

УДК 624.132.3

¹Кравець С.В., д.т.н.; ²Супонєв В.М., к.т.н.

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АНАЛІТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЛОБОВОГО ОПОРУ ЗАГЛИБЛЕННЮ В ГРУНТ КІЛЬЦЕВОГО НАКОНЕЧНИКА

Анотація. Надано аналітичне виведення математичної моделі для визначення лобового опору заглиблення в ґрунт кільцевого наконечника. Також визначено вплив параметрів кільцевого наконечника конічної форми на опір заглибленню. Розрахунки можуть бути використані при обґрунтуванні вибору установок для безтраншейного прокладання підземних комунікацій методом продавливання ґрунту.

Ключові слова: аналітична модель, безтраншейна технологія, інженерні комунікації, горизонтальна свердловина, технологія протискування, кільцевий наконечник.

Аннотация. Представлен аналитический вывод аналитической модели для определения лобового сопротивления заглиблення в ґрунт кольцевого наконечника. Также определены оптимальные параметры кольцевого наконечника конической формы. Расчёты могут быть использованы при обосновании выбора установок для безтраншейной прокладки подземных коммуникаций методом продавливания ґрунта.

Ключевые слова: аналитическая модель, безтраншейная технология, инженерные коммуникации, технология продавливания, кольцевой наконечник.

Abstract. An analytical model for definition of frontal resistance of implementation of the ring tip into the soil is presented. Also is determined the optimal parameters of conic ring tip. Calculations can be used to justify the choice of the plants for trenchless laying of underground communications using the method of pipe jacking.

Keywords: analytical model, trenchless technology, engineering services, technology adoption, ring tip.

Вступ. Серед методів формування горизонтальних свердловин для безтраншейного прокладання підземних комунікацій особливе місце займає технологія протискування, яка полягає у видаленні ґрунту з труби, яку заглиблюють за допомогою силових пристроїв, наприклад домкратів [1, 2]. Цей метод широко використовується для прокладання трубопроводів великих діаметрів до 800 мм, та більше. Його

позитивною особливістю є те, що при протискуванні ґрунту трубою навколо свердловини не виникає його ущільнення, як у інших технологіях, яке призводить до руйнування дорожньої основи, або прилеглих комунікацій. Крім того, він дозволяє суттєво знизити опір заглибленню трубопроводів діаметром більше 300...400 мм.

Оскільки у стислих міських умовах більшість комунікацій складають розподільні мережі, діаметр свердловин яких лежать у межі до 400÷500 мм. Тому виникає питання ефективного використання метода протискування в цих умовах та оптимальних параметрів кільцевих наконечників, які безпосередньо вступають у взаємодію з ґрунтом при формуванні горизонтальної свердловини.

Аналіз публікацій. Дослідженнями процесу заглибленню головної частини щитів та трубопроводів, які протікають при протискуванні ґрунту займалися В.П. Самойлов [3], Є.Д. Демешко [4], Н.В. Васильєв [5], А.С. Григор'єв [6], Л.Н. Кантович [7], К.С. Гурков [8] та інші вчені. Так В.П.Самойлов рахує, що на ніж діють два головних зусилля: яке потребує для приведення ґрунту в середину ножової частини у граничний (пластичний) стан та зусилля втиснення в ґрунт затупленої ріжучої кромки. Його методика зусилля втиснення відкритої ножової частини у ґрунтовий масив базується на експериментальних даних. На його погляд звуження вхідного перетину ножової частини по відношенню до вхідного перетину у деяких випадках досягає 50%, що викликає додатковий опір на втиснення ножа у ґрунт. Є.А. Демешко запропонував розрахунок клиновидного кільцевого ножа з урахуванням кута його загострення. Його розрахунки базуються на теорії рівноваги сипучого середовища. Н.В. Васильєв запропонував встановлювати зусилля з урахуванням довжини периметру ножа. А.С. Григор'єв встановив, що опір втиснення циліндричної оболонки залежить тільки від довжини участку тертя інженерної комунікації по ґрунту. Причому в кінці кожного циклу протискування оболонки відбувається зменшення опору втиснення за рахунок виймання ґрунтового керну з кожного циклу протискування.

