

Využitie nízko-potenciálnej tepelnej energie Zeme v tepelno-čerpádlových systémoch

Marina Sidorová¹ a Gabriel Wittenberger

Low-potencial Earth thermal Energy Utilization in Heat Pump Systems

The underground in the first approx. 100 m is well suited for supply and storage of thermal energy. The climatic temperature change over the seasons is reduced to a steady temperature at 10-20 m. With further depth, the temperatures increase according to the geothermal gradient (average 3 °C for each 100 m of depth).

Ground-source or geothermal heat pumps are a highly efficient, renewable energy technology for the space heating and cooling. This technology relies on the fact that, at a depth, the Earth has a relatively constant temperature, higher than that of air in winter and cooler than the air in summer. A geothermal heat pump (GHP) can transfer heat stored in the Earth into a building during the winter, and transfer heat out of the building during the summer. Special geologic conditions, such as hot springs, are not needed for a successful application of GHP.

Key words: geothermal heat pumps, horizontal ground heat exchangers, borehole heat exchangers (double-U-pipe).

Úvod

Racionálne využitie palivovo-energetických zdrojov je v súčasnosti jedným z globálnych svetových problémov. Jeho úspešné riešenie bude mať určujúci význam nielen pre ďalší rozvoj svetového spoločenstva, ale aj pre zníženie znečisťovania životného prostredia okolo nás. Jednou z perspektívnych ciest riešenia tohto problému je použitie nových energeticky nenáročných technológií, používajúcich netradičné obnoviteľné zdroje energií. Hrozíce vyčerpanie zásob tradičných nerastných palív a ekologické znečistenie pri ich spaľovaní za posledné desaťročia zvyšujú záujem o tieto technológie prakticky vo všetkých vyspelých štátoch sveta. Prednosti technológií zásobovania teplom, ktoré využívajú netradičné zdroje energií v porovnaní s tradičnými analógmi, súvisia nielen s úsporami energie v systémoch zásobovania teplom budov a stavieb, ale tiež s ich ekologickou čistotou.

Druhy tepelnej energie Zeme

Pri využití tepla Zeme je možné vymedziť dva druhy tepelnej energie: **vysokopotenciálnu a nízkopotenciálnu**. Zdrojom vysokopotenciálnej tepelnej energie sú hydrotermálne zdroje - termálne vody, ohriate v dôsledku geologických procesov. Využitie vysokopotenciálneho tepla je obmedzené oblasťami s určitými geologickými charakteristikami. V Rusku sú to napríklad Kamčatka, pásma Kaukazských minerálnych vôd, v Európe sú zdroje vysokopotenciálneho tepla v Maďarsku, Islande a Francúzsku. [1]

Na rozdiel od «priameho» využitia vysokopotenciálneho tepla (hydrotermálne zdroje), využitie nízkopotenciálneho tepla pôdy s pomocou tepelných čerpadiel je možné prakticky všade. V súčasnej dobe je to jedno z najviac dynamicky vyvinutých smerov použitia netradičných obnoviteľných zdrojov energií.

Nízkopotenciálne teplo pôdy sa môže využívať pre rôzne typy budov a stavby a pre rôzne účely: na vykurovanie, zásobovanie horúcou vodou, ochladzovanie vzduchu, ohrev dlažby v zimnom období, na zábranu vzniku námrazy, na zohriatie ihrísk otvorených štadiónov, atď. V anglickej technickej literatúre sa také systémy označujú ako «GHP» – «geothermal heat pumps».

Krajiny centrálnej a Severnej Európy, USA a Kanada sú hlavnými oblasťami využitia nízkopotenciálneho tepla pôdy. Klimatické podmienky týchto krajín určujú hlavným spôsobom potrebu vo vykurovaní, ochladzovanie vzduchu v letnom období je zriedkavé [2]. V USA sa tepelné čerpadlá najviac používajú v systémoch vykurovania vzduchom spolu s vetraním, čo umožňuje zohrievať ale aj ochladzovať okolitý vzduch. V európskych štátoch sa tepelné čerpadlá zvyčajne používajú v systémoch vykurovania vodou. Nakoľko efektívnosť tepelných čerpadiel sa zvyšuje znížením rozdielov teplôt odparovača a kondenzátora, často sa na vykurovanie budov používajú systémy podlahového kúrenia, v ktorých cirkuluje teplotonosné médium s relatívne nízkou teplotou (35–40 °C).

