

KORZYŚCI Z ZASTOSOWANIA GRUNTOWEGO POWIETRZNEGO WYMIENNIKA CIEPŁA W PRZYPADKU BUDOWNICTWA JEDNORODZINNEGO

A. Szelański

Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

STRESZCZENIE

Artykuł poświęcony jest tematyce związanej z zastosowaniem gruntu, jako źródła ciepła i chłodu dla powietrza wentylacyjnego. W artykule opisano najczęściej stosowane rodzaje gruntowych powietrznych wymienników ciepła (GPWC). Przedstawiony został również model matematyczny pozwalający wyznaczyć temperaturę, jaką będzie miało powietrze po przepłynięciu przez GPWC rurowy. W oparciu o zapotrzebowanie energii dla wybranego budynku domu jednorodzinnego policzono o ile zmniejszy się zapotrzebowanie na energię na cele ogrzewania i chłodzenia w przypadku zastosowania rurowego gruntowego powietrznego wymiennika ciepła.

WPROWADZENIE

Grunt jest akumulatorem olbrzymiej ilości ciepła. Wymiana ciepła w gruncie płytkim (do około 100 metrów głębokości) przebiega głównie z górnej jego powierzchni, natomiast przekazywanie ciepła z dolnych warstw gruntu jest znikomo małe. Ciepło do gruntu przekazywane jest od promieniowania słonecznego i częściowo przez konwekcję od powietrza, oraz przewodzenie z jego dolnych warstw (Kraft M., Hofst R., 1997).

Grunt może być wykorzystywany, jako źródło ciepła dla pomp ciepła, oraz jako sezonowy magazyn ciepła. Poza tym grunt można wykorzystać do bezpośredniego ogrzania bądź ochłodzenia powietrza zasysanego przez układ wentylacji. Jest to możliwe w przypadku zastosowania gruntowego powietrznego wymiennika ciepła. Zastosowanie takiego wymiennika wymusza stosowanie w budynku wentylacji mechanicznej nawiewnej. W praktyce gruntowy powietrzny wymiennik ciepła stosuje się, jako uzupełnienie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej wyposażonej już w układ odzysku ciepła (Jędrzejewski L., 2005).

W układach takich, powietrze nawiewane do budynku najpierw przepływa przez wymiennik, który jest zakopany w gruncie na odpowiedniej głębokości. Kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest niska (ma temperaturę niższą niż grunt na głębokości, na której zakopany jest wymiennik) powietrze przepływające przez GPWC odbiera ciepło od gruntu ogrzewając się w ten sposób. W okresie letnim, w którym temperatury powietrza zewnętrznego osiągają wysokie wartości, powietrze przepływające

przez GPWC oddaje ciepło do gruntu obniżając w ten sposób swoją temperaturę.

RODZAJE GRUNTOWYCH POWIETRZNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Ze względu na sposób wymiany ciepła pomiędzy gruntem a powietrzem nawiewanym, gruntowe powietrzne wymienniki ciepła można podzielić na dwa rodzaje:

- przeponowy;
- bezprzeponowy.

W wymiennikach przeponowych pomiędzy mediami wymieniającymi ciepło istnieje warstwa oddzielająca – przepona. W wymiennikach bezprzeponowych media wymieniające między sobą ciepło mają bezpośredni kontakt ze sobą.

Ze względu na budowę gruntowe powietrzne wymienniki ciepła można podzielić na wymienniki:

- rurowe;
- żwirowe;
- płytowe.

