

Енергозбереження і альтернативна енергетика  
Energy saving and alternative energy

УДК 631.22.019

## Аналіз конструкцій фундаментних паль

В.І.Мельник<sup>1</sup>, Б.М.Цимбал<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (м. Харків, Україна), victor\_melnik@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1176-2831

<sup>2</sup> Національний університет цивільного захисту України (м. Харків, Україна), tsembalbogdan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2317-3428

Анотація. В роботі представлено аналіз конструктивних особливостей, недоліків та переваг фундаментних паль з теплообмінниками та без них їх. Встановлено, що більшість паль має складну форму теплообмінника або самої палі. Теплообмінники можуть бути одинарні, подвійні та потрійні U-подібної, W-подібної та спіральної форми.

Найбільш перспективними є палі з U-подібними теплообмінниками. Їх застосування виключає механічне навантаження на стіни будівлі. Немає додаткових втрат на буріння свердловини. Вони мають збільшену теплову ефективність і низькі гідродинамічні втрати на перекачку теплоносія. Особливо це справедливо при використанні теплообмінників з паралельними подвійними U-подібними трубами. В таких конструкціях проблема порушення герметичності зведена до мінімуму і, відповідно, досягається належний рівень екологічної безпеки.

Водночас, використання рідини як теплоносія, за рахунок зміни температури, тиску та її об'єму може призвести до руйнування, спочатку труб теплообмінників, а потім і конструкції палі. Наявність розчиненого кисню в рідинному теплоносії сприяє появі наскрізної корозії труб теплообмінників і, як наслідок, руйнуванню залізобетонної конструкції палі в цілому. Використання труб теплообмінників у якості арматури також може приводити до їх ушкодження і, відповідно, до приведених вище проблем.

Проведений аналіз відомої інформації стосовно фундаментних паль дозволяє сформулювати вимоги до перспективних конструкцій енергетичних паль і в перспективі дасть можливість розробити нову конструкцію забивної палі з U-подібним теплообмінником в якій враховані всі приведені в роботі недоліки. Перш за все потрібно провести оптимізацію конструкції теплообмінника, а саме, геометрію поперечного перетину труб, форму укладки труб в тілі палі, методи фіксації труб теплообмінника в тілі палі та кількість таких фіксаторів.

**Ключові слова:** теплообмінник, конструкція палі, екологічна безпека, теплова ефективність, гідравлічні втрати, коефіцієнт теплопередачі, U-подібний теплообмінник

**Постановка проблеми.** Переважна більшість фундаментних паль мають тільки несучу здатність, і не містять теплообмінників для отримання енергії з ґрунту. Теплоенергетичні пальові системи поєднують в собі несучі функції фундаменту і теплообмінні функції для теплових насосів. Однак вони не повною мірою задовольняють сучасним потребам людства в відновлювальній геотермальній енергії. Причина в недоліках. Вони мають складну конструкцію та низьку енергетичну продуктивність. Є проблеми і з надійністю. Саморуйнування енергетичних паль можливе як під час монтажу, так і в період експлуатації. Можливі складнощі і піч час їх обслуговування. Вирі-

шення перелічених недоліків та посилення позитивних якостей теплоенергетичних пальових систем на сьогодні є актуальною проблемою.

**Метою роботи** є виявлення невирішених раніше конструктивних проблем і недоліків енергетичних фундаментних паль для подальшого їх вдосконалення і адаптації під специфічні вимоги будівель та споруд молочних фермерських господарств великої рогатої худоби.

**Задачі дослідження.** Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз конструкцій, параметрів та ефективності застосування фундаментних паль з теплообмінниками та без них і виявити їх недоліки та переваги.

**Головна частина.** В роботі [1] Ping Cui, Xin Li, Yi Manc та Zhaohong Fang досліджується теплове поле, що виникає навколо заглиблених теплообмінників у вигляді спіральних котушок, які застосовується в наземних теплонасосних системах з паливим фундаментом в якості геотермального теплообмінника. Автори розробили математичну модель теплового джерела з кільцевою котушкою (рис. 1), а також аналітичні рішення температурних реакцій і довели, що розглянуті математичні моделі можуть точно описувати процес теплопередачі паливого геотермального теплообмінника.

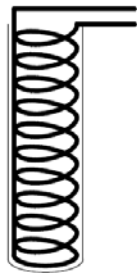


Рис. 1. Палля з теплообмінником, спіральною котушкою

Бетонний, паливий фундамент може складатися з палів, які містять поліетиленові труби підземних теплообмінників. Процес теплообміну через бетон та ґрунт посилюється фіксацією теплообмінних труб. Крім того, для засипки використовується залізобетон, який має високу теплопровідність [2].

Розташування енергетичних палів схоже з вертикальними бурильними трубами та в більшості випадків включає U-подібні труби теплообмінників (рис. 2.а), W-подібні труби (рис. 2.б) і спіральні труби (рис. 2.г) [3], а також одинарні U-подібні труби (рис. 2.а), паралельні подвійні U-подібні (рис. 2.в) і паралельні три U-подібні труби (рис. 2.г) [4]. Недоліком є те, що труба заглиблена в паливий фундамент. Кількість і довжина паливого фундаменту обмежена власною будівельною структурою. Одинарна U-подібна труба всередині фундаменту може призвести до невеликої кількості заглиблених труб і невеликої теплової зони обміну. W-подібна та U-подібна труба серед великої кількості поглиблених труб, має підвищену теплопередачу. При цьому, складна форма у верхній частині заглиблених труб може легко призвести до появи газової пробки, що перешкоджає теплопередачі [3, 5]. Подвійні і потрійні U-подібні заглиблені фундаментні труби зі збільшеними з'єднаннями і трубопроводами за рахунок складності збільшують площу теплообміну. Трубопровід фундаментного з'єднання легко створює небезпеку. Гвинтові труби теплообмінників

мають збільшену загальну довжину труб, використання яких є безпечним. Така конструкція не призводить до значного зниження несучої здатності паливих фундаментів. Однак вони мають невелику площу перенесення та низький коефіцієнт теплопередачі. Застосування спіральних теплообмінників знижує загальну трудомісткість закладання трубопровідного фундаменту, тому набуває все більшої популярності [2, 6], а отже може стати перспективним напрямом досліджень у сфері нової енергетики.

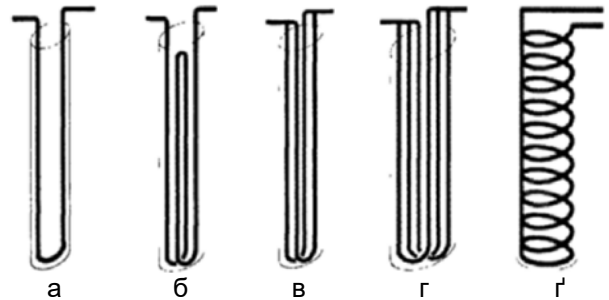


Рис. 2. Принципова схема заглибленої труби різних типів паливого фундаменту: а – одинарні U-подібні труби; б – W-подібні труби; в – паралельні подвійні U-подібні труби; г – паралельні три U-подібні труби; ґ – спіральні труби

Існує буроопускна термопалля (рис. 3), яка має підвищену несучу здатність, а також підвищений опір впливу на неї дотичних сил морозного здимання ґрунтів верхнього шару 3. Вона складається з герметичного трубчастого стовбура 1, заповненого теплоносієм 2, що відрізняється тим, що в нижній частині стовбура 1 додатково має герметичну емність 5, жорстко з'єднану зі стовбуром 1 палі. Причому в стовбурі 1 палі в межах висоти емності влаштовані отвори 6, через які ця емність заповнюється теплоносієм 2 [7].

Вченими Інституту технічної теплофізики НАН України були створені системи теплопостачання з використанням теплової енергії води з водозабірної свердловини та колодязя. Робота теплонасосної установки з водо-водяним теплообмінником передбачає монтування останнього у водозабірній свердловині. Він виконаний з поліетиленової труби, закріпленої на заглибленому насосі. Теплообмінник складається з чотирьох петель, які закріплені металевими кільцями (рис. 4.а).

Робота теплонасосної установки зі спіральним водо-водяним теплообмінником спеціального виконання передбачає монтування останнього на внутрішній стінці колодязя у стовпі води. Він виконаний з поліетиленової труби, що закріплена разом із датчиками температури, рис. 4.б [8].

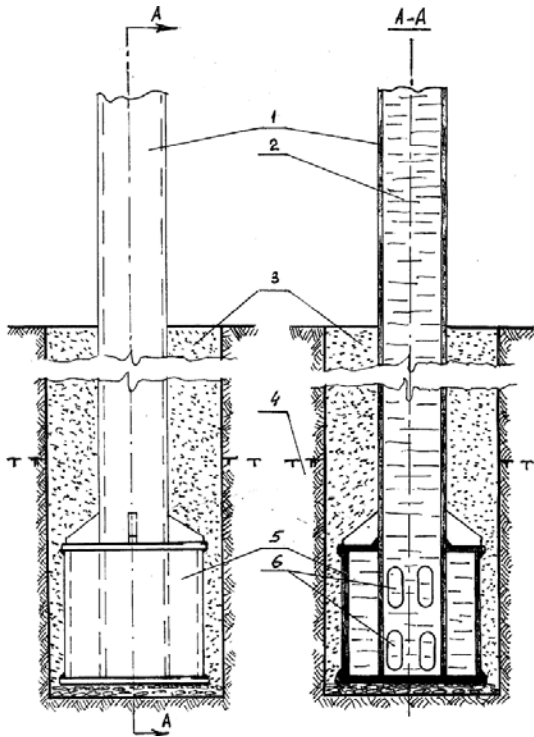


Рис. 3. Буроопускна термопалля з підвищеною несучою здатністю

Японськими вченими та провідними виробниками було проведено експеримент з паллями з різними теплообмінниками. Одна із конструкцій побудована за принципом «труба в трубі» (рис. 5.а). При цьому велика труба, заповнюється теплоносієм з вхідної довгої труби та вивільняється від нього короткою вихідною трубою. Інші конструкції палей передбачають використання одинарних U-подібних (рис. 5.б) та паралельних подвійних U-подібних (рис. 5.в) теплообмінників, що не з'єднані теплоносієм із великою трубою. Експеримент показав, що найкращий теплообмін мають теплообмінники з паралельними подвійними U-подібними трубами, бо вони мають найбільшу площу контакту [9].

Енергетична палля (рис. 6.а та рис. 6.б) складається з корпусу у вигляді залізобетонної вертикальної труби круглого поперечного перерізу 1. У ній на всю довжину співвісно встановлена труба 2 з низькотеплопровідного матеріалу з отворами 3 на нижньому кінці. Завдяки співвісному розташуванню труби 2 в корпусі 1 формуються канали 4 і 5, сполучені отворами 3. Внизу енергетичної палі розташований наконечник 6.

Для зменшення теплообміну між висхідним і спадним потоками повітря доцільно використовувати енергетичну палю (рис. 6.в, 6.г, 6.д), в якій корпус 1 містить на внутрішній стінці два симетрично розташованих поздовжніх паза 7 для закріплення в них поздовжніх ребер 8 на зовнішній

поверхні труби з низькотеплопровідного матеріалу 9. При цьому утворюється канал 10 для спадного і канал 11 для висхідного потоків повітря.

