Straty ciepła związane z wentylacją budynków (Q_w)

Straty ciepła związane z wentylacją budynków uzależnione są od ilości powietrza wentylacyjnego i jego temperatury; wynikają one z konieczności podgrzania zimnego powietrza do temperatury pokojowej

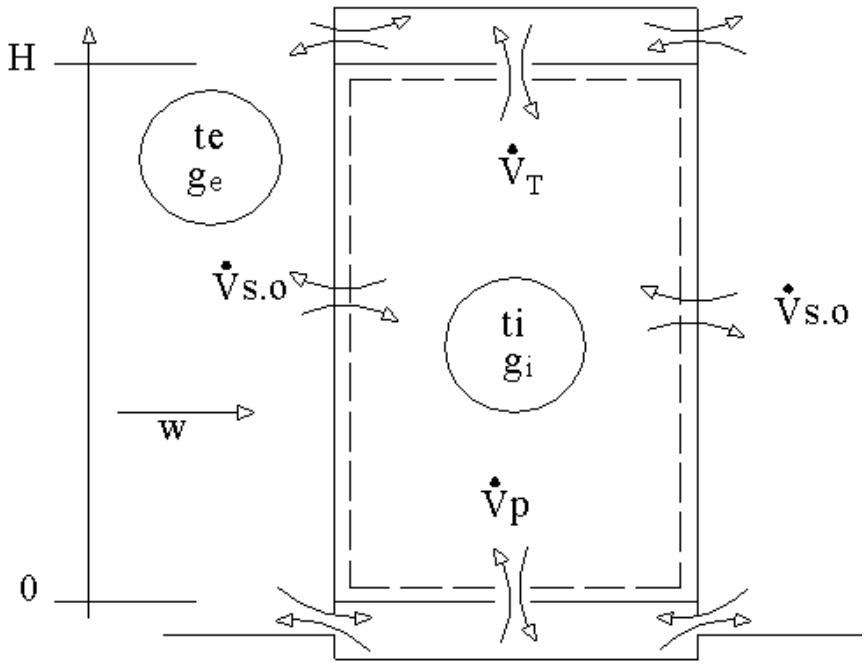
$$Q_w = \Sigma Q_{wj} = \Sigma G_{wj} \times c \times \Delta T = \Sigma V_{wj} \times c\rho \times \Delta T$$

$$q_w = WP \times c\rho$$

przy czym wymiana powietrza → $WP = V_W/K_E$, zaś $c\rho$ to jednostkowa pojemność cieplna powietrza wentylacyjnego (≈ 0,34÷0,38 Wh/m^3K).

Uwaga: W analizach powinna być uwzględniona kubatura efektywna (ilość powietrza biorąca udział w wymianie → $K_E \approx 0{,}7\ K_B$)

Posługując się uproszczonymi procedurami przy pominięciu rozplanowania wewnętrznego i założeniu stałej temperatury pomieszczeń budynek potraktowany może być jako prostopadłościan ograniczony czterema pionowymi przegrodami zewnętrznymi oraz stropami nad piwnicami i najwyższymi piętrami, przy czym wszystkie przegrody są dla powietrza przepuszczalne



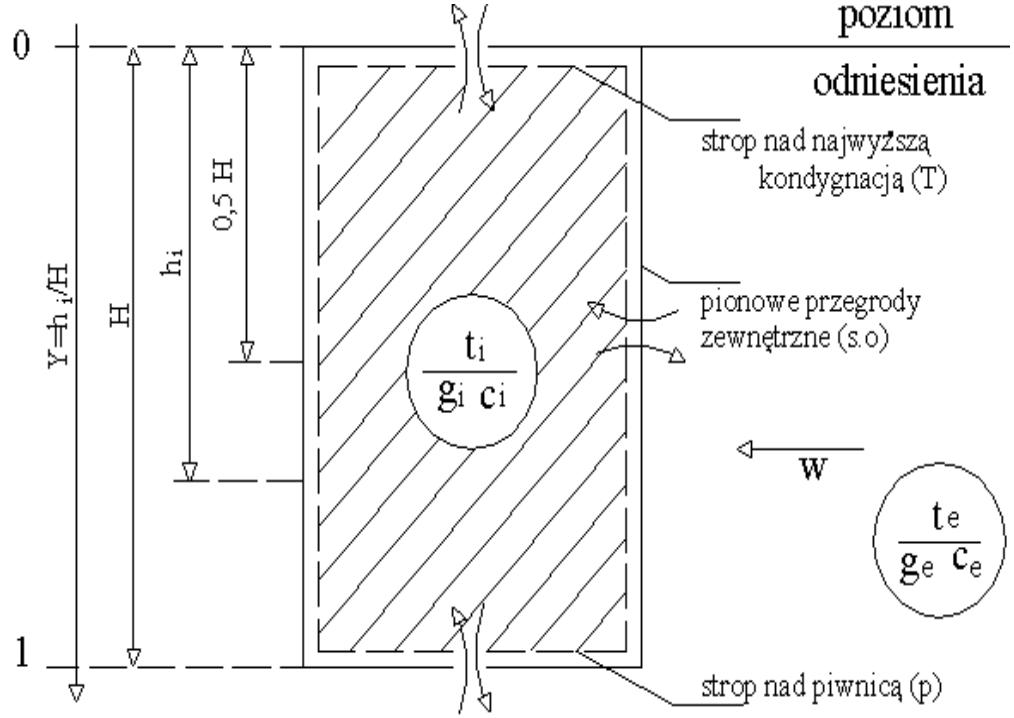
Sumaryczna ilość powietrza wymieniana w sposób naturalny z otoczeniem zewnętrznym

$$\dot{V}_w = \sum_{j=1}^{4} \dot{V}_{s,o_j} + \dot{V}_p + \dot{V}_T$$

$$V_w = a_m \times A_e \times (\Delta p_m)^{\alpha}$$

Średnia różnica ciśnienia (Δp_m) pomiędzy ciśnieniem zewnętrznym i wewnętrznym

$$\Delta p_m = \Sigma \Delta p_j (A_j/A_e)$$



Średni współczynnik przenikania powietrza dla powierzchni powłoki budynku

$$a_m = \Sigma\, a_j (A_j/A_e)(|\Delta p_j/\Delta p_m|)^{\alpha} \mathrm{sgn}\Delta p$$