Za posledných desať rokov sa výrazne zvýšilo množstvo systémov, ktoré využívajú nízkopotenciálne teplo pôdy použitím tepelných čerpadiel na zásobovanie budov teplom a chladom. Najväčšie množstvo

¹ Ing. Marina Sidorová PhD, Ing. Gabriel Wittenberger PhD., Katedra ropného inžinierstva, F BERG TU, Park Komenského 19, 04384 Košice, Slovensko.

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 26. 9. 2006)

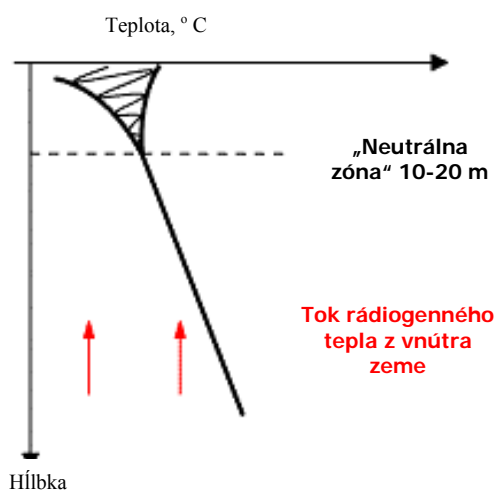
takýchto systémov sa používa v USA, v Kanade a v štátoch centrálnej a severnej Európy: Rakúsko, Nemecko, Švédsko a Švajčiarsko. V Rusku sa za posledných desať rokov podľa tejto technológie a za účasti firmy «INSOLAR INVEST» vybuďovali len jednotlivé objekty [1].

Údaje využitia nízopotenciálnej tepelnej energie s pomocou tepelných čerpadiel sú uvedené v tabuľke 1.

Tab. 1. Použitie nízko-potenciálnej tepelnej energie vo svete.

Tab. 1. Low-potential thermal energy utilization in the world.

Krajina	Inštalovaný výkon zariadenia MW	Výrobená energia TJ/rok
Austrália	24,0	57,6
Rakúsko	228,0	1094,0
Bulharsko	13,3	162,0
Veľká Británia	0,6	2,7
Maďarsko	3,8	20,2
Nemecko	344,0	1149,0
Grécko	0,4	3,1
Dánsko	3,0	20,8
Island	4,0	20,0
Taliano	1,2	6,4
Kanada	360,0	891,0
Litva	21,0	598,8
Holandsko	10,8	57,4
Nórsko	6,0	31,9
Poľsko	26,2	108,3
Rusko	1,2	11,5
Srbsko	6,0	40,0
Slovensko	1,4	12,1
Slovinsko	2,6	46,8
USA	4800,0	12000,0
Turecko	0,5	4,0
Fínsko	80,5	484,0
Francúzsko	48,0	255,0
Česko	8,0	38,2
Švajčiarsko	300,0	1962,0
Švédsko	377,0	4128,0
Japonsko	3,9	64,0
Celkovo:	6675,4	23268,9



Pôda ako zdroj nízopotenciálnej tepelnej energie

Ako zdroj nízopotenciálnej tepelnej energie sa môžu využívať podzemné vody s relatívne nízkou teplotou alebo pôdy povrchových (s hĺbkou do 400 m) vrstiev Zeme. Tepelný obsah komplexu pôdy je celkovo vyšší. Tepelný režim pôdy povrchových vrstiev Zeme sa vytvára pod vplyvom dvoch základných faktorov – *slnecnej radiácie dopadajúcej na povrch Zeme a tokom rádiogenného tepla z vnútra Zeme* [1], [5]. Sezónne a denné zmeny intenzity slnecnej radiácie a teploty vonkajšieho vzduchu vyvolávajú kolísanie teploty povrchových vrstiev Zeme. Hĺbka prieniku denného kolísania teploty vonkajšieho vzduchu a intenzity dopadajúcej slnecnej radiácie v závislosti od pôdno-klimatických podmienok kolíše v rozmedzí od niekoľko desiatok centimetrov do jeden a pol metra. Hĺbka prieniku sezónnych kolísaní teploty vonkajšieho vzduchu a intenzity dopadajúcej slnecnej radiácie neprevyšuje spravidla 15–20 m.