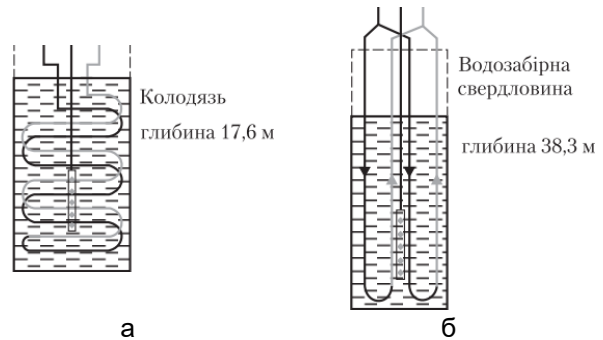


Рис. 4. Конструкція теплообмінників: а – з використанням теплоти ґрунтової води з водозабірної свердловини, б – з використанням теплоти колодезної води

Довжина ребер 8 менше висоти енергетичної палі, так що вони не доходять до самого низу труби 9, а закінчуються на деякому рівні 12 від нижньої точки 13 корпусу 1, утворюючи тим самим прохід 14 для переходу повітря з спадного каналу 10 в висхідний канал 11. Центральна область 15 труби 9 або залишається порожньою, або заповнюється низькотеплопровідним матеріалом [10].

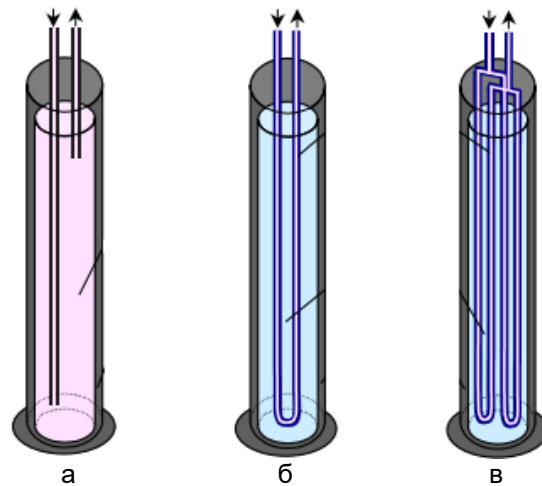


Рис. 5. Схема палей з теплообмінниками, труба в трубі: а – вхідна довга та коротка вихідна труба; б – одинарні U-подібні труби; в – паралельні подвійні U-подібні труби

Тепле повітря примусово подається в кільцевий канал 4. За рахунок того, що температура ґрунту, прилеглого до корпусу 1, менша температури подаваного в кільцевий канал 4 повітря, відбувається його охолодження. Досягнувши низу кільцевого каналу 4, повітря через бічні отвори 3

на нижньому кінці труби 2 переходить в неї, прямуючи вгору по каналу 5. Завдяки малій швидкості руху повітря в каналі 5 труби 2 коефіцієнт тепловіддачі на її внутрішній поверхні має низькі значення. Це мінімізує тепловий потік між низхідним і висхідним потоками повітря. В цілому це є негативним фактором.

В енергетичній palі (рис. 6в, 6.г, 6.д) тепле повітря примусово подається в канал 10, за рахунок того що температура ґрунту, прилеглого до корпусу 1, менше температури подаваного в канал 10 повітря, відбувається його охоло-

дження. Досягнувши низу каналу 10, повітря через прохід 14 направляється в канал 11 і рухається вгору, охолоджуючись від корпусу 1. Витрату повітря необхідно приймати виходячи з питомої величини теплотримання з одиниці довжини palі 1-80 Вт/м в залежності від теплофізичних властивостей прилеглого ґрунту. При заданій витраті повітря ширину каналів 4, 10, 11 слід вибрати виходячи із швидкості повітря в ньому в діапазоні 1-10 м/с, щоб уникнути великих аеродинамічних втрат. Напрямок руху повітря в енергетичній palі може бути змінено на протилежний [10].

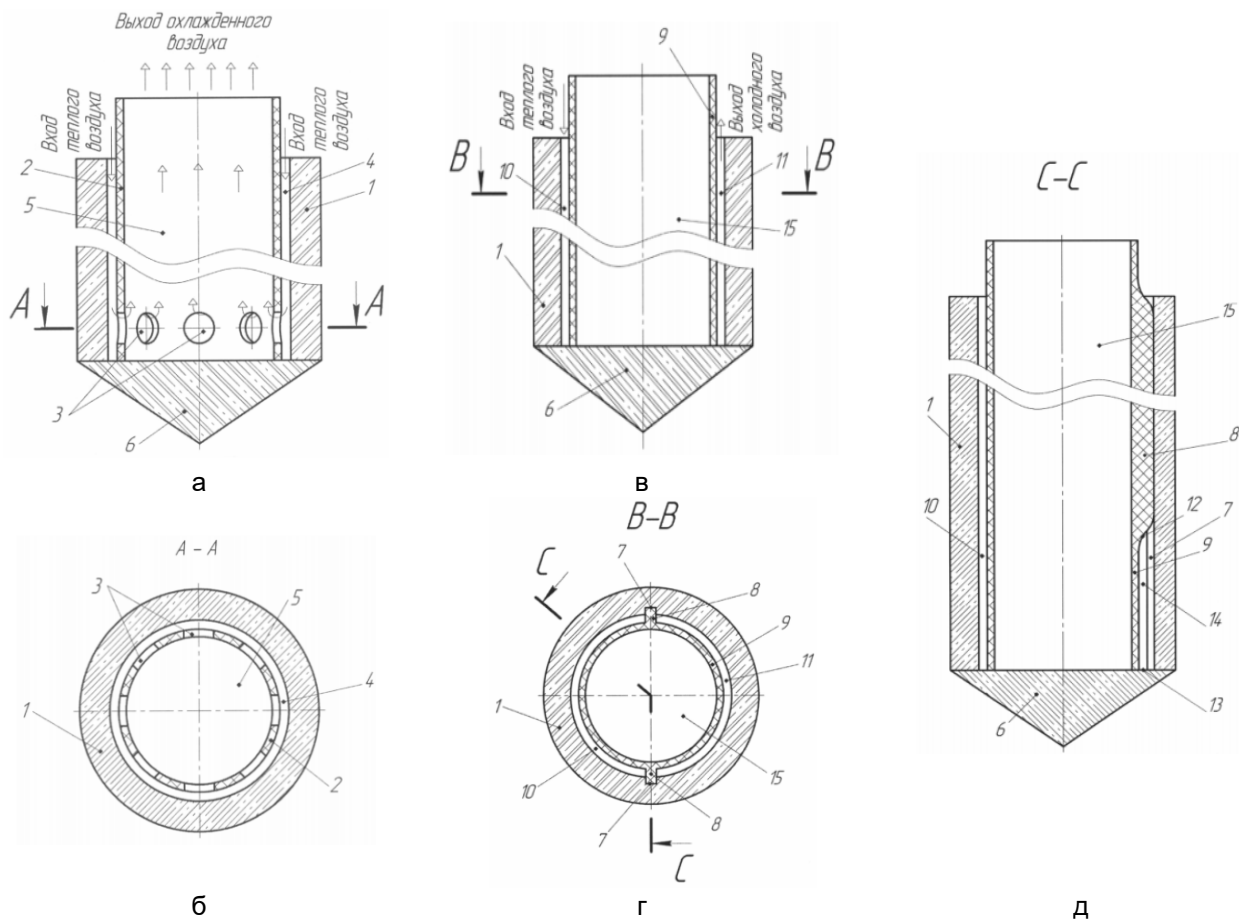


Рис. 6. Енергетична palя: а – показано подовжній перетин енергетичної palі; б – поперечний переріз А-А на рівні розташування бічних отворів центральної труби; в – подовжній перетин енергетичної palі, що включає трубу з низькотеплопровідного матеріалу з подовжніми ребрами; г – поперечний переріз В-В енергетичної palі; д – подовжній перетин С-С енергетичної palі

Представлена конструкція енергетичної palі в порівнянні з іншими palями має наступні переваги: внаслідок використання екологічно чистого теплоносія (повітря) виключається проблема герметичності і підвищується екологічна безпека; виключаються капітальні (первісна покупка теплоносія) та експлуатаційні (заповнення витоків) витрати на теплоносій внаслідок повсюдної доступності повітря як теплоносія; виключаються

витрати на додатковий теплообмінник; в порівнянні з широко поширеними пристроями для охолодження повітря на основі компресійного трансформатора теплоти повітря-повітря. Повітровід має наступні переваги: значно менші витрати електрики (вона витрачається лише на привід нагнітачів повітря); підвищується екологічна безпека; виключається механічне навантаження на стіни будівлі; відсутній негативний вплив на



естетичність фасадів будівлі, а в порівнянні з традиційними вертикальними ґрунтовими теплообмінниками має такі переваги, як: збільшення теплової потужності за рахунок більшої поверхні теплообміну; відсутність проблеми герметичності; підвищення екологічної безпеки; виключаються витрати на теплоносій; виключаються витрати на додатковий теплообмінник; виключаються витрати на буріння свердловини [11].

В представленій енергетичній палі в якості корпусу, що сприймає механічні навантаження, використовується цільна залізобетонна труба (паля-оболонка). На сьогодні в будівництві застосовуються ряд інших конструкцій несучих оболонок палі. Зокрема, відомі конструкції пустотілих паль-оболонки круглого, прямокутного, трикутного, таврового та двотаврового перетину [10].

Дана конструкція енергетичних паль (рис. 6) має певні недоліки. Оскільки повітря має меншу теплоємність ніж рідинний теплоносій, його використання в якості теплоносія знижує коефіцієнт корисної дії енергетичної системи в цілому. Крім цього, при зміні температури змінюється об'єм і тиск повітря в системі, що може призвести до її руйнування.

Відома інша конструкція енергетичної палі (рис. 7), яка передбачає використання повітря в якості теплоносія. Розглянемо її робочий процес. Тепле повітря примусово подається в кільцевий канал 4. Оскільки температура ґрунту, прилеглого до вертикальної залізобетонної труби 1 з зовнішнього боку, менше температури подаваного в кільцевий канал 4 повітря, відбувається його охолодження. Досягнувши низу кільцевого каналу 4, повітря через бічні отвори 3 в нижньому кінці труби 2 переходить в неї, прямує вгору по каналу 5. При русі в кільцевому каналі 4 охоложене повітря рухається уздовж внутрішньої поверхні вертикальної залізобетонної труби 1 з траншейними лунками 7, які забезпечують вихрову інтенсифікацію тепловіддачі. З урахуванням гідродинамічно обґрунтованих параметрів інтенсифікаторів, ефективність такої енергетичної палі збільшується до 2,3-2,6 рази.

Витрати повітря розраховують виходячи з питомої теплоємності одиниці довжини палі 1-80 Вт/м та в залежності від теплофізичних властивостей прилеглого ґрунту. При заданій витраті повітря, щоб уникнути великих аеродинамічних втрат в каналі 4 його ширину  $s$  вибирають з умови забезпечення швидкості руху повітря в діапазоні 1-15 м/с. Напрямок руху повітря в енергетичній палі може бути реверсивним.

В порівнянні з іншими, за рахунок збільшеної тепловіддачі, описана енергетична паля (рис. 7) дозволяє забезпечити підвищений тепловий потік при незмінних площі тепловіддаючої поверхні (а відповідно, і розмірах енергетичної палі) і

різниці температур. При цьому завдяки невисоким аеродинамічним втратам представлена енергетична паля має підвищену теплову ефективність в порівнянні з іншими палями [12]. Але дана конструкція палі має певні недоліки.

В процесі експлуатації, із-за малих розмірів отвори можуть забиватися. Використання повітря як теплоносія може викликати руйнування палі за рахунок зміни його температури, тиску та об'єму. Наявність кисню у повітрі може призвести до корозії залізобетонної конструкції і її руйнування.

