

УДК 539.3

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ЗІ СТІЛЬНИКОВОЮ СТІНКОЮ (Огляд)

М. Г. СТАЦУК, М. І. ДОРОШ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Виконано огляд праць, які є попередніми і необхідними для дослідження напружено-деформованого та граничного станів стільникових трубних конструкцій. Проаналізовано праці, присвячені суцільним полімерним (гнучким) трубам, що експлуатуються в умовах дії ґрунтів. Виокремлено найважливіші чинники та критерії для застосування в інженерних розрахунках і проектуванні стільникових труб.

Ключові слова: поліетиленові стільникові труби, мінімальна довготривала міцність, кільцева жорсткість, напружено-деформований стан.

Загальні відомості про стільникові трубні конструкції. В сучасній техніці і виробництві широко використовують полімерні матеріали та вироби з них. Порівняно з традиційними матеріалами для трубопровідних систем такими, як сталь, чавун та бетон, полімери [1] можна вважати відносно новими. В основному – це полівінілхлорид, поліпропілен та поліетилен високої густини (HDPE) марки ПЕ-80 і ПЕ-100 [2–4]. Застосування поліетиленових труб розпочалось у 60-х роках ХХ століття у мережах водовідведення. З того часу їх використовують дедалі частіше. Таке зростання ринку полімерних труб обумовлене їх перевагами над сталевими і залізобетонними та реальними вимогами до сучасних каналізаційних мереж. Вони, порівняно зі сталевими, довговічніші та мають високу корозійну і хімічну тривкість, а також характеризуються низкою інших переваг.

На сьогодні полімерні труби широко застосовують для підземних водопровідних та каналізаційних мереж; підземних самостічних трубопроводів; захисних футлярів; газопровідних труб; різноманітних колекторів зберігання та очищення рідини.

За конструкційними та структурними особливостями стінки полімерні труби поділяють на такі: гладкі одношарові труби; композитні труби; труби зі складною пустотілою стінкою. Водночас полімерні трубні конструкції великого діаметра зі суцільним профілем стінки не забезпечують повною мірою оптимальної масоємкості. Тому актуально використовувати легші конструкції із пустотілими стінками (рис. 1).

Одним із варіантів таких конструкцій є полімерні тонкостінні вироби з трубчастим профілем стінки (рис. 1, тип VI). Їх називають стільниковими [5, 6]. Виробляють такі конструкції компанії “Енергоресурс-інвест” (Львів), “Свротрубпласт” (Росія), “KWH Pipe” (Фінляндія) та інші підприємства. Технологія виробництва стільникових трубних елементів [5, 6] – це неперервне намотування на спеціальних пристроях-барабанах водопровідних поліетиленових (HDPE марки ПЕ-80 та ПЕ-100 [2, 3]) трубок з їх одночасним екструзійним зварюванням між витками. Труби стільникового типу зображені на рис. 2а.

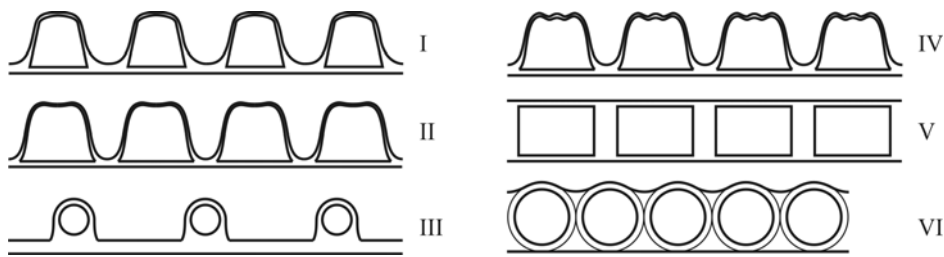


Рис. 1. Різні типи (I–VI) профілю структурованої стінки трубної конструкції.

Fig. 1. Different types (I–VI) of the profile of structured wall of the pipe construction.

Внутрішній тиск, зовнішні (переважно ґрунтові) навантаження, які має витримувати виріб впродовж запланованого терміну експлуатації, визначають кількість шарів стінки конструкції (один, два або три). Технологія виробництва дозволяє виготовляти стільникові конструкції циліндричної, сферичної, плоскої і конічної форм. Однією з областей використання стільникових трубних конструкцій є виготовлення колодязів і ємкостей для зберігання та очищення рідини. До того ж резервуари можна монтувати як у вертикальному, так і в горизонтальному положеннях залежно від конструкційних особливостей. Такі конструкції (рис. 2b) корпорація “Енергоресурс-інвест” виготовляє зі стільникових труб, причому їхній діаметр може сягати до 6000 mm.

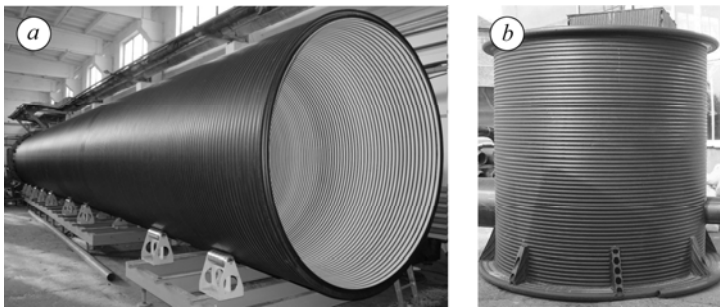


Рис. 2. Одношарові стільникові труби (a) та резервуари (b).

Fig. 2. One-layer cellular pipes (a) and reservoirs (b).

