OGRANICZENIE STRAT CIEPŁA BUDYNKÓW

TEKST: JERZY BOGDAN ZEMBROWSKI

Od 1 stycznia 2014 roku w Unii Europejskiej obowiązują nowe wymagania techniczne WT znacznie zmniejszające energochłonność wszystkich rodzajów budynków wymagających ogrzewania. Mogą być one dla architekta wyzwaniem.

Wszystko za sprawą nowelizacji europejskiej Dyrektywy EPBD[1]. Ograniczenia te zostały zwiększone w roku 2017 i wzrosną jeszcze w 2021. Projekt budowlany każdego typu obiektu zgodnie z rozporządzeniem[2] musi zawierać nie tylko szczegółową charakterystykę energetyczną, lecz także techniczno-ekonomiczną analizę możliwości racjonalnego wykorzystania wysokoefektywnych alternatywnych systemów zaopatrzenia budynku w energię cieplną ze szczególnym uwzględnieniem źródeł odnawialnych. Ponadto, musi on zawierać optymalizacyjne porównanie dwóch wybranych systemów zaopatrzenia w energię: konwencjonalnego i alternatywnego lub hybrydowego, oraz wykazywać racjonalność tego zawartego w projekcie. Mimo że od wprowadzenia WT[3] minęło już pięć lat, nadal w projektach budowlanych albo brak charakterystyk energetycznych, albo są to tylko ich namiastki. Architekt może zarówno wykonać ją sam, jak i skorzystać z pomocy specjalisty fizyki budowli albo wymagać jej od projektanta instalacji ogrzewania i wentylacji jako składnika projektu branżowego. Niezależnie od drogi, jaką wybierze, powinien w miarę swobodnie poruszać się po tych zagadnieniach, aby móc porozumieć się z konsultantem oraz przedstawić je inwestorowi, ponieważ w trakcie analiz nieuniknione są modyfikacje na etapie tworzenia projektu. Często ich wyniki powodują, że konieczna jest kompletna zmiana koncepcji. Obecne projektowanie budynków przypomina trochę ruch modelu samolotu na uwięzi – lata, nawet wykonuje akrobacje, ale tylko w takim stopniu, w jakim pozwala mu na to linka w ręku modelarza. Ponieważ WT zawierają ściśle określone wymagania, nie ma możliwości ani wydłużenia linki, ani rezygnacji z niej na rzecz sterowania falami radiowymi. Podobnie jest z analizami energetycznymi. Tego współczesny architekt musi być świadomy.

PRZYKŁAD PRAKTYCZNY

Najbardziej przekonuje przykład wzięty z życia. Rozpatrzmy zatem aspekt energetyczno-ekonomiczny i prześledźmy możliwości architekta w zakresie dopasowania projektu do wymagań WT na przykładzie budynku jednorodzinnego przedstawionego na rysunku 1.

1 Dyrektywa 2010/31/UE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 19.05.2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.

2 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego ze zmianami z dnia 21 września 2013 r. obowiązującymi od 1.01.2014 r.

3 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, ze zmianami z dnia 5.07.2013 r. obowiązującymi od 1.01.2014 r.