Спорудження фундаменту здійснюється в такий чином: збирають стовбур 1 палі з окремих елементів 2, які звернені один до одного внутрішніми плоскими поверхнями 4 і розташовані на рівних відстанях по відношенню один до одного по всій довжині стовбура, а пази 5 парних і непарних ярусів розташовують перпендикулярно один до одного. Через наскрізний отвір 6 пропускають тяж 7 і скріплюють, використовуючи сили тертя, елементи 2 палі. Причому, при використанні палі під вертикальне навантаження, елементи 2 по ярусах розташовують більшою основою до голови палі (рис. 8.а – 8.в), а при використанні палі як анкерної – елементи 2 по ярусах палі розташовують меншою основою до голови палі (рис. 8.г – 8.д).

При використанні палі під споруди із знакозмінім навантаженням, елементи 2 по ярусах розташовують суміщенням більших чи менших основ елементів 2 (рис. 8.е – 8.є). В попередньо пробурену свердловину встановлюють стовбур палі 1 у зібраному вигляді і виймають тяж 7. В наскрізний отвір 6 проводять занурення інвентарної палі (не показано), яка має поперечний переріз за формою призматичних пазів 5 з розмірами, що перевищують наскрізний отвір 6. При цьому окремі елементи 2 у парному і непарному ярусах розсовують відносно один одного, заглиблюючи зовнішніми бічними поверхнями 3 у стінки ґрунту свердловини. Інвентарну палю (не показана) витягають й виконують заповнення простору між внутрішніми плоскими поверхнями 4 і призматичними пазами 5 робочою сумішшю.

При використанні палі в якості анкерної, перед заповненням простору робочою сумішшю, встановлюють тяж 7 (рис. 8.ж) [13]. Недоліків у такої конструкції палі є декілька. Ця паля не містить вбудованого теплообмінника.

При монтажі даної палі відбувається зміна геометричних параметрів. При контакті з більш щільним кам'янистим ґрунтом можливо руйнування палі та нерівномірна зміна геометричних параметрів палі, зокрема, кута між ребрами палі.

Фундаментна гвинтова паля з модульною конструкцією містить залізобетонний циліндричний корпус з осьовим отвором і має, принаймні, одну опору, виконану після загвинчування палі в ґрунт. Вона оснащена теплообмінником, який

розташований у пальовому гвинті в скрученому сердечнику з основою для будівлі, яке рухливе в горизонтальній площині.

Метод монтажу гвинтової палі передбачає виготовлення технологічного отвору, а потім власне отвору для загвинчування палі [14].

Така паля має певні недоліки. Скручений в котушку теплообмінник під час експлуатації при потраплянні бруду може забиватися, а гвинтова форма затрудняє його очищення. Під час монтажу такої палі при контакті гвинта з кам'яним ґрунтом можливе зношення поверхні, тріщини, пробої, деформація гвинта і теплообмінника.

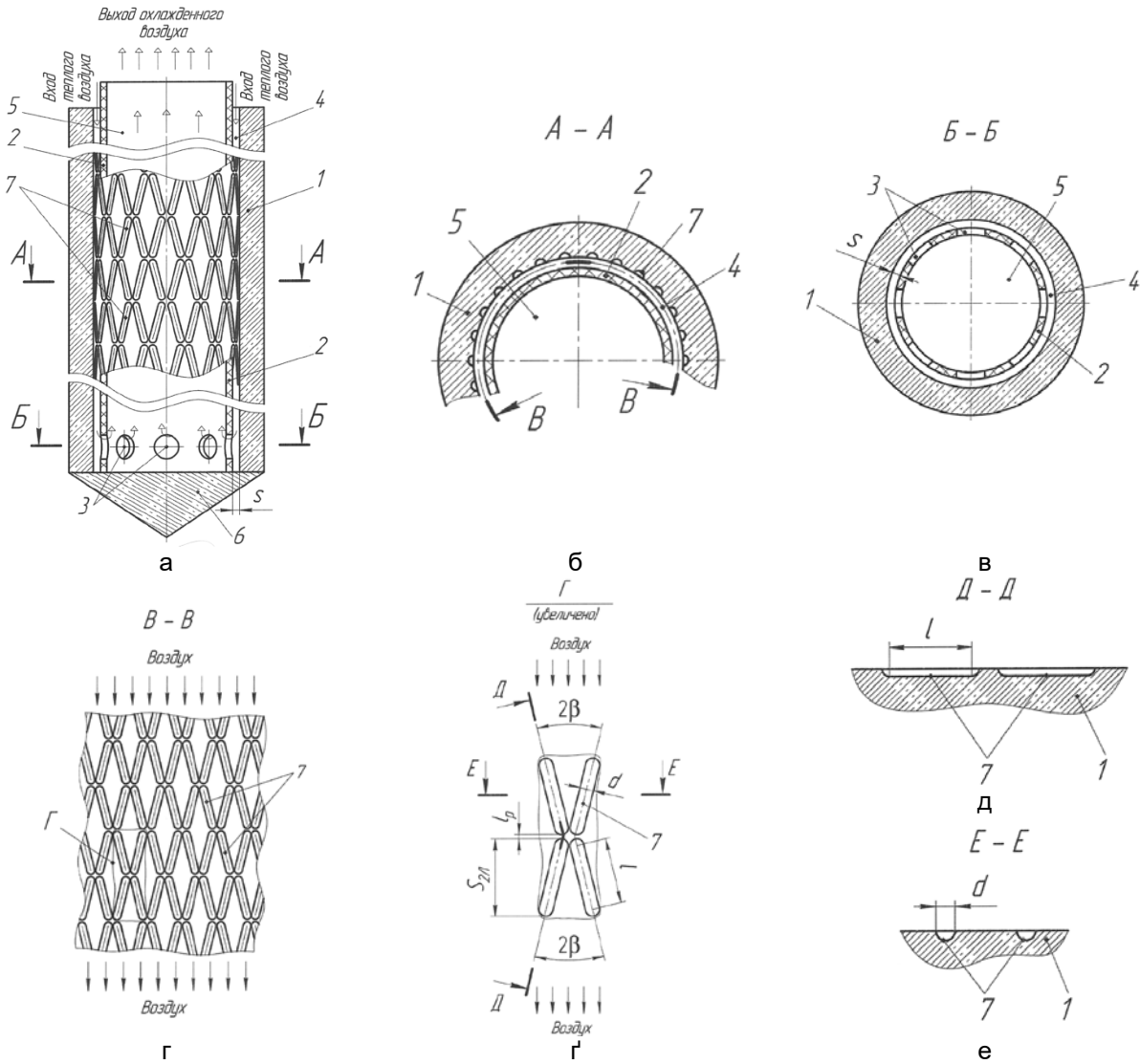


Рис. 7. Енергетична паля: а – подовжній перетин енергетичної палі; б – поперечний перетин А-А основної частини енергетичної палі з траншейними лунками; в – поперечний переріз Б-Б енергетичної палі на рівні розташування бічних отворів теплопровідних труб; г – фрагмент внутрішньої поверхні вертикальної залізобетонної труби у відповідності із видом В-В; г' – фрагмент Г внутрішньої поверхні вертикальної залізобетонної труби; д і е – перерізи Д-Д і Е-Е фрагменту Г

Вчені-конструктори Курчевський В.П., Цуканов В.Н., Лубни-Герцик К.К. та Медведєв В.В. розробили підземний теплоакумулятор, який містить свердловину в ґрунті, яка заповнена бетоном, в якому розміщено по крайній мірі один U-подібний трубчастий теплообмінник 1, який підключено до споживача тепла, при чому бетон

утворює з теплообмінником 1 буронабивну палю 3 для будівель та споруд. У палі 3 мажуть бути розміщені додаткові законсервовані U-подібні трубчасті теплообмінники, які разом з основними служать арматурою палі 3. Бетон понад функції зв'язуючого матеріалу служить теплопровідником до ґрунту, а також теплокумулюючим матері-

алом, що зображено на рис. 9 [15]. Недоліком даного теплоакумулятора є те, що під час експлуатації теплообмінники виконують функцію арма-

тури і під дією навантаження можуть деформуватися та руйнуватися, теплообмінники, які не використовуються повинні бути законсервовані.

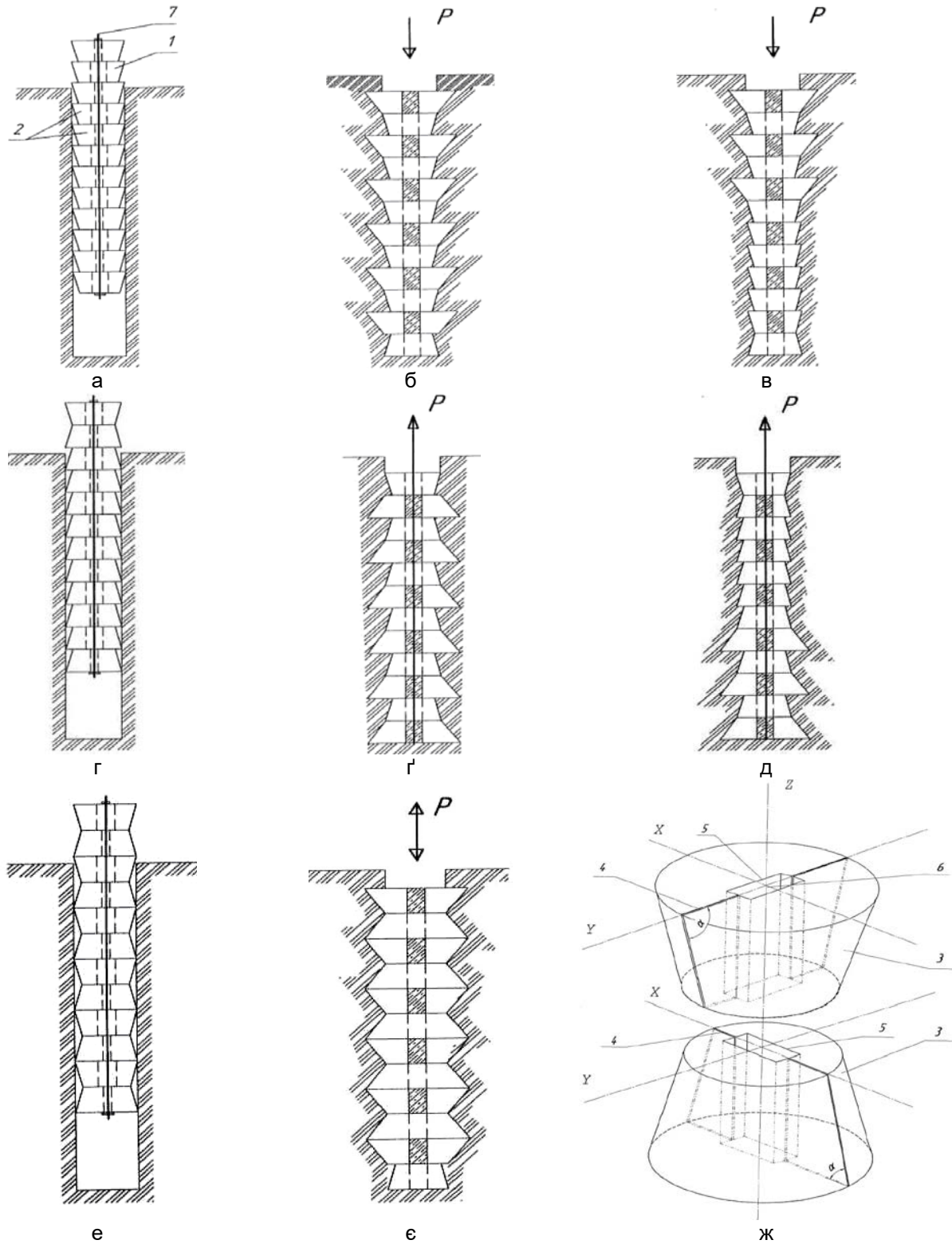


Рис. 8. Палі: а, г, е – конструкція палі в процесі занурення в ґрунт; б, в, ґ, д, є – конструкція палі в проектному положенні; ж – елементи палі