Мета і постановка задачі. Наведені вище дослідження та запропоновані розрахунки базуються лише на експериментальних даних, тому потребують аналітичного визначення сил опору втиснення труби з конусною насадкою, встановлення впливу на неї параметрів насадки залежно від фізико-механічних властивостей ґрунту та визначення умов їх оптимізації.

Виклад основного матеріалу. Схема дії сил опору ґрунту на протискування кільцем з двоконусним наконечником представлена на рис. 1. Процес втиснення наконечника у ґрунт супроводжується радіальним зовнішнім та внутрішнім ущільненням ґрунту по мірі занурення конусної частині наконечника. При цьому на поверхнях

конусу виникає змінний тиск ґрунту, який визначається його напруженістю. Його величина тим більше, чим більше відбувається ущільнення ґрунту. Після втиснення конусної частини насадки у ґрунт ущільнений ґрунт створює тиск на її зовнішню і внутрішню циліндричні поверхні. Розрахунок сили опору просуванню ґрунту по внутрішній циліндричній частині насадки є окремою самостійною задачею і в статті не розглядатиметься.

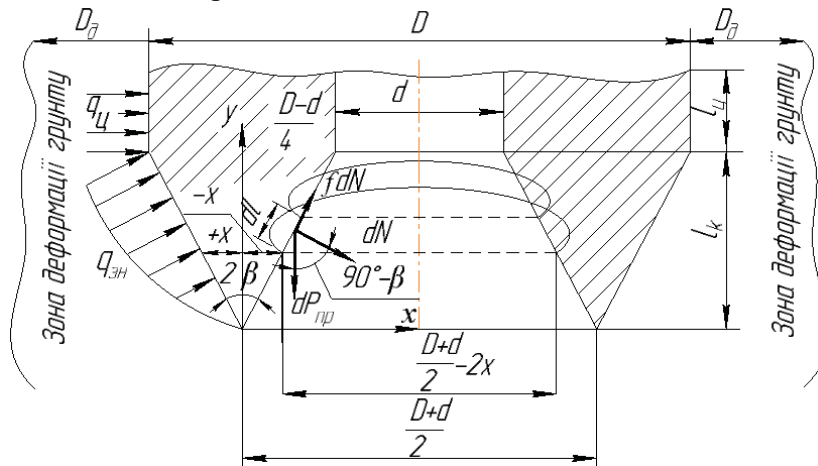


Рис. 1. Схема взаємодії кільцевого двоконусного наконечника з ґрунтом

Для визначення раціональних параметрів кільцевого конічного наконечника визначаємо нормальний тиск на зовнішній і внутрішній конуси на основі компресійних показників для ґрунтів [9]

$$q = \frac{\rho_{\text{ТВ}} (1 + \omega)}{C_{\text{к}}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{пр}}} - \frac{1}{\rho} \right), \quad (1)$$

де $\rho_{\text{ТВ}}$ – щільність твердої фази ґрунту при умові, що відсутні пори;

ω – вологість ґрунту;

$\rho_{\text{пр}}$ – щільність ґрунту в природньому неперушеному стані;

ρ – змінна щільність ґрунту пропорційна зміні площі поперечного перерізу зовнішнього або внутрішнього кільцевих конусів;

$C_{\text{к}}$ – коефіцієнт компресії ґрунту, ($C_{\text{к}} = 0,07 \dots 0,09 \cdot (\omega_{\text{Т}} - 10)$, МПа⁻¹) [10]

$\omega_{\text{Т}}$ – границя текучості ґрунту.