Класифікують безнапірні труби, в тому числі і стільникові, призначені для будівництва підземних мереж каналізації та водовідведення, за кільцевою жорсткістю S_n [7], яка характеризує здатність трубопроводу протистояти тиску ґрунту та іншим зовнішнім механічним чинникам. Цей параметр – базовий класифікатор підземних каналізаційних труб, затверджений стандартами [7–9]. Кільцева жорсткість для труб залежить від геометричних розмірів конструкції та модуля пружності матеріалу і може бути визначена шляхом обробки результатів випробувань, згідно зі стандартами [7–9], або теоретично розрахована за формулою

$$S_n = EI/D^3, \quad (1)$$

де E – модуль пружності матеріалу труби; D – середній діаметр труби; I – момент інерції профілю стінки труби на одиницю її довжини. Для практики нормовані кільцеві жорсткості S_n приймають значення 2; 4; 8; 16 kPa. Однією з головних вимог до трубопроводів великого діаметра [10, 11], що працюють під впливом зовнішніх навантажень, є забезпечення достатньої кільцевої жорсткості конструкції. Використання стільникових (пустотілих) труб спричинено тим, що для достатньої кільцевої жорсткості потрібно використати в 2–2,5 рази менше матеріалу

порівняно з трубою зі суцільною стінкою (у вартості полімерної труби левову частку займає сировинна складова).

Отже, основною перевагою стільникових полімерних трубних конструкцій є їхня висока кільцева жорсткість. Технологія виробництва дозволяє виготовляти різноманітні конструкції з різними геометричними параметрами, в тому числі труби діаметра до 6000 mm.

Особливості розрахунку міцності стільникових трубних конструкцій.

Стільникові трубні конструкції переважно укладають у ґрунт. Він створює постійне навантаження, яке діє безпосередньо на трубопровід у вертикальному напрямку [12]. Досвід і технічна література підтверджують [7, 10], що якісне і належне ущільнення ґрунту є першочерговим завданням для успішної роботи трубопровідної конструкції. Водночас надійність трубопровідної системи оцінюють з поведінки труби, а не ґрунту [13], і отже, граничний стан стільника повинен оцінюватись традиційно, як і граничний стан будь-якого елемента конструкції. Однак, щоб забезпечити надійну експлуатацію підземних полімерних трубних конструкцій, в тому числі стільникових, необхідно також дослідити систему “трубна конструкція–ґрунт” [4, 11–14].

В літературі практично відсутні дослідження стільникових трубних елементів конструкцій. З виявлених праць у цьому напрямку можна виділити роботи вітчизняних авторів [15–24] та зарубіжжя [25, 26]. Зокрема, досліджено [15, 17–20] напружено-деформований стан (НДС) стільникових трубних конструкцій, що розміщені у ґрунті. Розглянуто [15, 16, 21] дві схеми навантаження стільникової труби у ґрунті: з жорсткою основою та з просіданням у ґрунт. Встановлено критичні прогини стільникової труби. Дослідження [22–24] в основному стосуються формулювання й розв’язку задач стійкості циліндричної полімерної труби зі стільниковою структурою стінки за сталого навантаження. Встановлювали [25] зміну міцнісних характеристик поліетилену у стінці трубної конструкції, спричинену екструзійним зварюванням під час її виготовлення. Найґрунтовніше досліджено [26] систему “труба зі структурованою стінкою–ґрунт”. При цьому використовували метод скінченних елементів для оцінки НДС стільникових труб в умовах їх навантаження внутрішнім тиском.

Водночас більшість праць, де досліджували міцність полімерних трубних конструкцій, присвячена трубам зі суцільними стінками. Достовірні дослідження стільників є новими та перспективними. У зв’язку з цим виділимо низку необхідних чинників для розрахунку та проектування полімерних тонкостінних конструкцій, а саме [26]: конструкційні особливості (геометрія конструкції та особливості будови її стінки); фізико-механічні властивості поліетилену; вплив ґрунту. Їх врахування уможливило розробку рекомендацій для інженерної практики з питань розробки методів і засобів оцінювання роботоздатності полімерних стільникових трубних конструкцій. Для цього виконаємо короткий огляд літератури, присвяченої вивченню зазначених вище чинників.

Лінійні деформації в полімерах за механічного навантаження. Стільникові трубні конструкції виготовляють в основному з поліетилену марки ПЕ-80 та ПЕ-100 [2, 3]. Як відомо [27], поліетилен є в’язкопружним матеріалом, поведінка якого в деформованому стані залежить від зовнішнього навантаження, температури та часу експлуатації. Відповідно він відрізняється від пружного матеріалу, наприклад металу.

Основні особливості та закономірності деформування полімерних матеріалів за статичних, квазістатичних та динамічних навантажень висвітлені у монографіях [14, 28–31], а моделі, що дають змогу описати механічні властивості полімерів з урахуванням їхніх в’язкопружних особливостей деформування – у монографіях [28–32]. Проте розв’язання задачі для системи “стільникова труба–ґрунт” у в’яз-

копружному формулюванні – проблематичне. Водночас для розрахунку та проектування полімерних трубних конструкцій на довготривалий період (в межах 50 років) [33–35] критерії прогнозу ґрунтуються на залежностях від модуля пружності поліетилену E , який змінюється з часом. Тому розв’язують задачу в пружній поставі з ефективним модулем пружності, що відповідає довготривалому періоду (зазвичай 50 років). Він використаний [33, 36] для оцінювання міцності поліетиленової труби. Рекомендуються [33] значення $E_0 = 758$ МПа і $E_\infty = 152$ МПа для короткотривалого і довготривалого модулів пружності поліетилену HDPE, відповідно. Янсон та Молін [36], екстраполюючи модуль пружності для HDPE на термін 50 років, отримали його значення, рівне 100 МПа. Кієнов і Прево [37] отримали наближені співвідношення між 50-річним і початковим значеннями жорсткостей труби. На цій основі ними встановлено, що довготривалий модуль пружності для HDPE становить 16% від початкового. На рис. 3 в подвійних логарифмічних координатах подані експериментальні результати [11] залежності модуля пружності поліетилену HDPE E (МПа) від часового параметра τ (h).