Wymiennik rurowy

Wymiennik rurowy jest kanałem powietrznym zakopany w gruncie. Składa się on z długiego rurociągu zbudowanego z rur (najczęściej PVC, bądź innych tworzyw sztucznych). Wymiennik tego typu jest wymiennikiem przeponowym, ponieważ między gruntem a przepływającym powietrzem istnieje ścianka rury. W zależności od wielkości terenu, jaki jest do zagospodarowania, zagłębienia, oraz warunków cieplnych gruntu, wymienniki rurowe układać można w postaci jednego długiego rurociągu - często o długości przekraczającej obwód budynku (np. układ opaskowy, w którym rurociąg przebiega wokół budynku), lub w układach rozgałęzionych. W układach rozgałęzionych, strumień powietrza rozdziela się na kilka rurociągów o mniejszej średnicy - w celu zwiększenia powierzchni wymiany ciepła - a następnie łączy się i kierowany jest do budynku. Instalując wymiennik rurowy, jak i inne wymienniki przeponowe, należy ułożyć je z pewnym pochyleniem. Wykonuje się to aby woda, która może się zebrać w wyniku kondensacji pary wodnej z powietrza opuściła wymiennik. Na końcu umieszcza się studzienkę zbiorczą, z której kondensat będzie usuwany. Aby ułatwić odprowadzenie wody, należy zadbać, aby spływ skroplin był zgodny z kierunkiem przepływającego powietrza. Woda zalegająca

w rurociągu przez dłuższy czas może powodować spadek jakości powietrza nawiewanego do budynku. Dla zapewnienia czystości powierzchni rurociągu na czepni stosuje się wysokiej klasy filtry.

Wymiennik żwirowy

Wymiennik żwirowy jest bezprzeponowym wymiennikiem ciepła, w którym powietrze przepływa przez złożę o dużej granulacji. Materiał, z którego wykonane jest złożę musi być nienasiąkliwy, mieć dobrą przewodność i dużą pojemność cieplną. Po za tym powinien mieć kształt, który nie będzie powodował dużych oporów przepływu powietrza, najlepiej zbliżony do kształtu kuli. Jako materiał, z którego wykonane jest złożę wymiennika, najczęściej stosuje się płukany żwir, o dużej granulacji. Takie złożę ma dużą powierzchnię kontaktu i wymiany ciepła z powietrzem nawiewanym. Złożę wymiennika żwirowego działa również jako filtr powietrza. Wymiennik ten zajmuje małą powierzchnię jednak istotną rolę odgrywa prawidłowy dobór wielkości złoża do strumienia powietrza. Wymiennik żwirowy nie nadaje się do pracy ciągłej, ponieważ po pewnym czasie następuje zrównanie temperatury złoża z temperaturą powietrza nawiewanego. Wtedy musi nastąpić jego regeneracja, poprzez wyłączenie go z użycia. Złożę samoistnie się zregeneruje pobierając ciepło z otaczającego gruntu. Można zapewnić ciągłą pracę wymiennika stosując dwa oddzielne złoża pracujące na zmianę. Wymienniki żwirowe bezwzględnie muszą być zabezpieczone przed działaniem wody gruntowej. Jeżeli poziom wód gruntowych jest wysoki istnieje ryzyko zalania złoża. Poza tym do wad należą: znaczne opory powietrza, (przez co należy stosować wentylatory o dużym poborze energii), oraz możliwość przedostawania się owadów i gryzoni.

Wymiennik płytowy

Wymiennik płytowy jest wymiennikiem bezprzeponowym, przepływające przez wymiennik powietrze ma częściowo bezpośredni kontakt z gruntem. Wymiennik składa się z modułów, które stanowią płyty (najczęściej z tworzywa sztucznego). Moduły układane są w rzędach, w układzie zwartym (jeden koło drugiego) bądź w układzie rozstawionym (z przerwami pomiędzy sobą). Płyty wymiennika uniesione są ponad zagęszczoną podsypkę na specjalnych klockach dystansowych. Powstaje wówczas szczelina między gruntem a płytą, którą przepływa powietrze. Szczelina ma wysokość zapewniającą odpowiednie warunki do wymiany ciepła. Oprócz płyt, wymiennik składa się z dwóch kolektorów oraz rurociągu doprowadzającego powietrze z czepni terenowej do kolektora wlotowego i odprowadzającego powietrze z kolektora wylotowego do budynku. Wymienniki płytowe przystosowane są do posadowienia w gruncie na głębokości już od 0,7 m. Warunkiem jest zastosowanie izolacji termicznej ułożonej nad wymiennikiem (Staniszewski D., Targański W., 2007). Wbudowanie wymiennika płytowego wymaga wykonania wykopu o dużej