Współczynniki przenikania powietrza dla każdej z przegród mogą być z pewnym uproszczeniem wyrażone w postaci średniej ważonej, z ich wartości dla wyróżnionych części tych przegród przepuszczalnych dla powietrza, a wagami będą tu udziały powierzchni tych części w całkowitej powierzchni rozpatrywanej przegrody

$$a_j = \Sigma\, a_i (A_i/A_e),\ m^3/m^2 s\ (Pa)$$

Na poziomie odniesienia ciśnienie atmosferyczne wynosi p_0, zaś ciśnienie wewnętrzne (p_i) i zewnętrzne (p_e) opisać można za pomocą równań:

$$p_i = p_0 + H g \rho_i + 0{,}5 c_i \rho_i w^2 \quad \text{oraz} \quad p_e = p_0 + H g \rho_e + 0{,}5 c_k \rho_e w^2$$

Przy przyjęciu względnej wysokości budynku $y = h_i/H$, różnica ciśnień po obu stronach przegród wynosi

$$\Delta p_j = 0{,}5 \rho_e \cdot w^2 \left(\Delta c_k + 2 \frac{\Delta T \cdot h_i \cdot g}{T_i \cdot w^2} \right)$$

Δc_k - aerodynamiczny współczynnik kształtu budynku

$\frac{\Delta T \cdot h_i \cdot g}{T_i \cdot w^2} = Ar$ liczba Archimedesa określająca stosunek siły wyporu termicznego do naporu wiatru

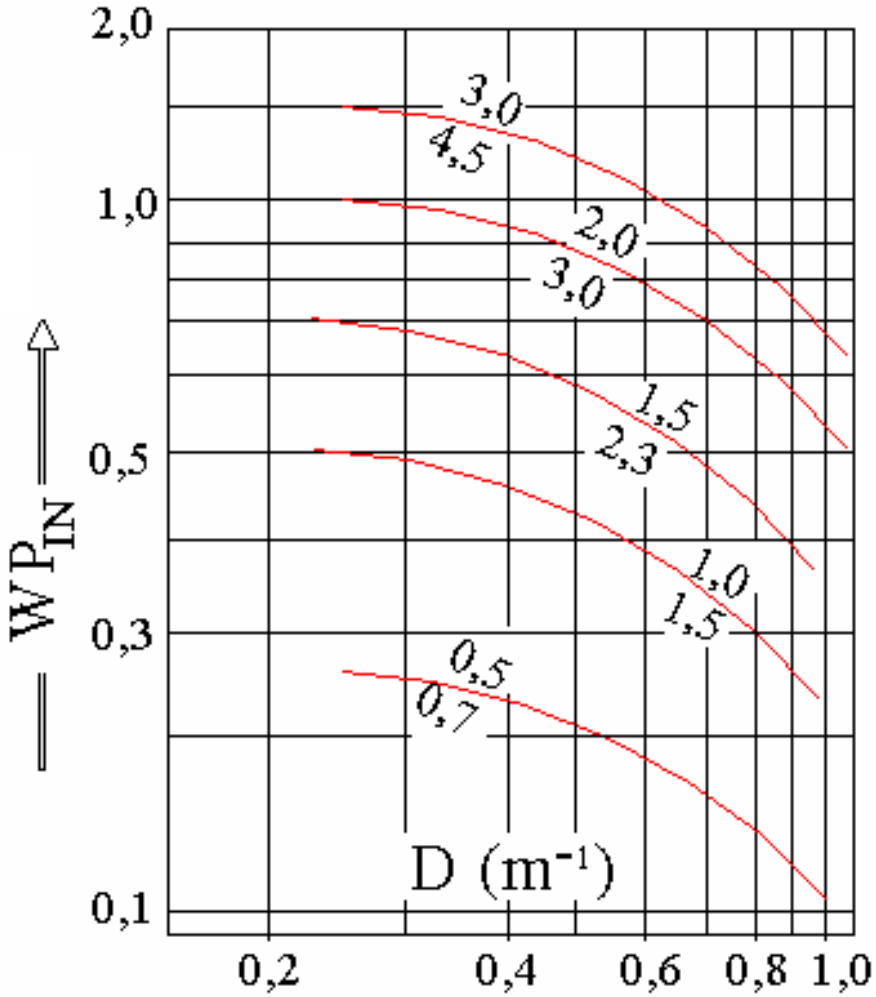
Różnicę ciśnień wyrazić można zatem w postaci równania

$$\Delta p_j = 0{,}5 \varsigma_e w^2 (\Delta c_k + 2 Ar Y)$$

dla pionowych przegród zewnętrznych ($Y=0{,}5$) $\rightarrow \Delta p_{s.o} = 0{,}5 \rho_e w^2 (\Delta c_k + Ar)$

dla stropu nad najwyższym piętrem ($Y=0{,}0$) $\rightarrow \Delta p_T = 0{,}5 \rho_e w^2 \Delta c_k$

dla stropu nad piwnicą ($Y=1{,}0$) $\rightarrow \Delta p_p = 0{,}5 \rho_e w^2 (\Delta c_k + 2Ar)$



Górne wartości na wykresie to współczynniki przenikania powietrza odniesione do powierzchni ścian (m^3/m^2h dla 1daPa), dolne do długości szczelin okna (m^3/mh dla) przy Δp = 1daPa

Charakterystyczną ilustracją znacznej liczby obliczeń mogą być dane przedstawione na rysunku dla kilkudziesięciu budynków różniących się geometrycznym współczynnikiem kształtu D. Obliczeń dokonywano przy założeniu, że ilość powietrza przenikającego przez przegrody pełne są pomijalne w stosunku do infiltracji przez stolarkę okienną. Do obliczeń przyjęto również średnie warunki zimowe sprowadzone do różnicy temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego ΔT = + 20K (t_e= 0˚C) i prędkości wiatru w = 3÷5 m/s

Jak widać z uzyskanych danych, wymianę powietrza w granicach 0,5-1,0/h (wartości pożądane w budownictwie powszechnym) warunkują współczynniki przenikania powietrza odniesione jedynie do powierzchni okien wynosił około 1,5÷2,0m^3/m^2h dla 1 daPa

Sumaryczne straty ciepła (Q_S)

