obecność istotnie zmniejsza zapotrzebowanie na energię do ogrzewania dostarczaną z zewnątrz do budynku.

Koszt wszelkich źródeł niedarmowych rozpatruje się w sposób pełny, tzn. bierze się pod uwagę np. koszt nie tylko samego grzejnika c.o., lecz również rur, które do niego prowadzą oraz koszt wężła ciepłego.

Odbiornikami energii użytecznej są wszystkie przegrody zewnętrzne oraz powietrze wentylacyjne. Do przegród zewnętrznych zaliczamy ściany, okna i drzwi balkonowe, strop nad ostatnią ogrzewaną kondygnacją, strop nad nieogrzewaną piwnicą oraz podłogę na gruncie. Drzwi wejściowe do budynku na ogół zaniedbuje się, zaś stropy nad otwartą przestrzenią (nad bramami, loggiami, przestrzenie typu "crawlspac") występują w budownictwie polskim jedynie w nielicznych przypadkach. Wszystkie przegrody zewnętrzne wyposażone są w warstwy termoizolacyjne. Koszt ich wykonania przyjmuje się za koszt odbiornika energii - koszt części konstrukcyjnej przegrody pomija się, jako elementu nie należącego do badanego systemu. W bardziej zaawansowanych modelach budynku rozpatruje się jednak pełny koszt wykonania przegrody, gdyż w wielu przypadkach rozdzielenie jej na część konstrukcyjną i część izolacyjną byłoby zbyt sztuczne - na przykład w odniesieniu do jednomateriałowych ścian wykonanych z gazobetonu lub ścian z pustaków ceramicznych dodatkowo ocieplonych wełną mineralną.

Akumulatorami energii są przede wszystkim ściany i stropy, zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne. Można do nich zaliczyć także inne masywne elementy budynku jak schody i spoczniki, natomiast akumulację energii cieplnej w innych elementach budynku (wyposażenie, meble itp.) zaniedbuje się. Wymienione powyżej akumulatory są biernymi akumulatorami energii, ich koszt przyjmuje się za zerowy, gdyż zostały one umieszczone w budynku dla innych potrzeb niż energetyczne. Wyjątek stanowią wszelkiego rodzaju ściany akumulacyjne stosowane w ogrzewaniach słonecznych, ich koszt należy doliczyć do kosztu układu ogrzewania.

Poza tym stosuje się również czynne akumulatory energii cieplnej, będące specjalnie konstruowanymi urządzeniami energetycznymi. Należą do nich wszelkiego rodzaju zasobniki gruntowe, wodne i z przemianą fazową, współpracujące z układem cyrkulacji medium grzewczego, często bardzo wyrafinowanym (z pompą ciepła). Są to urządzenia bardzo kosztowne, spotykane jedynie w budynkach eksperymentalnych.

Można zadać pytanie, jakie jest kryterium efektywności systemu energetycznego utworzonego przez zbiór opisanych wyżej źródeł, odbiorników i akumulatorów energii? Odpowiedź: minimum rocznego kosztu eksploatacji energetycznej budynku, zdefiniowanego w poprzednim punkcie. Aby zapisać to formalnie oznaczmy źródła energii indeksami i ($i = 1, 2, \dots, I$),

odbiorniki indeksami j ($j = 1, \dots, J$), zaś akumulatory indeksami l ($l = 1, \dots, L$). Okres rozliczeniowy (rok) dzielimy na T podokresów, wewnątrz których cena energii jest stała. Przyjmijmy następujące oznaczenia:

- P_i - moc zainstalowana i -tego źródła,
- k_j - roczne koszty jednostkowe mocy zainstalowanej i -tego źródła,
- K_j - roczne koszty j -tego odbiornika,
- k_l - roczne koszty jednostkowe l -tego akumulatora,
- A_l - pojemność cieplna l -tego akumulatora,
- k_{it} - zmienne koszty energii z i -tego źródła w podokresie t ,
- E_{it} - energia oddana przez i -te źródło w podokresie t .