powierzchni, lecz niewielkiej głębokości. Wykonanie wykopu poza budynkiem uzależnione jest od powierzchni działki przeznaczonej pod GPWC. Jako że, grunt wymienia z powietrzem nie tylko ciepło, ale również wilgoć, to nie zachodzi konieczność stosowania specjalnego układu do odprowadzania skroplin. Jeżeli powietrze ma dużą wilgotność względną to nadmiar wilgoci zostanie pochłonięty przez grunt, natomiast w przypadku, gdy powietrze ma niską wilgotność względną to grunt nawilży powietrze.

Dobór odpowiedniego GPWC

Poza oczywistym finansowym aspektem, wybór rodzaju gruntowego powietrznego wymiennika ciepła będzie zależał od takich czynników jak: wielkość działki, a w zasadzie od powierzchni terenu jaki możemy przeznaczyć pod wymiennik, rodzaj gruntu, oraz poziom wód gruntowych.

Prawidłowo dobrany i wbudowany GPWC powinien się charakteryzować:

- dużą efektywnością wymiany ciepła (duże zyski ciepła lub chłodu);
- małymi oporami przepływu powietrza;
- odpornością na warunki atmosferyczne i gruntowe.

MODEL MATEMATYCZNY GPWC RUROWEGO

W przypadku rurowego GPWC, przez rurociąg płynie powietrze zasysane do układu wentylacji mechanicznej. Moc takiego wymiennika można określić jako przyrost entalpii przepływającego płynu (Woodson T., Coulibaly Y., 2012).

Moc wymiennika \dot{Q}_{wym} :

$$\dot{Q}_{wym} = \dot{m} (i_2 - i_1) \quad (1)$$

gdzie:

\dot{m} – przepływ masowy czynnika [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$],

i_2 – entalpia właściwa czynnika na wyjściu z wymiennika [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],

i_1 – entalpia czynnika na wejściu do wymiennika [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Przepływ masowy \dot{m} obliczyć można, jako znając strumień objętościowy powietrza zasysanego przez układ wentylacyjny:

$$\dot{m} = \dot{V}_w \rho \quad (2)$$

gdzie:

\dot{V}_w – natężenie objętościowe płynu przepływającego przez wymiennik [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$],

ρ – gęstość płynu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Natomiast entalpię właściwą określa wzór:

$$i = c_p \cdot T \quad (3)$$

gdzie:

c_p – ciepło właściwe płynu [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$],

T - temperatura płynu [K].

Strumień ciepła odebrany przez powietrze z powierzchni wymiennika:

$$\dot{Q}_c = \pi d_w L h_w \Delta T_{ln} \quad (4)$$

gdzie:

d_w - średnica wewnętrzna rury wymiennika [m],

L – długość wymiennika [m],
 h_w – współczynnik przejmowania ciepła po wewnętrznej stronie ścianki wymiennika [$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$],
 ΔT_{ln} – średnia logarytmiczna temperatura powietrza [K] w wymienniku.

Oznaczając:

$$\pi d_w L = A_w \quad (5)$$

gdzie:

A_w - powierzchnia wewnętrzna wymiennika [m^2].

Równanie (4) przyjmuje postać:

$$\dot{Q}_c = A_w h_w \Delta T_{ln} \quad (6)$$

Średnią logarytmiczną temperaturę powietrza wyznacza się z zależności:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - T_{sc,1}) - (T_2 - T_{sc,2})}{\ln \left(\frac{T_1 - T_{sc,1}}{T_2 - T_{sc,2}} \right)} \quad (7)$$

gdzie:

T_1 - temperatura powietrza na wlocie do wymiennika [K],

T_2 - temperatura powietrza na wylocie z wymiennika [K].

$T_{sc,1}$ – temperatura ścianki wymiennika przy jego wlocie [K],

$T_{sc,2}$ – temperatura ścianki wymiennika przy jego wylocie [K].