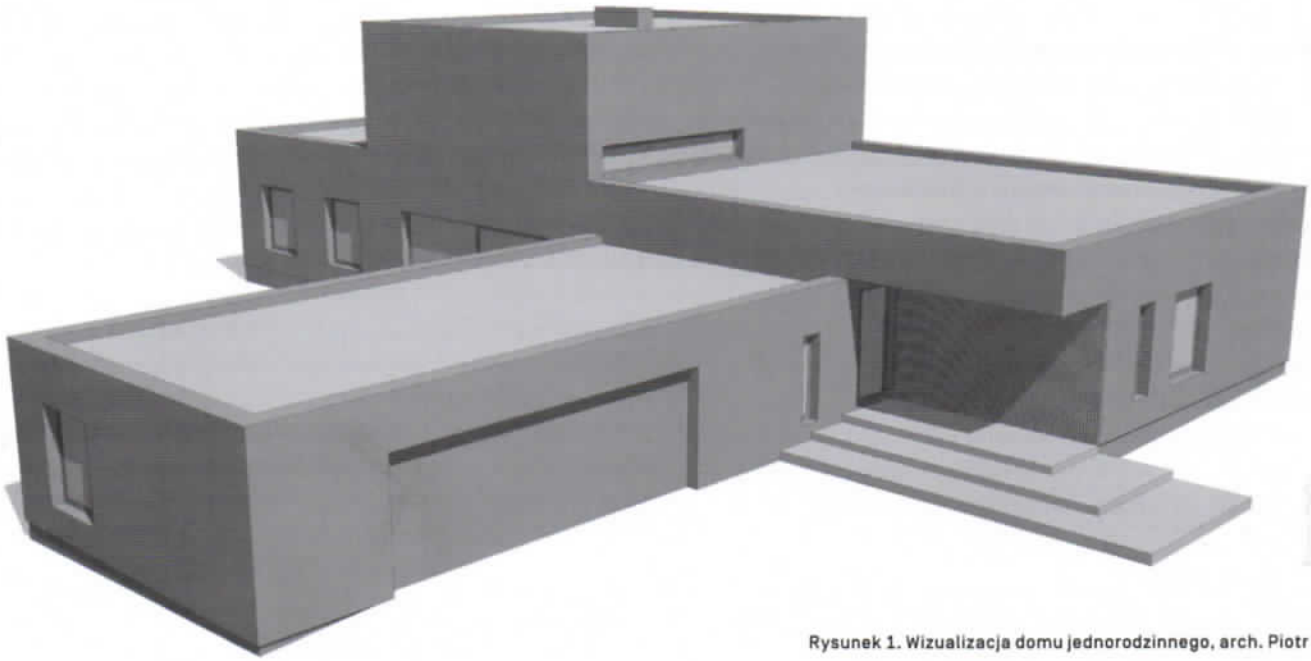
Poddany analizie obiekt to dom dla 4–5 osób, bez podpiwniczenia, o kubaturze zewnętrznej ogrzewanej równej 1230 m^3, zlokalizowany pod Białymstokiem, posadowiony na gruncie piaszczystym, o powierzchni użytkowej parteru 289 m^2 i piętra 72 m^2, przykryty stropodachem wentylowanym, z instalacją zasilaną c.o./c.w.u. z kotła olejowego z zamkniętą komorą spalania z programatorem. Zgodnie z WT współczynniki przenikania ciepła przegród zewnętrznych wynoszą: $U_{ścian}$ – 0,23 W/m^2K, $U_{stropodachu}$ – 0,18 W/m^2K, $U_{podłogi}$ – 0,30 W/m^2K, U_{okien} – 1,1 W/m^2K, U_{drzwi} – 1,5 W/m^2K. Przy założeniu wentylacji grawitacyjnej lub hybrydowej, instalacji ogrzewania podłogowego i grzejnikowego wodnego oraz zasilania w energię cieplną z kotła kondensacyjnego 55/45°C na olej opałowy obliczone według metodologii[4] wartości wskaźników zapotrzebowania do ogrzewania, wentylacji i c.w.u. domu wynoszą:

- nieodnawialnej energii pierwotnej (EP) 100,97 kWh/m^2rok;
- energii końcowej (EK) 87,14 kWh/m^2rok.