Визначимо закони зміни середньої щільності ґрунту в деформованому просторі поверхнями внутрішнього і зовнішнього конусів на основі закону рівності мас.

$$\frac{\pi \left(\frac{D+d}{2} \right)^2}{4} \rho_{\text{пр}} = \frac{\pi \left(\frac{D+d}{2} - 2x \right)^2}{4} \rho_{\text{вн}}. \quad (2)$$

Звідки

$$\rho_{\text{вн}} = \frac{\rho_{\text{пр}}}{1 - \left(\frac{4x}{D+d} \right)^2}. \quad (3)$$

Якщо взяти до уваги, що деформація ґрунту зовнішнім конусом розповсюджується на відстань D навколо наконечника [10], то аналогічним чином маємо

$$\frac{\pi \left[D^2 - \left(\frac{D+d}{2} \right)^2 \right]}{4} \rho_{\text{пр}} = \frac{\pi \left[D^2 - \left(\frac{D+d}{2} + 2x \right)^2 \right]}{4} \rho_{\text{зн}} \quad (4)$$

$$\rho_{\text{зн}} = \frac{1 - \left(\frac{D+d}{2D} \right)^2}{1 - \left(\frac{D+d+4x}{2D} \right)^2} \rho_{\text{пр}} \quad (5)$$

де D і d – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри кільцевого наконечника.

Тоді, відповідно залежності (1) закони зміни нормального тиску на бічні поверхні зовнішнього і внутрішнього конусів запишуться у вигляді

$$q_{\text{зн}} = \frac{\rho_{\text{ТВ}}(1+\omega)}{C_{\text{к}}\rho_{\text{пр}}} \left[1 - \frac{1 - \left(\frac{D+d+4x}{2D} \right)^2}{1 - \left(\frac{D+d}{2D} \right)^2} \right] \quad (6)$$

$$q_{\text{вн}} = \frac{\rho_{\text{ТВ}}(1+\omega)}{C_{\text{к}}\rho_{\text{пр}}} \left[1 - \left(1 - \frac{4x}{D+d} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Ці залежності для напівтвердого суглинку приведені на рис.2. Наведені розрахунки надані з урахуванням осьового просування конусу від 0 м до 0,1 м, зовнішнього діаметру конусної насадки $D = 0,6$ м та внутрішнім $d = 0,2$ м, фізико механічних властивостей напівтвердого суглинку: компресійний модуль деформації ґрунту –

$E_{\text{гр}} = 0,892$ МПа; щільність твердого ґрунту – $\rho_{\text{ТВ}} = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; щільність

природна – $\rho_{\text{пр}} = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; вологість – $\omega = 20\%$; коефіцієнт

компресії – $C_{\text{к}} = 1,73$ МПа⁻¹.

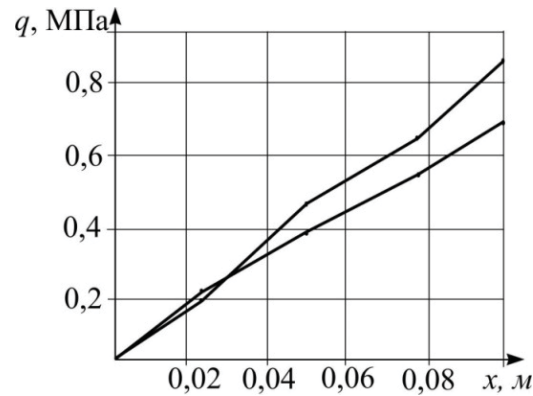


Рис.2. Залежності зміни нормального тиску на зовнішній і внутрішній конус для напівтвердого суглинку.

Елементарні площі зовнішнього і внутрішнього конусів відповідно дорівнюють

$$dF_3 = \pi \left(\frac{D+d}{2} + 2x \right) \frac{dx}{\sin \beta} \quad (8)$$

$$dF_B = \pi \left(\frac{D+d}{2} - 2x \right) \frac{dx}{\sin \beta}, \quad (9)$$

де 2β – кут загострення конуса.