Stosując założenie upraszczające, że temperatura ścianki wymiennika jest stała na całej długości i równa temperaturze gruntu (Firląg S., Mijakowski M. 2004):

$$T_{sc,1} = T_{sc,2} = T_g \quad (8)$$

gdzie:

T_g - temperatura gruntu [K].

Współczynnik przejmowania ciepła pomiędzy powietrzem i ścianką wyznacza się z zależności na liczbę Nusselta;

$$h_w = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_w} \quad (9)$$

gdzie:

λ – przewodność cieplna płynu [$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$].

Wzór Michiejewa na liczbę Nusselta dla przepływu płynu przez kanał stosowany w literaturze (Woodson T., Coulibaly Y. 2012):

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_s} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (10)$$

Pr_p – liczba Prandtla dla płynu dla średniej temperatury w wymienniku,

Pr_s – liczba Prandtla dla płynu dla temperatury ścianki,

ε_1 – współczynnik (dla $L \gg d$ $\varepsilon_1 = 1$)

Re – liczba Reynoldsa dla przepływającego płynu

x – głębokość gruntu [m],

n – kolejny dzień roku,

T_{sr} – średnia roczna temperatura [K],

ΔT_g – poprawka na lokalne anomalie geotermalne [K],

k_v – współczynnik wegetatywny,

A_r – roczna amplituda średnich miesięcznych temperatur powietrza [K]

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (11)$$

w – prędkość płynu [$m \cdot s^{-1}$],

ν – lepkość kinematyczna płynu [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Lepkość kinematyczną można wyrazić poprzez lepkość dynamiczną:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (12)$$

μ – lepkość dynamiczna płynu [$N \cdot s \cdot m^{-2}$].

Jedną z postaci wzoru na liczbę Prandtla jest następująca:

$$Pr = \frac{\mu}{\lambda} \cdot c_p \quad (13)$$

Prędkość powietrza wewnątrz rury można wyznaczyć z zależności:

$$w = \frac{\dot{V}_w}{\frac{\pi d_w^2}{4}} \quad (14)$$

Strumień ciepła odebrany w wymienniku równy jest jego mocy:

$$\dot{Q}_{wym} = \dot{Q}_c \quad (15)$$

$$\dot{Q}_c = A_w h_w \Delta T_{ln} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{wym} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (17)$$

Przyrównując równania (16) i (17) zgodnie z założeniem otrzymujemy:

$$\dot{m} c_p (T_2 - T_1) = A_w h_w \Delta T_{ln} \quad (18)$$

Po podstawieniach i uporządkowaniu otrzymujemy zależność na temperaturę płynu za wymiennikiem ciepła:

$$T_2 = T_{gsr} - (T_{gsr} - T_1) \cdot e^{-\left(\frac{A_w h_w}{\dot{m} c_p} \right)} \quad (19)$$

Temperaturę gruntu w zależności od głębokości i dnia roku można wyznaczyć z zależności (Bags A.S., 1983):

$$T_g(x, n) = (T_{sr} \mp \Delta T_g) - 1,07 k_v A_r \exp \left(\frac{-0,00031552 \cdot x}{\sqrt{a_g}} \right) \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(n - n_0 - \frac{0,018335 \cdot x}{\sqrt{a_g}} \right) \right] \quad (20)$$

a_g – średnia dyfuzyjność cieplna gruntu [$m^2 \cdot s^{-1}$],

n_0 – przesunięcie fazowe rocznej amplitudy gruntu w dniach [dni].