Całkowity koszt roczny eksploatacji energetycznej budynku można wtedy zapisać

$$K = \sum k_i P_i + \sum K_j + \sum k_l A_l + \sum k_{it} E_{it} \quad (2.1)$$

w równaniu (2.1) człon pierwszy wyraża roczne koszty zainstalowania źródeł energii, drugi - odbiorników, trzeci - akumulatorów, czwarty zaś - koszty energii dostarczanej.

Pełne omówienie wzoru (2.1) wraz z podaniem bilansów mocy i energii poszczególnych podokresach można znaleźć w [8].

Koszty roczne źródeł, odbiorników i akumulatorów energii oblicza się metodą dyskonta, mnożąc nakłady inwestycyjne przez czynnik

$$s = r/[1-(1+r)^{-T}] \quad (2.2)$$

gdzie r - oznacza stopę procentową,
zaś T - przyjęty okres amortyzacji urządzenia.

Wzory powyższe stosuje się we wszystkich modelach energetycznych energooszczędnych budynków mieszkalnych opracowanych w ZPE IPPT PAN, aczkolwiek często w zmodyfikowanej i rozszerzonej formie.

2.3. Opis modelu BED-OPT

Jako przykład modelu energooszczędnego budynku mieszkalnego opiszemy model BED-OPT, powstały w ZPE IPPT PAN w 1992 r., jako rozszerzenie stworzonego rok wcześniej modelu BED (Building Energy Designer). Skonstruowano go w myśl zasad opisanych poprzednio.

W warstwie użytkowej model BED-OPT jest pakietem złożonym z 3 programów komputerowych:

- BE (Building Editor),
- TS (Technology Selector),
- ECC (Energy- and Cost Calculator).

Program BE jest prostym edytorem, umożliwiającym w sposób konwersacyjny utworzenie pliku danych opisujących modelowany budynek. W szczególności zadawane są tutaj takie parametry budynku, jak: powierzchnia użytkowa i kubatura, powierzchnie poszczególnych przegród zewnętrznych, powierzchnie okien w rozbiciu na strony świata, a także parametry opisujące strukturę wewnętrzną budynku, np.: liczba pomieszczeń kuchennych, liczba w.c., liczba mieszkań, liczba mieszkańców. Można tutaj również zadać np. normatywne wartości współczynników przenikania ciepła dla poszczególnych przegród mieszkalnych, co umożliwia bezpośrednie przejście do obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania dokonywanych w programie ECC.

Program TS jest programem do zadawania technologii wykonania zewnętrznych przegród budynku i co za tym idzie do określania ich parametrów fizycznych oraz kosztu inwestycyjnego. Odbyna się to również konwersacyjnie, poprzez udzielanie odpowiedzi na zadawane przez komputer pytania, w taki sposób, że użytkownik kreuje przegrody budowlane, z których chce skonstruować swój budynek, wybierając z przygotowanej uprzednio bazy danych elementarne warstwy poszczególnych przegród. Program oblicza koszt inwestycyjny tak określonych przegród budynku oraz ich współczynniki przenikania ciepła. Zmienne te przekazywane są następnie do programu ECC.

Program ECC w oparciu o dane przygotowane przez programy BE oraz TS oblicza zapotrzebowanie na energię użyteczną do ogrzewania. Wykorzystywane są tutaj również dane klimatyczne oraz szereg założeń dotyczących sposobu użytkowania budynku, które operator programu może zmieniać. Wyniki obliczeń zapotrzebowania na energię przedstawiane są w postaci tabeli bilansowej, z której można dowiedzieć się o stratach i zyskach energetycznych budynku w czasie poszczególnych miesięcy, a także w rozbiciu na poszczególne przegrody budowlane. Uwidaczniane są także zyski słoneczne oraz tzw. zyski wewnętrzne, pochodzące z innych niż ogrzewanie pomieszczeń celów użytkowania energii, jak również pochodzące od ludzi zamieszkujących budynek. Następnie zadawane jest pytanie o wybór technologii ogrzewania. Po wybraniu jednej z 20 możliwości obliczane jest bezpośrednie zużycie energii do ogrzewania