Визначимо елементарне зусилля заглиблення (протискування) в ґрунт конічної частини наконечника. Для цього спроекуємо всі елементарні сили на вісь OY

$$\begin{aligned} dP_\kappa &= dN \sin \beta + fdN \cos \beta = (q_{3н} dF_3 + q_{6н} dF_6)(1 + f \operatorname{ctg} \beta) \sin \beta = \\ &= \pi \frac{\rho_{ТВ} (1 + \omega)}{C_\kappa \rho_{пр}} (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \beta) \times \\ &\times \left\{ \left[\frac{1 - \left(\frac{D+d+4x}{2D} \right)^2}{1 - \left(\frac{D+d}{2D} \right)^2} \right] \left(\frac{D+d}{2} + 2x \right) dx + \right. \\ &\left. + \left[1 - \left(1 - \frac{4x}{D+d} \right)^2 \right] \left(\frac{D+d}{2} - 2x \right) dx \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

З урахуванням залежності $E_{гр} = \frac{(1 + \omega)\rho_{ТВ}}{C_k \rho_{гр}}$, яка відображає

компресійний модуль деформації ґрунту, отримаємо наступне:

$$P_{2к} = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \times \left\{ 2 \int_0^{\frac{D-d}{4}} \frac{D+d}{2} dx - \int_0^{\frac{D-d}{4}} \frac{1 - \left(\frac{D+d+4x}{2D}\right)^2}{1 - \left(\frac{D+d}{2D}\right)^2} \cdot \frac{D+d}{2} dx + \int_0^{\frac{D-x}{4}} 2x dx - 2 \int_0^{\frac{D-d}{4}} \frac{1 - \left(\frac{D+d+4x}{2D}\right)^2}{1 - \left(\frac{D+d}{2D}\right)^2} x dx - \frac{D+d}{2} \int_0^{\frac{D-x}{4}} \left(1 - \frac{4x}{D+d}\right)^2 dx - 2 \int_0^{\frac{D-x}{4}} x dx + 2 \int_0^{\frac{D-x}{4}} \left(1 - \frac{4x}{D+d}\right)^2 x dx \right\} \quad (11)$$

Після інтегрування залежності (10) та проміжних математичних перетворень отримаємо вираз для визначення зусилля заглиблення двоконусного кільцевого наконечника

$$P_{2к} = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \left\{ \frac{D^2 - d^2}{4} - \frac{D^2 - 2dD - d^2}{16 \left[1 - \left(\frac{D+d}{2D}\right)^2\right]} - \frac{(D+d)^4}{128 \left[1 - \left(\frac{D+d}{2D}\right)^2\right] D^2} - \frac{(D+d)^2}{32} + \frac{d^4}{2(D+d)^2} \right\} \quad (12)$$

З урахуванням позначення відношення $\frac{D}{d} = \gamma$, вираз (12)

перепишеться у вигляді

$$P_{2к} = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \left[\frac{\gamma^2 - 1}{4} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \right. \\ \left. - \frac{(\gamma + 1)^4}{128 \left[1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right] \gamma^2} - \left(\frac{\gamma + 1}{32} \right)^2 + \frac{1}{2(\gamma + 1)^2} \right] \cdot \frac{D^2}{\gamma^2} \quad (13)$$

Для визначення дії сил опору ґрунту на одноконусний кільцевий наконечник (зовнішній конус) при його заглибленні у виразі (10) необхідно вирахувати перших чотири інтеграли у фігурних дужках без двійки у першому інтегралі. У результаті отримаємо

$$P_k = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \left(\frac{3D^2 - 2dD - d^2}{16} - \right. \\ \left. \frac{D^2 - 2dD - d^2}{16 \left[1 - \left(\frac{D + d}{2D} \right)^2 \right]} - \frac{(D + d)^4}{128 \left[1 - \left(\frac{D + d}{2D} \right)^2 \right] D^2} \right) \quad (14)$$