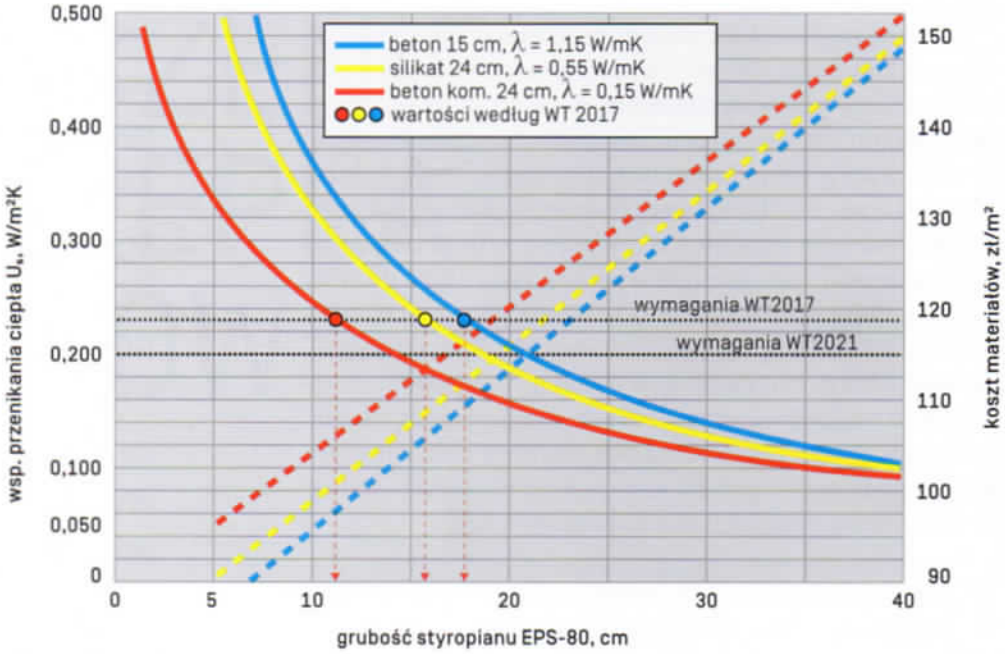
Dopuszczalna wartość EP dla domu to 93,19 kWh/m^2rok. Zatem ta uzyskana nie spełnia wymagań WT 2017 w zakresie rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną, mimo że są spełnione dopuszczalne wartości współczynników przenikania ciepła U tracących je poszczególnych przegród. Pierwszym naturalnym odruchem projektanta jest próba zmniejszenia powyższych strat za pomocą grubszej termoizolacji. Przeanalizujmy zatem możliwości w tym zakresie.

→ Obecne projektowanie budynków przypomina trochę ruch modelu samolotu na uwięzi – lata, nawet wykonuje akrobacje, ale tylko w takim stopniu, w jakim pozwala mu na to linka w ręku modelarza. Ponieważ WT zawierają ściśle określone wymagania, nie jest możliwe ani wydłużenie linki, ani rezygnacja z niej na rzecz sterowania falami radiowymi. Podobnie jest z analizami energetycznymi. ←

4 Rozporządzenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 27.02.2015 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej.



Rysunek 1. Wizualizacja domu jednorodzinnego, arch. Piotr Sołowiej.



Rysunek 2. Zależność współczynnika przenikania ciepła U ścian zewnętrznych od grubości ocieplenia styropianem metodą BSO.

ŚCIANY ZEWNĘTRZNE

Na rysunku 2. linią ciągłą przedstawione zostały wyniki obliczeń współczynników przenikania ciepła U ściany zewnętrznej domu według wskazań normy[5]. Analizie poddano trzy przykładowe materiały ścienne: żelbet grubości 15 cm, bloczki silikatowe grubości 24 cm oraz bloczki z betonu komórkowego grubości 24 cm. Rozważmy ocieplenie styropianem EPS metodą bezspoinową BSO (ETICS). Zależność współczynnika U od grubości ocieplenia jest krzywoliniowa, więc w miarę jej wzrostu następuje coraz mniejszy spadek jego wartości. Wykres pokazuje zatem, że najbardziej efektywne rezultaty występują przy niewielkich grubościach ocieplenia. Dla większych funkcja staje się coraz bardziej płaska, a powyżej 30 cm praktycznie nie ma znaczenia rodzaj materiału ściennego, zaś wartości U ulegają zmniejszeniu tylko w minimalnym stopniu. Ma to ważne znaczenie dla kosztów ogrzewania domu. Linie przerywane przedstawiają koszt materiałów 1 m² ściany.