ZMNIJSZENIE ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ PRZY ZASTOSOWANIU RUROWEGO GPWC

Stosując GPWC można w zależności od warunków ogrzać lub ochłodzić świeże powietrze wentylacyjne zmniejszając w ten sposób straty/zyski ciepła związane

z ogrzewaniem/chłodzeniem powietrza wentylacyjnego. Aby określić, do jakiej temperatury można ogrzać/ochłodzić powietrze przepuszczając je przez taki wymiennik trzeba znać temperaturę gruntu, w którym jest on zakopany. Temperaturę gruntu wyznaczono na podstawie równania (20). Do równania podstawiono następujące wartości:

$$\begin{aligned}t_{sr} &= 8,26 \text{ [K]}, \\ \Delta T_g &= 0 \text{ [K]}, \\ k_v &= 0,85, \\ A_r &= 20,2 \text{ [K]}, \\ a_g &= 6 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \\ n_0 &= 22 \text{ [dni]}.\end{aligned}$$

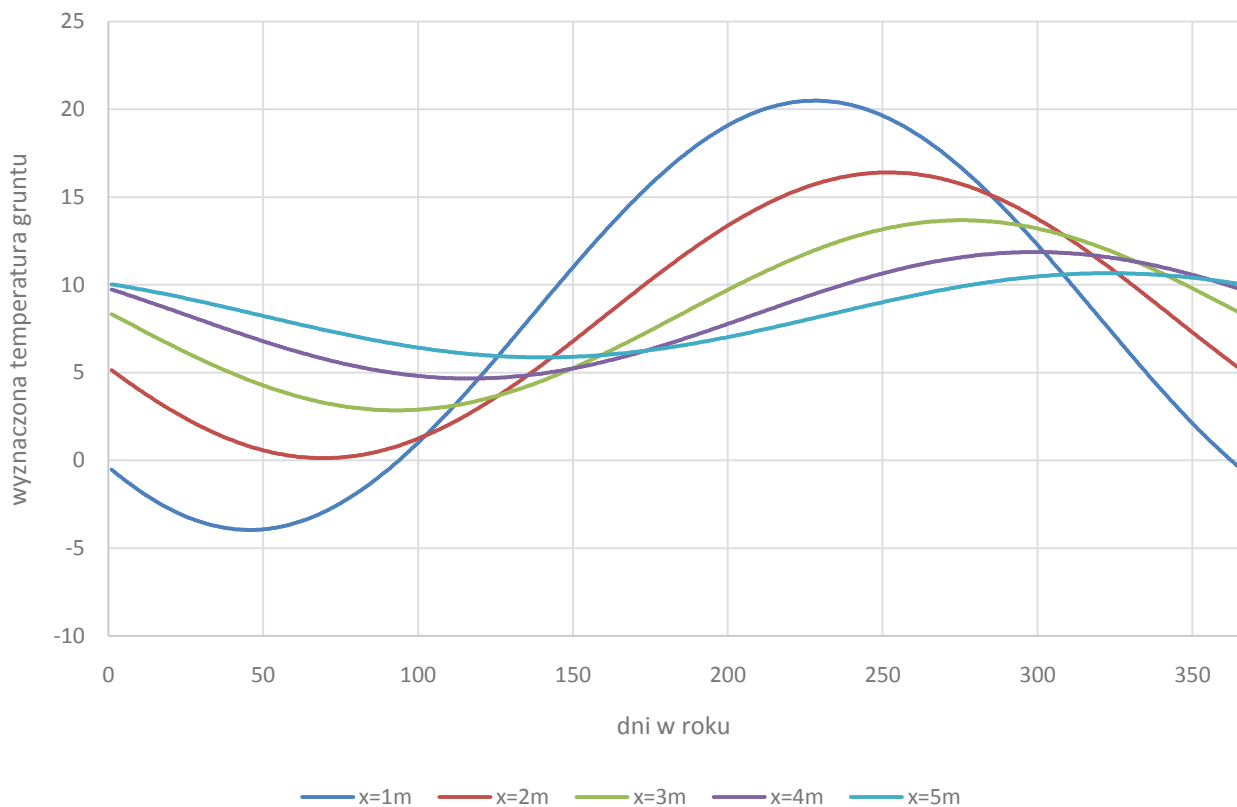
W konsekwencji otrzymano przebieg wartości temperatury gruntu w zależności od dnia w roku, dla różnych głębokości. Przebieg ten przedstawia rys. 1.

Analizując przebiegi temperatury gruntu dla różnych głębokości nasuwają się następujące wnioski: w ciągu roku występują dni, w których na głębokości 1m dochodzi do przemarzania gruntu, natomiast dla głębokości 2m temperatura gruntu może spaść do 0°C.

