

## ZASTOSOWANIE UPROSZCZONEJ METODY PROJEKTOWANIA GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA DO OCENY JEGO EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Joanna RUCIŃSKA\*

\* Politechnika Warszawska, Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji  
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: [joanna.jedrzejuk@poczta.fm](mailto:joanna.jedrzejuk@poczta.fm)

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono uproszczoną metodę obliczania wymaganej długości gruntowego wymiennika ciepła. Metoda ta opiera się na analizie procesu wymiany ciepła w stanie ustalonym. Następnie zweryfikowano uzyskane przy jej pomocy wyniki z wynikami obliczeń wykonanymi programami komputerowymi PH-Luft i GAEA. W stosunku do znanych metod uwzględniono zużycie energii elektrycznej zużywanej przez wentylatory. Oszacowano efekty energetyczne i ekonomiczne wynikające z zastosowania gruntowego wymiennika ciepła.

**Słowa kluczowe:** gruntowy wymiennik ciepła, projektowanie, oszczędność energii.

### 1. WSTEP

Jedną z metod zwiększania efektywności energetycznej systemu wentylacji jest odzyskiwanie lub pozyskiwanie ciepła. Może być to zrealizowane poprzez zastosowanie gruntowych wymienników ciepła. To rozwiązanie zyskuje coraz większą popularność wśród inwestorów indywidualnych również w Polsce. W tym artykule przedstawiono uproszczoną metodę projektowania gruntowych wymienników ciepła. Porównano także uzyskane przy jej zastosowaniu wyniki z wynikami uzyskanymi przy pomocy dostępnych na rynku programów komputerowych do projektowania takich wymienników.

### 2. UPROSZCZONA METODA PROJEKTOWANIA GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA

#### 2.1. Gruntowy wymiennik ciepła

Najprostszym gruntowym wymiennikiem ciepła jest rurociąg zakopany w ziemi na głębokości 1,5-2 m poniżej poziomu terenu. Następuje w nim wstępnie podgrzane

powietrza wentylacyjnego poprzez wykorzystanie ciepła zmagazynowanego w gruncie. Wprowadzone do wymiennika powietrze zewnętrzne ogrzewa się dzięki temu w okresie zimy. Natomiast w okresie letnim ochładza. Rozwiązanie to stanowi efektywne uzupełnienie systemu wentylacyjnego oraz ogrzewczego budynku.

W najprostszym wykonaniu gruntowy wymiennik ciepła stanowi rura z tworzywa sztucznego o długości do około 30 do 50 metrów, ułożona pod ziemią i zakończona czerpnią wyposażoną w podwójną siatkę zabezpieczającą (przed insektami i gryzoniami) oraz filtr. Należy pamiętać, że w okresie letnim może dochodzić do wykraplania wilgoci z powietrza na wewnętrznych ściankach wymiennika co może doprowadzić do rozwoju pleśni, grzybów i innych mikroorganizmów. Powoduje to obniżenie jakości nawiewanego powietrza. Aby temu zapobiec rury wymiennika należy ułożyć ze spadkiem na ich całej długości i umożliwić odpływ powstających skroplin. Na rynku dostępne są również rury z wewnętrzną warstwą antybakteryjną ograniczającą ryzyko powstania nieprzyjemnego zapachu stęchlizny.

Wymiennik gruntowy wykonać można w czterech wersjach ułożenia: typ prosty, typ meandrowy, typ pierścieniowy, typ Tichelmana.

#### 2.2. Opis metody

Uproszczona metoda projektowania gruntowego wymiennika ciepła IGSPA (The International Ground Source Heat at Pump Association Method) została stworzona w celu obliczania wymaganej długości gruntowych wymienników ciepła współpracujących z pompami ciepła i została opublikowana w [1] a także opisana w [2]. Metoda ta zakłada, że wymiana ciepła pomiędzy powietrzem przepływającym przez gruntowy wymiennik ciepła a otaczają-

cym go gruntem ma charakter ustalony. Wymagana długość wymiennika ciepła jest funkcją wymaganej mocy wymiennika  $Q_w$  [W], oporu przenikania ciepła przez ściankę rury wymiennika  $R_p$  [ $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ], oporu cieplnego gruntu  $R_G$  [ $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ], średniej logarytmicznej różnicy temperatury pomiędzy przepływającym przez wymiennik powietrzem, a otaczającym gruntem  $\Delta T_{\text{ln}}$  [K] oraz od współczynnika cykliczności pracy  $F_H$  [-] i opisana jest wzorem:

$$L = \frac{Q_w (R_p + R_G \cdot F_H)}{\Delta T_{\text{ln}}}, \quad [\text{m}]. \quad (1)$$