Możliwe jest dokonywanie prostej optymalizacji strat przez uwzględnienie obu ich składowych, tzn. izolacyjności cieplnej i wymiany powietrza

$$\Sigma q_S = U_m \times D + 0{,}36 \times WP, \quad W/m^3K$$

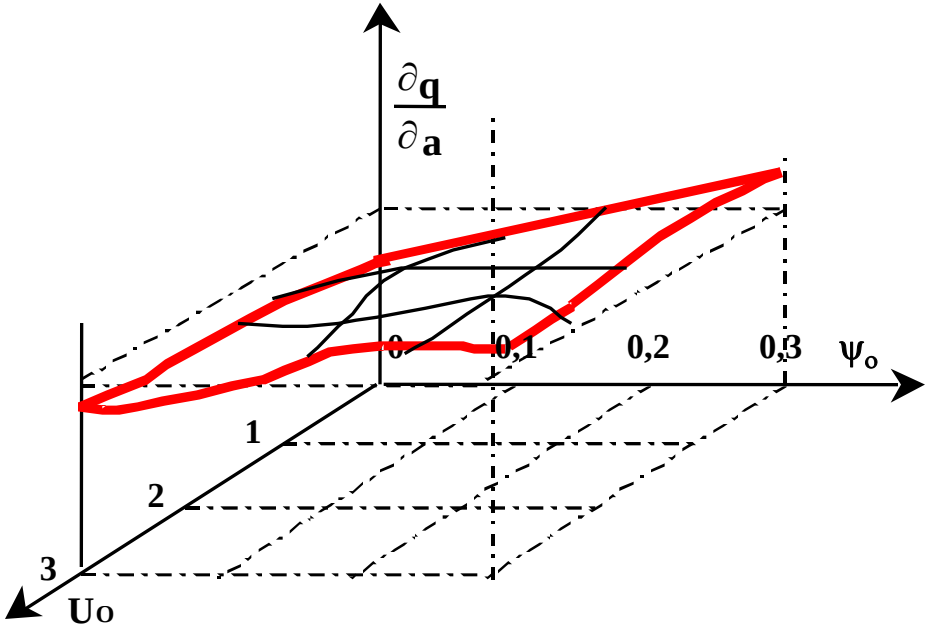
Szczególna przydatność powyższego równania wynika z możliwości szybkiej oceny udziału strat ciepła związanych z izolacyjnością cieplną lub wymianą powietrza, co może mieć znaczenie zarówno dla procesów fizycznych zachodzących w budynkach, jak i urządzeń i instalacji je wyposażających.

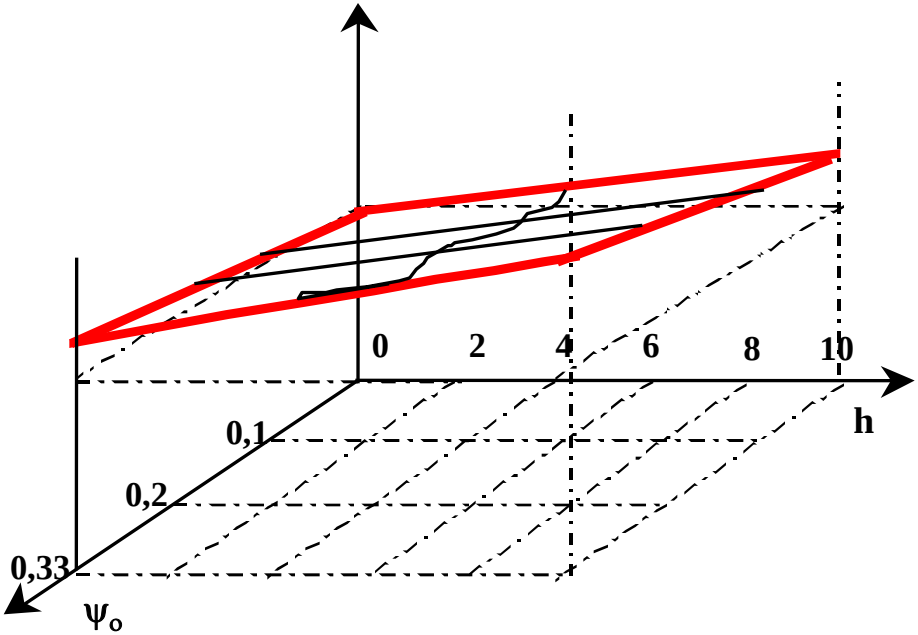
Przedmiotem takiej analizy byłoby poszukiwanie wymiarów obiektów, przy których łączne straty ciepła będą najmniejsze z możliwych przy określonych wartościach współczynników przenikania ciepła i ilości wymienianego powietrza.

Przykładowo, badając wpływ zmian długości obiektu uzyskamy:

$$\frac{\partial q}{\partial a} = b(U_p + U_T) + 2h(1-\psi_o)U_S + 2h \times \Phi \times U_O + 0{,}36 \times b \times h \times WP$$

Dla określonego typu budynku stosunek ten ma wartość będącą wynikiem wpływu wszystkich innych wymiarów (b, h) i uwzględnianych parametrów (np. U_i, ψ_o, WP)