Zwiększenie grubości ocieplenia – w stosunku do wymaganej przez WT 2017 – o 10 cm dla ściany wykonanej z betonu komórkowego przekłada się na redukcję kosztów energii o 760 zł w skali roku, jednak koszt ścian domu wzrośnie o 4250 zł. Zatem prosty czas zwrotu nakładów SPBT wyniesie 6 lat. Można to uznać za działanie ekonomicznie uzasadnione. Z kolei jeśli zwiększymy grubość styropianu o 20 cm, to koszt ścian wzrośnie o 8500 zł, oszczędność energii wyniesie 1140 zł/rok, zaś SPBT – 8 lat. Opłacalność tego działania jest dyskusyjna. Gdy zaś zwiększymy grubość styropianu o 30 cm, to koszt ścian wzrośnie o 12750 zł, oszczędność energii wyniesie 1235 zł/rok, zaś SPBT – 11 lat, co już na pewno nie jest opłacalne.

Ten mechanizm pokazuje, że nie można bezkrytycznie zwiększać grubości ocieplenia celem uzyskania mniejszych wartości współczynników przenikania ciepła U w dążeniu do zmniejszenia wskaźnika zużycia energii EP, aby spełnić wymagania WT. To właśnie dlatego w rozporządzeniu widnieje zapis, że rozwiązania zawarte w projekcie budowlanym powinny być racjonalne pod względem ekonomicznym.

STROPODACH WENTYLOWANY

Rysunek 3. przedstawia wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła U dla stropodachu według wymagań ww. normy. Funkcja przedstawiająca zależność współczynnika U od grubości wełny mineralnej także ma charakter krzywoliniowy, choć jest nieco mniej wypukła niż w przypadku ścian. Dlatego zastosowanie grubości ocieplenia nawet 30 cm i większej wywiera znaczący wpływ na straty ciepła stropodachu.

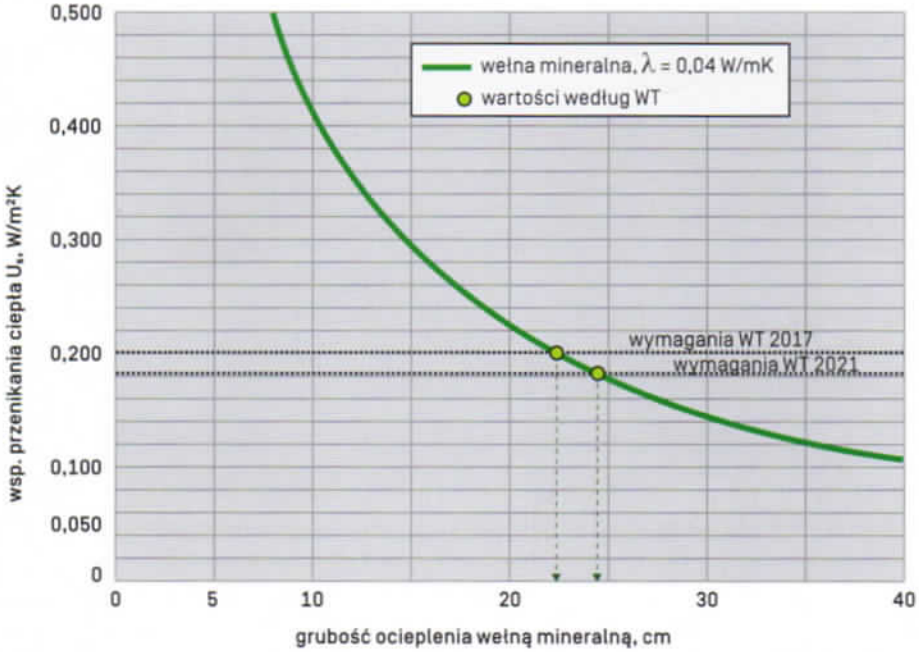
Z tego powodu ograniczenia wartości U dla tego rodzaju przegrody według WT są ostrzejsze niż dla ścian. Jednakże i tu widać, że zwiększenie grubości izolacji o ponad 40 cm przynosi niewielki zysk.