Współczynnik cykliczności pracy zależy od całkowitego czasu pracy wymiennika  $t$  [h] oraz liczba dni użytkowania gruntowego wymiennika ciepła w czasie sezonu grzewczego lub chłodniczego  $n$  [-] i opisany jest wzorem:

$$F_H = \frac{t}{24 \cdot n}, \quad [-]. \quad (2)$$

Wartość średniej logarytmicznej różnicy temperatury pomiędzy powietrzem płynącym w wymienniku o otaczającym go gruntem obliczana jest ze wzoru (3). Zależy ona od temperatury gruntu na głębokości początkowej gruntowego wymiennika ciepła  $t_{g1}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], temperatury gruntu otaczającego koniec wymiennika  $t_{g2}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], temperatury powietrza zewnętrznego  $t_e$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] oraz temperatury za gruntowym wymiennikiem ciepła  $t_1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]:

$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{(t_{g1} - t_e) - (t_{g2} - t_1)}{\ln\left(\frac{t_{g1} - t_e}{t_{g2} - t_1}\right)}, \quad [\text{K}]. \quad (3)$$

Wymagana moc gruntowego wymiennika ciepła zależy od ilości nawiewanego powietrza wentylacyjnego  $V_n$  [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ], gęstości powietrza  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ], ciepła właściwego powietrza  $c_p$  [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] oraz temperatury powietrza za wymiennikiem gruntowym ciepła  $t_1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] i opisana jest wzorem (4). Gęstość powietrza oraz ciepło właściwe należy odczytać dla średniej temperatury powietrza za gruntowym wymiennikiem ciepła oraz temperatury gruntu.

$$Q_w = \frac{V_n \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_1 - t_e)}{3,6}, \quad [\text{W}]. \quad (4)$$

Temperatura powietrza za wymiennikiem gruntowym powinna mieć wartość wyższą od  $0^{\circ}\text{C}$ . Warunek ten chroni przed szronieniem powierzchni wymiennika rekuperacyjnego zapewniając jego efektywną pracę. Wpływ na ilość ciepła wymienianą pomiędzy powietrzem przepływającym przez gruntowy wymiennik, a otaczającym go gruntem ma rodzaj ruchu, który zależy od średnicy

wewnętrznej oraz prędkości przepływającego nim powietrza. Wymiennik należy zaprojektować w taki sposób, aby prędkość przepływającego powietrza była na tyle duża by wywołać ruch turbulentny intensyfikujący wymianę ciepła poprzez zmniejszanie oporów przejmowania. Nadmierne zwiększenie prędkości może jednak doprowadzić do wzrostu całkowitych strat ciśnienia na wymienniku co powoduje konieczność dobrania większej mocy wentylatorów w centrali wentylacyjnej.

Opór cieplny przenikania przez ściankę rury wymiennika ciepła opisany jest wzorem (5) i jest sumą oporu cieplnego przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej gruntowego wymiennika ciepła  $R_\alpha$  [ $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ] i oporu przewodzenia ciepła przez ściankę rury wymiennika [ $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ]:

$$R_p = R_\alpha + R_{sc}, \quad [\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]. \quad (5)$$

Opór przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej ścianki gruntowego wymiennika ciepła obliczany jest ze wzoru (6). Opór ten zależy od średnicy wewnętrznej rury wymiennika  $d_w$  [m] oraz od współczynnika przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej ścianki wymiennika  $\alpha_i$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. Współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_i$  wyznaczany jest z zależności określonych dla przepływu wymuszonego. Decydujący wpływ na wartość współczynnika ma rodzaj ruchu, który zależy od średnicy wewnętrznej i prędkości przepływającego nim powietrza.

$$R_\alpha = \frac{1}{\pi \cdot d_w \cdot \alpha_i}, \quad [\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]. \quad (6)$$

Opór przewodzenia ciepła przez ściankę wymiennika opisany jest wzorem (7) i zależy od współczynnika przewodzenia ciepła ścianki rury wymiennika  $\lambda_{sc}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ], średnicy wewnętrznej  $d_w$  [m] i zewnętrznej  $d_z$  [m] rury gruntowego wymiennika ciepła:

$$R_{sc} = \frac{1}{2 \cdot \Pi \cdot \lambda_{sc}} \cdot \ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right), \quad [\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}]. \quad (7)$$

Opór przejmowania ciepła gruntu  $R_G$  wyznacza się z wzoru (8) w zależności od współczynnika przewodzenia ciepła gruntu  $\lambda_{gr}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ], wartości funkcji  $I(Xd_z)$  dla  $X = d_z$  oraz wartości funkcji dla  $X = 2H$  gdzie  $H$  [m] jest średnią głębokością posadowienia gruntowego wymiennika ciepła.