Tepelný režim vrstiev pôdy, umiestnených nižšie ako hĺbka «neutrálnej zóny», sa formuje účinkom tepelnej energie z vnútra Zeme a prakticky nezávisí od sezónnych aj denných zmien parametrov vonkajšieho prostredia (obr.1). S hĺbkou teplota pôdy narastá podľa geotermického gradientu (asi 3 °C na každých 100 m). Veľkosť toku rádiogenného tepla z vnútra Zeme pre rôzne oblasti sa odlišuje. Pre centrálnu Európu táto veľkosť predstavuje 0,05–0,12 W.m⁻² [3].

V prevádzkovom období komplexu pôdy, ktorý sa nachádza v zóne systému zberu nízopotenciálneho tepla pôdy (systém tepleného zberu), v dôsledku sezónnej zmeny parametrov vonkajšieho prostredia a tiež pôsobenia prevádzkových záťaží na systém tepleného zberu, sa spravidla vystavuje zmrazovaniu a rozmrazovaniu.

Dochádza tu k zmene stavu skupenstva vody, obsiahnutej v póroch pôdy. Voda sa môže nachádzať v tekutej, pevnej a plynnej fáze súčasne. Pôdny komplex systému tepleného zberu bez ohľadu na to, v akom stave sa nachádza (v zmrznutom alebo roztopenom), je zložitým trojfázovým heterogénnym systémom. «Skelet» systému je tvorený veľkým množstvom pevných častíc rôznorodého tvaru a veľkosti a môže byť tak pevný ako i pohyblivý, podľa toho, ako pevne sú medzi sebou častice spojené alebo sú od seba oddelené.

Obr. 1. Závislosť teploty pôdy od hĺbky

Fig. 1. Dependence of soil temperature on the depth

Priestor medzi pevnými časticami môže byť zaplnený mineralizovanou vodou, plynom, parou, ľadom alebo súčasne niekoľkými zložkami. Modelovanie procesov prenosu tepla, vytvárajúcich tepelný režim viackomponentného systému je nesmierne náročnou úlohou, nakoľko potrebuje matematický popis rôznych mechanizmov ich realizácie:

- tepelnej vodivosti v jednotlivých časticiach,
- odovzdanie tepla od jednej častice druhej pri ich styku,
- molekulárnej tepelnej vodivosti v prostredí, ktoré vyplňa vzdialenosť medzi časticami,
- prúdenia tepla pary a vody v pórovom priestore a mnoho ďalších.

Zvlášť je potrebné pozastaviť sa na pôsobení vlhkosti pôdneho komplexu a migrácie vody v pórovom priestore na tepelné procesy, ktoré určujú charakteristiky pôdy ako zdroja nízko-potenciálnej tepelnej energie.

V kapilárnom poréznom systéme, akým je pôdny komplex systému tepleného zberu, má prítomnosť vlhkosti v pórovom priestore veľký vplyv na priebeh šírenia tepla. To môže byť spojené so značnými ťažkosťami, ktoré v prvom rade súvisia s nedostatkom jasnej predstavy o charaktere rozmiestnenia pevnej, tekutej a plynnej fázy vlhkosti v štruktúre systému. Doteraz nie je vyjasnený charakter väzby vlhkosti s časticami skeletu systému, závislosť foriem väzby vlhkosti s podkladom na rôznych stupňoch zvlhčovania, mechanizmus premiestňovania vlhkosti v pórovom priestore.

Pri výskyte teplotného gradienta v komplexe pôdy sa molekuly pary premiestňujú na miesta so zníženým teplotným potenciálom, ale zároveň pri pôsobení tiažových síl vzniká opačne nasmerovaný tok vody v kvapalnej fáze. Okrem toho, na teplotný režim povrchových vrstiev Zeme vplyva voda atmosférických zrážok a tiež podzemné vody.

Systémy využitia nízko-potenciálnej tepelnej energie Zeme

Zemné výmenníky tepla spájajú tepelno-čerpádlové zariadenia s komplexom pôdy. Okrem «vyťaženia» tepla pôdy, zemné výmenníky sa môžu používať aj pre akumuláciu tepla (alebo chladu) v komplexe pôdy.