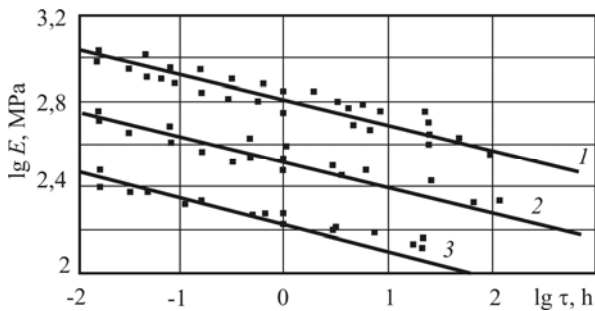


Рис. 3. Залежність модуля пружності поліетилену від часу випробування за температури $T = 20^\circ\text{C}$ (1), 40°C (2), 60°C (3).

Fig. 3. Dependence of the elastic modulus of polyethylene on test time for temperatures $T = 20^\circ\text{C}$ (1), 40°C (2), 60°C (3).

У подвійних логарифмічних координатах залежність модуля E від часу τ , можна описати лінійною функцією [11] $\lg E = 3,0582 - 0,09198 \lg \tau - 0,0112 T$, де T ($^\circ\text{C}$) – температура випробування. Так, при $\tau = 3$ min встановлюємо короткотривале значення модуля пружності для поліетилену HDPE $E=915$ МПа. Дослідники [33, 38] подають залежність модуля пружності для HDPE від часу навантаження формулою $E(\tau) = E_\infty + (E_0 - E_\infty)\tau^{-m}$. Як видно з рис. 3, модуль пружності для поліетилену HDPE не стала величина (що не характерно металам) і залежить від часу та способу навантаження. При цьому швидкість його зміни з часом зменшується.

В складніших поставах досліджено [39–43] деформування поліетилену залежно від часу: лінійне моделювання в’язкопружної поведінки HDPE [39]; нелінійне моделювання в’язкопружної поведінки HDPE [40, 41]; в’язкопластичне моделювання [42, 43].

Критерії розрахунку міцності поліетиленових конструкцій. Основні принципи та закономірності руйнування полімерів можна знайти в працях [44, 45]. Хоча руйнування полімерів є складне та багатостадійне, для оцінки міцності полімерних виробів зазвичай використовують два простих розрахункових критерії [14, 26]: забезпечення допустимих напружень ($\sigma \leq \sigma_c$) та допустимих деформацій ($\varepsilon \leq \varepsilon_c$). Частіше поліетиленові труби розраховують за першим критерієм. Наприклад, дослідження міцності поліетиленових труб за дії внутрішнього гідростатичного тиску уможливили розроблення міжнародних стандартів [27, 46]. Згідно з ними, допустимий тиск у поліетиленовій трубі встановлюють з умови

$$\max \sigma \leq MRS, \quad (2)$$

де σ – кільцеві напруження у стінці порожнистої (стільникової) труби; MRS – мінімальна довготривала міцність [27, 46], тобто MRS – напруження, отримані шляхом екстраполяції результатів випробувань поліетиленових труб на їх стійкість до внутрішнього гідростатичного тиску впродовж 50 років. Поліетилену марки

ПЕ-80 та ПЕ-100 відповідно мають $MRS = 8$ МПа та 10 МПа. Згідно з умовою (2), критичні навантаження на стільникові трубні конструкції можна оцінити на основі виразу

$$\max \{ \sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33} \} \leq MRS, \quad (3)$$

де $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ – головні напруження у поліетиленовому виробі.

Під час проектування стільників, згідно з критерієм (3), необхідно оцінити їх НДС.

Система “полімерна трубна конструкція–грунт”. Оцінка НДС та проектування підземних полімерних трубних конструкцій вимагає дослідження системи “трубна конструкція–грунт”. Більшість досліджень у цьому напрямку пов’язані з металевими та бетонними (тобто жорсткими) трубними елементами. Методи розрахунку жорстких трубопроводів із традиційних матеріалів добре розроблені і експериментально перевірені [47]. Спроби перенести відомі методи розрахунку для жорстких підземних трубних елементів на полімерні гнучкі труби великого діаметра призвели до серйозних обмежень та неточностей [48]. Особливістю деформації гнучкої підземної труби, на відміну від жорсткої, є те, що вона працює спільно з ґрунтом, який її оточує. Ґрунт стосовно труби відіграє подвійну роль. З одного боку, він створює і передає від наземних навантажень активний тиск на трубу, з іншого, він є основою і чинить опір за допомогою реактивного тиску за рахунок переміщення стінок труби у горизонтальному напрямку. При цьому реактивний тиск значною мірою впливає на деформований стан гнучкої конструкції і є важливим чинником для довготривалого збереження її кругової форми. Таким чином, здатність гнучких труб перерозподіляти зовнішні навантаження на бічні сторони є великою перевагою порівняно з жорсткими, що розміщені у ґрунті. А тому для гнучких труб необхідно врахувати дію реальних зовнішніх середовищ.

Зазвичай під час дослідження системи “гнучка труба–грунт” розглядавану задачу розділяють на три підзадачі [47]: оцінка зовнішнього навантаження (активного тиску), що діє на оболонку у пружному середовищі (гравітаційні навантаження від ґрунту чи зовнішнього транспорту); визначення характеру взаємодії гнучкої труби з навколишнім пружним середовищем (реактивного тиску); встановлення НДС гнучкої циліндричної оболонки з урахуванням дії (активного тиску) та реакції (реактивного тиску) навколишнього пружного середовища. Проаналізуємо ці підзадачі.