$$R_G = \frac{I(X_{d_z}) - I(X_{2H})}{2 \cdot \Pi \cdot \lambda_{gr}}, \quad [\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}] \quad (8)$$

Wartość funkcji  $I(X)$  oblicza się na podstawie wzorów (9) i (10) w zależności od wartości  $X$ :

$$- \quad 0 < X \leq 1:$$

$$I(X) = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} -\ln X^2 - 0,57721566 \\ + 0,99999193 \cdot X^2 \\ - 0,24991055 \cdot X^4 \\ + 0,05519968 \cdot X^6 \\ - 0,00976004 \cdot X^8 \\ + 0,00107857 \cdot X^{10} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

–  $1 \leq X < \infty$ :

$$I(X) = \left[ 1 / \left( 2 \cdot X^2 \cdot e^{X^2} \right) \right] (A / B). \quad (10)$$

Współczynniki  $A$  i  $B$  opisane są następującymi wzorami:

$$A = X^8 + 8,5733287 \cdot X^6 + 18,059017 \cdot X^4 + 8,637609 \cdot X^2 + 0,2677737 \quad (11)$$

$$B = X^8 + 9,5733223 \cdot X^6 + 25,6329561 \cdot X^4 + 21,0996531 \cdot X^2 + 3,9684969 \quad (12)$$

Całkowitą stratę ciśnienia w gruntowym wymienniku ciepła oblicza się jako sumę strat liniowych i miejscowych.

### 3. OMÓWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW

Wykorzystanie w instalacji wentylacyjnej gruntowego wymiennika ciepła pozwala nie tylko na ogrzanie powietrza wentylacyjnego zimą, ale również na jego schłodzenie latem. Jest to efekt zbliżony do uzyskiwanego w instalacjach klimatyzacyjnych.

W tabeli 1 znajduje się porównanie wymaganej długości rurowego gruntowego wymiennika ciepła. Natomiast w tabeli 2 porównanie strat ciśnienia w gruntowym wymienniku ciepła uzyskanych przy pomocy uproszczonej metody projektowania, programu PHLuft oraz GAEA w trzeciej strefie klimatycznej (w Polsce).

Programy PHLuft i GAEA zostały napisane przez Niemieckich specjalistów. W programie PHLuft jest możliwość obliczania wymaganej długości wymiennika dla wszystkich stref klimatycznych w Polsce. Natomiast w programie GAEA są wprowadzone dane klimatyczne wyłącznie dla Warszawy (obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego zimą  $-18,7^\circ\text{C}$ ). Program ten realizuje inny algorytm niż w omawianej metodzie uproszczonej oraz w programie PHLuft. Wprowadzane są dokładne

dane dotyczące długości i położenia gruntowego wymiennika ciepła. Następnie na podstawie tych danych program oblicza możliwe do uzyskania oszczędności energetyczne wynikające z zastosowania gruntowego wymiennika ciepła.

Tabela 1. Wymagana długość gruntowego wymiennika ciepła.  
Table 1. Required length of air-ground heat exchanger.

Strefa klimatyczna \ Strumień (m <sup>3</sup> /h)	III $t_{obl} = -20^\circ\text{C}$ UM	III $t_{obl} = -20^\circ\text{C}$ PHLuft	III $t_{obl} = -18,7^\circ\text{C}$ GAEA
100 (Ø200mm)	31	30	26
150 (Ø200mm)	38	41	34
200 (Ø200mm)	45	51	40
250 (Ø250mm)	53	62	46
300 (Ø250mm)	59	72	55

Tabela 2. Strata ciśnienia na gruntowym wymienniku ciepła.  
Table 2. Pressure loss on air-ground heat exchanger.

Strefa klimatyczna \ Strumień (m <sup>3</sup> /h)	III $t_{obl} = -20^\circ\text{C}$ UM	III $t_{obl} = -20^\circ\text{C}$ PHLuft	III $t_{obl} = -18,7^\circ\text{C}$ GAEA
100 (Ø200mm)	23,6	23,2	23,2
150 (Ø200mm)	28,7	28,9	28,0
200 (Ø200mm)	36,9	38,9	35,4
250 (Ø250mm)	30,4	31,6	29,4
300 (Ø250mm)	36,0	38,6	35,2

W tabeli 3 przedstawiono ilość ciepła możliwego do pozyskania w trakcie sezonu grzewczego w gruntowym wymienniku ciepła.