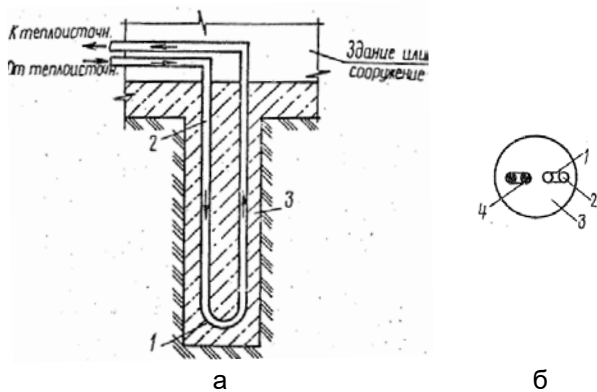


Рис. 9. Підземний теплоаккумулятор: а – вертикальний перетин; б – вид зверху

Відома паля (рис. 10) [16], яка включає оголовок 1, стовбур 2 із локальними розширеннями. Нижнє розширення 3 і вище розміщені розширення 4, 5, 6, розташовані по висоті стовбура 2 на середній відстані один від одного в межах  $(10-60)b$ , де  $b$  – виліт розширення, яке розташоване вище, а середня площа проекції (загальна площа верхніх розширень розділена на кількість розширень) на горизонтальну площину розширень, розташованих вище нижнього розширення на ділянці ствола, що не перевищує  $2/3$  його висоти, не менше, ніж в 1,2 рази перевищує площу проекції на горизонтальну площину нижнього розширення. Розширення можуть бути виконані на нижніх ділянках однієї або двох бічних граней стовбура. Принаймні дві бічні грані 7 стовбура 2 можуть бути виконані похилими до поперечної вісі стовбура. При цьому всі розширення розташовані на похилих гранях ствола.

Недоліком даної палі є те, що вона не має теплообмінника, під час монтажу утворюються повітряні люфти між поверхнею палі та ґрунтом, навантаження припадає на основу палі та грані її розширення, що може викликати їх деформацію та руйнування.

Відома конструкція палі (рис. 11) [17] змунного поперечного перетину. Паля включає оголовок 1, верхню клиновидну діафрагму 2, вертикальні елементи 3, нижню діафрагму 4, проміжну діафрагму 5, похилі, звернені один до одного межі 6 вертикальних елементів 3, вертикальну грань 7 діафрагми 4, розміщену між вертикальними елементами. Для пояснення взаємодії палі з ґрунтом основи на рис. 11 показана ущільнена зона 8. Зона 8 обмежує масив ущільненого ґрунту поблизу палі. Найбільший ефект досягається в разі, коли довжина палі становить 6-8 м з розмірами в рівні верхнього торця  $1,0 \times 1,0$  м, а звернені один до одного межі вертикальних елементів розве-

дені догори під кутом  $0,4-1,2$  градуси. В результаті використання описаної конструкції палі забезпечується зниження енерговитрат при її зануренні в 1,2-1,4 рази і зниження матеріаломісткості фундаментів в 1,2-1,3 рази за рахунок більш високої несучої здатності цієї палі [17].

Недоліком даної палі є те, що вона має нерівномірно розподілене навантаження по всій палі, при цьому в критичній зоні паля може зламатися, що робить її конструкцію небезпечною. Також ця паля не містить теплообмінника.

Відома енергетична паля 10 (рис. 12.а), яка містить теплообмінник в основі якого теплообмінна труба 102, яка розташована всередині корпусу 101 палі. Корпус палі 101 розміщений під землею. Паля 101 являє собою композит, що складається з цементу, золи і щебню. Форма палі 101 встановлюється відповідно до конкретних потреб і може бути прямокутною, циліндричною або іншою. В варіанті, що розглядається, форма тіла палі 101 є циліндричною. На рис. 12.а - 12.г наведено приклади можливих конструкцій теплообмінної труби 102, яка може бути U-подібна одинарна, W-подібна одинарна, подвійна паралельна U-подібного типу, потрійна паралельна U-подібного типу, або подвійна послідовна W-подібної форми. Один із варіантів монтажу труб теплообмінника показано на рис. 12.д.

Розглянемо U-подібний подвійний тип теплообмінника (рис. 12). Теплообмінна труба 102 утворює теплопровідний канал всередині тіла палі 101. Зокрема, теплообмінна труба 102 включає в себе множину корпусних труб 103 і множину з'єднувачів 104. Кожна пара сусідніх труб множини труб 103 основного корпусу з'єднані в U-подібну форму з'єднувальною головкою 104. Таким чином множина труб 103 основного корпусу цілком утворюють один канал теплопровідності. У цьому варіанті з'єднані теплообмінні труби 102 відносять до подвійний типу.

В більшості випадків теплообмінні труби 102 виготовляють із поліетилену високої щільності. Корпус труби 103 має діаметр від 19 до 38 мм. З'єднувач 104 є сполучною трубою. Діаметр з'єднувача 104 відповідає діаметру труби 103 корпусу. Завдяки цьому з'єднувач 104 щільно з'єднаний з трубою 103 корпусу, і труба 103 корпусу утворюють єдиний теплопровідний канал. В даному варіанті реалізації теплообмінні труби 102 виготовлені із поліетилену високої щільності, причому труба 103 основного корпусу і з'єднувальна головка 104 з'єднані шляхом теплового плавлення. Треба мати на увазі, що матеріал теплообмінної труби 102 не обмежується поліетиленом. Можливе використання інших термостійких матеріа-



лів, що використовуються в будівельній галузі. Теплообмінні труби 102 вбудовані в середину тіла 101 нижче рівня поверхні ґрунту. Це забезпечує теплообмін між трубами палі та ґрунтом.

Труби 102 із дном корпусу 101 не контактують. Так виключається пошкодження теплообмінних труб 102 і відповідне зниження ефективності теплообміну.

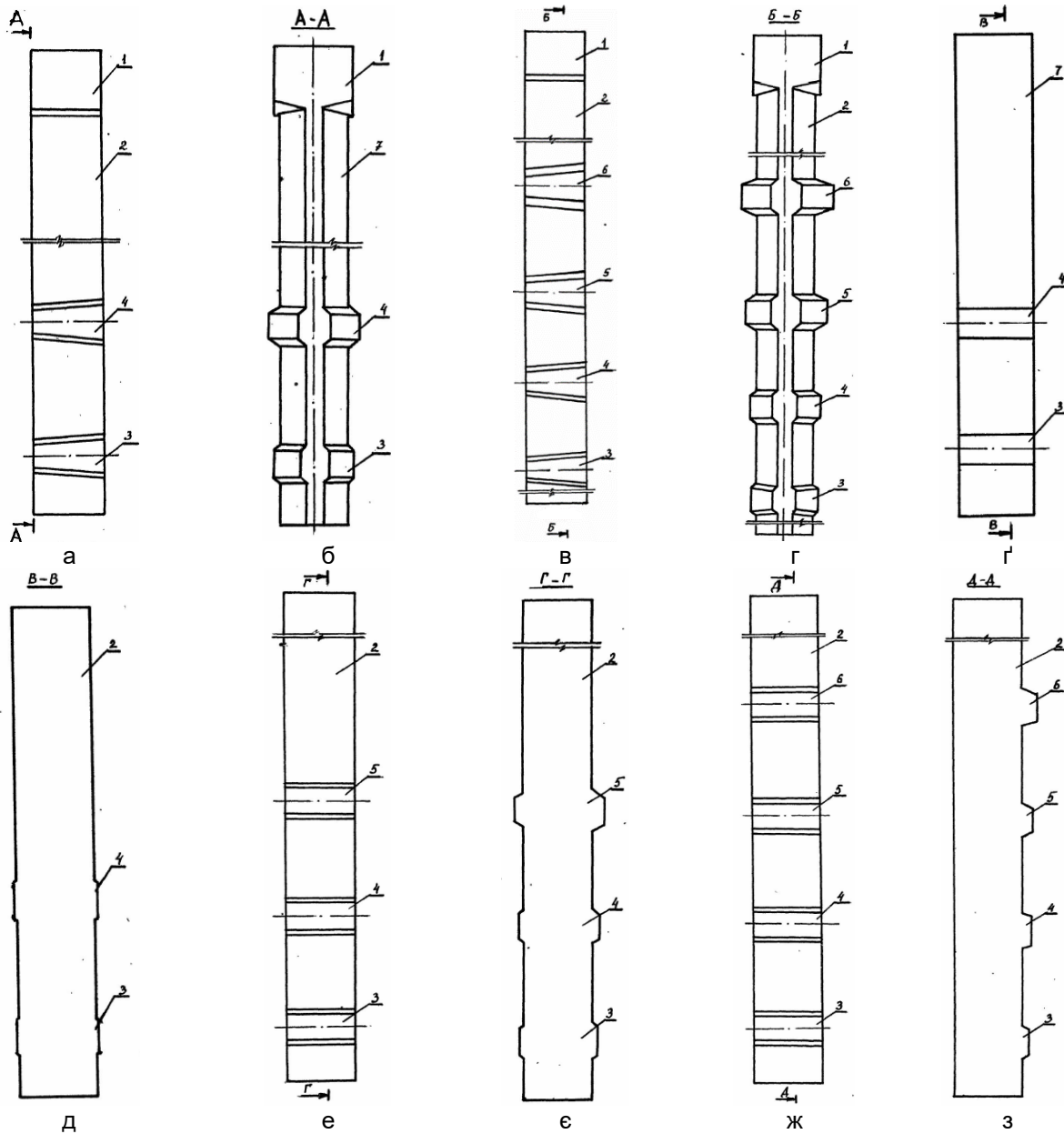


Рис. 10. Забивна паля: а, в, г, е, ж – загальний вигляд (варіанти конструкції); б – вид А-А на рис. 10.а; г – вид Б-Б на рис. 10.в; д – вид В-В на рис. 10.г; е – вид Г-Г на рис. 10.е; з – вид Д-Д на рис. 10.ж

Можливо зрозуміти, що теплообмінна труба 102 може простягатися до зовнішньої сторони палі 101 для досягнення теплообміну з зовні. Енергетична паля 10 може додатково включати в себе кронштейн 105, розташований навколо теплообмінної труби 102 (рис. 12.д). Теплообмінна труба 102 підтримується кронштейном 105 і

розташовується всередині палі 101 разом з кронштейном 105. На рис. 12.д зображено палю, яка містить кронштейн 105, що включає в себе значну кількість металевих смужок 106 і значну кількість стрічок 107, зібраних разом для формування структури сітки. Металеві смуги 106 розташовані паралельно один одному і охоплюють тіло палі.

Стремена 107 щільно пов'язують металеві смуги 106 з утворенням кронштейна 105. У цьому варіанті виконання кронштейну 105 включає в себе велику кількість арматурних стержнів і стремени, а теплообмінні труби 102 і кронштейни 105 можуть бути з'єднані за допомогою ременів. Теплообмінна труба 102 фіксується кронштейном 105 для функціонування для захисту теплообмінної труби 102. Крім того, кронштейн 105 може додатково збільшувати механічну міцність енергетичної палі 10. Крім того, енергетична палля 10 може

включати в себе щонайменше одну захисну пластину 108. Захисна пластина 108 розташована в нижній частині кронштейна 105. Кронштейн 105 занурений аж до найглибшої частини палі 101. Крім цього, захисна пластина 108 розташована під з'єднувачем 104 теплообмінної труби 102. Це дозволяє захистити з'єднувач 104 від можливого пошкодження при монтажі в середині палі 101. Захисна пластина 108 може бути виготовлена із сталевго кутника. Саме так є в представленому варіанті.