Rozlišujeme dva typy systémov využitia nízko-potenciálnej tepelnej energie Zeme:

- **otvorené systémy:** ako zdroj nízko-potenciálnej tepelnej energie sa využívajú podzemné vody, privádzané priamo tepelným čerpadlám;
- **uzavreté systémy:** výmenníky tepla sú umiestnené v komplexe pôdy, pričom pri cirkulácii teplotného média s nižšou teplotou akú má pôda vzniká «odber» tepelnej energie z pôdy a jej prenos k odparovaču tepelného čerpadla (alebo pri využití teplotného média s vyššou teplotou akú má pôda dochádza k jeho ochladzovaniu).

Hlavnou časťou otvorených systémov sú vrty, ktorými je možné ťažiť podzemné vody z vrstiev pôd a vracať ju naspäť. Pre tento účel sa realizujú vrty v pároch. Schéma takého systému je uvedená na obr. 2.

Prednosťou otvorených systémov je možnosť získania veľkého množstva tepelnej energie pri pomerne nízkych nákladoch. Využitie takých systémov nie je možné vo všetkých oblastiach. Hlavné požiadavky pre pôdu a podzemné vody sú nasledovné:

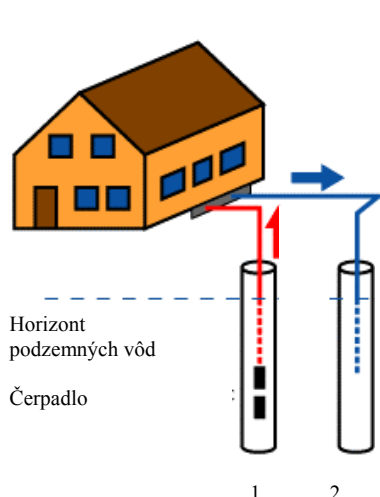
- dostatočná priepustnosť pôdy, ktorá umožní dopĺňať zásoby vody,
- vhodné chemické zloženie podzemných vôd (napr. nízky obsah železa).

K systémom, ktoré využívajú teplo Zeme, patria aj systémy, využívajúce nízko-potenciálne teplo otvorených prírodných a umelých vodojemov (napríklad, v USA). Systémy, ktoré využívajú nízko-potenciálne teplo vodojemov, patria k otvoreným ako aj systémy, využívajúce nízko-potenciálne teplo podzemných vôd.

Uzavreté systémy sa delia na **horizontálne a vertikálne**.

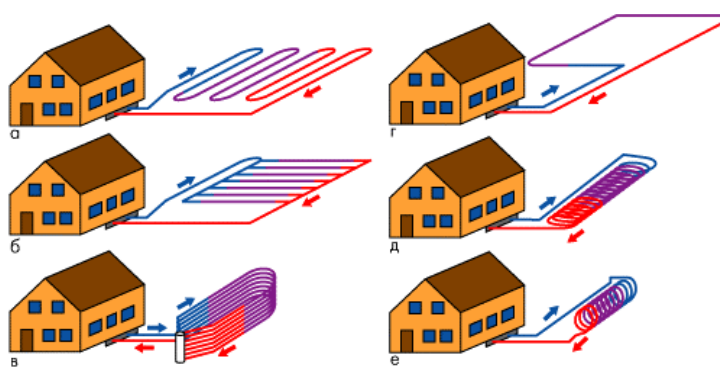
Horizontálny zemný výmenník tepla (z anglického «ground heat collector» a «horizontal loop») sa umiestňuje, spravidla, pri budove v malej hĺbke (avšak hlbšie ako je úroveň premrznania pôdy v zimnom období). Použitie horizontálnych zemných výmenníkov tepla je obmedzené rozmermi plochy na ktorej by sa mali umiestniť.

V krajinách západnej a centrálnej Európy horizontálne zemné výmenníky tepla predstavujú jednotlivé rúry, ktoré sa umiestňujú tesne pri sebe a sú spojené medzi sebou buď sériovo alebo paralelne (obr. 3a, 3b). Pre úsporu plochy pozemku boli vyrobené vylepšené typy výmenníkov tepla, napríklad, výmenník tepla vo forme špirály, umiestnený vertikálne alebo horizontálne (obr. 3f, 3e). Také výmenníky tepla sú spravidla rozšírené v USA.