Активний тиск ґрунту. Проблема визначення активного тиску ґрунту на підземні труби висвітлена в працях [13, 26, 47, 49, 50]. Найпоширеніший спосіб – відкрите укладання трубопроводів у траншею або в насип [10]. При цьому основне навантаження на трубу створюється від ваги ґрунту засипки, розміщеного над конструкцією (активний тиск ґрунту). Найпростіший спосіб врахувати дію ваги ґрунту на гнучку конструкцію – прийняти, що його вертикальний тиск (рис. 5) на будь-якій глибині по ширині траншеї рівномірний та оцінити співвідношенням [47, 49]

$$q = H\gamma, \quad (4)$$

де H – висота від поверхні ґрунту до труби; γ – питома густина ґрунту.

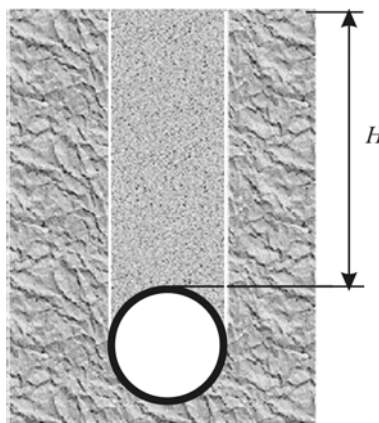


Рис. 4. Схема труба–грунт.

Fig. 4. The chart pipe–soil.

Інші методики розрахунку активного тиску ґрунту на трубу базуються на теорії Мартсона [51]. За цією теорією приймається, що уздовж стінок траншеї утворюються площини ковзання, де діють сили тертя, що утримують частину ваги засипки. За теорією Мартсона [13, 26, 52] активний тиск ґрунту на трубу менший, ніж за розрахунками згідно з формулою (4) і встановлюється з виразу [26]

$$q = VH\gamma, \quad (5)$$

де коефіцієнт $V < 1$. Однак однозначного вибору параметра V немає [13, 26, 53]. Водночас підходи до вибору параметра V є у стандартизованих документах. Прийняті національні стандарти проектування підземних трубопроводів Бельгії, Нідерландів, Німеччини та Швеції [26] дозволяють використання формули (5).

Під час оцінювання міцності полімерних труб також враховують нерівномірний по вертикалі внутрішній або зовнішній гідростатичний тиск [49]. Часто на трубу укладену на невеликій глибині, діє додатковий тиск від поверхневих навантажень, що створюються насипами, зовнішнім транспортом тощо. Розраховується тиск на трубу від поверхневого навантаження [13, 47, 54] за допомогою формули Бусінеска, де ґрунт розглядається як пружний півпростір.

Реактивний тиск ґрунту. В результаті переміщення стінок труби в горизонтальному напрямку з боку ґрунту виникає реактивний тиск на конструкцію. Реактивний тиск характеризує здатність ґрунту чинити опір переміщенням стінок труби. Реакція ґрунту залежить від багатьох чинників: переміщення стінки труби, фізико-механічних властивостей ґрунту (щільності, структури, вологості тощо) [55, 56]. Своєю чергою щільність ґрунту навколо труби залежить від методу укладання конструкції, якості засипки [10]. За дії зовнішніх навантажень різні ґрунти по-різному деформуються і чинять опір, причому їх деформованість залежить від часу навантаження. Але, незважаючи на складність будови і властивостей ґрунтів в інженерній практиці набув поширення принцип лінійної деформованості, який реалізується з достатньою для практичних цілей точністю за невеликих змін зовнішніх тисків, порядку 0,1...0,7 МПа [47, 57]. Найпростішою моделлю взаємодії ґрунту з трубою є модель Вінклера [58], згідно з якою, ґрунтова основа переміщується тільки в точці прикладення сили. Відповідно компоненти реактивного тиску η , η_1 та η_2 , пов'язані з переміщеннями серединної поверхні оболонки w , v і u , описують лінійною залежністю:

$$\eta = kw, \eta_1 = k_1v \text{ та } \eta_2 = k_2u,$$

де k , k_1 та k_2 – коефіцієнти реакції ґрунту у радіальному, тангенціальному та поздовжньому напрямках. Область, де радіальні переміщення спрямовані від ґрунту всередину труби, дістала назву “безвідпірна зона” [49]. В ній радіальну реакцію ґрунту приймають рівною нулю, тобто $\eta = 0$. Коефіцієнт реакції в радіальному напрямку k визначають з таблиць [58, 59]. Коефіцієнт k_1 рекомендують [60] орієнтовно приймати в межах $0 \leq k_1 \leq \delta k$, де δ – коефіцієнт тертя ґрунту об зовнішню поверхню труби.

Розрахунок напружено-деформованого та граничного станів системи “труба–ґрунт”. На початку ХХ століття підземні труби розраховували тільки на внутрішній тиск. Пізніше зі збільшенням водоспоживання і, відповідно, діаметрів водопроводів підземні труби стали розраховувати з урахуванням зовнішніх навантажень, спричинених дією ґрунту на трубу. Широкий огляд методів розрахунку підземних труб висвітлено в праці Виноградова [61].