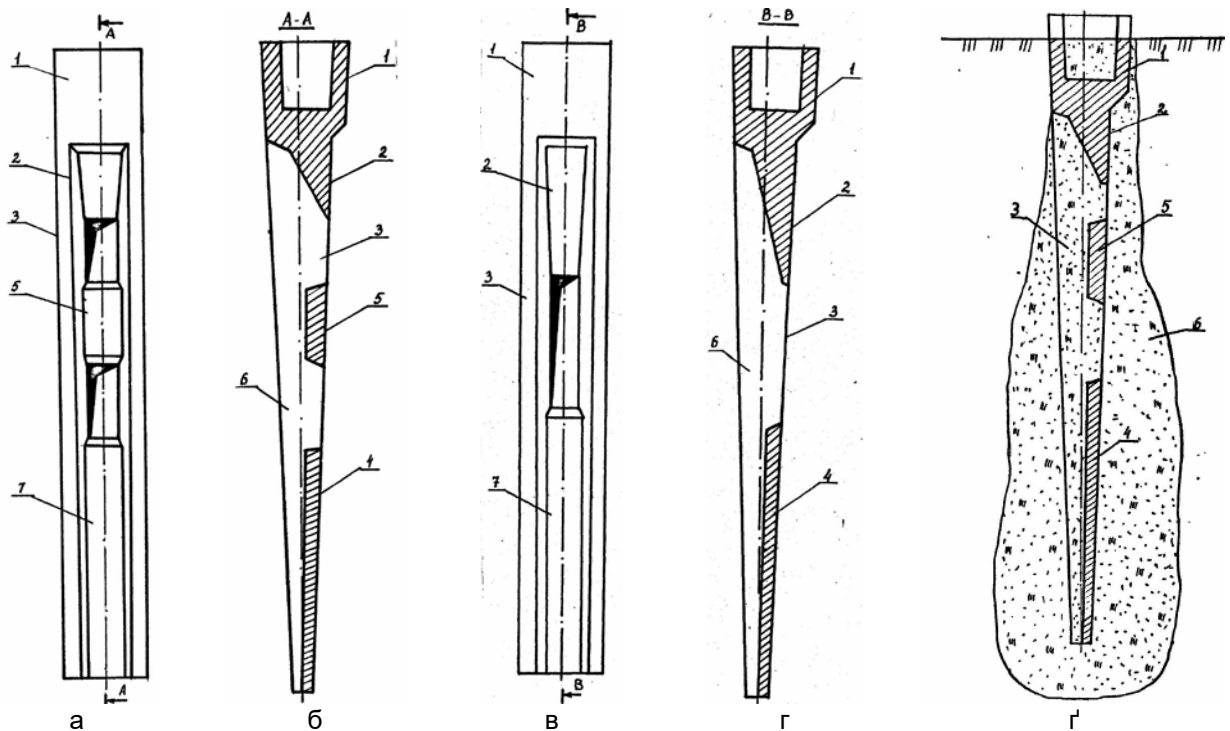


Рис. 11. Палля: а, в – загальний вигляд (варіанти реалізації); б – розріз по А-А на рис. 11.а; г – розріз по Б-Б на рис. 11.в; г' – поздовжній розріз палі, зануреної в ґрунт на проектну глибину

Тепло відбирається в будівлі та циркулюючим потоком теплообмінної рідини в теплообмінних трубах 102 переноситься в приповерхневий шар ґурту. При цьому додаткові технічні витрати невеликі. Зокрема, немає необхідності займати додатковий підземний простір. Можливе використання зовнішніх блоків теплообміну, або градирень. Так, в порівнянні із традиційними системами кондиціонування досягається енергозбереження на рівні 30-50%. У той же час, оскільки енергетична палля 10 тісно поєднує підземний теплообмін труби 102 і композиту, забезпечується стабільність і довговічність енергетичної пальнової системи, а вартість нижче, ніж у підземній системі наземного теплового насоса [18]. Недоліком конструкції даної палі, є те, що кільця, які тримають теплообмінник, під час механічного та

теплого навантаження змінюють лінійні розміри (розширюються, стискаються) і, відповідно, можуть деформувати теплообмінник, що, в свою чергу, призведе до зниження пропускної здатності енергетичної пальнової системи та зменшення її теплової продуктивності.

На рис. 14 зображено спіраль теплообмінника. Під час її зберігання, транспортування до місця, та попередніх етапів будівництва вона перебуває в компактному вигляді (рис. 14а), коли зазор між витками ущільнений аж до нуля. Тобто в компактному вигляді витки торкаються один до одного. Довжина зонда  $L_1$  в такому випадку дорівнює добутку числа витків ( $n$ ) теплообмінника і зовнішнього діаметру трубопроводу. На рис. 14б представлено спіральний теплообмінник в робочому стані.

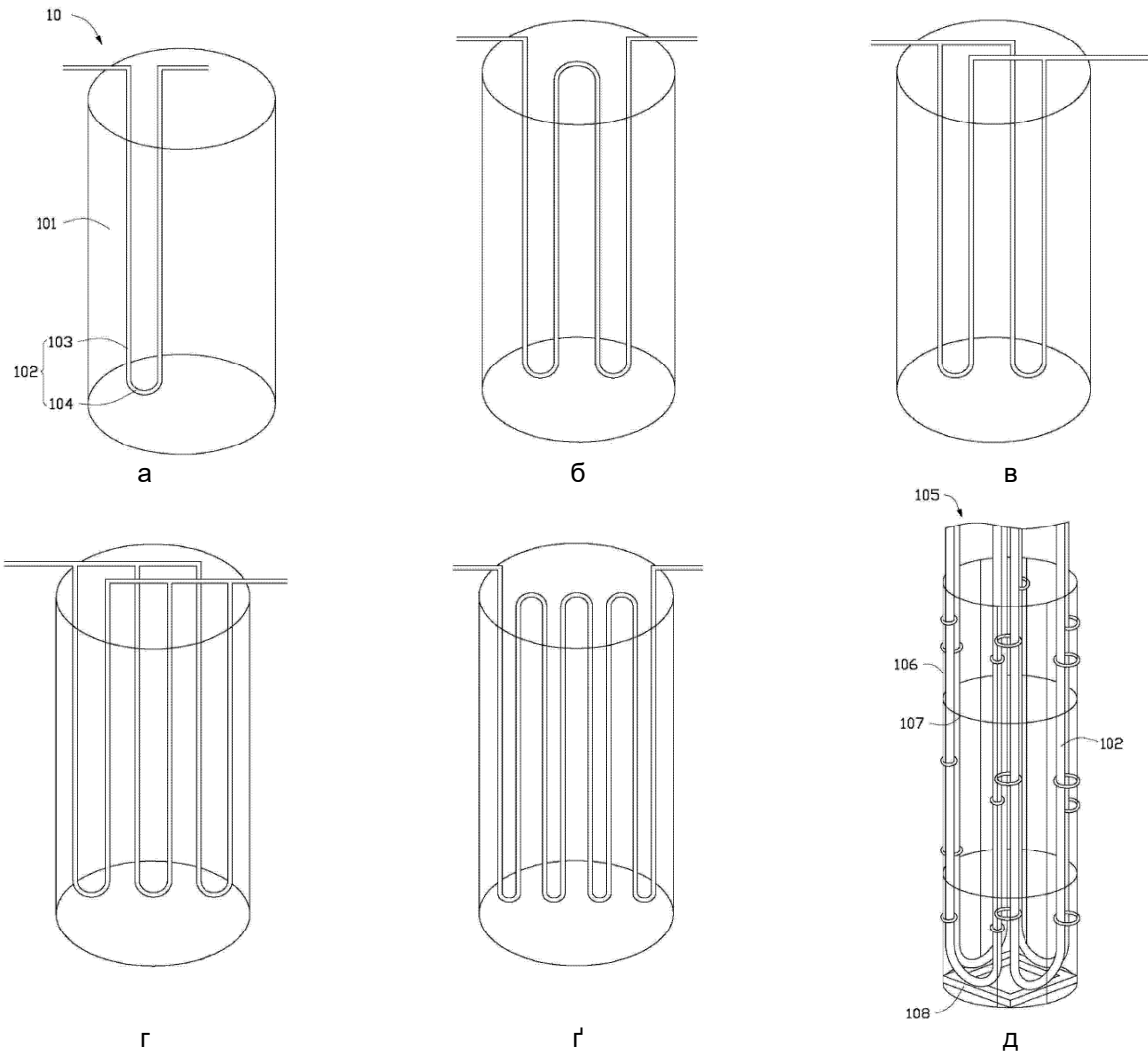


Рис. 12. Енергетичні палі: а – одинарні U-подібні труби; б – W-подібні труби; в – паралельні подвійні U-подібні труби; г – паралельні три U-подібні труби; ґ – подвійні послідовні W-подібні труби; д – варіант монтажу труб теплообмінника

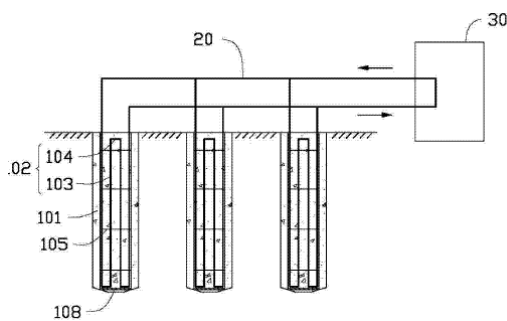


Рис. 13. Енергетична пальова система

Під час монтажу спіраль теплообмінника вивішуючи на стропях орієнтують вертикально і опускають в свердловину в ґрунті. Розтягування спіралі відбувається за рахунок гравітаційного

ефекту, шляхом поступового послаблення строп, що утримують нижню частину спіралі. Максимальна відстань між витками спіралі, тобто її крок, визначається довжиною гнучких з'єднувачів (не показані), які під час установки розтягуються до максимальної довжини і переходять в напружений стан, утримуючи спіраль від подальшого розтягування. Довжина теплообмінника  $L_2$  в цій фазі дорівнює добутку « $n \cdot d$ », де  $d$  – це довжина з'єднувачів між кожною парою сусідніх витків. Після того, як спіраль теплообмінника встановлено в ґрунтовому вертикальному каналі, його заповнюють несучою сумішшю (бетоном) [19].

Така конструкція теплообмінника енергетичної палі має певні недоліки. Під час розтягування або затискування витків котушки виникають напруження, які можуть призвести до появи дефектів на поверхні теплообмінників.

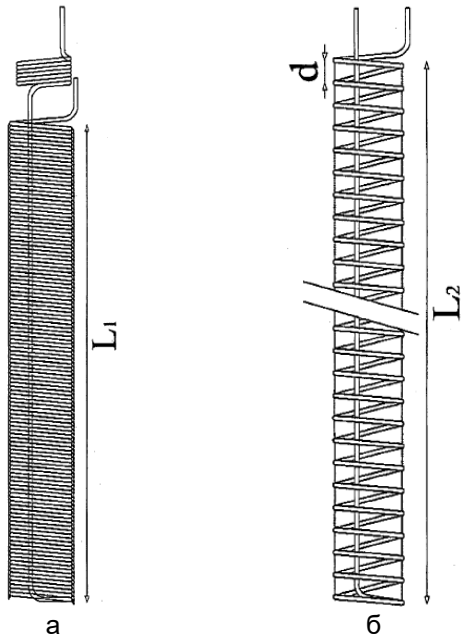


Рис. 14. Спіральний теплообмінник: а – без простору між витками котушки; б – з простором між витками котушки

Відома порожниста паля 1, яка є складовою теплоенергетичної систему будинку (рис. 15) і придатна для заглиблення вертикально в ґрунт гвинтовим способом. Товщина стінки палі, що утворює функціональну порожнину є незмінною. Внутрішня та зовнішня поверхні стінки 1i та 1e.