Obr. 2. Otvorený systém využitia nízko - potenciálnej tepelnej energie podzemných vôd. 1- odberový vrt, 2- vtláčny vrt

Fig.2. Open system of the utilization of low - potential thermal energy of groundwater heat pump



Obr.3. Typy horizontálnych zemných výmenníkov tepla: a- výmenník tepla zo sériovo zapojených rúr, b- výmenník tepla z paralelne zapojených rúr, c- horizontálny kolektor umiestnený v ryhe, d- výmenník tepla typu slučky, f- výmenník tepla typu „slinky“, e- výmenník tepla typu špiráli

Fig.3. Types of horizontal ground heat exchanger: a- connection in series, b- connection in parallel, c- trench collector, d- pipe in trench, f- „slinky“ collector, e- svec spiral collector

Ak sa systém s horizontálnymi výmenníkmi tepla používa len pre získanie tepla, jeho normálna prevádzka je možná len za predpokladu postačujúcich „tepelných príjmov“ z povrchu zeme vďaka slnečnej radiácii. Z tohto dôvodu musí byť plocha vyššie ako výmenník tepla vystavená slnečným lúčom.

Vertikálne zemné výmenníky tepla (z anglického BHE – «borehole heat exchanger») dovoľujú využiť nízkoenergetickú tepelnú energiu pôdneho komplexu, ktorý sa nachádza hlbšie ako «neutrálna zóna» (10–20 m od úrovne povrchu zeme). Systémy s vertikálnymi výmenníkmi tepla si nevyžadujú veľké plochy a nezávisia od intenzity slnečnej radiácie, ktorá dopadá na povrch zeme. Vertikálne výmenníky tepla efektívne pracujú prakticky vo všetkých geologických prostrediach okrem pôd s nízkou tepelnou vodivosťou, napríklad v suchom piesku alebo suchom štrku. Systémy s vertikálnymi výmenníkmi tepla majú veľmi široké použitie.

Schéma vykurovania a zásobovania obytného domu horúcou vodou použitím tepelno-čerpaceho zariadenia s vertikálnym výmenníkom tepla je uvedená na obr. 4.

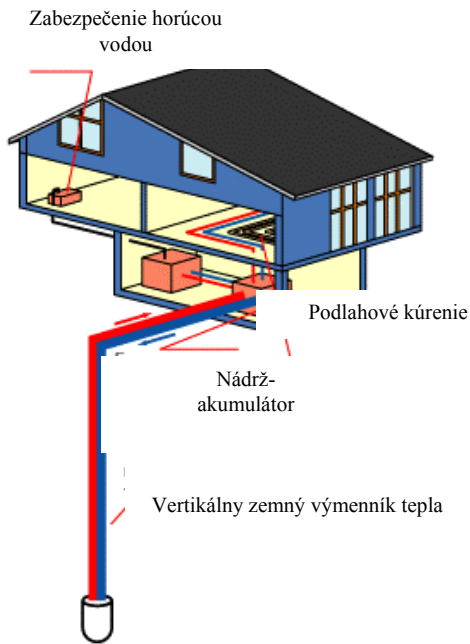
Tepelnosť médium cirkuluje cez rúry (polyetylénové alebo polypropylénové) vo vertikálnych vrtoch s hĺbkou od 50 do 200 m. Zvyčajne sa používajú dva typy vertikálnych zemných výmenníkov tepla (obr. 5):

- **Výmenník tepla typu U** zahŕňa dve paralelné rúry, ktoré sú spojené v spodnej časti. V jednom z vrtov sa umiestňujú jeden alebo dva (niekedy tri) páry takých rúr. Prednosťami takej schémy sú relatívne nízke náklady na ich výrobu. Dvojitý vertikálny výmenník tepla typu U sú najviac využiteľné v Európe.
- **Koaxiálny výmenník tepla** zahŕňa dve rúry rôzneho priemeru. Rúra menšieho priemeru sa umiestňuje do vnútra druhej rúry. Koaxiálne výmenníky tepla môžu mať aj zložitejšie usporiadanie.