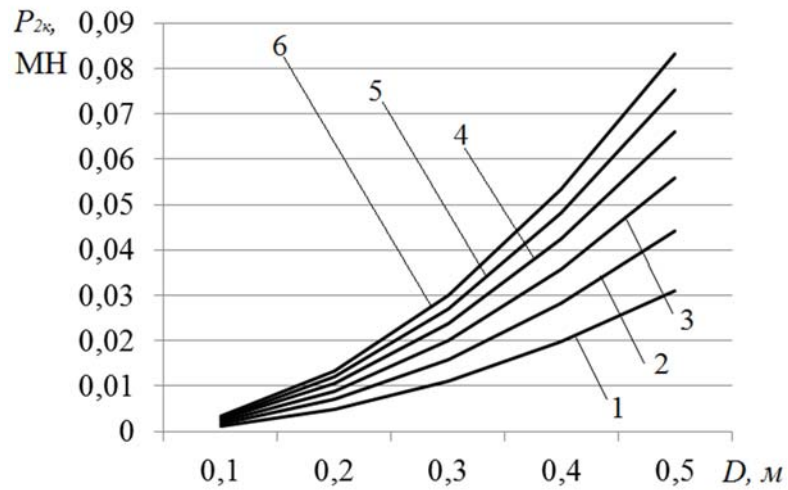
або

$$P_k = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \left(\frac{3\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16} - \right. \\ \left. - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{\frac{(\gamma + 1)^4}{\gamma^2}}{128 \left[1 - \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} \right) \frac{D^2}{\gamma^2} \quad (15)$$

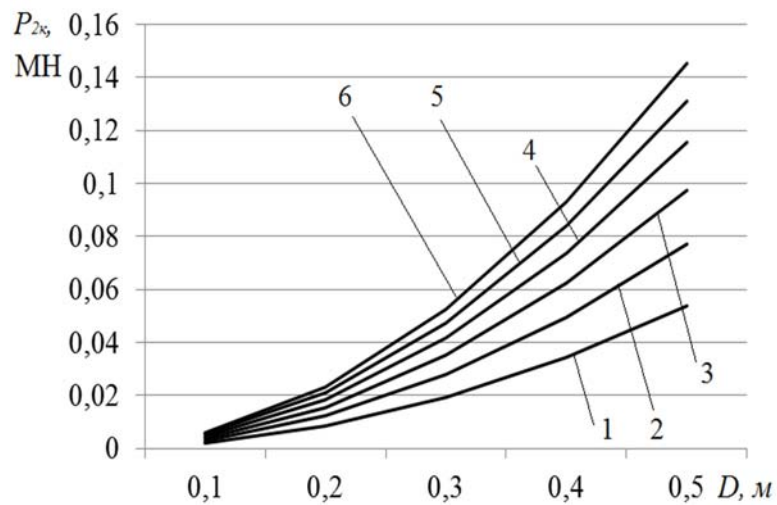
Залежності сили потискування для одно і двоконусного наконечників від різних діаметрів і ґрунтів приведені на рис. 3 та 4.

Аналіз графічного відображення розрахунків дозволяє зробити наступні висновки. У всіх випадках зі збільшенням діаметру наконечника сили опору ґрунту зростають. При цьому збільшення діаметра, наприклад в 2 рази від 0,2 м до 0,4 м, призводить до зростання сили опору ґрунту майже в 3 рази.

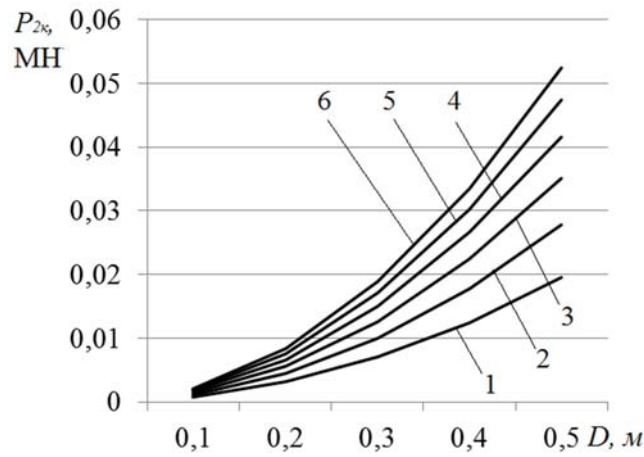
Збільшення відношення зовнішнього до внутрішнього діаметру від $\gamma=1,2$ до $\gamma=1,7$ призводить до зростання сил опору ґрунту для двоконусного наконечника в 2,8-3,0 рази, а для одноконусного в 2,1-2,4. Це пояснюється збільшенням лобової площі наконечника на фронтальну площину. При однакових умовах конструкція одноконусного наконечника майже на 30% ефективніше. Зіставлення сил опору ґрунту втисненню одноконусного наконечника з двоконусним показав, що перший також ефективніший більш ніж на 25%.