Poniżej głębokości 2m wahania temperatury gruntu są coraz mniejsze a zjawisko przemarzania nie występuje. Biorąc powyższe wnioski pod uwagę GPWC najlepiej jest umieścić na głębokości 2m, lub głębiej.

Wyznaczone temperatury GWPC

Korzystając z przedstawionego modelu matematycznego opisującego przepływ ciepła przez wymiennik gruntowy (równania 9 – 19) przeprowadzono obliczenia dla wybranego rodzaju wymiennika. Do obliczeń przyjęto wymiennik w postaci zakopanej w ziemi rury o długość czynnej wymiennika $L = 20\text{m}$ i przekroju kołowym o średnicy wewnętrznej równej $d_w = 0,2\text{m}$. Przyjęta głębokość, na której wymiennik jest umieszczony wynosi $x = 2\text{m}$. Wartości przyjętych do obliczeń temperatur gruntu dla kolejnych miesięcy przyjęto zgodnie z tabelą 1. Wartości te wyznaczone zostały w wyniku uśrednienia wartości temperatury gruntu dla kolejnych dni w miesiącu (rys. 1).

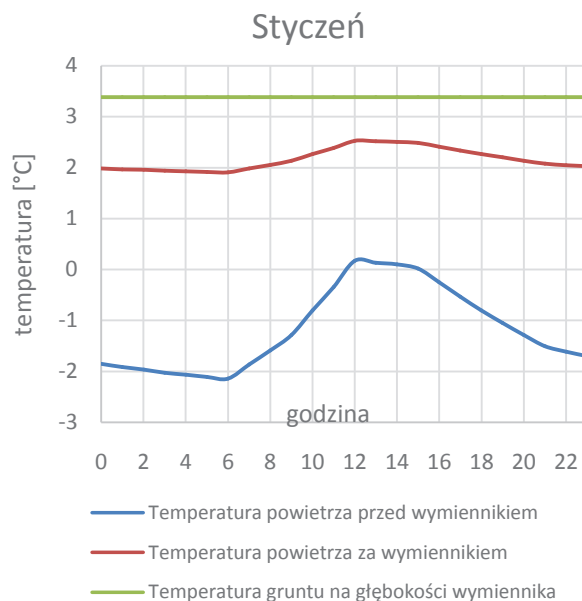


Rys. 1. Roczny przebieg temperatury gruntu na różnej głębokości

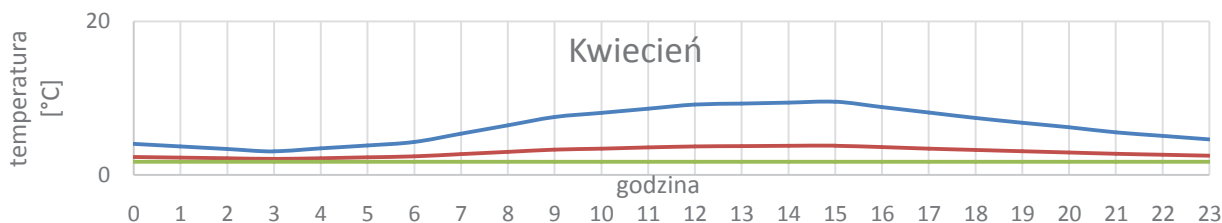
Tabela 1. Średnie miesięczne temperatury gruntu na głębokości 2 m

Miesiąc	Średnia temperatura gruntu [°C]
Styczeń	3,4
Luty	0,9
Marzec	0,3
Kwiecień	1,7
Maj	4,9
Czerwiec	9,0
Lipiec	12,9
Sierpień	15,1
Wrzesień	16,3
Październik	14,7
Listopad	11,4
Grudzień	7,3