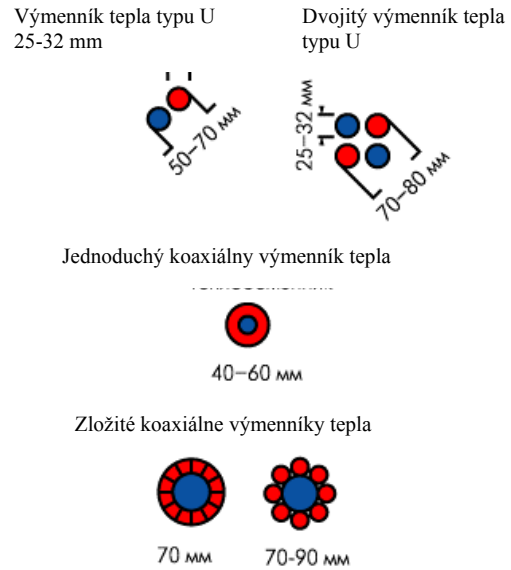
Pre zvýšenie efektívnosti výmenníkov tepla sa priestor medzi stenou vrtu a rúrami naplňa špeciálnymi teplovodivými materiálmi.

Systémy s vertikálnymi výmenníkmi tepla sa môžu používať pre zásobovanie budov rôznych veľkostí teplom a chladom. Pre malú budovu je dostatočný jeden výmenník tepla, pre veľké budovy môže byť potrebných niekoľko vrtov s vertikálnymi výmenníkmi tepla. Na univerzite «Richard Stockton College» v USA v štáte New Jersey sa pre tento účel použilo najväčšie množstvo vrtov v systéme zásobovania teplom a chladom. Vertikálne zemné výmenníky tepla sú rozmiestnené v 400 vrtoch s hĺbkou 130 m. V Európe najväčšie množstvo vrtov (154 vrtov s hĺbkou 70 m) sa používa v systéme zásobovania teplom a chladom hlavného pracoviska nemeckej služby pre správu leteckej prepravy («Deutsche Flug-sicherung»).

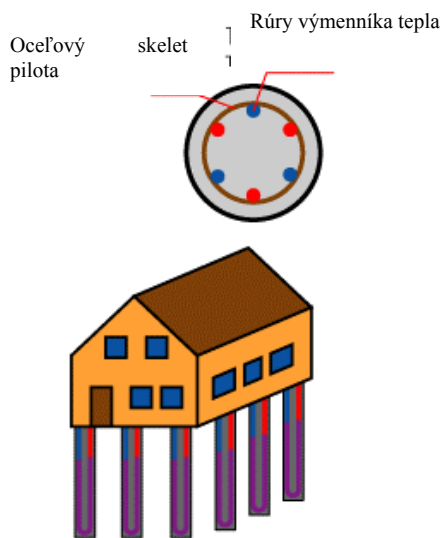
Veľmi často sa ako zemné výmenníky tepla stavebných konštrukcií používajú základné pilóty s monolitnými potrubiami. Prierez takejto piloty s tromi obvodmi zemného výmenníka tepla je znázornený na obr.6.



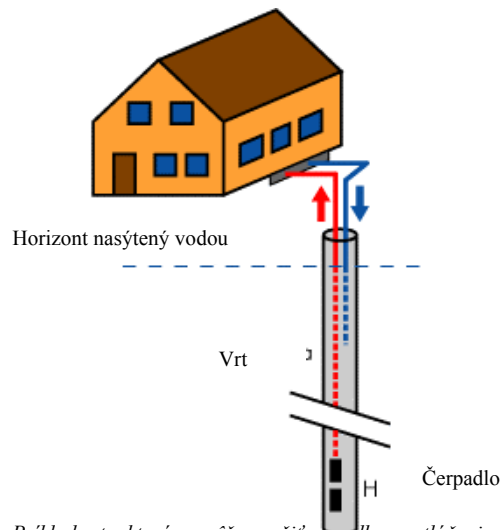
Obr. 4. Schéma vykurovania a zabezpečenia horúcou vodou obytného domu použitím teplo-čerpaceho zariadenia s vertikálnym výmenníkom tepla.
Fig. 4. Typical application of a borehole heat exchanger heat pump system.



Obr. 5. Prierezy vertikálnych výmenníkov tepla.
Fig. 5. Cross-sections of different types of borehole heat exchangers.



Obr. 6. Prierez základného pilota s tromi obvodmi zemného výmenníka tepla.
Fig. 6. Energy piles and cross-section of a pile with 3 loops.



Obr. 7. Príklad vrtu, ktorý sa môže použiť pre odber a vtláčanie vody.
Fig. 7. Standing column well.