budynku, koszt tej energii (paliwa), koszt obsługi urządzeń ogrzewczych a także koszty inwestycyjne zewnętrznych przegród budynku oraz instalacji ogrzewczej. Wyniki tych obliczeń przeliczane są następnie na koszt roczny eksploatacji energetycznej budynku, zgodnie z zasadami przedstawionymi w punkcie 2.2. Zmieniając charakterystyki budynku programem TS użytkownik pakietu może łatwo prześledzić wpływ różnych czynników na koszt roczny i poszukać optymalnego rozwiązania. Koszt roczny definiowany jest w programie jako suma zdyskontowanego kosztu inwestycyjnego izolacji termicznej (z warstwami zabezpieczającymi), kosztu instalacji ogrzewczej oraz bieżących kosztów ogrzewania, będących sumą kosztów energii oraz kosztu obsługi urządzeń ogrzewczych. W programie ECC przyjęto liniową zależność pomiędzy kosztem instalacji a mocą zainstalowaną urządzeń ogrzewczych. Umożliwia to poszukiwanie optymalnego rozwiązania niezależnie dla każdej przegrody z osobna, co znakomicie upraszcza proces optymalizacji konstrukcji budynku, jako całości.

2.4. Przykład zastosowania modelu BED-OPT

Przedstawmy działanie modelu BED-OPT na następującym przykładzie. Chcemy w 1991 r. wybudować budynek wielorodzinny, 3 kondygnacyjny o powierzchni użytkowej 900 m, w konstrukcji murej, dla 12 rodzin. (Budynek taki opisany jest w opracowaniu [20] jako Model 02). Założona lokalizacja - Warszawa. Przyjęto przeciętne warunki klimatyczne (średnie wieloletnie).

Opiszmy stan wyjściowy projektu jako żądanie, aby budynek ten, w odniesieniu do izolacyjności termicznej, spełniał wymagania PN-82/B-02020, parametrami swoimi wybiegając w kierunku mającej być wprowadzonej od 1.01.1992 r. PN-91/B-02020. Konstrukcja budynku może być zaprojektowana oczywiście różnie, dla przykładu weźmy następującą:

1. Ściany zewnętrzne: cegła budowlana pełna o grubości 1 1/2 cegły, izolacja z wełny mineralnej "na sucho" 30 mm, obmurowanie bloczkami z betonu komórkowego 600 o grubości 12 cm, tynk zewnętrzny, tynk wewnętrzny.
2. Okna i drzwi balkonowe: drewniane, zespolone, 2-szybowe.
3. Stropodach wentylowany - strop z pustaków DZ-3, ocieplony wełną mineralną "60" o grubości 100 mm.
4. Strop nad piwnicą - strop z pustaków DZ-3, warstwa wyrównawcza, izolacja styropianowa 30 mm, podkład cementowy, posadzka z mozaiki 8 mm, lakierowana.

Można pokazać, że wartości współczynników przenikania ciepła tego budynku wyniosą (w kolejności przegród jak wyżej): 0,65, 2,60, 0,38 oraz 0,90 W/m²K, a więc wymagania PN-82/B-02020 są spełnione nawet z pewnym zapasem i niewiele odbiegają od wymagań PN-91/B-02020.

Założono wentylację naturalną (grawitacyjną), o intensywności zgodnej z PN-63/B-03430. Przyjęto, że budynek będzie ogrzewany z miejskiej sieci ciepłowniczej.

Zadano pytanie, czy celowym jest, z ekonomicznego punktu widzenia, zbudowanie takiego budynku o wyższym stopniu izolacyjności, tj. zwiększenie grubości warstw termoizolacyjnych ponad wymagania normowe, ewentualnie położenie dodatkowej izolacji.

Rozważano tutaj:

- 1) pogrubienie warstwy wełny mineralnej w ścianach zewnętrznych do 40, 50, 60, 70, 80 i 100 mm, następnie wykonanie dodatkowej izolacji styropianem 20-60 mm na zewnątrz (z otynkowaniem),
- 2) wmontowanie okien 3-szybowych zamiast 2-szybowych, z ewentualnym domontowaniem 4 szyby od wewnątrz,
- 3) położenie na stropie nad ostatnią ogrzewaną kondygnacją dodatkowej izolacji z wełny mineralnej o grubości 30 - 100 mm,
- 4) zwiększenie grubości warstwy izolacji podpodłogowej w stropie nad piwnicą kolejno do 40, 50 i 60 mm, a następnie wykonanie dodatkowej izolacji styropianowej od strony piwnicy.