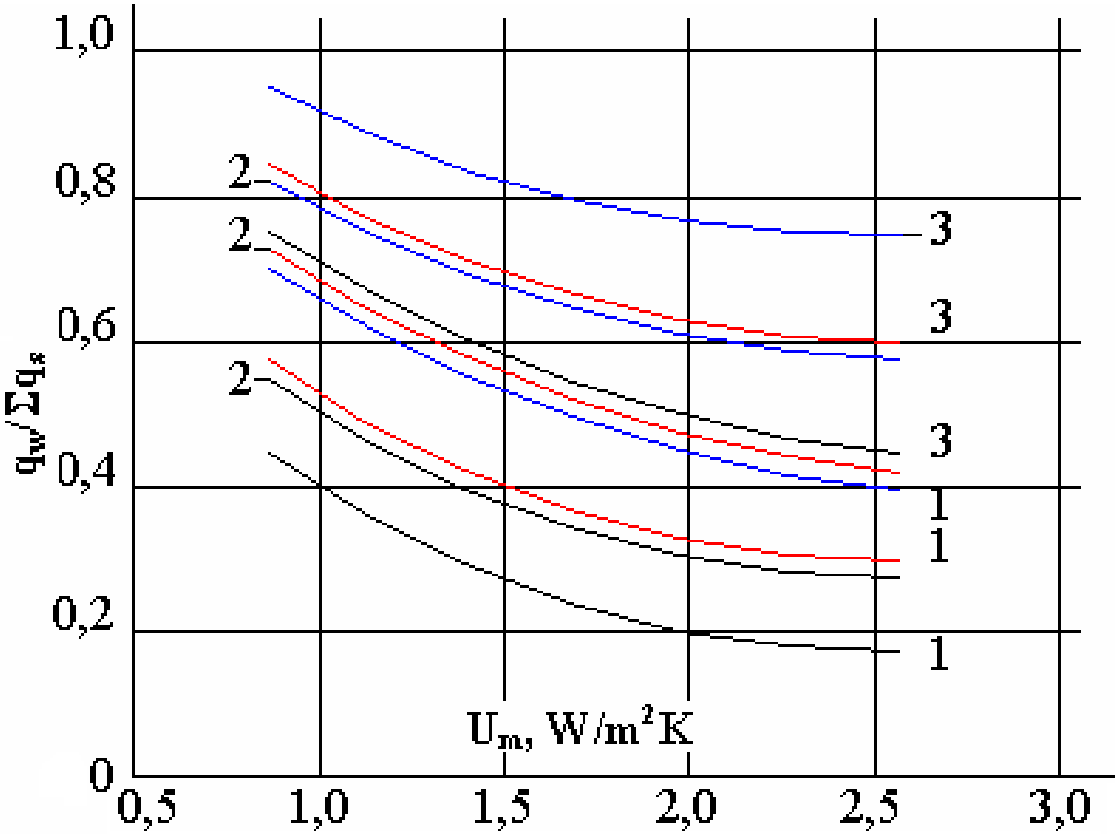




Wynikiem jest każdorazowo płaszczyzna, na której występuje poszukiwane minimum, a więc określony może zostać pożądany zakres zmian parametrów

Dla budynku jednorodzinnego o kubaturze $K_B \approx 500m^3$ minimalne straty ciepła wystąpią, gdy poszczególne czynniki zawierać się będą w następującym zakresie:

- ✓ **przeszklenie ścian pionowych nie będzie większe od 15 % i mniejsze od 12 %;**
- ✓ **współczynniki przenikania ciepła przez okna nie będą większe od 2,2W/(m²K) i mniejsze od 1,4W/(m²K),**
- ✓ **a wysokość budynku nie przekroczy 7 m i nie będzie niższa od 5 m**



W miarę, gdy współczynnik D maleje (rośnie kubatura w stosunku do powierzchni przegród), teoretycznie rosną jego potrzeby ciepła na podgrzanie powietrza. Wzrost ten jest najszybszy dla budynków wielorodzinnych (małe D). Dla budynków spełniających warunki przepisów, oraz zakładając wymianę powietrza na poziomie 1/h, udział potrzeb cieplnych na podgrzanie powietrza wentylacyjnego wynosi 65% dla budynków jednorodzinnych, 75% dla średnich i 85% dla wielorodzinnych o dużej kubaturze

1 – WP = 0,5/h; 2 – WP = 1,0/h; 3 – WP = 2,0/h; linia: czarna - D = 0,9/m.; linia czerwona – D = 0,6/m; linia niebieska – D = 0,3/m

W praktyce jednak niemal niemożliwym jest osiągnięci wymiany równej 1/h dla budynków z wentylacją naturalną. W rzeczywistości dla budynków jednorodzinnych uzyskuje się wymianę na poziomie 0,1/h, dla której udział zapotrzebowania ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego wynosi około 15%. Większe ilości wymian uzyskuje się dla budynków wielorodzinnych i dla nich udział ten wyniesie 60-70%

A. W miarę wzrostu izolacyjności cieplnej zewnętrznej powłoki budynków (U_m ↓) wzrasta udział zapotrzebowania ciepła związanego z wymianą powietrza. Zwiększenie tego udziału uzależnione jest również od wartości tej wymiany oraz od geometrycznego współczynnika kształtu budynków.

B. W miarę zmniejszania się wartości tego współczynnika (D↓) oraz zwiększania wymiany powietrza (WP↑) rosną ich straty ciepła wynikające z wartości tej wymiany, a ich udział w sumarycznych stratach ciepła zmienia się w szerokich granicach.

Zyski ciepła

Potrzeby cieplne uzyskuje się pomniejszając straty o zyski ciepła wewnętrznego oraz wynikające z promieniowania słonecznego (mogą wystąpić również innego typu źródła ciepła wewnętrznego)

Zyski ciepła wewnętrznego (Q_i)

Wynikają z przeznaczenia i użytkowania pomieszczeń. Ich źródłami są urządzenia wyposażające pomieszczenia, tj. do przygotowania ciepłej wody użytkowej, posiłków, aparaty elektryczne, sztuczne oświetlenie, fizjologia organizmu ludzkiego, itp., a także obciążenia związane z technologią pomieszczeń przemysłowych (piece przemysłowe, maszyny, gorące powierzchnie, itp.)

Dokładne ustalenia tych zysków jest trudne głównie z uwagi na ich okresową zmienność (badania ankietowe). Możliwe jest jedynie wskaźnikowe określanie, np. w oparciu o ilość użytkowników. Przykładowo dla budynków jednorodzinnych (4-8 użytkowników) sumaryczne zyski ciepła wewnętrznego szacować można na 0,7 - 1,5 kW w zależności od wyposażenia pomieszczeń oraz aktywności ludzi. W budynkach wielorodzinnych (duża ilość użytkowników) sięgają one do 6 kW (są to jednak wartości orientacyjne).

Średnią wartość zysków od ludzi w odniesieniu do pojedynczego dnia zimowego przyjmować można na poziomie 1200 Wh/osobę. Zyski ciepła od urządzeń elektrycznych w tych samych warunkach są równe od około 7000 Wh (dla pojedynczego mieszkania w budynkach wielorodzinnych) do ponad 8000 Wh (w budynkach jednorodzinnych o średnim standardzie

Zyski ciepła od promieniowania słonecznego (Q_R)

Zależą min. od szerokości geograficznej na jakiej położony jest rozpatrywany obiekt, orientacji jego przegród w stosunku do do położenia Słońca (stron świata), pory roku, dnia itp. Warto zwrócić uwagę, że nawet w okresie zimy i w warunkach atmosfery przemysłowej (duże zanieczyszczenie powietrza) zyski ciepła dla pionowych przegród mogą sięgać w Polsce 80 W/m^2

W celu dokładniejszego oszacowania tych zysków należy dysponować kompletem danych opisujących promieniowanie słoneczne również w okresie zimowym (tzw. rok klimatyczny)

Można także wstępnie założyć, że z całkowitej energii słonecznej w atmosferze rozpraszane jest 17-18%. Pozostała jej część jest w około 80% przekazywana przez przegrody przeźroczyste (okna), zaś 2-3% zostaje zakumulowane w przegrodach zewnętrznych. Przy takich założeniach zyski z tytułu promieniowania słonecznego mogą być oszacowane dla całego budynku za pomocą równania:

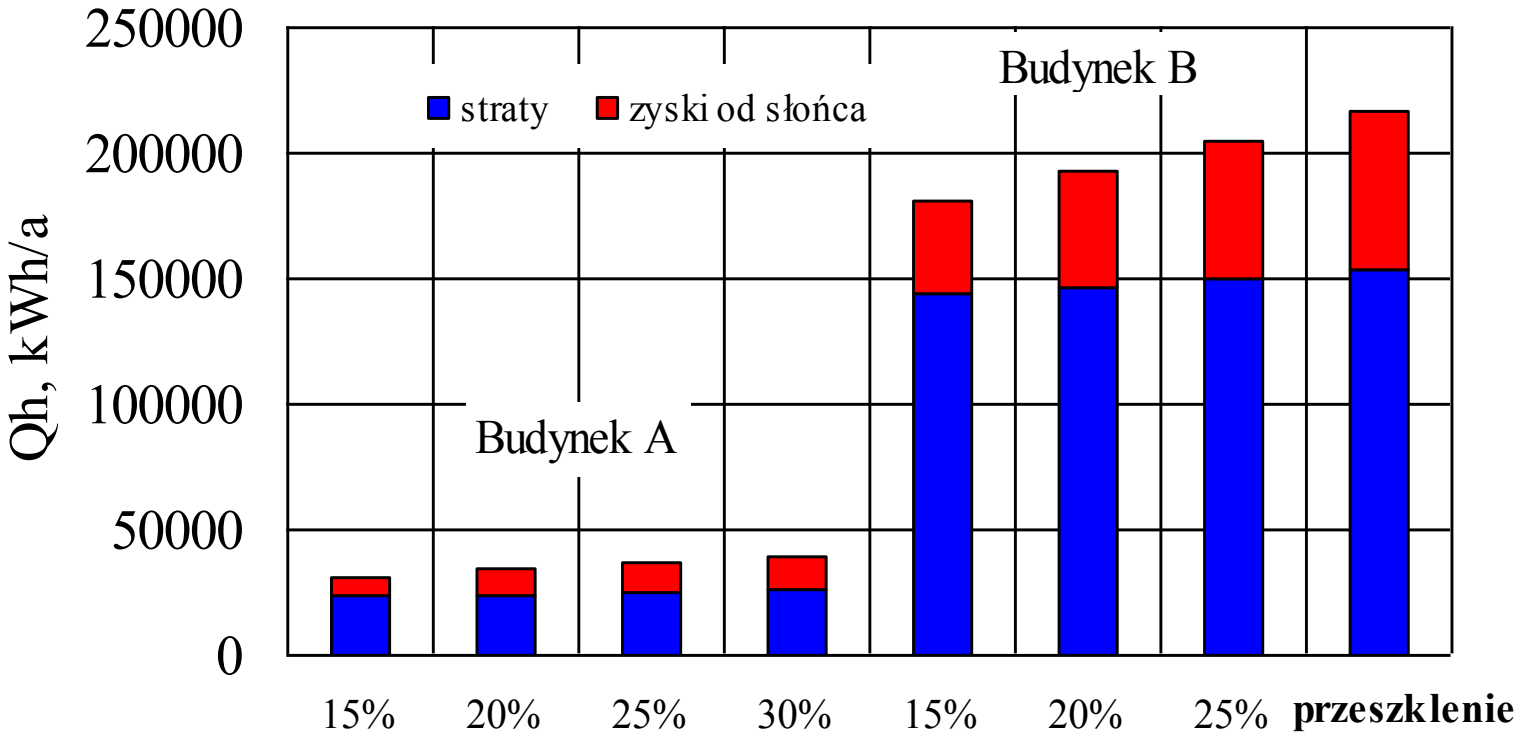
$$Q_R = A\,I\,(\varphi_O\,p_O + \varphi_S\,p_S)$$

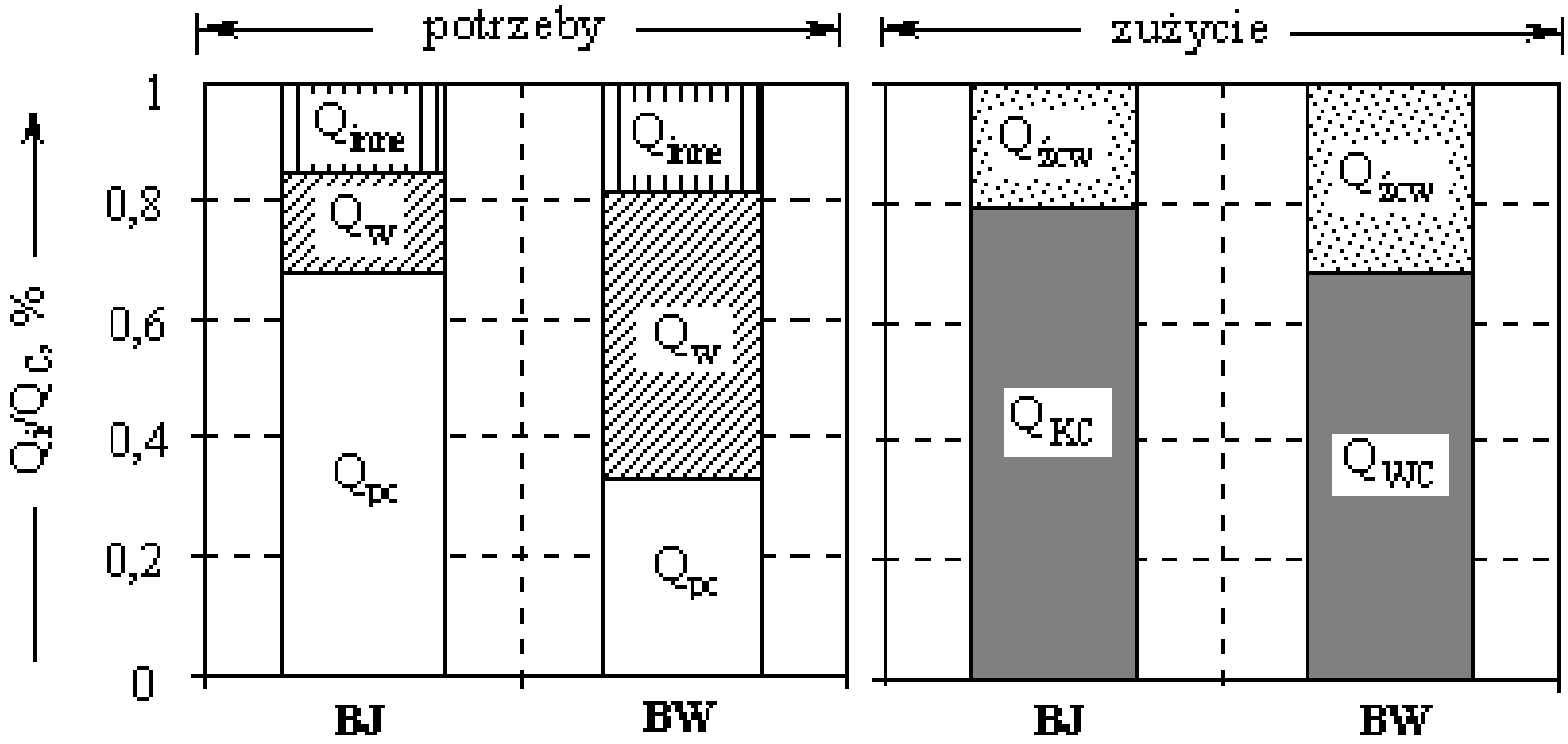
gdzie I to intensywność promieniowania słonecznego określana przy założeniu prostopadłego oddziaływania Słońca na przegrodę; φ_o , φ_S są udziałami powierzchni okien i pionowych ścian pełnych w sumarycznej powierzchni przegród, zaś p_O, p_S są przyjętym procentem energii przekazywanej do pomieszczenia przez okna (p_O = 0,80) i przez pionowe ściany pełne (p_S = 0,02- 0,03)