Pôdny komplex (v prípade vertikálnych výmenníkov tepla) a stavebné konštrukcie so základnými výmenníkmi tepla sa môžu využívať nielen ako zdroj, ale aj ako prírodný akumulátor tepelnej energie alebo «chladu».

Existujú aj systémy využitia nízko-potenciálneho tepla pôdy, ktoré sa nedajú jednoznačne priradiť k otvoreným alebo uzavretým. Napríklad ten istý vrt s hĺbkou od 100 do 450 m zaplnený vodou môže byť ťažobný aj vtláčny. Priemer vrtu je zvyčajne 15 cm. V spodnej časti vrtu sa umiestňuje čerpadlo, ktoré vodu z vrtu posúva k odparovačom. Následne sa voda vracia do hornej časti vodného stĺpca toho istého vrtu. Takto prebieha stále dopĺňovanie vrtu podzemnými vodami a otvorený systém pracuje podobne ako uzavretý. Systémy tohto typu sa v anglojazyčnej terminológii nazývajú «standing column well system» (obr. 7).

Zvyčajne sa vrty tohto typu používajú na zásobovanie budov pitnou vodou. Avšak taký systém môže efektívne pracovať len v pôde, ktorá zabezpečuje stále dopĺňovanie vrtu vodou, aby sa zabránilo jej zamrznutiu. Ak sa horizont nasýtený vodou nachádza príliš hlboko, je potrebné výkonné čerpadlo pre

normálne fungovanie systému, čo si vyžiada zvýšené náklady na energiu. Veľká hĺbka vrtu si vyžaduje vysoké náklady, a preto sa podobné systémy nepoužívajú pre malé budovy. V súčasnosti vo svete funguje niekoľko takých systémov v USA a v Európe.

Záver

Naša Zem skrýva vo svojom vnútri veľké množstvo energie. Geotermálna energia, tiež vnútorné teplo Zeme, je iba časťou tejto energie, ktorá sa prejavuje buď mechanicky (zemetrasenia, vrásnenia horských masívov) alebo tepelne (sopky, gejzíry a horúce pramene).

Tepelný tok z vnútra Zeme na jej povrch dosahuje cca 26 TJs⁻¹. [3]. Ak by sme mali pokryť celkovú minulú i budúcu spotrebu ľudstva využitím tepla Zeme, jej teplota by poklesla o 1°C za 40 mil. rokov. Otázne je, ako by sme vedeli tento zdroj účinne a výhodne ekonomicky využiť.

Využívanie obnoviteľných energetických zdrojov na Slovensku snáď s výnimkou vodnej energie, je značne nedocenené, kým vývoj v iných vyspelých krajinách sa ubera cestou vyššieho využitia práve týchto zdrojov. Príkladov využitia tepelných čerpadiel je na Slovensku veľmi málo a v energetickej bilancii majú zanedbateľný podiel. Doteraz realizované projekty nabádajú k zamysleniu sa, prečo napriek ekonomickým, ekologickým ale aj sociálnym pozitívam je týchto príkladov u nás stále tak veľmi málo [4], [6].

Jedným z perspektívnych smerov sa javí využitie nízkopotenciálnej tepelnej energie vody z baní a tunelov. Teplota takej vody je konštantná po celý rok a je relatívne ľahko dostupná.

Literatúra - References

- [1] Vasiljev, G., P., Šilkin, N., V.: Ispolzovanie nizkopotencialnej teplovoj energie zemli v teplonasosnykh systemach. *Casopis ABOK*. http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1991&version=print
- [2] Rybach, L., Sanner, B.: Ground-source heat pump systems - the European experience. *GeoHeatCenter Bull.* 21/1, 2000
- [3] <http://redilem.sjf.stuba.sk/files/tm/3.3%20Energetika%20a%20zivotne%20prostredie.pdf>
- [4] <http://www.fns.uniba.sk/zp/fond/1998/7.htm>
- [5] Sanner, B.: Ground Heat Sources for Heat Pumps (classification, characteristics, advantages). 2002.
- [6] Tauš, P., Rybár, R., Kudelas, D., Kuzevič, Š., Domaracký, D.: Potenciál obnoviteľných zdrojov energie na Slovensku z hľadiska výroby elektrickej energie, *AT&P Journal* 3/2005.