Przyjęto poziom cen materiałów budowlanych, robocizny, pracy sprzętu i narzutów z sierpnia 1991 r., gdyż większość prac budowlanych wykonuje się w miesiącach letnich.

Obliczenia modelowe wykonano dla różnych wariantów cen energii cieplnej. Jako poziom odniesienia przyjęto cenę energii cieplnej dla mieszkań z sierpnia 1991 r., wynoszącą 31.000 zł/GJ (112 zł/kWh). Przyjęto ponadto 4 inne ceny energii cieplnej:

- 1) cenę urzędową energii cieplnej z sierpnia 1990 r., wynoszącą 9.700 zł/GJ (35,00 zł/kWh),
- 2) cenę urzędową z sierpnia 1992 r. - 58.100 zł/GJ (209,20 zł/kWh),
- 3) cenę "ekonomiczną" z sierpnia 1992 r., zapewniającą pokrycie kosztów produkcji i dystrybucji ciepła do mieszkań,
- 4) cenę zachodnioeuropejską.

Wszystkie ceny wyrażono w cenach stałych sierpnia roku 1991, stosując do obliczeń wskaźniki wzrostu cen towarów i usług konsumpcyjnych publikowane przez GUS.

Cenę z sierpnia 1990 r., wyrażoną w cenach stałych r. 1991 określono biorąc pod uwagę cenę bieżącą energii cieplnej dla mieszkań z sierpnia 1990 r. - 35 zł/kWh oraz wskaźnik wzrostu cen towarów i usług pomiędzy rokiem 1990 i 1991 wynoszący wg GUS 70,3%.

Z ceną dla roku 1992 postąpiono podobnie, z tym że cenę bieżącą z sierpnia 1992 r. (209,20 zł/kWh) wyrażono w cenach stałych r. 1991 biorąc pod uwagę wskaźnik wzrostu cen pomiędzy 1991 i 1992 r. wynoszący 43,0%.

W 1992 r. szacowano, że urzędowa cena energii cieplnej pokrywa koszty jej wytworzenia i dostarczenia do mieszkań w ok. 50 %, stąd wysokość przyjętej ceny "ekonomicznej".

Cenę "europejską" 500 zł/kWh określono na przykładzie ceny energii cieplnej obowiązującej w systemie ciepłowniczym w Grenoble, drugiego (po Paryżu) systemu ciepłowniczego we Francji, która w 1991 r. wynosiła 240,58 F/MWh, co przy kursie 5,180 F/\$ oraz 10.957 zł/\$ (kursy na koniec roku 1991 wg GUS), daje powyższą wartość. Jest ona jeszcze wyższa niż polska cena "ekonomiczna" ze względu na wyższe koszty robocizny we Francji niż w Polsce.

Dla uniknięcia niepotrzebnego mnożenia wariantów cenowych nie przyjęto do obliczeń ani ceny bieżącej energii cieplnej z sierpnia 1993 r. (98.990 zł/GJ = 356,35 zł/kWh), która po sprowadzeniu do cen r. 1991 dałaby wartość 180 zł/kWh ani ceny "perspektywicznej" wg [21] (479 zł/kWh), odpowiadającej cenie w roku 1991 wynoszącej 250 zł/kWh. (Można przy okazji zauważyć, że w roku 1993 jeszcze nie osiągnięto ceny ciepła zapewniającej pokrycie kosztów produkcji i dystrybucji, na co dodatkowym dowodem są zapowiedziane na 1994 r., kolejne podwyżki bieżącej ceny ciepła w stopniu przewyższającym inflację. Natomiast cena "perspektywiczna" wg [21] jest niższa od ceny "ekonomicznej", co oznacza, że ta ostatnia z powodów socjalnych prawdopodobnie w ogóle nie jest, przy obecnym sposobie gospodarowania ciepłem sieciowym, do osiągnięcia.)