PODŁOGA NA GRUNCIE

Obliczenia współczynnika przenikania ciepła U podłogi na gruncie wykonuje się według WT stosownie do normy[6] z uwzględnieniem: rodzaju gruntu w posadowieniu, poziomu wód gruntowych, wymiarów geometrycznych podłogi (łącznie z grubością otaczających ją ścian zewnętrznych), obwodu podłogi stykającej się ze ścianami zewnętrznymi, całkowitej grubości ścian w strefie cokołu, materiału ścian w tej strefie, ma-

5 PN-EN ISO 6946:2008 *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.*

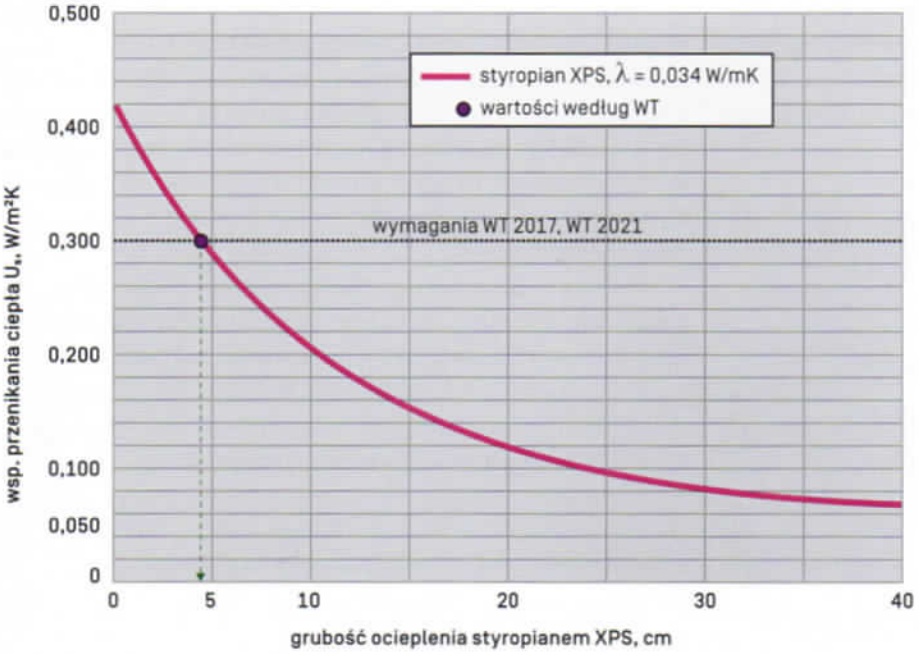
6 PN-EN ISO 13370:2008 *Cieplne właściwości użytkowe budynków. Przenoszenie ciepła przez grunt. Metody obliczania.*



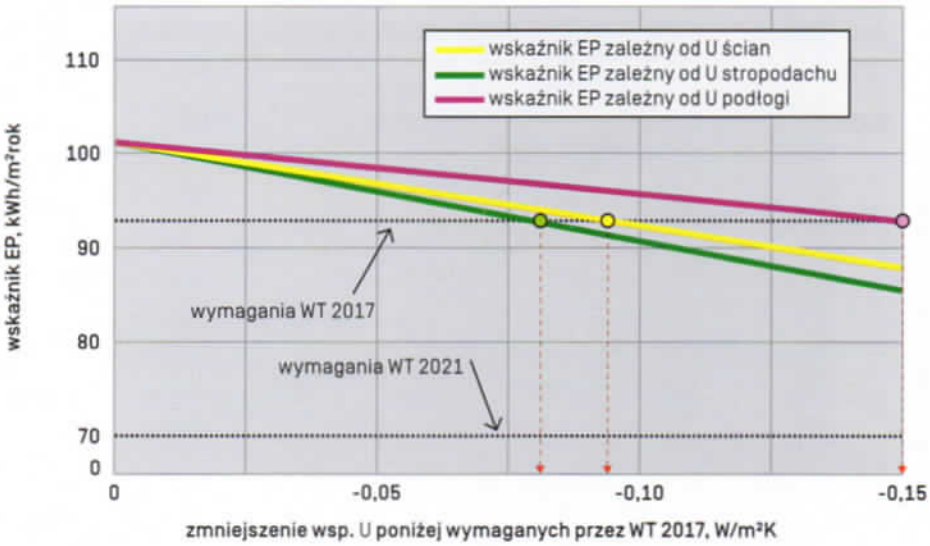
Rysunek 3. Zależność współczynnika przenikania ciepła U stropodachu od grubości ocieplenia wełną mineralną.