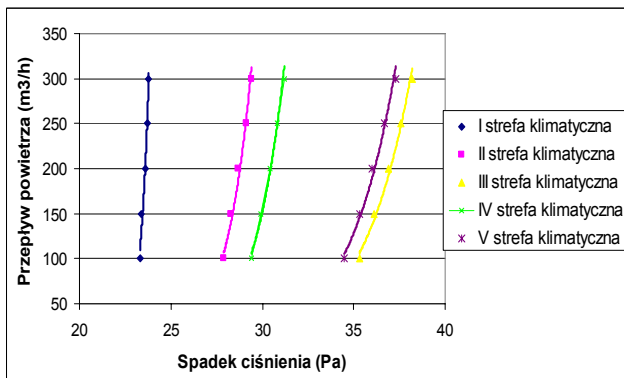
Poniżej przedstawiono informacje na temat oszczędności wynikających z zastosowania gruntowego wymiennika ciepła tabela 4 z uwzględnieniem kosztów energii elektrycznej zużywanej przez wentylatory, która jest proporcjonalna do spadku ciśnienia na gruntowym wymienniku ciepła rys.1. W tabeli znajdują się wyniki dla III strefy klimatycznej Polski i przepływu 200 m<sup>3</sup>/h (średnica wymiennika 200 mm). Średnie ceny paliwa zostały przyjęte dla roku 2006 (cena energii elektrycznej dla taryfy G11).

Tabela 3. Ilość ciepła w kWh/a.  
Table 3. Amount of heat in kWh/a.

Strefa klimatyczna \ Strumień (m <sup>3</sup> /h)	I $t_{obl} = -16^{\circ}\text{C}$	II $t_{obl} = -18^{\circ}\text{C}$	III $t_{obl} = -20^{\circ}\text{C}$	IV $t_{obl} = -22^{\circ}\text{C}$	V $t_{obl} = -24^{\circ}\text{C}$
100 (Ø200mm)	498,4	569,2	640,1	765,6	781,8
150 (Ø200mm)	750,2	854,8	959,3	1149,3	1174,4
200 (Ø200mm)	1000,5	1141,0	1281,6	1533,7	1565,8
250 (Ø250mm)	1251,9	1426,4	1600,8	1916,8	1958,4
300 (Ø250mm)	1503,5	1712,5	1922,0	2300,7	2350,2

Tabela 4. Roczna oszczędność kosztów energii.  
Table 4. Annual saving costs of energy.

Rodzaj paliwa	Cena paliwa	Roczna oszczędność kosztów energii zł/rok
Węgiel kamienny	380,0 zł/t	15,7
Węgiel ekogroszek	450,0 zł/t	28,6
Energia elektryczna** (pompa ciepła)	0,38 zł/kWh	65,4
Gaz ziemny (kocioł kondensacyjny)	1,30 zł/m <sup>3</sup>	72,3
Gaz ziemny	1,30 zł/m <sup>3</sup>	97,0
Pelety	0,55 zł/kg	118,3
Olej opałowy	2,70 zł/l	246,4
Gaz płynny	2,00 zł/l	323,3
Energia elektryczna (grzejniki elektryczne)	0,38 zł/kWh	400,2



Rys. 1. Spadek ciśnienia w gruntowym wymienniku ciepła typu prosty w zależności od przepływu powietrza i strefy klimatycznej (do 200m<sup>3</sup>/h – Ø200mm, powyżej 200m<sup>3</sup>/h – Ø250mm).

Fig. 1. Pressure losses in air-ground heat exchanger – simple type depending on air flow and climate zone (to 200m<sup>3</sup>/h – Ø200mm, from 200m<sup>3</sup>/h – Ø250mm).

Przeprowadzone obliczenia przy użyciu uproszczonej metody projektowania i programów komputerowych PH-Luft [3] oraz GAEA [4] dają porównywalne wyniki dotyczące wymaganej powierzchni gruntowego wymiennika ciepła. Występujące różnice wynikają z zastosowanej do obliczeń metody analitycznej oraz zastosowanych danych pogodowych. Uproszczona metoda może być zatem z powodzeniem stosowana przez projektantów, inwestorów i wykonawców do określania wymaganej długości rurowych gruntowych wymienników ciepła współpracujących z indywidualnymi systemami wentylacji mechanicznej.

#### A SIMPLIFIED METHOD OF DESIGNING AN AIR-GROUND HEAT EXCHANGER

**Summary:** The paper presents description of the method used for calculation of required length of air-ground heat exchanger. The comparison between obtained results and results of calculation done with PH-Luft and GAEA programs is included. The paper gives also some information about the economical aspects of construction and use of AGHE, with taking into account the cost of electric energy used by the fans.

#### Literatura

- [1] J.E. Bose, J.D. Parker i F.C. McQuiston. ASHRE, Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump systems.
- [2] S. Firląg, *Współpraca wentylacji mechanicznej z GWC w budynku pasywnym*, Rynek instalacyjny, Marzec 2007
- [3] User Manual PH-Luft
- [4] User Manual GAEA