W odniesieniu do ceny "zachodnioeuropejskiej" można wykazać, że cena ciepła w Grenoble w 1992 r., po uwzględnieniu kursów walut z 1992 r. i sprowadzona do cen r. 1991, wyniosłaby również 500 zł/kWh, natomiast dla 1993 r. otrzymałoby się wynik 370 zł₁₉₉₁/kWh, co jest już wartością niewiele wyższą od ceny "ekonomicznej".

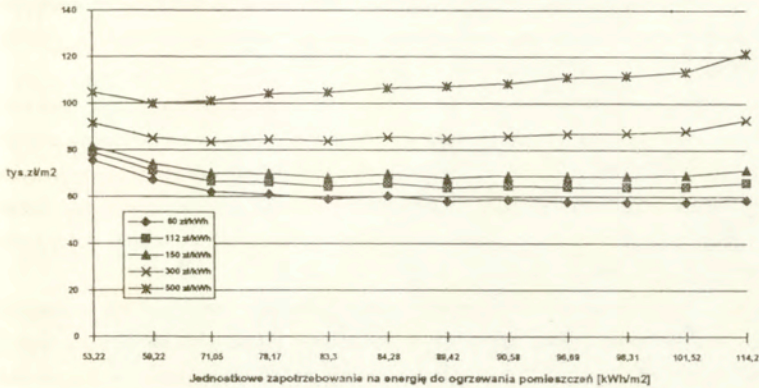
W sumie przyjęto do obliczeń modelowych 5 następujących wariantów cenowych (wszystkie ceny w cenach stałych sierpnia 1991 r.):

- 1) cena urzędowa z sierpnia 1990 r. - 60 zł/kWh,
- 2) cena urzędowa z sierpnia 1991 r. - 112 zł/kWh,
- 3) cena urzędowa z sierpnia 1992 r. - 150 zł/kWh,
- 4) cena "ekonomiczna" (rok 1992) - 300 zł/kWh,
- 5) cena "zachodnioeuropejska" - 500 zł/kWh.

Dla przejrzystości, wszystkie ceny będące wynikiem przeliczeń, podane powyżej zaokrąglono do pełnych dziesiątek zł/kWh.

Wyniki obliczeń rocznego kosztu eksploatacji energetycznej budynku w zakresie ogrzewania pomieszczeń, dla różnych wariantów ceny energii cieplnej, przedstawiono na poniższym rysunku.

Rysunek.
Koszt roczny eksploatacji energetycznej budynku w zakresie ogrzewania pomieszczeń



Na rysunku tym - dla przejrzystości prezentacji - uwidoczniono jedynie niektóre z uzyskanych wyników. Najniżej położone na poszczególnych krzywych punkty są rozwiązaniami optymalnymi, co można pokazać analitycznie, niezależnie od przedstawionej na rysunku interpretacji graficznej. Na osi odciętych, pomiędzy wartościami skrajnymi odpowiadającymi minimalnej i maksymalnej izolacyjności budynku, zaznaczono wybrane wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię cieplną do ogrzewania pomieszczeń, odpowiadające rozwiązaniom suboptymalnym.

Dla poziomu cen 1990 roku optymalnym rozwiązaniem o budowy zewnętrznej budynku jest:

- grubość wełny mineralnej w ścianach zewnętrznych: 70 mm,
- okna 2-szybowe,
- grubość wełny mineralnej w stropodachu: 100 mm,
- grubość styropianu w stropie nad piwnicą: 40 mm.

Jak widać, wartości te niewiele odbiegają od stanu wyjściowego określonego przez normę ochrony cieplnej. Nieduża jest też różnica w wartości funkcji celu (kosztu rocznego) dla obydwu przypadków. Można powiedzieć, że stosowanie minimalnych, zgodnych z PN-91/B-02020, grubości warstw termoizolacyjnych w 1990 r. nie było wprawdzie rozwiązaniem optymalnym, ale nie miało to znaczenia praktycznego.