teriału i grubości fundamentu, materiału i grubości podsypki pod podłogą, grubości betonu podkładowego, rodzaju i grubości termoizolacji podłogi oraz grubości i rodzaju jastrychu. Są to znacznie bardziej skomplikowane obliczenia niż w przypadku przegród płaskich, takich jak ściana czy stropodach, ponieważ ciepło z pomieszczenia parteru w największym stopniu przenika ze strefy styku jastrychu podłogi ze ścianą zewnętrzną i dalej poprzez fundament oraz cokół na zewnątrz, a także przez podłogę i fundament do gruntu i łukiem przez grunt do otoczenia. Tak dzieje się w bliskiej strefie wokół ścian zewnętrznych, tj. w pasie podłogi o szerokości do 2 m. W pozostałej części tej strefy ciepło przenika prostopadle do gruntu strumieniem zależnym od jego rodzaju i poziomu wody gruntowej. Dlatego wartość współczynnika U zależy od wymiarów geometrycznych podłogi.

Rysunek 4. przedstawia wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła podłogi na gruncie w analizowanym domu w zależności od grubości ocieplenia styropianem (z ociepleniem



Rysunek 4. Zależność współczynnika przenikania ciepła U podłogi na gruncie od grubości jej ocieplenia.



Rysunek 5. Zależność wartości wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej domu od obniżania wartości współczynnika przenikania U poszczególnych przegród.

strefy cokołowej grubością 18 cm). Zależność współczynnika U także ma charakter krzywoliniowy. Przy grubościach ocieplenia podłogi przekraczających 20 cm efekt spadku jego wartości jest już znikomy. Podłogi na gruncie w wymaganiach WT objęto jednakowym ograniczeniem 0,30 W/m²K aż do roku 2021. Zwróćmy uwagę, że dla spełnienia tych wytycznych wystarczy 4-centymetrowa warstwa styropianu. Jednakże, w wyniku identycznego rozumowania odnośnie do opłacalności zwiększania grubości ocieplenia, jak w przypadku ścian, dowiadujemy się, że wynosi ona 14 cm, co daje czas zwrotu nakładów SPBT równy 6 lat.

ZMIANA ZUŻYCIA ENERGII PRZEZ BUDYNEK POPRZEZ OCIEPLENIE PRZEGRÓD

Możliwe jest zmniejszanie strat ciepła budynku przez obniżenie wartości współczynników przenikania ciepła U poszczególnych przegród. Zbadajmy, jak ten proceder wpływa na wskaźnik EP obliczany według rozporządzenia. Rysunek 5. przedstawia zmiany jego wartości dla analizowanego domu (przy zasileniu z kotła olejowego) w zależności od stopnia zmniejszenia współczynników U, niezależnie dla każdego rodzaju przegrody.

- Linia żółta przedstawia zmiany wskaźnika EP przy obniżaniu U ścian i przy stałych (zgodnych z WT 2017) współczynnikach przenikania ciepła pozostałych przegród.
- Linia niebieska przedstawia zmiany wskaźnika EP przy obniżaniu U stropodachu oraz przy stałych (zgodnych z WT 2017) współczynnikach przenikania ciepła pozostałych przegród.
- Linia brązowa przedstawia zmiany wskaźnika EP przy obniżaniu U podłogi i przy stałych (zgodnych z WT 2017) współczynnikach przenikania ciepła pozostałych przegród.

Widać, że za pomocą redukcji straty ciepła budynku przez przenikanie tylko zwiększaniem jakości czy grubości termoizolacji można spełnić jedynie wymagania WT 2017 w zakresie dopuszczalnych wartości EP. Realizacja tą drogą wymagań WT 2021 nie jest możliwa. Mimo że rozważamy przykład domu jednorodzinnego, te same wnioski wyciąga się dla jakichkolwiek innych rodzajów budynków mieszkalnych czy użyteczności publicznej.