Przeprowadzone szacunkowe obliczenia wykorzystujące to równanie wykazują, że zyski od promieniowania słonecznego mogą wahać się od 2 kW do 20 kW w odniesieniu do pojedynczego sezonu zimowego oraz rodzaju i przeszklenia przegród

Niezależnie od wielkości ogrzewanej przestrzeni (budynku) zyski ciepła w najzimniejszych miesiąca sezonu zimowego nie przekraczają kilkunastu lub nawet kilku procent zasadniczych strat ciepła. Maksymalnie mogą one sięgać niewiele ponad 20% w okresach wczesne wiosny i późnej jesieni. Warto jednak podkreślić, że wpływ zysków ciepła na bilanse potrzeb cieplnych szybko wzrasta wraz ze wzrostem izolacyjności cieplnej i powietrznej przegród zewnętrznych

Wpływ nasłonecznienia na zyski ciepła wewnątrz budynków jest głównym problemem po stronie zysków ciepła. Decydujące znaczenie w skali roku *ma procentowy udział powierzchni przeszklonych* w stosunku do całkowitej powierzchni budynku. Przegrody transparentne, nie posiadające filtrów antysolarnych przepuszczają niemal całe promieniowanie słoneczne do wnętrza budynku, które powoduje podwyższenie temperatury sprzętów, ścian itp. Akumulowane ciepło wypromieniowywane od tych sprzętów nie przedostaje się z powrotem na zewnątrz (efekt szklarniowy). Powoduje to dość znaczne zyski ciepła. Zyski od promieniowania mogą być również oszacowane na podstawie danych klimatycznych. Mając je do dyspozycji można przeprowadzić analizę udziału zysków od promieniowania słonecznego w całkowitym bilansie ciepła.





Podział potrzeb i zużycia ciepła w budynku jednorodzinnym (BJ) i wielorodzinnym (BW)

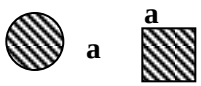
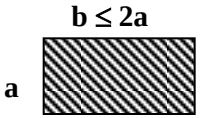
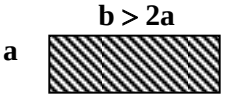
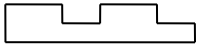
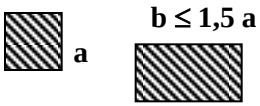
Q_{pc} – potrzeby wynikające z izolacyjności przegród zewnętrznych (przenikanie ciepła), Q_w – zapotrzebowanie ciepła na podgrzanie strumieni powietrza (wentylacja), Q_{inne} – inne potrzeby cieplne lub energetyczne (np. przygotowanie ciepłej wody), Q_K – ciepło produkowane w kotle grzewczym, Q_{WC} – ciepło przekazywane przez wymiennik ciepła, $Q_{źcw}$ – ciepło zużywane na inne potrzeby cieplne (np. oświetlenie, sprzęt AGD i RTV, kanalizację, itp.) pochodzące z wewnętrznych źródeł ciepła, promieniowania słonecznego, itp.

Wśród metod wyznaczania średniego wieloletniego zużycia ciepła w ciągu sezonów grzewczych można, ze względu na sposób ujmowania parametrów klimatu zewnętrznego, wyróżnić następujące:

- ✓ **metodę stopniodni lub częstości występowania temperatury o określonej wartości,**
- ✓ **metodę polegającą na wyznaczaniu zużycia energii cieplnej dla poszczególnych miesięcy sezonu grzewczego, na podstawie charakterystycznego dla danego miesiąca godzinowego przebiegu dobowego lub wartości średniodobowych,**
- ✓ **metodę polegającą na wyznaczaniu zużycia ciepła dla poszczególnych godzin okresu grzewczego. Przebieg porównawczy elementów klimatu zewnętrznego dla poszczególnych godzin zestawiony jest w postaci wartości średnich wieloletnich lub przez losowy wybór z okresu wielolecia miesięcy średnich, przy czym stany wartości elementów związane z granicami poszczególnych miesięcy są odpowiednio „wygładzone”,**
- ✓ **metodę roku syntetycznego referencyjnego (zbiór godzinowych przebiegów poszczególnych parametrów klimatu zewnętrznego, przy czym długość poszczególnych przebiegów jest mniejsza od 8760 i tak dobrana, aby po przeliczeniu otrzymanych wartości zużycia energii na zużycie roczne, uzyskiwało się wystarczająco dokładne przewidywanie tego zużycia**