а)

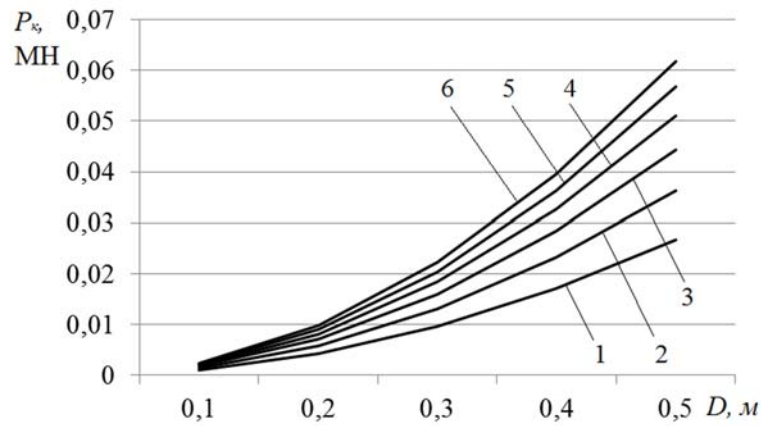


б)

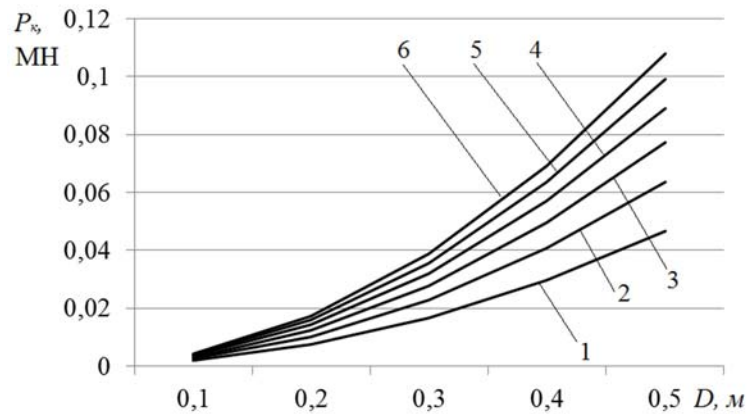


в)

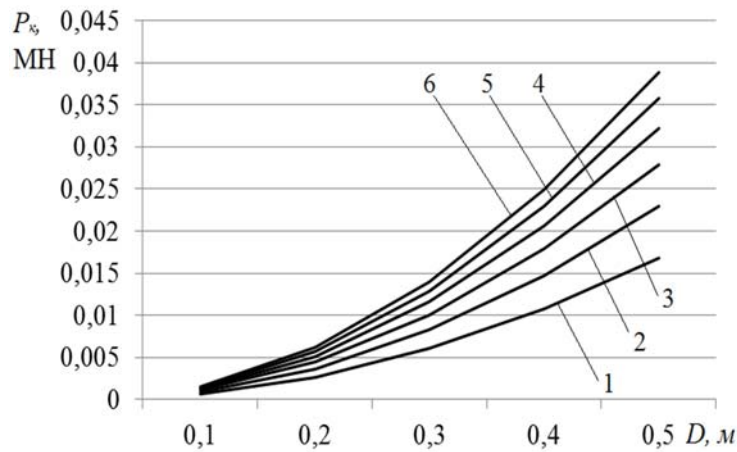
Рис.4. Залежність сили опору $P_{2к}$ від діаметру двоконусного наконечника D при різних значеннях γ : 1 – $\gamma=1,2$; 2 – $\gamma=1,3$; 3 – $\gamma=1,4$; 4 – $\gamma=1,5$; 5 – $\gamma=1,6$; 6 – $\gamma=1,7$ для різних типів ґрунтів: а) напівтвердого суглинку; б) твердого супіску; в) тугопластичної глини.