Podczas sporządzania projektu budowlanego i poszukiwania optymalnych rozwiązań materiałowych w zakresie charakterystyki energetycznej architekt musi znać odpowiedzi na szereg pytań. Musi, ponieważ na pewno zada je inwestor świadomy zasad współczesnego projektowania i dążący do minimalizacji wydatków na swoją inwestycję. Te pytania to:

- Czy inwestowanie w większe grubości termoizolacji poszczególnych przegród jest opłacalne?
- Czy poniesione wyższe koszty na stolarkę superenergooszczędną zwrócą się w rozsądnym czasie?

→ Powierzchnia wymiany ciepła zależy od geometrii obiektu, a więc całkowicie od woli architekta i inwestora. ←

- Czy jest inna droga do spełnienia WT niż zmniejszanie współczynników U?
- Jakie możliwości ma architekt w zakresie bezpośredniego i pośredniego wpływania na charakterystykę energetyczną budynku?
- Czy rozwiązania według WT należy traktować jako optymalne, czy przeciwnie?
- Czy warto już dzisiaj ograniczać straty ciepła i projektować ze spełnieniem wymagań WT 2021?
- Jak bardzo optymalizacja rozwiązań projektowych pozwoli inwestorowi zmniejszyć wydatki na budowę i koszty eksploatacji?

OPTYMALNA WARTOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA

Zgodnie z prawem Pecleta strumień ciepła przenikającego przez przegrodę budowlaną Φ_T (W) jest wprost proporcjonalny do różnicy temperatur między ośrodkiem wewnętrznym t_i (°C) i zewnętrznym t_e (°C), współczynnika przenikania ciepła U (W/m²K) przegrody, jej powierzchni A (m²), a także do liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ (W/mK), liniowego mostka cieplnego o długości l (m) oraz punktowego współczynnika przenikania ciepła χ (W/K) punktowego mostka cieplnego. Zależność tę przedstawia wzór[7]:

$$\Phi_T = (t_i - t_e)\left(\sum UA + \sum \Psi l + \chi\right), \text{W}$$

Z powyższego równania płynie dla architekta wiele praktycznych wniosków. Różnica temperatur $t_i - t_e$ jest uzależniona od strefy klimatycznej danej lokalizacji i projektowanych temperatur wewnątrz budynku. Im niższa jest t_e oraz im wyższe są t_i w budynku zimą, tym większe straty ciepła przez przenikanie. Powierzchnia wymiany ciepła A zależy od geometrii obiektu, a więc całkowicie od woli architekta i inwestora. Współczynnik przenikania ciepła U jest odwrotnie proporcjonalny do oporów przenikania ciepła przez warstwy przegród, które są wprost proporcjonalne do grubości warstw i odwrotnie proporcjonalne do ich współczynników przewodzenia λ.

Im mniejsze uzyska się wartości U i im mniejsze są liniowe Ψ oraz punktowe χ współczynniki przenikania ciepła, tym mniejsze będą straty ciepła Φ_T i tym samym, roczne koszty eksploatacji K_{eks}. Zależą one też od aktualnej jednostkowej ceny energii pokrywającej straty ciepła budynku, stopy dyskontowej i stopy inflacji. Zależność tę pokazuje linia granatowa na rysunku 6. Zachodzi też relacja przeciwstawna, bowiem im niższa jest wartość U, tym większe będą roczne odpisy kosztów inwestycyjnych przegrody K_{inw} z uwagi na grubszą lub droższą termoizolację, co pokazuje krzywa czerwona. Te przeciwstawne zależności pozwalają określić wynikową wartość rocznych kosztów K_{sum} (krzywa niebieska). Funkcja ta ma minimum kosztów sumarycznych K_{ek}. Jego wartości odpowiada ekonomicznie uzasadniona wartość współczynnika przenikania ciepła U_{ek}. Jest ona obliczana oddzielnie dla każdej przegrody projektowanego budynku.

Jeśli w obiekcie zostaną przewidziane przegrody o takim współczynniku U_{ek}, koszty inwestycyjne wynikające ze strat ciepła będą zminimalizowane, a jednocześnie uzyskane zostaną najniższe z możliwych roczne koszty eksploatacji budynku. Z uwagi na stopniowalność produkowanych grubości termoizolacji i materiałów ściennych w sąsiedztwie wartości U_{ek} występuje pewien zakres wartości współczynnika przenikania ciepła ΔU_{ek}, w którym będzie jeszcze zachodzić minimum kosztów sumarycznych.