Паля 1 може бути виконана із декількох сегментів з'єднані один з одним. Вона має, щонайменше, одне гвинтове ребро 2, що має сплюснуту форму і невеликі розміри. Гвинтове ребро 2 забезпечує заглиблення палі на кілька сантиметрів за оборот. Ребро 2 закріплено механічно та знаходиться в тепловому контакті з зовнішньою поверхнею 1e стінки.

Паля 1 має внутрішню концентричну перегородку 3, що ділить порожнину палі на два об'єми 11, 12, які з'єднуються один з одним в придонній частині 13 палі. Зовнішній об'єм 12 має площу поперечного перетину S2, яка значно менша, ніж площа поперечного перетину S1 осьового об'єму 11. Нижню частину 9 палі має конічну форму. У верхній частині палі закріплено фланцеву пластину 8, що має наскрізні отвори для труб 4, які з'єднуються герметично з кожним з двох об'ємів 11 та 12. Кожна з палей має щонайменше один коаксіальний відрізок труби 22 з висотою, більшою ніж діаметр горизонтального ребра 2. За рахунок відрізка труби 22 сформовано порожній простір, коаксіальний з палею. Цей простір, при повороті палі рухається разом з нею. Його заповнено матеріалом 25, який має теплову інерцію і провідність, більшу, ніж у ґрунту.

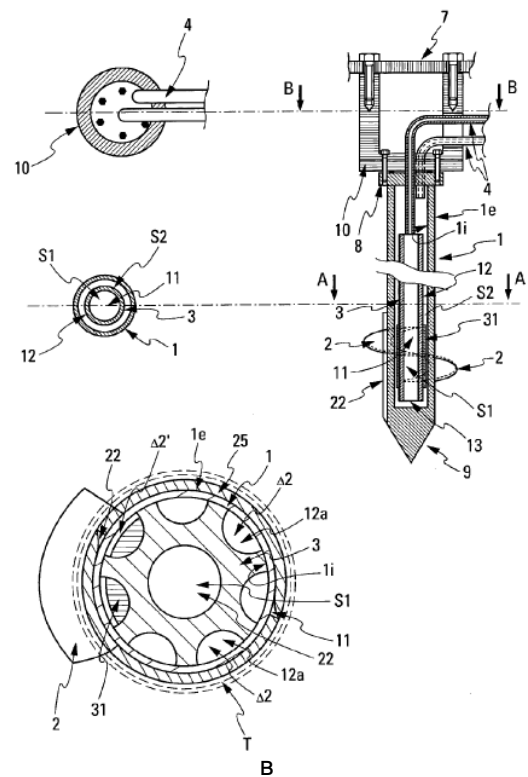
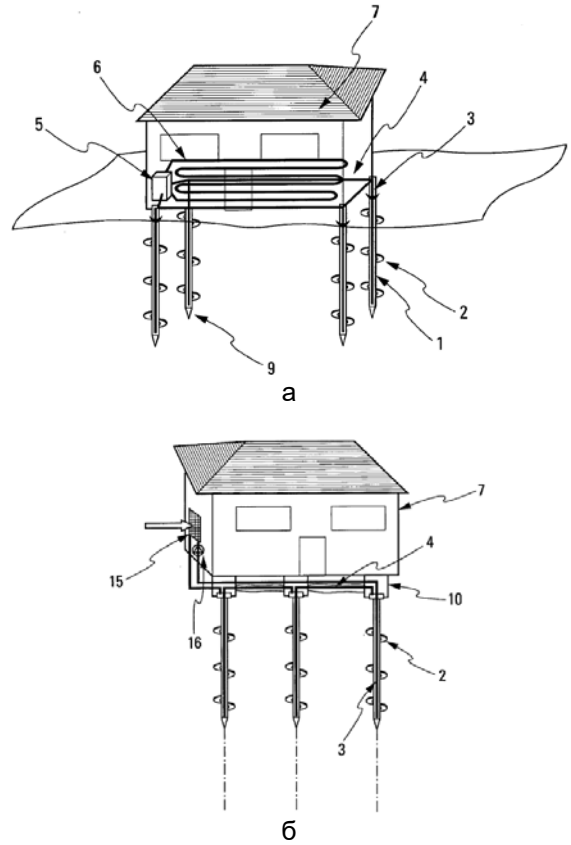


Рис. 15. Теплоенергетична система будинку: а – житло, яке стоїть на чотирьох палях; б – житло, яке стоїть трьох палях; в – конструкція палі з перерізами «А-А» та «В-В»



Матеріал 25 можна вибирати з числа речовин, які мають властивість переходити з твердого стану в рідкий стан при температурі, що перевищує 10°C. Наприклад, з числа парафінів або ізопарафінів.

За цих обставин можна зрозуміти, що рідина (теплоносій), яка холодна взимку або є більш гарячою влітку відносно ґрунту, обмінюється теплом спочатку з зовнішньою стінкою палі 1, потім з матеріалом 25 і з гвинтовими ребрами 2. Матеріал наповнювача 25 обмінюється теплом з ущільненою землею Т, яка знаходиться на його периферії, як показано на рис. 15в. Тепло поширюється на іншу частину ґрунту, який не піддавався дії операцій, пов'язаних з монтажем палі в робоче положення. Нижній сегмент палі має кінець 9 конічної форми, який сприяє проникненню палі в ґрунт. Всі сегменти палі зібрані разом у герметичний спосіб, наприклад, шляхом зварювання. Кожен сегмент палі має один або більше гвинтових ребер 2. Коли палі використовуються як основа для будівлі, кожна з них, у своїй верхній

частині, забезпечена з'єднувальною деталлю 10, що має кріпильні засоби, придатні для закріплення з підлогою 17 або до нижньої конструкції будівлі 7. Кожна верхня фланцева пластина 8 та з'єднувальна деталь 10 мають отвори для проходження труб 4. Рідина (теплоносій), після його проходження через відсіки теплообмінника і труби 4, може використовуватися для подачі тепла до теплового насоса 5 [20]. Дана теплоенергетична система має недоліки такі, як складну конструкцію та низьку продуктивність.

Відома система (рис. 16.), у якій в якості теплообмінників у поєднанні з тепловими насосами використовуються анкери. Зокрема анкери нагнітальних свердловин використовуються для нагрівання ґрунтового простору 2 (накопичення тепла, необов'язково в поєднанні з кондиціонером будівлі) або надра для видобування тепла (опалення тепловим насосом) через анкерну трубу 4. В такому випадку в порожнину труби 4 вводять трубопровід 8, який забезпечує обмін тепла з навколишнім середовищем.

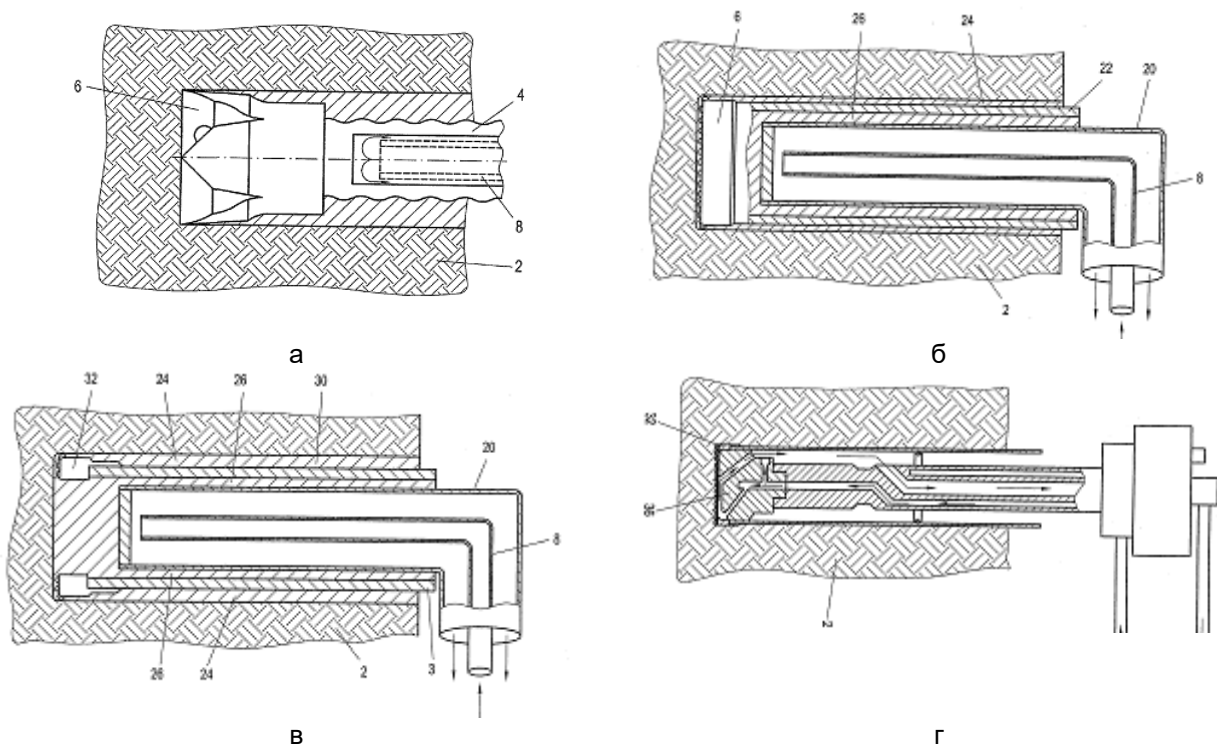


Рис. 16. Теплообмінник: а – передній кінець інженерних засобів з лінією для теплообміну; б, в – варіанти теплообмінного анкера із збільшеною пропускнуою здатністю; г – схема технічних засобів для виготовлення порожнини під теплообмінний анкер

На рис. 16.б, анкер показаний у збільшеному вигляді. Розташований в ньому трубопровід 8 використовується для підведення, а трубопровід 20 для видалення теплоносія. На цьому рисунку показано облаштування теплового контакту між ґрунтом 2 і анкерною трубою 22, шляхом використання теплопровідної маси, наприклад термоце-

ментного або якірного розчину 24. Така конструкція сприяє закріпленню нижнього кінця анкерної труби 22 в свердловині. Шар 26 термоцементного або якірного розчину, між зовнішнім каналом 20 для видалення тепла і якірною трубою 22 гарантує, що між лінією 20 і зовнішньою трубою 22, а також ґрунтом 2, можливий хороший теплообмін.

На рис. 16.в показаний варіант з опорною трубою 30, яка закріплена на передньому кінці кільцевого прутка 32. Всередині опорної труби 30 знаходиться лінія 20 для відведення текучого теплоносія. Всередині лінії 20 розташована лінія 8 для подачі теплоносія.

На рис. 16.г показано схему технічних засобів для виготовлення порожнини в ґрунті під теплообмінний анкер [21]. Дана конструкція має певні недоліки: складність процесу монтажу, великий об'єм теплоносія та низьку теплопередачу.

Відома гвинтова паля (рис. 17), яка включає: полий стовбур 1 у вигляді сталевий безшовної труби висотою  $H = 2...4$  м, діаметром  $d_{нар}$  до 200...400 мм і товщиною 2...4 мм; виступи 2 з полусової сталі товщиною 0,5...1 мм і шириною 100...300 мм, прикріплені по гвинтовій лінії до стовбура 1 по його зовнішній поверхні, причому тангенс кута нахилу виступу 2 до вертикалі дорівнює 0,15...0,7. Причому в поперечному перетині виступи 2 мають еліпсоїдальну форму. Стовбур 1 забезпечено штуцерами 6 для подачі стиснутого повітря. Монтаж гвинтової палі здійснюють шляхом загвинчування в ґрунт на проектну глибину. В процесі загвинчування через штуцери 6 подають стиснуте повітря, що дозволяє зменшити опір обертанню. Після занурення палі на проекту глибину в її порожнину занурюють теплообмінник і заповнюють бетоном [22]. Представлена паля має певні недоліки. Гвинтовий виступ під час монтажу може бути деформований. Використання повітря в якості теплоносія зменшує інтенсивність теплообміну.