Стосовно світових стандартів у сфері проектування полімерних трубопроводних систем у ґрунті їх міцність оцінюють переважно за зменшенням діаметра (прогином) уздовж вертикального напрямку. Власне сам прогин безпосередньо не відповідає за граничний стан конструкції, але великі прогини свідчать про

значні деформації у стінці конструкції, що може призвести до втрати її робото-здатності. Із наближених методів розрахунку прогину підземних труб найвідомі-ший метод Шпенглера. Основні його положення зводяться до наступного: верти-кальне навантаження від ваги ґрунту рівномірно розподілене по усій ширині тру-би; вертикальна сила реакції – по ширині основи труби; горизонтальний реактив-ний тиск – за параболічним законом у секторі з кутом розхилу 100°. На основі цього Шпенглером встановлено формулу [62] для визначення прогину гнучкої труби, розміщеної у ґрунті

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{aq}{bS_n + cS_s}, \quad (6)$$

де Δ – початковий прогин гнучкого трубопроводу; q – інтенсивність вертикаль-ного навантаження, яку визначають за формулою (4) або (5); D – діаметр трубо-проводу; S_n – кільцева жорсткість труби [8, 10], яку визначають за формулою (1); S_s – жорсткість ґрунту, яку зазвичай приймають як січний модуль ґрунту (модуль пружності) E_s [26, 62]; a, b, c – сталі. Коефіцієнти a, b, c формули Шпенглера (6) у різних міжнародних стандартах проектування підземних полімерних труб від-мінні. Найпоширеніші формули для встановлення відносного прогину подані в табл. 1

Таблиця 1. Розрахункові формули для знаходження прогину полімерних під-земних трубопроводів [11, 26] для різних національних будівельних правил

Країна	Росія	Англія	Франція	Німеччина	Швеція
$\frac{\Delta}{D}$	$\frac{0,11q}{8S_n + 0,06E_s}$	$\frac{0,1q}{8S_n + 0,06E_s}$	$\frac{0,083q}{16S_n + 0,24E_s}$	$\frac{0,1q}{16S_n + 0,08E_s}$	$\frac{0,083q}{16S_n + 0,12E_s}$

Січний модуль ґрунту E_s залежить від типу ґрунту і його ущільнення, спосо-бу укладки, висоти засипки та інших чинників. Вибір значення E_s для різних бу-дівельних стандартів проектування полімерних труб є неоднозначним. Це може бути частково обґрунтовано вибором методу розрахунку прогину. Наприклад [26], французький будівельний стандарт забезпечує мінімальні значення січного модуля ґрунту, водночас як німецький – його середні значення. Січні модулі пружності ґрунту E_s для французьких та німецьких будівельних норм мають значні відмінності в розрахункових значеннях (табл. 2).

Відносний прогин Δ/D обмежують критичним значенням для забезпечення різних норм безпеки, в тому числі граничної деформації або напружень в резуль-таті згину, запобігання локальної або загальної втрати тривкості. Забезпечення прогину меншого від критичного дає змогу запобігти втраті робото-здатності кон-струкції. Запропоновані різні обмеження для прогину полімерних труб. Типові межі відхилення прогину у відсотках від діаметра труби такі: 8% – прогин під час проектування [63]; 6% – німецький будівельний стандарт ATV; 6% – після 12 мі-сяців експлуатації [64]; 5% – після будівництва [65]. Однак дискусія щодо вста-новлення розрахункової формули (6) та критичного значення прогину незаверше-на. Щоб розрахувати міцність стільникової труби, необхідно вибрати адекватну розрахункову формулу для прогину та встановити його критичне значення.

Основні недоліки розглянутих методів розрахунку підземних труб поляга-ють у наближеному врахуванні роботи реактивних сил ґрунту під час деформації труби шляхом прийняття тієї або іншої епюри реактивного тиску, в неточності вибору значення січного модуля ґрунту E_s , у різних способах задання активного тиску ґрунту та в апіорному виборі критичного прогину полімерної труби.

**Таблиця 2. Значення січного модуля E_s
(французькі та німецькі будівельні правила)**

Тип ґрунту	Франція, E_s , МПа		Німеччина					
	неущільнений	ущільнений	D_{P_s} , %*	E_s , МПа	D_{P_s} , %*	E_s , МПа	D_{P_s} , %*	E_s , МПа
Пісок грубо- і середньозернистий	0,7	2,0...5,0	90	6	95	16	97	23
Пісок дрібнозернистий	0,6	1,2...3,0	90	3	95	8	97	11
Супіски, суглинки	0,5	1,0...2,5	90	2	92	3	95	5
Пливун, глина	<0,3	0,6	90	1,5	92	2	–	–

* Щільність ґрунту за Проктором [26].

Початком розвитку уточнених методів розрахунку підземних труб, що ґрунтуються на розв’язанні диференціальних рівнянь, які описують деформацію кільця з ґрунтом, стала праця Ємельянова [52]. Отримано неоднорідне диференціальне рівняння шостого порядку для розрахунку підземних труб. У праці Бернса і Річарда [66] детально розглянуто метод, в якому ґрунт приймається як пружне суцільне середовище, що взаємодіє з конструкцією, яку моделювали пружною оболонкою. Клейном [67] розраховано кільце на пружній основі з урахуванням “безвідпірної” зони, в якій автор, застосовуючи метод розвинення в тригонометричний ряд шуканої функції, отримав нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Зроблено [67] висновок про незалежність “безвідпірної” зони від інтенсивності зовнішнього навантаження. Розв’язано задачу розрахунку підземної труби в статично неоднорідному ґрунті [68, 69]. Також для встановлення поведінки системи “ґрунт–труба” часто використовують метод скінченних елементів [70]. Він може бути використаний для дослідження впливу цілої низки нелінійних і нестационарних особливостей ґрунту і матеріалів труби. Використовуючи програму Cande, розраховували та проаналізували підземні термопластичні труби [71, 72].

Поряд з теоретичними розробками методів розрахунку підземних гнучких труб виконали велику кількість як лабораторних, так і натурних досліджень деформації тонкостінних труб у ґрунті [73–76]. Широкий огляд експериментальних досліджень підземних трубопроводів виконав Клейн [67].