Algorytm optymalizujący koszty K_{sum} jest wprawdzie dość zawiły, ale za to bardzo przydatny oraz wiarygodny. Uwzględnia on wpływ wszystkich kształtujących je czynników,

7 J.B. Zembrowski, *Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów*, BDB, Białystok 2017.

Rysunek 6. Ideowa zależność kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych ogrzewania budynku w zależności od współczynnika przenikania ciepła U przegrody.

→ Optymalizacja wartości U_{ek} pozwala bez trudu zmniejszyć koszty inwestycyjne o 16–33 tys. zł dla średniej wielkości domów jednorodzinnych w stosunku do wymagań WT i o odpowiednio więcej w przypadku budynków kubaturowych. ←

tj.: współczynniki przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych i ich cenę, nakłady na robociznę, stopę dyskontową uwzględniającą spadek wartości pieniądza w czasie, stopę wzrostu kosztów ogrzewania ponad stopę spadku wartości pieniądza w czasie, roczny odpis amortyzacyjny inwestycji, roczny odpis amortyzacji systemów i instalacji ogrzewania, ciepłej wody użytkowej i wentylacji, głębokość i rodzaj posadowienia budynku, warunki gruntowo-wodne, zarejestrowane statystyczne średnie miesięczne temperatury powietrza zewnętrznego w danej lokalizacji oraz aktualne koszty dostępnych źródeł energii[8].

W przypadku analizowanego domu przy stopie dyskontowej 5%, wzroście cen energii ponad stopę inflacji o 3%, okresie dyskontowania 20 lat i zasilenia domu kondensacyjnym kotłem opalanym olejem uzyskuje się zoptymalizowane wartości:

- $U_{ek,\ ścian}$ – 0,107 W/m²K (0,141 W/m²K kocioł na gaz ziemny);
- $U_{ek,\ stropodachu}$ – 0,115 W/m²K (0,152 W/m²K kocioł na gaz ziemny);
- $U_{ek,\ podłogi}$ – 0,155 W/m²K (0,194 W/m²K kocioł na gaz ziemny);
- U_{okien} – 0,86 W/m²k (0,92 W/m²K kocioł na gaz ziemny);
- U_{drzwi} – 1,10 W/m²k (1,20 W/m²K kocioł na gaz ziemny).

Wprowadzenie tych wartości pozwala uzyskać zoptymalizowane wskaźniki charakterystyki energetycznej analizowanego domu wyposażonego w wentylację hybrydową oraz ogrzewanie c.w.u. zasilane z kotła kondensacyjnego opalanego olejem opałowym:

- nieodnawialnej energii pierwotnej (EP) 71,15 kWh/m²rok;
- energii końcowej (EK) 60,03 kWh/m²rok.

Jak widać, wartość EP z zapasem spełnia aktualnie obowiązujące WT.

Ogólnie można wskazać zależność optymalizacyjną – im droższa energia zasilająca budynek, tym mniejsza wartość U_{ek} (grubsze termoizolacje) i odwrotnie – im tańsza energia, tym większe U_{ek} (cieńsze termoizolacje). Ponadto, przy tańszym materiale termoizolacyjnym bardziej opłacalne są niższe wartości U_{ek} (grubsze termoizolacje) i odwrotnie: im droższe jest wykonanie termoizolacji, tym większy jest U_{ek} (cieńsza termoizolacja).

Optymalizacja wartości U_{ek} pozwala bez trudu zmniejszyć koszty inwestycyjne o 16–33 tys. zł dla średniej wielkości domów jednorodzinnych w stosunku do wymagań WT i odpowiednio więcej w przypadku budynków kubaturowych. Dzięki stosowaniu U_{ek} uzyskuje się drugie tyle oszczędności na kosztach eksploatacji w ciągu 20 lat. ●

8 J.B. Zembrowski, *Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów*, BDB, Białystok 2017.

JERZY BOGDAN ZEMBROWSKI

specjalista fizyki budowli, autor książki *Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów*, prowadzi serwis budowlany www.bdb.com.pl