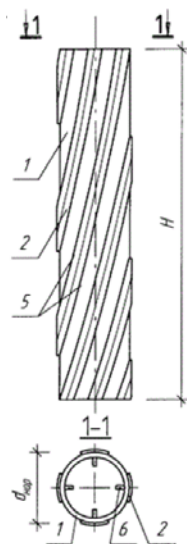


Рис. 17. Гвинтова паля

На рис. 18 представлена фундаментна паля квадратного суцільного перетину, цільна, з поперечним армуванням стовбура.

Вона складається із залізобетонного пальового тіла 1 і пальної арматури 4. Її відмінністю є те, що в залізобетонному стовбуровому тілі встановлений вбудований U-подібний теплообмінник 2 трубчастої форми необхідного профілю і конфігурації. При цьому внутрішній об'єм вбудованого теплообмінника заповнений рідким робочим тілом-теплоносієм.

Перевагою використання зазначеної фундаментної палі з вбудованим в залізобетонне пальне тіло 1 теплообмінником 2, є забезпечення основних параметрів за механічною міцністю та несучою здатністю, а також можливість використання низькопотенційної теплової енергії поверхневих шарів ґрунту в автономних системах тепlopостачання та гарячого водopостачання будівель і споруд [23]. Дана конструкція має певні недоліки: низька продуктивність U-подібного теплообмінника.

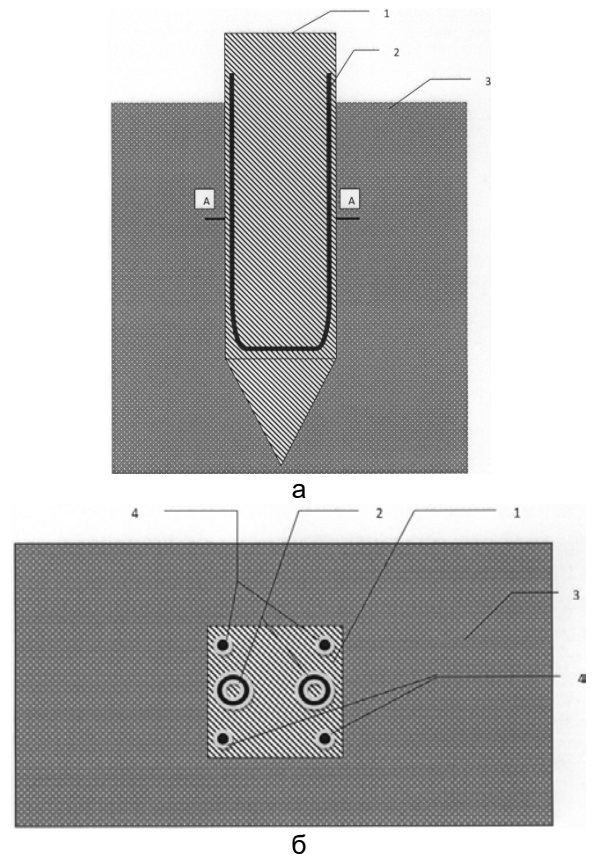


Рис. 18. Фундаментна паля з вбудованим теплообмінником: а – вертикальний вистовий переріз палі; б – горизонтальний переріз палі в площині А-А

#### Висновки.

Під час аналізу конструкцій фундаментних паль із теплообмінником та без нього було встановлено, що найбільш перспективними є забивні

палі з U-подібними теплообмінниками. Їх застосування виключає механічне навантаження на стіни будівлі. Немає додаткових втрат на буріння свердловини. Вони мають збільшену теплову ефективність і низькі гідродинамічні втрати на перекачку теплоносія, особливо при використанні теплообмінників з паралельними подвійними U-подібними трубами. В таких конструкціях проблема порушення герметичності зведена до мінімуму і, відповідно, досягається належний рівень екологічної безпеки.

Водночас, використання рідини як теплоносія, за рахунок зміни температури, тиску та її об'єму може призвести до руйнування, спочатку труб теплообмінників, а потім і конструкції палі. Наявність розчиненого кисню в рідинному теплоносії сприяє появі наскрізної корозії труб теплообмінників і, як наслідок, руйнуванню залізобетонної конструкції палі в цілому. Використання труб теплообмінників у якості арматури також може приводити до їх ушкодження і, відповідно, до приведених вище проблем.

Проведений аналіз відомих конструкцій фундаментних паль дозволяє сформулювати вимоги до перспективних конструкцій енергетичних паль і, відповідно, дасть можливість розробити нову конструкцію забивної палі з U-подібним теплообмінником в якій враховані всі приведені в роботі недоліки. Перш за все потрібно провести оптимізацію конструкції теплообмінника, а саме, геометрію поперечного перетину труб, форму укладки труб в тілі палі, методи фіксації труб теплообмінника в тілі палі та кількість таких фіксаторів.

### Література

1. Ping Cui Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils / Cui Ping, Li Xin, Man Yi, Fang Zhaohong // *Applied Energy*. – V. 88, 2011, P. 4113-4119.
2. Wenbo Liua Research Progress of Pile Heat Exchangers in Ground Source Heat Pump System / Liua Wenbo, Xu Minghai // *10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China*. – V. 205, 2017, P. 3775-3781.
3. SHANG Chao, LI Peng. Review on the Research and Development of Energy Piles in Ground Source Heat Pump. *Building Energy & Environment*. 2014(05). – P. 51-56.
4. Wu Huajian. Study on Performance of Pile Spiral Pipe Heat Exchanger. Chongqing University, 2012.
5. Wang Rui. Numerical Simulation Study on heat transfer of Coil inside Foundation Piles. Beijing University of Civil Engineering and Architecture. 2013.
6. Man Y, Yang H, Diao N, et al. Development of spiral heat source model for novel pile ground heat exchangers. *HVAC R Res*, 2011, 17(6). – P. 1075-88.
7. Пат. № 66750 U1, Россия, МПК E02D 7/20 Буропускная термосвая с повышенной несущей способностью / Светлов Л. П., Озорнин А. А., Сухой Л. Г., Недоварков С. А., Андрушко С. Б., Квитко А. В.; патентообладатель Военная академия тыла и транспорта. – № 2005137584/22; заявл. 02.12.2005; опубл. 27.09.2007, бюл. № 27.
8. Басок Б.І. Створення ґрунтово-водо-водяних теплообмінників для теплонасосних технологій теплопостачання приміщень / Б.І. Басок, А.Р. Коба, О.М. Недбайло, М.В. Ткаченко, М.А. Хибина, Т.Г. Беляєва, А.І. Тесля, А.О. Луїна // *Наука та інновації*. Київ, 2012. Т. 8. № 1. С. 67—76. – URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/116071>. (дата звернення: 09.02.2019).
9. Nagano K. Thermal characteristics of steel foundation piles as ground heat exchangers / K. Nagano, T. Katsura, S. Takeda, E. Saeki, Y. Nakamura, A. Okamoto, S. Narita // *The Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES)*, 2007. URL: <http://www.cres.gr/kape/pdf/geotherm/19.pdf> (date of the application: 09.02.2019).
10. Пат. № 9186, Республика Беларусь, МПК E04D 5/22, F24D 11/00 Энергетическая свая / Филатов С. О., Кунтыш В. Б.; Володин В. И.; патентообладатель Учреждение образования "Белорусский государственный технологический университет". – № u 20120992; заявл. 15.11.2012; опубл. 30.04.2013.
11. СТБ 1075-97. Сваи железобетонные. Общие технические условия. [Действует от 2012-04-01]. URL: [http://gost-snip.su/download/stb\\_1075\\_97\\_svai\\_jelezobetonnie\\_obschie\\_tehnicheskie\\_usloviya](http://gost-snip.su/download/stb_1075_97_svai_jelezobetonnie_obschie_tehnicheskie_usloviya) (дата обращения: 09.02.2019).
12. Пат. № 9186, Республика Беларусь, МПК F24D 11/00, F24D 21/00 Энергетическая свая / Филатов С. О., Кунтыш В. Б.; Володин В. И.; патентообладатель Учреждение образования "Белорусский государственный технологический университет". – № u 20140289; заявл. 06.08.2014; опубл. 28.02.2015.
13. Пат. 91941 Україна, МПК (2006.01) E02D 5/34 Паля / Попович М.М.; власник патенту Вінницький національний технічний університет – № а 200904766; заявл. 15.05.2009; опубл. 10.09.2010, бюл. №17.
14. Pat. PL421905 (A1) European, IMC E02D5/22, E02D5/52, E02D5/54, E02D5/56, E02D7/22, E21B7/00, F24T10/00, F25B30/00 Foundation screw pile with modular construction and method for founding it / Treywasz E.; applicant Treywasz E. – № PL20170421905 20170613; priority date: 13.06.2017; publication info: 17.12.2018.



15. А.с. № 1812397 А1 СССР, МПК F24H 7/00, F24J 3/08 Подземный теплоаккумулятор / Корчевский В.П., Цуканов В.Н., Лубны-Герцик К.К., Медведев В.В. № 4782659/06; заявл. 27.12.1989; опубл. 30.04.1993, бюл. №16.

16. Пат. Украины № 302, МПК E02D 5/22. Забивная свая / Кашка Б.З.; заявитель и патентообладатель Кашка Б.З. – №4893897/SU заявл. 26.12.90; опубл. 30.04.93 г; Бюл. №1.

17. Пат. № 2004686 С1, Россия, МПК E02D 5/48 Свая / Кашка Б.З.; патентообладатель Кашка Б.З. – № 4896447/33; заявл. 29.12.1990; опубл. 15.12.1993, бюл. № 45-46.

18. 专利 № CN104514218A, 中国, IPC (2006.01) E02D 5/22 CHINA 能源桩及其系统 / 人程晓辉由爽姚智全; 专利持有人清华大学 – № 201310459205.1; 申请日 30.09.2013; 申请公布日 15.04.2015.

19. Pat. EP 1 992 886 A2 United states of America, IMC (2006.01) F24J 3/08, E02D 27/12, E02D 27/46 Compact geothermal heat exchanger, spiral shaped / Mainardi E., Cappanera E., Lucchetti L.; applicant Energy Resources srl – № 08008695.2; date of filing: 06.05.2008; date of publication: 19.11.2008, Bulletin 2008/47.

20. Pat. US 2010/0200192 A1 European, IMC F24J 3/08 Compact geothermal heat exchanger, spiral shaped / Mainardi E., Cappanera E., Lucchetti L.; applicant Energy Resources srl – № 08008695.2; date of filing: 06.05.2008; date of publication: 19.11.2008, Bulletin 2008/47.

21. Pat. WO 2007/070905 A2 Internationales Deutsch, IMC (2006/01) F28D 20/00, F24J 3/08, E21D 21/00, E02D 5/80 Wärmetauscher / Bernthaler M., Hosp M., Kopf F., Oberhauser A., Adam D., Markiewicz R., Ostermann N.; patentinhaber Atlas copco mai GMBH, Bernthaler M., Hosp M., Kopf F., Oberhauser A., Adam D., Markiewicz R., Ostermann N. – № A2032/2005; angegeben: 19.12.2005; date of publication: 19.12.2006, Bulletin 2008/47.

22. Пат. № 2278211 С2, Россия, МПК E02D 5/30, E02D 5/56 Винтообразная свая и способ ее сооружения / Землянский А. А., Ращепкина С. А., Денисова А. П., Вертынский О. С.; патентообладатель Саратовский государственный технический университет – № 2003129105/03; заявл. 29.09.2003; опубл. 20.06.2006, бюл. № 17.