W przypadku braku pełnych danych dla szczegółowego obliczania potrzeb cieplnych można się posłużyć metodą „orientacyjną”. Dla przeprowadzenia tych orientacyjnych szacunków niezbędne są dane dotyczące kubatury (K) i kształtu budynków (w tym stosunku wymiarów rzutu ich podstawy) oraz przede wszystkim tzw. charakterystyki cieplnej budynków, będącej ich jednostkowymi stratami ciepła (q_o) uzależnionymi od ich przeznaczenia

$$\Sigma Q_{OR} = q_o\, K\, (t_i - t_e)$$

Lp.	Przeznaczenie budynków	Kubatura budynków, K, m^3 (wg. wymiarów zewnętrznych)	Kształt rzutu podstawy budynków	Wskaźnik jednostkowych strat ciepła, q_o, $W/m^3 K$
1	Kinoteatry, Teatry, Domy Kultury, itp.	20000 i więcej		0,20 - 0,25
2	Budynki mieszkalne, hotelowe, itp.	do 5000 5000 - 10000 10000 - 20000 20000 i więcej		0,40 - 0,45 0,38 - 0,40 0,36 - 0,38 0,32 - 0,36
3	Jak powyżej	5000 - 10000 10000 - 20000 20000 i więcej		0,45 - 0,50 0,43 - 0,44 0,40 - 0,44
4	Budynki szpitalne, Szkoły, itp.	10000 - 15000 15000 i więcej		0,48 - 0,52 0,44 - 0,47
5	Budownictwo wysokie (administracyjne i mieszkalne „wieżowce”)	15000 i więcej		0,48 - 0,60

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie i innymi aktami prawnymi budynek i jego instalacje ogrzewcze, wentylacyjne i klimatyzacyjne powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby ilość ciepła, potrzebnego do użytkowania budynku zgodnie z jego przeznaczeniem, można było utrzymać na racjonalnie niskim poziomie.

Dla budynku mieszkalnego wielorodzinnego i zamieszkania zbiorowego wymagania określone powyżej uznaje się za spełnione, jeżeli wartość wskaźnika E, określającego obliczeniowe zapotrzebowanie na energię końcową (ciepło) do ogrzewania budynku w sezonie grzewczym, wyrażone ilością ciepła w ciągu roku na 1 m^3 kubatury ogrzewanej części budynku, jest mniejsza od wartości granicznej E_0, a także jeżeli przegrody budowlane odpowiadają wymaganiom izolacyjności cieplnej oraz innym wymaganiom określonym w załączniku do rozporządzenia

Dla budynku jednorodzinnego wymagania określone powyżej uznaje się za spełnione, gdy wartość wskaźnika E, o którym mowa w ust. 1, jest mniejsza od wartości granicznej E_0 oraz jeżeli przegrody budowlane odpowiadają wymaganiom określonym w pkt 2 załącznika do rozporządzenia lub gdy przegrody budowlane odpowiadają wymaganiom izolacyjności cieplnej oraz innym wymaganiom określonym w załączniku do rozporządzenia.

Dla budynku użyteczności publicznej i produkcyjnego wymagania określone powyżej uznaje się za spełnione, gdy przegrody budowlane odpowiadają wymaganiom izolacyjności cieplnej oraz innym wymaganiom określonym w załączniku do rozporządzenia.

Wartości graniczne E_O, wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku, w zależności od geometrycznego współczynnika kształtu budynku (D = A/V), dla budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego wynoszą:

E_O = 29,0 kWh/(m³rok), jeśli (D = A/V) « 0,20/m

E_O = 26,6+12(D = A/V) kWh/(m³rok), jeśli 0,2<(D = A/V) « 0,90/m

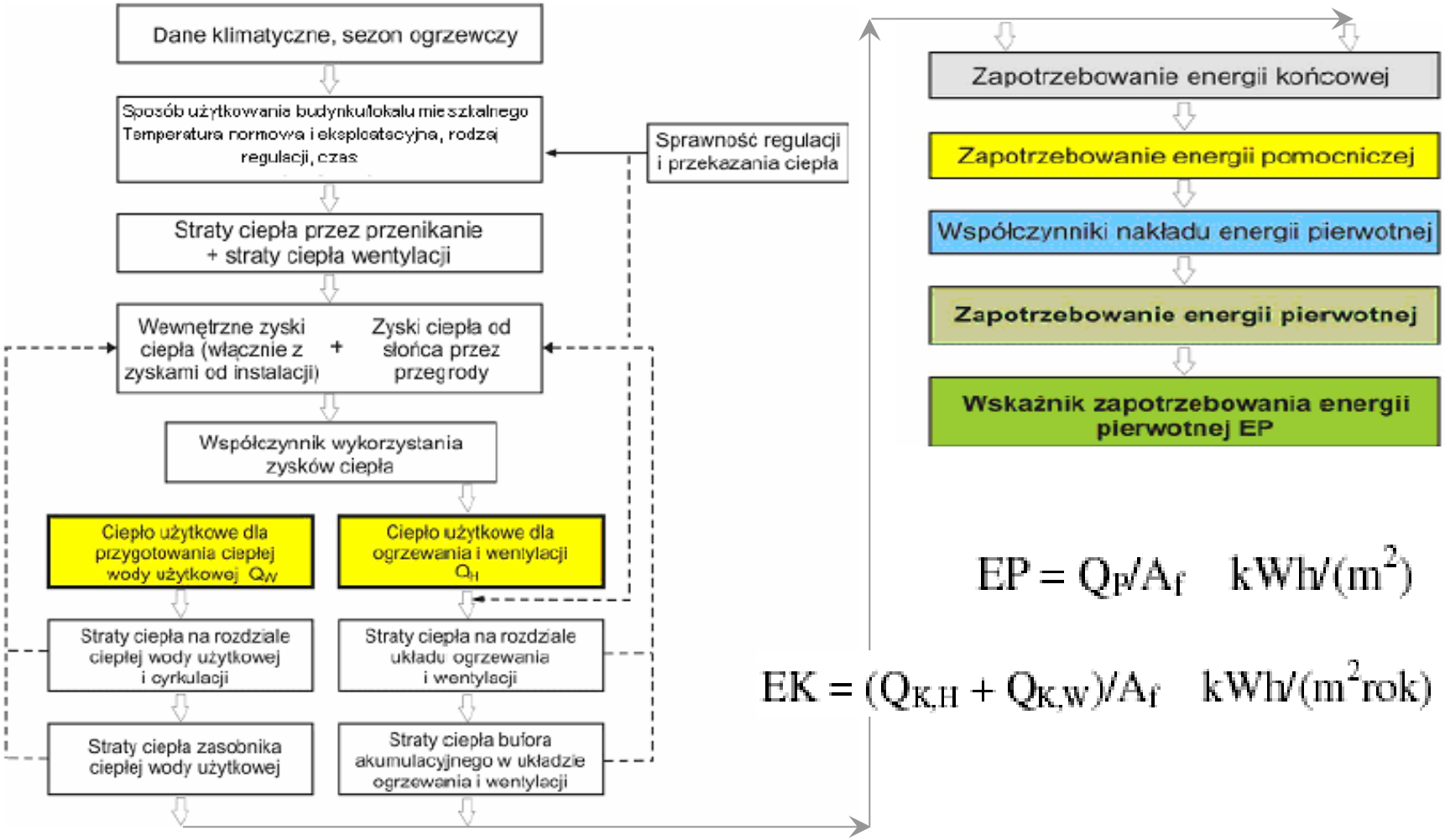
E_O = 37,4 kWh/(m³rok), jeśli (A/V) « 0,90/m