Як випливає з наведеного огляду праць, присвячених розрахунку підземних труб, найширше застосування знайшла модель розрахунку кільця на пружній основі. Але ця модель має недолік, який не дозволяє використовувати теорію під час розрахунків гнучких підземних трубних конструкцій, де наявні значні поперевжні зусилля. До того ж вищенаведені методи є незастосовні до розрахунку різноманітних резервуарів, розміщених у ґрунті. Цього недоліку позбавлена теорія циліндричних оболонок у пружному середовищі, де трубна конструкція розглядається як циліндрична оболонка [49, 77]. Її поява стала можливою завдяки розвитку теорії оболонок [78–80]. Розглянута [81, 82] теорія розрахунку пологих оболонок на пружній основі. Отримані [81] залежності для пружної основи типу Власова, а в праці [82] – для Вінклерівської основи, що однаково працює на розтяг і стиск. Обуховим [83] розраховано підземні циліндричні резервуари і трубопроводи із склопластиків та пластмас як ортотропних оболонок на пружній основі з урахуванням “безвідпірної” зони.

ВИСНОВКИ

Розроблення методів дослідження роботоздатності стільникових трубних елементів у робочих умовах на сьогодні знаходиться на початковому етапі. До того ж більшість існуючих розрахункових моделей визначення НДС та оцінювання міцності полімерних трубних конструкцій великого діаметра, розміщених у ґрунті, не мають належного як теоретичного, так і експериментального підтвердження. В основному вони стосуються труб зі суцільною стінкою, що затримує розвиток використання підземних полімерних трубопроводів.

Наведений огляд праць зі статистики і кінематики підземних труб свідчить про різні напрями в цій області, про успішний розвиток теорії розрахунку підземних труб від примітивних до сучасних зі застосуванням ефективно реалізованих методів. З огляду літератури також бачимо, що найзручнішою для дослідження підземних гнучких труб, в тому числі і стільникових, є модель Вінклера зі змінним коефіцієнтом реакції ґрунту. Ця модель дає змогу врахувати “безвідпірну” зону і різноманітні ґрунтові дефекти.

Можна стверджувати, що використання поліетиленових труб великого діаметра відкриває нові можливості під час будівництва трубопроводів. Широкому впровадженню такої продукції перешкоджає відсутність нормативних документів для проектування, монтажу і експлуатації мереж водовідведення та водопостачання з полімерних труб. Тому подальший розвиток теоретико-аналітичних досліджень у цьому напрямку на сьогодні є актуальною та важливою задачею як у прикладному, так і в практичному плані.

РЕЗЮМЕ Выполнен обзор работ, которые предшествуют и необходимы для исследований напряженно-деформированного и предельного состояний сотовых трубных конструкций. Проанализированы труды, посвященные сплошным полимерным (гибким) трубам, которые эксплуатируются в условиях действия почв. Выделены наиболее важные факторы и критерии для применения в инженерных расчетах и проектирования сотовых труб.

SUMMARY A review of the papers which have been published earlier and are necessary for researches of the stress-state and the limiting state of cellular pipe constructions is done. The papers dealing with the solid polymer (flexible) pipes which operate in the conditions of the soil action are analysed. On this basis the most important factors and criteria for application in engineering calculations and design of cellular pipes are shown.

1. Уайт Дж., Чой Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины. – Санкт-Петербург: Профессия, 2006. – 240 с.
2. Альперн В. Полиэтилен класса ПЭ-100 для водяных труб: когда это выгодно // Инженерные сети из полимерных материалов. – 2003. – № 3. – С. 3–7.
3. Шестопал А., Гохфельд В., Гурский А. Трубы из полиэтилена типа ПЭ-80 и ПЭ-100 для подачи воды // Там же. – 2002. – № 2. – С. 14–16.
4. Уиллоуби Д. А., Вудсон Р. Д., Суверленд Р. Полимерные трубы и трубопроводы: Справ. – М.: Профессия, 2010. – 488 с.
5. Великогабаритні полімерні конструкції з пустотілою (стільниковою) будовою стінки // Вода і водоочисні технології. – 2008. – № 5. – С. 65–66.
6. Корпорация “Энергоресурс-инвест” представляет новую технологию производства крупногабаритных полимерных изделий с пустотелой (сотовой) конструкцией стенки // Полимерные трубы. – 2007. – № 2–3. – С. 6–7.
7. ГОСТ Р 54475-2011. Трубы полимерные со структурированной стенкой и фасонные части к ним для систем наружной канализации. Технические условия. – Введ. 13.12.2011.
8. ДСТУ-Н Б В.2.5-40:2009. Проектування та монтаж мереж водопостачання та каналізації з пластикових труб. – Введ. 21.12.2009.
9. ISO 9969:2007. Thermoplastics pipes. Determination of ring stiffness. – Introduced 31.01.2008.

10. СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. – Введ. 16.08.2000.
11. Швабауэр В. В., Гвоздев И. В. Расчет подземного трубопровода из термопластов // Полимерные трубы. Украина. – 2007. – № 3. – С. 52–56.
12. Балсон Ф. С. Загубленные сооружения: статическая и динамическая прочность. – М.: Стройиздат, 1991. – 240 с.
13. Moser A. P. and Folkman S. L. Buried pipe design. – New York: McGraw-Hill, 2008. – 601 p.
14. Janson L. E. Plastic pipes for water supply and sewage disposal. – Stockholm: Borealis, 1996. – 156 p.
15. Стащук М. Г., Дорош М. І. Розрахунок великогабаритних поліетиленових труб з порожнистою стінкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, №4. – С. 39–45.
(Stashchuk M. H. and Dorosh M. I. Calculation of large-size polyethylene pipes with hollow walls // Materials Science. – 2012. – 48, №4. – P. 456–463.)
16. Стащук М. Г., Дорош М. І. Розрахунок стільникових трубопроводів великого діаметра в неоднорідному ґрунтовому середовищі // Там же. – 2010. – 46, № 6. – С. 47–50.
(Stashchuk M. H., and Dorosh M. I. Numerical analysis of the strained state of cellular pipes in inhomogeneous soil // Materials Science. – 2010. – 46, № 6. – С. 763–768.)
17. Стащук М. Г., Максимук А. В., Дорош М. І. Расчет прогиба композитного трубопровода, изготовленного путем намотки трубки // Механика композитных материалов. – 2011. – 47, № 4. – С. 567–578.
18. Максимук О. В., Стащук М. Г., Дорош М. І. Розрахунок стільникового полімерного трубопроводу, підкріпленого періодичною системою пружних шпангоутів // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2009. – 52, № 2. – С. 170–179.
19. Стащук М. Г., Дорош М. І. Моделювання прогину стільникової труби з урахуванням дії ґрунту // Матеріали між. конф. “Обчислювальна математика і математичні проблеми механіки” (Львів, травень 20–24, 2009). – Львів, 2009. – С. 302–304.
20. Стащук М. Г., Дорош М. І. Встановлення деформованого стану тонкостінних конструкцій зі стільниковою структурою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, № 4. – С. 67–75.
(Stashchuk M. H. and Dorosh M. I. Determination of the strained state of thin-walled cellular structures // Materials Science. – 2009. – 45, № 4. – С. 542–554.)
21. Дорош М. І. Встановлення умов експлуатації підземних великогабаритних поліетиленових труб з пустотілою (стільниковою) будовою стінки // Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 2012. – 730. – С. 41–46.
22. Напружено-деформований стан і стійкість полімерних труб зі стільниковою стінкою / О. В. Максимук, Н. М. Щербина, Р. М. Махніцький, Н. В. Гануліч // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2008. – 51, №3. – С. 145–151.
23. Максимук О. В., Махніцький Р. М., Щербина Н. М. Розрахунок на стійкість стільникових полімерних труб // машинознавство. – 2009. – №1. – С. 28–31.
24. Максимук О. В., Махніцький Р. М., Щербина Н. М. Про стійкість полімерних циліндричних оболонок стільникової будови // Мат. 9-го Міжнар. симп. укр. інженерів-механіків (20–22 травня 2009 р.). – Львів, 2009. – С. 50–52.
25. Butt-welding technology for double walled Polyethylene pipe / Bo-Young Lee, Jae-Seong Kim, Sang-Yul Lee, Yeong K. Kim // Materials and Design. – 2012. – 35. – P. 626–632.
26. McGrath T. J., Moore I. D., Hsuan G. Y. NCHRP Report 631: Updated test and design methods for thermoplastic drainage pipe. – Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2009. – http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_631.pdf
27. ISO 12162:1995. Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure application. – Classification and designation – Overall service (design) coefficient. – Introduced 1.06.1995.
28. Алфрей Т. Механические свойства высокополимеров. – М.: Издательство, 1952. – 620 с.
29. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. – М.: Научный мир, 2007. – 573 с.
30. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров. – М.: Лабиринт, 1994. – 367 с.
31. Гольдберг И. И. Механическое поведение полимерных материалов. – М.: Химия, 1970. – 190 с.

32. Аскадський А. А. Деформація полімерів. – М.: Хімія, 1973. – 448 с.
33. Janson L. E. Investigation of the long term creep modulus for buried polyethylene pipes subjected to constant deflection // Proc. of the Int. Conf. on Advances in Underground Pipeline Engineering (Madison, WI, April, 1985). – Madison, WI: American Society of Civil Engineers, 1985. – P. 142–148.
34. Mruk S. A. The durability of polyethylene piping // In buried plastic pipe technology, ASTM STP 1093 / Ed. G. S. Buczala, M. J. Cassady. – West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1990. – P. 132–141.
35. Buczala G. S., Cassady M. J. Buried plastic pipe technology. – Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990. – 419 p.
36. Janson L. E., Molin J. Design and installation of underground plastic sewer pipes // Int. Conf. on Underground Plastic Pipes (New Orleans, LA, March 30 – April 1, 1981). – New York: American Society of Civil Engineers, 1981. – P. 34–41.
37. Kienow K. K., Prevost R. C. Stiff soils-an adverse environment for low stiffness pipe // Proc. of the Int. Conf. on Pipeline in Adverse Environments II (San Diego, Calif., CA, November 14-16, 1983). – New York, NY: American Society of Civil Engineers, 1983. – P. 434–455.
38. Janson L. E. The relative strain as a design criterion for buried PVC gravity sewer pipes // Proc. of the Int. Conf. on Advances in Underground Pipeline Engineering (Madison, WI, April, 1985), Madison, WI: American Society of Civil Engineers, 1985. – P. 251–260.
39. Moore I. D. and Hu F. Linear viscoelastic modelling of profiled high density polyethylene pipe // Canadian J. of Civil Engng. – 1996. – 23. – P. 395–407.
40. Moore I. D., Zhang C. Computer models for predicting HDPE pipe stiffness // Proc. of the Annual Conf. of the Canadian Society of Civil Engng. (Ottawa, ON, Canada, June 1–3). – Ottawa, 1995. – P. 565–574.
41. Zhang C. and Moore I. D. Nonlinear mechanical response of high density polyethylene. P. 1, 2 // Polymer Engng. and Sci. – 1997. – 37, № 2. – P. 404–420.
42. Bodner S. R. and Partom Y. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials // J. of Applied Mechanics. – 1975. – 42. – P. 385–389.
43. Zhang C., Moore I. D. Nonlinear finite element analysis for thermoplastic pipes // Transportation Research Record 1624. – Washington, D.C., 1998. – P. 225–230.
44. Бартенев Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 278 с.
45. Кауш Г. Разрушение полимеров. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
46. ISO 9080:2003. Plastic piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. – Introduced 19.08.2003.
47. Клейн Г. К. Расчет подземных трубопроводов. – М.: Стройиздат, 1969. – 240 с.
48. Сладков А. В. Проектирование и строительство наружных сетей водоснабжения и канализации из пластмассовых труб. – М.: Стройиздат, 1988. – 207 с.
49. Виноградов С. В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки. – М.: Стройиздат, 1980. – 135 с.
50. Watkins R. K. and Moser A. P. Response of corrugated steel pipe to external soil pressures // Highway Research Record 373. – 1971. – P. 88–112.
51. Marston A. and Anderson A. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe // Iowa Engineering Experiment Station, Bull. 31. – 1913. – 181 p.
52. Емельянов Л. М. О расчете подземных труб по теории упругости // Строительная механика и расчет сооружений. – 1961. – 11. – С. 32–37.
53. McGrath T. J. Calculating loads on buried culverts based on pipe hoop stiffness // Transportation Research Record 1656 (July, 1999). – Washington, D.C., 1999. – P. 73–79.
54. Hall W. J. and Newmark N. M. Seismic design criteria for pipelines facilities // J. of the Technical Councils of ASCE. – 1978. – 104, № 1. – P. 91–107.
55. Цытович Н. А. Механика грунтов. – М.: Госстройиздат, 1963. – 637 с.
56. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 с.
57. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. – М.: Госстройиздат, 1958. – 607 с.
58. Власов В. З., Леонтьев Н. Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. – М.: Госстройиздат, 1960. – 490 с.
59. Лисов В. М. Дорожные водопропускные трубы. – М.: ТИМР, 1998. – 140 с.