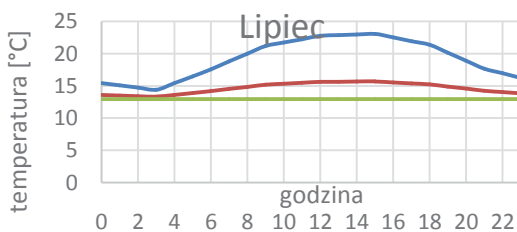
W ten sposób uzyskano wartości temperatury powietrza po przetłoczeniu przez GPWC. Na rysunkach 2 – 5 zaprezentowane są wyniki dla wybranych miesięcy. Rysunek 2 przedstawia wyniki dla stycznia, który reprezentuje okres grzewczy. Rysunek 4 przedstawia wyniki dla lipca, który reprezentuje okres z zapotrzebowaniem na chłód. Rysunki 3, 5 przedstawiają wyniki dla kwietnia i września, które charakteryzują okresy przejściowe.



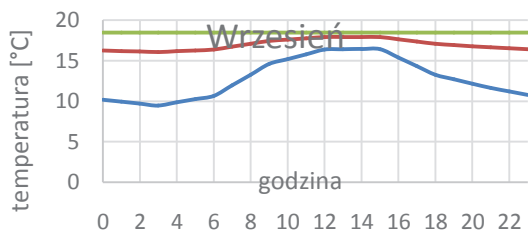
Rys. 2. Dobowy rozkład temperatury przed i za GPWC dla miesiąca stycznia



Rys. 3. Dobowy rozkład temperatury przed i za GPWC dla miesiąca kwietnia



Rys. 4. Dobowy rozkład temperatury przed i za GPWC dla miesiąca lipca



Rys. 5. Dobowy rozkład temperatury przed i za GPWC dla miesiąca września

Zastosowanie rurowego gruntowego powietrznego wymiennika ciepła pozwala na ogrzanie powietrza pobieranego przez instalację wentylacyjną, w okresie grzewczym nawet o 7 °C. W okresie letnim GPWC pozwala na ochłodzenie powietrza wentylacyjnego i obniżenie jego temperatury nawet do ok. 16 °C. Analizując rysunki 1-5 można wysnuć następujące wnioski: w okresie zimowym GPWC pozwala na ogrzanie powietrza zewnętrznego pobieranego przez instalację wentylacyjną, w lecie GPWC można wykorzystać do chłodzenia powietrza nawiewanego do

budynku, w okresach przejściowych, czyli wiosną i jesienią, kiedy temperatura powietrza i gruntu mają zbliżone wartości przepuszczanie powietrza nawiewanego przez GPWC nie wpływa na znaczne zmiany temperatury powietrza nawiewanego, może nawet działać niekorzystnie (rys. 3). W okresach przejściowych zalecane jest wyłączenie GPWC z obiegu, a powietrze do wentylacji pobierane powinno być bezpośrednio z zewnątrz.

WSPÓLPRACA UKŁADU WENTYLACJI MECHANICZNEJ I GPWC

Praca zimą

Wykorzystując zapotrzebowanie ciepła na cele ogrzewania dla wybranego budynku domu jednorodzinne, oraz ilość powietrza niezbędnego na cele wentylacji tego budynku przeprowadzone zostały obliczenia w celu wyznaczenia o ile zmniejszy się zapotrzebowanie na ciepło w przypadku zastosowania GPWC. Całkowite zapotrzebowanie na ciepło w sezonie grzewczym (01 X – 31 III) dla wybranego obiektu wynosi 11344,1 kWh, z czego 32% stanowi zapotrzebowanie energii do ogrzania powietrza wentylacyjnego. W przypadku zastosowania GPWC zapotrzebowanie na ciepło zmniejszyło się do 10342,1 kWh, czyli zmniejszenie zapotrzebowania energii wyniosło 1002 kWh, co stanowi w przybliżeniu 8,9% pierwotnego zapotrzebowania. Uwzględniając zyski, jakie daje nam GPWC straty wentylacyjne zmniejszyły się do ok. 26%.