gdzie A – suma pól powierzchni wszystkich ścian zewnętrznych (wraz z oknami i drzwiami balkonowymi), dachów i stropodachów, podłóg na gruncie lub stropów nad piwnicą nieogrzewaną, stropów nad przejazdami, oddzielających część ogrzewaną budynku od powietrza zewnętrznego, gruntu i przyległych pomieszczeń nieogrzewanych, liczona po obrysie zewnętrznym (m^2), V – kubatura netto ogrzewanej części budynku, obliczona jako kubatura brutto budynku pomniejszona o kubaturę wydzielonych klatek schodowych, szybów dźwigowych, a także zewnętrznych, otwartych części budynku, takich jak podcienia, balkony, tarasy, loggie galerie (m^3).

Analizy potrzeb cieplnych sprowadza się do ustalania zużycia ciepła (energii), a nie potrzeb lub strat ciepła. Główną zmianą w obecnych przepisach certyfikacji energetycznej jest rezygnacja z klas energetycznych (rysunek poniżej). Zamiast nich pojawia się charakterystyka energetyczna, która przedstawiona jest na poniżej

Zintegrowany wskaźnik charakterystyki energetycznej EP	Klasa energetyczna budynku
EP < 0,25	A
0,25 < EP ≤ 0,5	B
0,50 < EP ≤ 0,75	C
0,75 < EP ≤ 1,0	D
Budynek referencyjny EP = 1,00 (klasa D)	
1,00 < EP ≤ 1,25	E
1,25 < EP ≤ 1,50	F
EP ≥ 1,50	G

Charakterystyka ta określana jest na podstawie porównania jednostkowej ilości nieodnawialnej energii pierwotnej EP niezbędnej do zaspokojenia potrzeb energetycznych budynku w zakresie ogrzewania, chłodzenia, wentylacji i ciepłej wody (efektywność całkowita) z odpowiednią wartością referencyjną



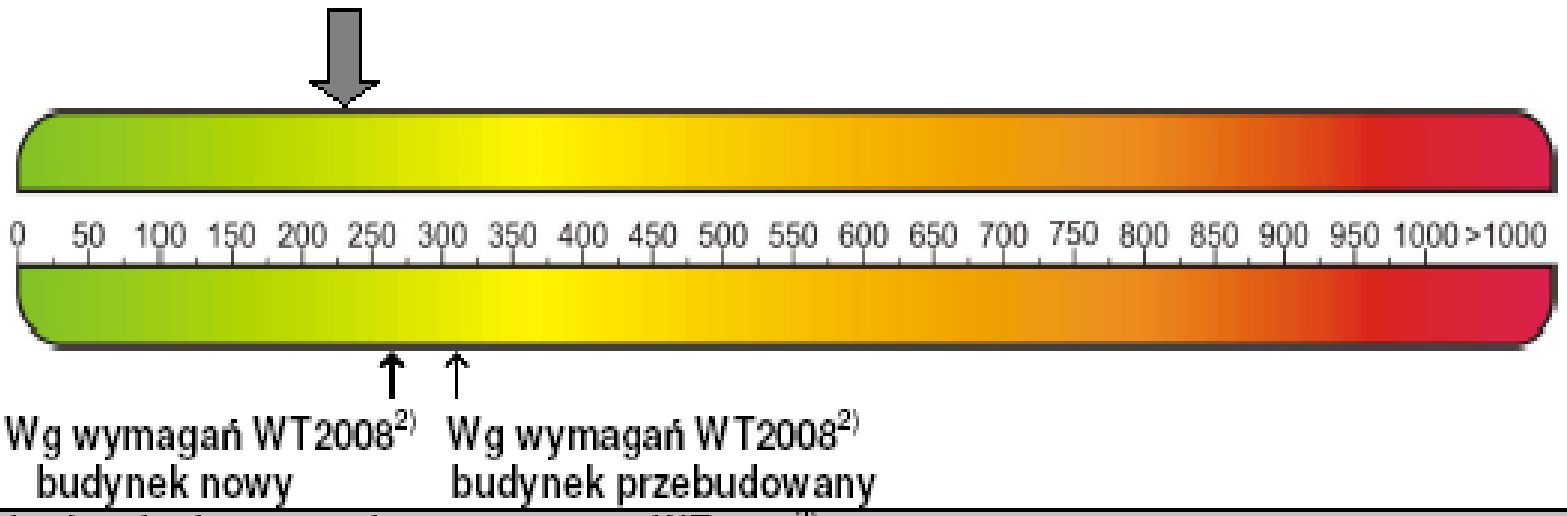
Q_p – roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną dla ogrzewania i wentylacji, przygotowania ciepłej wody i napędu urządzeń pomocniczych; A_f – powierzchnia ogrzewalna (o regulowanej temperaturze); $Q_{K,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową przez system grzewczy i wentylacyjny; $Q_{K,W}$ - roczne zapotrzebowanie na energię końcową przez system przygotowania ciepłej wody

Wskaźnik EP jest to wskaźnik zapotrzebowania energii pierwotnej na jednostkę powierzchni, dostarczonej do budynku, lokalu mieszkalnego, części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową, wyrażone w kWh/(m^{2}rok)

Obliczeniowe zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną[1)]

EP - budynek oceniany

246 kWh/(m^{2}rok)



Stwierdzenie dotrzymania wymagań wg WT2008[2)]

Zapotrzebowanie na energię pierwotną (EP)			Zapotrzebowanie na energię końcową (EK)[3)]		
Budynek oceniany	246	kWh/(m^{2}rok)	Budynek oceniany	111	kWh/(m^{2}rok)
Budynek wg WT2008	270	kWh/(m^{2}rok)			