60. Емельянов Л. М. О расчете тонкостенных труб, заложенных в землю // Гидротехника и мелиорация. – 1952. – № 10. – С. 18–29.
61. Виноградов С. В. Обзор методов расчета подземных тонкостенных трубопроводов на прочность, жесткость и устойчивость // Тр. Союзводпроект. – 1977. – 48. – С. 51–61.
62. Watkins R. K. and Spangler M. G. Some characteristics of the modulus of passive resistance of soil // Highway Research Record 37. – Washington, D.C., 1958. – P. 389–397.
63. Miles R. W. and Schrock B. J. Integrated design procedure for flexible pipe // Pipelines in the constructed environment. – Reston, VA, 1998. – P. 125–131.
64. Prevost R. C. and Kienow K. K. Basics of flexible pipe structural design // J. of Transportation Engng. – 1994. – 120, № 4. – P. 652–671.
65. СН 550-82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб. – Введ. 22.04.1982.
66. Burns J. Q. and Richard R. M. Attenuation of stresses for buried cylinders // Proc. of the symposium on soil structure interaction. – Tucson: Univ. of Arizona, 1964. – P. 378–392.
67. Клейн Г. К. Проблемы строительной механики подземных трубопроводов // Стр. мех. и расчет сооружений. – 1967. – № 4. – С. 17–22.
68. Болотин В. В. Об упругих деформациях подземных трубопроводов, прокладываемых в статически неоднородном грунте // Там же. – 1965. – № 1. – С. 23–45.
69. Великоднев В. Я. Расчет подземных мелиоративных труб при наличии неоднородности в основании // Науч. тр. Моск. гидромелиорат. ин-та. – 1981. – 69. – С. 162–170.
70. Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
71. Adams D. N., Muindi T., and Selig E. T. Polyethylene pipe under high fill // Transportation research record 1231. – Washington, D.C., 1989. – P. 88–95.
72. Hashash N. M. and Selig E. T. Analysis of the performance of a buried high density polyethylene pipe // Structural performance of flexible pipe / Ed. A. A. Balkema. – Rotterdam: Taylor and Francis, 1990. – P. 56–63.
73. Метельский П. З. Экспресс-метод измерения вертикальных перемещений подземных труб малого диаметра // Тр. Моск. гидромелиорат. ин-та. – 1981. – 69. – С. 159–161.
74. Moghaddas Tafreshi S. N. and Khalaj O. Analysis of repeated-load laboratory tests on buried plastic pipes in sand // Soil Dynamics and Earthquake Engng. – 2011. – 31. – P. 1–15.
75. Moghaddas Tafreshi S. N. and Khalaj O. Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated-load // Geotextiles and Geomembranes. – 2008. – 26. – P. 145–163.
76. Watkins R. K. Plastic pipes under high landfills // Buried plastic pipe technology, ASTM STP 1093 / Ed. G. S. Buczala, M. J. Cassady. – West Conshohocken, PA, 1990. – P. 379–392.
77. Клейн Г. К. Расчет труб, уложенных в землю. – М.: Госстройиздат, 1957. – 195 с.
78. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике. – М.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
79. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
80. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. П. Пластины и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 625 с.
81. Васильев А. И. О расчете тонкостенной подземной трубы как цилиндрической оболочки в упругой среде // Науч. тр. Моск. гидромелиорат. ин-та. – 1977. – 53. – С. 35–49.
82. Какушадзе А. М., Михеладзе Г. Г. Расчет пологой цилиндрической оболочки на упругом основании // Сообщение АН ГрузССР. – 1971. – № 5. – С. 617–623.
83. Обухов А. С. Расчет цилиндрических подземных сосудов и трубопроводов из стеклопластиков и пластмасс // Стр. мех. и расчет сооружений. – 1981. – № 6. – С. 22–25.

Одержано 08.04.2013