Dla 1991 r., po 2-krotnym podniesieniu o 100% cen (bieżących) energii cieplnej, sytuacja jest już trochę inna. Optymalną grubością wełny mineralnej w ścianach zewnętrznych jest 100 mm (maksymalna grubość w bazie danych), okna pozostają nadal 2-szybowe, nadal nie opłaca się dać dodatkowej izolacji stropodachu, natomiast opłaca się zwiększyć grubość izolacji stropu nad

piwnicą do 70 mm. Różnica pomiędzy początkową wartością funkcji celu a jej wartością dla optymalnego rozwiązania wynosi 5%.

Dla r. 1992 rozwiązanie jest takie samo jak dla r. 1991. Jest to skutkiem stosunkowo niewielkiego (w cenach stałych) wzrostu ceny energii cieplnej. Podobna jest również różnica w wartości funkcji celu.

Analizując rozwiązania optymalne dla lat 1991 i 1992 można wysnuć dość ciekawy wniosek, że w stosunku do przeciętnych możliwości wykonawczych w budownictwie cena energii cieplnej już w tych latach była na tyle wysoka, że optymalne rozwiązanie dla ścian zewnętrznych pokrywa się z ograniczeniami. Konstruktor nie ma tu już możliwości manewru, jeśli nie liczyć dodatkowej izolacji ścian styropianem, co jednakowoż się nie opłaca - jak pokazano dalej - dla żadnej ceny energii cieplnej.

Przejście na "ceny ekonomiczne" energii cieplnej powoduje, że staje się opłacalne stosowanie okien 3-szybowych. Opłaca się również dodatkowo zaizolować stropodach wełną mineralną o grubości 100 mm (maximum). Maksymalna izolacja pojawia się również w stropie nad piwnicą - 60 mm styropianu pod podłogą oraz 60 mm styropianu od spodu stropu, od strony piwnicy. Rozwiązanie optymalne różni się od stanu wyjściowego w funkcji celu o 12%, co oznacza, że użytkownik budynku zbudowanego we właściwy (w tym rozumieniu) sposób odniesie wymierne korzyści materialne.

2.5. Uwagi końcowe

Szczupłość ram niniejszego rozdziału nie pozwala na pełne przedstawienie problemu modelowania energetycznego budynków mieszkalnych. Podobnie brak jest miejsca na dokonanie przeglądu wykonanych w tej dziedzinie badań. Obszerną literaturę przedmiotu można znaleźć w cytowanych opracowaniach. Autor wyraża nadzieję, że chociaż zasady modelowania energetycznego budynków mieszkalnych stały się jasne dla Czytelnika, a zamieszczony przykład pokazał jego użyteczność.

W następnych rozdziałach przedstawiono podstawy modelowania procesów ciepłowo-wilgotnościowych zachodzących w budynkach mieszkalnych.