Praca latem

Zmniejszenie zapotrzebowania na chłód przy zastosowaniu GPWC wyznaczono przy założeniu, że powietrze zewnętrzne przepuszczane jest przez wymiennik od momentu, gdy wentylowanie pomieszczeń powietrzem o temperatura zewnętrznej nie wystarcza na odebranie zysków wewnętrznych. Wentylowanie powietrzem zewnętrznym wystarcza na odebranie wewnętrznych zysków ciepła, gdy temperatura powietrza na zewnątrz jest odpowiednio niska. Często sytuacja taka zachodzi w okresie przejściowym. W okresie letnim zdarza się to w nocy. Zapotrzebowanie na chłód, czyli ilość energii, jaką należy odebrać od budynku, aby utrzymać zadaną stałą temperaturę wewnątrz budynku, wynosi 3834,35 kWh. Wartość ta jest obliczona dla okresu 01 VI – 31 VIII. W wyniku eksploatacji GPWC latem zapotrzebowanie na chłód zmniejsza się do 2910,35 kWh, czyli zapotrzebowanie na chłód zmniejsza się do 924 kWh, co stanowi 24 % całkowitego zapotrzebowania na energię do chłodzenia we wspomnianym okresie.

PODSUMOWANIE

W zimie grunt może być źródłem ciepła wykorzystanym do ogrzewania powietrza pobieranego przez instalację wentylacyjną, chociaż zyski ciepła związane z jego wykorzystaniem są niewielkie 8-9% (1002 kWh). W lecie grunt można wykorzystać do chłodzenia powietrza nawiewanego do pomieszczeń zmniejszając tym samym zapotrzebowanie na chłód. Latem zyski energetyczne (w postaci chłodu) są większe, procentowo stanowią 24%, natomiast ilościowo są na podobnym poziomie, co zyski (w postaci ciepła) zimą (924 kWh).

W obliczonym przypadku już stosunkowo nieduża długość wymiennika dawała znaczące efekty zmiany temperatury powietrza nawiewanego do budynku. Jednak użyte w obliczeniach zależności nie uwzględniają zmian temperatury gruntu w wyniku wymiany ciepła. W rzeczywistości temperatura gruntu kontaktującego się ze ścianką wymiennika ulega zmianie pogorszając tym samym warunki wymiany ciepła, dlatego w praktyce należałoby zwiększyć długość wymiennika kilkukrotnie.

Podsumowując. Zyski z zastosowania GPWC, co do wartości są stosunkowo nieduże. Po za tym przeprowadzona analiza nie uwzględniała energii potrzebnej do napędu wentylatorów przetłaczających powietrze przez GPWC, więc w rzeczywistym przypadku ogólny zysk energetyczny będzie jeszcze mniejszy.

Praca GPWC latem procentowo daje dobre wyniki analizy energetycznej. Sam GPWC zaś stanowi pewnego rodzaju alternatywę dla klasycznych systemów chłodzenia powietrza. Aby w pełni określić opłacalność stosowania GPWC należy przeprowadzić analizę ekonomiczną.

LITERATURA

- Bags A.S., 1983, *Remote prediction of ground temperature in Australian soils and mapping its distribution*, Solar Energy vol. 30 No 4, pp. 351-66.
- Kraft M., Hofit R., 1997, *Utilizability solar function*. Solar Radiation, vol.5 No 11, pp. 180-184.
- Firląg S., Mijakowski M. 2004. *Projekt gruntowego wymiennika ciepła*. Instytut Budynków Pasywnych, Narodowa Agencja Poszanowania Energii. Warszawa.
- Jędrzejewski L., *Gruntowe wymienniki ciepła jako główny element energooszczędnego systemu klimatyzacji*, Polska energetyka słoneczna 1/2005.
- Oleśkiewicz-Popiel C., Wojtkowiak J., Prętka I.: *Effect of surface cover on ground temperature season's fluctuations*, Foundations of civil and environmental engineering 2/2002.
- Staniszewski D., Targański W., 2007. *Odzysk ciepła w instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych*. IPPU Masta. Gdańsk.
- Woodson T., Coulibaly Y.: *Earth-air heat exchangers for passive air conditioning: Case study Burkina Faso*, Journal of Construction in Developing Countries 17/2012