23. Пат. № 123 021 U1, Россия, МПК E02D 5/30 Фундаментная свая со встроенным теплообменником / Петровский В.П.; патентообладатель Петровский В.П. – № 2012127509/03; заявл. 02.07.2012; опубл. 20.12.2012, бюл. № 35.

## References

1. Ping Cui Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils / Cui Ping, Li Xin, Man Yi, Fang Zhaohong // Applied Energy. – V. 88, 2011, P. 4113-4119.

2. Wenbo Liua Research Progress of Pile Heat Exchangers in Ground Source Heat Pump System / Liua Wenbo, Xu Minghai // 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China. – V. 205, 2017, P. 3775-3781.

3. SHANG Chao, LI Peng. Review on the Research and Development of Energy Piles in Ground Source Heat Pump. Building Energy & Environment. 2014(05). – P. 51-56.

4. Wu Huajian. Study on Performance of Pile Spiral Pipe Heat Exchanger. Chongqing University, 2012.

5. Wang Rui. Numerical Simulation Study on heat transfer of Coil inside Foundation Piles. Beijing University of Civil Engineering and Architecture. 2013.

6. Man Y, Yang H, Diao N, et al. Development of spiral heat source model for novel pile ground heat exchangers. HVAC R Res, 2011, 17(6). – P. 1075-88.

7. Pat. № 66750 U1, Rossija, MPK E02D 7/20 Buroopusknaja termosvaja s povyshennoj nesushhej sposobnost'ju / Svetlov L. P., Ozornin A. A., Suhoj L. G., Nedovarkov S. A., Andrushko S. B., Kvitko A. V.; patentoobladatel' Voennaja akademija tyla i transporta. – № 2005137584/22; zajavl. 02.12.2005; opubl. 27.09.2007, bjul. № 27.

8. Basok B.I. Stvorennia gruntovo-vodovodnykh teploobminnykh dla teplonasosnykh tekhnolohii teplopostachannia prymishchen / B.I. Basok, A.R. Koba, O.M. Nedbailo, M.V. Tkachenko, M.A. Khybnya, T.H. Bieliaieva, A.I. Teslia, A.O. Lunina // Nauka ta innovatsii. Kyiv, 2012. T. 8. № 1. S. 67-76. – URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/116071>. (data zvernennia: 09.02.2019).

9. Nagano K. Thermal characteristics of steel foundation piles as ground heat exchangers / K. Nagano, T. Katsura, S. Takeda, E. Saeki, Y. Nakamura, A. Okamoto, S. Narita // The Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES), 2007. URL: <http://www.cres.gr/kape/pdf/geotherm/19.pdf> (date of the application: 09.02.2019).

10. Pat. № 9186, Respublika Belarus', MPK E04D 5/22, F24D 11/00 Jenergeticheskaja svaja / Filatov S. O., Kuntyshev V. B.; Volodin V. I.; patentoobladatel' Uchrezhdenie obrazovaniya "Belorusskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet". – № u 20120992; zajavl. 15.11.2012; opubl. 30.04.2013.



11. STB 1075-97. Svai zhelezobetonnye. Obshhie tehnicheckie uslovija. [Dejstvuuet ot 2012-04-01]. URL: [http://gost-snip.su/download/stb\\_1075\\_97\\_svai\\_jelezobetonnye\\_obschie\\_tehnicheckie\\_usloviya](http://gost-snip.su/download/stb_1075_97_svai_jelezobetonnye_obschie_tehnicheckie_usloviya) (data obrashhenija: 09.02.2019).

12. Pat. № 9186, Respublika Belarus', MPK F24D 11/00, F24D 21/00 Jenergeticheskaja svaja / Filatov S. O., Kuntyshev V. B.; Volodin V. I.; patentoobladatel' Uchrezhdenie obrazovanija "Belorusskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet". – № u 20140289; zajavl. 06.08.2014; opubl. 28.02.2015.

13. Pat. 91941 Ukraina, MPK (2006.01) E02D 5/34 Palia / Popovych M.M.; vlasnyk patentu Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichniy universytet – № a 200904766; zaiavl. 15.05.2009; opubl. 10.09.2010, biul. №17.

14. Pat. PL421905 (A1) European, IMC E02D5/22, E02D5/52, E02D5/54, E02D5/56, E02D7/22, E21B7/00, F24T10/00, F25B30/00 Foundation screw pile with modular construction and method for founding it / Treywasz E.; applicant Treywasz E. – № PL20170421905 20170613; priority date: 13.06.2017; publication info: 17.12.2018.

15. A.s. № 1812397 A1 SSSR, MPK F24H 7/00, F24J 3/08 Podzemnyj teploakkumuljator / Korchevskij V.P., Cukanov V.N., Lubny-Gercik K.K., Medvedev V.V. № 4782659/06; zajavl. 27.12.1989; opubl. 30.04.1993, bjul. №16.

16. Pat. Ukrainy № 302, MPK E02D 5/22. Zabivnaja svaja / Kashka B.Z.; zajavitel' i patentoobladatel' Kashka B.Z. – №4893897/SU zajavl. 26.12.90; opubl. 30.04.93 g; Bjul. №1.

17. Pat. № 2004686 S1, Rossija, MPK E02D 5/48 Svaja / Kashka B.Z.; patentoobladatel' Kashka B.Z. – № 4896447/33; zajavl. 29.12.1990; opubl. 15.12.1993, bjul. № 45-46.

18. The patent № CN104514218A, China, IPC (2006.01) E02D 5/22 CHINA energy systems and

makeup / person CHENG Xiao-hui YAO Zhi full of cool; patent holder Tsinghua University - № 201310459205.1; filing date of 30.09.2013; Application Publication date 15.04. 2015.

19. Pat. EP 1 992 886 A2 United states of America, IMC (2006.01) F24J 3/08, E02D 27/12, E02D 27/46 Compact geothermal heat exchanger, spiral shaped / Mainardi E., Cappanera E., Lucchetti L.; applicant Energy Resources srl – № 08008695.2; date of filing: 06.05.2008; date of publication: 19.11.2008, Bulletin 2008/47.

20. Pat. US 2010/0200192 A1 European, IMC F24J 3/08 Compact geothermal heat exchanger, spiral shaped / Mainardi E., Cappanera E., Lucchetti L.; applicant Energy Resources srl – № 08008695.2; date of filing: 06.05.2008; date of publication: 19.11.2008, Bulletin 2008/47.

21. Pat. WO 2007/070905 A2 Internationales Deutsch, IMC (2006/01) F28D 20/00, F24J 3/08, E21D 21/00, E02D 5/80 Wärmetauscher / Bernthaler M., Hosp M., Kopf F., Oberhauser A., Adam D., Markiewicz R., Ostermann N.; patentinhaber Atlas copco mai GMBH, Bernthaler M., Hosp M., Kopf F., Oberhauser A., Adam D., Markiewicz R., Ostermann N. – № A2032/2005; angeben: 19.12.2005; date of publication: 19.12.2006, Bulletin 2008/47.

22. Pat. № 2278211 C2, Rossija, MPK E02D 5/30, E02D 5/56 Vintoobraznaja svaja i sposob ee sooruzhenija / Zemljanskij A. A., Rashhepkina S. A., Denisova A. P., Vertynskij O. S.; patentoobladatel' Saratovskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet – № 2003129105/03; zajavl. 29.09.2003; opubl. 20.06.2006, bjul. № 17.

23. Pat. № 123 021 U1, Rossija, MPK E02D 5/30 Fundamentnaja svaja so vstroennym teploobmennikom / Petrovskij V.P.; patentoobladatel' Petrovskij V.P. – № 2012127509/03; zajavl. 02.07.2012; opubl. 20.12.2012, bjul. № 35.

## Аннотация

### Анализ конструкций фундаментных свай

В.И. Мельник, Б.М. Цимбал

В работе представлено анализ фундаментных свай с теплообменниками и без них, их конструктивные особенности, недостатки и преимущества. Было установлено, что большинство свай имеет сложную форму теплообменника или самой сваи. Теплообменники могут быть одинарными, двойными и тройными U-образными, W-образными и спиральной формы.

Наиболее перспективными являются сваи с U-образными теплообменниками. Их применение исключает механическую нагрузку на стены здания. Нет дополнительных расходов на бурение скважин. Они имеют увеличенную тепловую эффективность и низкие гидродинамические потери на перекачку теплоносителя, особенно при использовании теплообменников с параллельными двойными U-образными трубами. В таких конструкциях проблема нарушения герметичности сведена к минимуму и соответственно достигается высокий уровень экологической безопасности.

При этом, использование жидкости как теплоносителя, за счёт изменения температуры, давления и её объёма может привести к разрушениям, сначала труб теплообменников, а потом и конструкции сваи. Наличие растворённого кислорода в жидком теплоносителе способствует появлению сквозной

коррозии труб теплообменников, и как следствие разрушение железобетонной конструкции сваи в целом. Использование труб теплообменников в качестве арматуры также может приводить к их повреждению и, соответственно, к приведенным выше проблемам.

Проведенный анализ известных конструкций фундаментных свай позволяет сформировать требования к перспективным конструкциям энергетических свай и, соответственно, даст возможность разработать новую конструкцию забивной сваи с U-образным теплообменником в которой учтены все приведенные в работе недостатки. Прежде всего нужно провести оптимизацию конструкции теплообменника, а именно, геометрию поперечного сечения труб, форму укладки труб в теле сваи, методы фиксации труб теплообменника в теле сваи и количество таких фиксаторов.

**Ключевые слова:** теплообменник, конструкция свай, экологическая безопасность, тепловая эффективность, гидравлические потери, коэффициент теплопередачи, U-образный и спиральный теплообменник.

## Abstract

### Analysis of the construction of foundation piles

V.I. Melnyk, B.M. Tsymbal

The paper presents the analysis of structures of foundation piles with or without heat exchangers, their design features, as well as their advantages and disadvantages. We have revealed that most piles have a complicated form of heat exchangers or piles themselves. Heat exchangers can be single, double and triple U-shaped, W-shaped and spiral.

Piles with U-shaped heat exchangers are the most promising. Their application excludes the mechanical load on the walls of the building. There are no additional losses for drilling wells. They have increased thermal efficiency and low hydrodynamic heat carrier transfer losses, especially when using heat exchangers with parallel double U-shaped pipes. Such structures reduce impermeability break risk and, accordingly, promote achieving an appropriate level of environmental safety.

At the same time, using liquid as a coolant can lead to the destruction of, initially, pipes of heat exchangers, and then piles, due to changes in temperature, pressure and volume. Dissolved oxygen in the liquid coolant promotes deep corrosion of heat exchanger tubes and, as a consequence, the destruction of the reinforced concrete frame piles in general. Using heat exchanger pipes as reinforcement can also lead to their damage and, accordingly, to the above problems.

The analysis of available structures of foundation piles can lay down the requirements for perspective design of energy piles and, accordingly, will give an opportunity to develop a new design of a pile with a U-shaped heat exchanger, which takes into account all the disadvantages provided in our paper. First of all, it is necessary to improve the heat exchanger design, namely, the geometry of the cross-section of pipes, the form of the pipe laying in the pile shaft, the methods of fixing the heat exchanger pipes in the pile shaft, as well as the number of such holders.

**Keywords:** Heat exchanger, pile construction, ecological safety, thermal efficiency, hydraulic losses, heat transfer coefficient, U-shaped and spiral heat exchanger.

#### Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Melnyk, V. and Tsymbal, B. (2019). Analysis of the construction of foundation piles. *Engineering of nature management*, 3(13), pp. 6 - 23.

Подано до редакції / Received: 27.05.2019