Bibliografia

- [1] Källblad K., F.Higgs, *Building Energy Use Modelling in Sweden by JULOTTA*, Proceedings of the Third International Conference on Energy Use Management, Berlin, October 26-30, 1981.
- [2] Källblad K., *Calculation Methods to Predict Energy Savings in Residential Buildings*, Document D4:1983, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1983.
- [3] Augenbroe G. L. M., *Building Energy Modelling, State of the art and future perspective: A report on some recent projects*, Report: C2-88-03, Delft University of Technology, Delft, May 1988.
- [4] Fireovid J. A., Fryer L. R. , *ASEAM 2.1, A Simplified Energy Analysis Method*, ACEC Research & Management Foundation, Washington, October 1987.
- [5] Bojarski W. W., *Podstawy analizy i inżynierii systemów*, PWN, Warszawa 1984.
- [6] Chyrczakowski S., Lis T., *Potrzeby energetyczne sektora mieszkaniowego. Część I: Analiza zużycia energii w latach 1980-1985*, Prace IPPT 4/1991, Warszawa 1991.
- [7] Chyrczakowski S., *Building Construction Technologies and SO₂ emission*, Proc. of the 3rd International Conference on System Analysis related to Environment, Energy and Natural Resource Management in the Baltic Region, Copenhagen, May7-10, 1991, Nord 1991:48, pp. 225-229.
- [8] Chyrczakowski S., Lis T., Bojarski W., *Analiza problemu modelowania energetycznego budynku mieszkalnego i jego elementów oraz opracowanie wstępnej koncepcji modelu*, CPBP 02.21 4.1, IPPT PAN, Warszawa, listopad 1986.
- [9] Lis T., *Opracowanie koncepcji modelu systemu pokrycia potrzeb energetycznych budynku oraz współpracującej z nim bazy danych*, Ekoprogres, Katowice 1988.
- [10] Pogorzelski J. A., *Fizyka cieplna budowli*, PWN, Warszawa 1976.
- [11] Chyrczakowski S., Lis T., *Opracowanie modelu do bilansowania energetycznego budynku w fazie testowania i obliczenia testowe*, CPBP 02.21 Temat 4.1, IPPT PAN, Warszawa, listopad 1987.
- [12] Chyrczakowski S., Lis T., *Zastosowanie modelu do optymalizacji struktury urządzeń energetycznych budynku*, CPBP 02.21 4.1, IPPT PAN, Warszawa, listopad 1988 r.
- [13] Lis T., Chyrczakowski S., *Opracowanie numeryczne zagadnień optymalizacji struktury urządzeń ogrzewczych i nośników energetycznych, zgodnie z kryterium minimum rocznych kosztów eksploatacji energetycznej budynku*, CPBP 02.21 4.1, IPPT PAN, Warszawa, listopad 1989 r.
- [14] Lis T., Chyrczakowski S., *Analiza możliwości wprowadzenia nowych technologii energetycznych w budownictwie jednorodzinym na przykładzie wybranego budynku mieszkalnego*, CPBP 02.21 4.1, IPPT PAN, Warszawa, grudzień 1990 r.

- [15] Lis T., *Komputerowa metoda analizy efektywności termorenowacji budynków w aspekcie ochrony energii*, Rozprawa doktorska, ZPE IPPT PAN, Warszawa, czerwiec 1991.
- [16] Chyrczakowski S., Lis T., *Analiza kierunków rozwoju techniki i struktury budownictwa w świetle perspektywicznych deficytów i cen paliw na podstawie obliczeń modelowych*, CPBR 4.1 P3.07.02.03, Warszawa, listopad 1990.
- [17] Chyrczakowski S., Lis T., *Potrzeby energetyczne sektora mieszkaniowego, Część II: Ocena wpływu nowych technologii budownictwa mieszkaniowego na zużycie energii na ogrzewanie mieszkań*, Prace IPPT 5/1991, Warszawa 1991.
- [18] Boudelle M., Senderowski A., *Wielkości zużycia energii na ogrzewanie w modelowych budynkach wielorodzinnych*, P2.02.02.2, COBPBO, Warszawa, sierpień 1987.
- [19] Pogorzelski J. A., Kostrzewa J., *Wspomaganie komputerem projektowania budynków energooszczędnych*, Sympozjum "Racjonalizacja użytkowania energii w budynkach", Warszawa, 27 kwiecień 1992 r.
- [20] Nowak Zb., Grzelec Zb., *Analiza i dobór zaktualizowanych reprezentatywnych obiektów modelowych budownictwa mieszkaniowego wielorodzinnego w układzie rodzajowym i technik*, Opracowanie COBPBO P2.04.02.2, Warszawa, grudzień 1986.
- [21] Chyrczakowski S., *Model komputerowy do oceny efektywności inwestowania w oszczędność energii w budynkach mieszkalnych*, Opracowanie ZPE IPPT PAN, Warszawa, grudzień 1993 r.
- [22] *Słownik wyrazów obcych PWN*, Warszawa 1980.
- [23] Laskowski L., *Badania bilansu i oszczędności energii cieplnej w budynkach mieszkalnych*, COW Nr 7-8/1985, str. 174-178.
- [24] Mejro Cz., *Podstawy gospodarki energetycznej*, Warszawa, WNT 1980.
- [25] *Architect's and Engineer's Guide to Energy Conservation in Existing Buildings*, DOE/RL/0183OP-H4, Washington, April 1990.