а)



б)



в)

Рис.5. . Залежність сили опору P_k від діаметру одноконусного наконечника D при різних значеннях γ : 1 – $\gamma=1,2$; 2 – $\gamma=1,3$; 3 – $\gamma=1,4$; 4 – $\gamma=1,5$; 5 – $\gamma=1,6$; 6 – $\gamma=1,7$ для різних типів ґрунтів: а) напівтвердого суглинку; б) твердого супіску; в) тугопластичної глини.

Аналіз графічного відображення розрахунків дозволяє зробити наступні висновки. У всіх випадках зі збільшенням діаметру наконечника сили опору ґрунту зростають. При цьому збільшення діаметра, наприклад в 2 рази від 0,2 м до 0,4 м, призводить до зростання сили опору ґрунту майже в 3 рази.

Збільшення відношення зовнішнього до внутрішнього діаметру від $\gamma=1,2$ до $\gamma=1,7$ призводить до зростання сил опору ґрунту для двоконусного наконечника в 2,8-3,0 рази, а для одноконусного в 2,1-2,4. Це пояснюється збільшенням лобової площі наконечника на фронтальну площину. При однакових умовах конструкція одноконусного наконечника майже на 30% ефективніше. Зіставлення сил опору ґрунту втисненню одноконусного наконечника з двоконусним показав, що перший також ефективніший більш ніж на 25%.

Висновки. Отримані аналітичні залежності в порівнянні з раніше встановленими розрахунками сил опору більш повно відповідають процесам протискування ґрунту кільцевим робочим органом, за рахунок використання відомих показників ґрунту та параметрів конусних наконечників, які використовуються для формування горизонтальної свердловини.

Аналіз отриманих результатів дозволив провести порівняльну оцінку конструкцій кільцевого робочого органу з двоконусним наконечником та одно конусним. Встановлено, що сила опору ґрунту протискування двоконусним кільцем при однакових умовах порівняно

з одноконусною насадкою буде більшою на 25...30%. У зв'язку з тим, що двоконусний наконечник створює додатковий опір від деформування ґрунту внутрішнім конусом для зменшення зусилля протиснення більш ефективною буде схема наконечника тільки із зовнішнім конусом.

ЛІТЕРАТУРА

1. . Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / С.В. Кравец, Н.Д. Каслин, В.К. Руднев, В.Н. Супонев. – Х.: ООО «Фавор», 2008. – 256 с.
2. Полтавцев И.С. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства / И.С. Полтавцев, В.Б. Орлов, И.Ф. Ляхович – К.: «Будівельник», 1977. – 136 с.
3. Проходка подземных выработок в сыпучих породах / [Васильев Н.В., Гордиенко Б.И., Самойлов В.П. и др.]; под ред. А.С. Архангельского. – М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 205 с.
4. Демешко Е.А. Аналитический метод расчета усилий внедрения щитов в грунт / Тезисы доклада конференции молодых специалистов ЦНИИподземшахтстроая и ЦНИИСМинтрансстроем по подземному и шахтному строительству. – М., 1961. – С. 23 – 38.
5. Васильев С.Г. Подземное строительство неглубокого заложения / Васильев С.Г. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1980. – 144 с.
6. Григорьев А.С. Обоснование и выбор параметров продавливающих установок для бестраншейной технологии строительства подземных инженерных коммуникаций: дис. канд. тех. наук: 05.05.06 / Григорьев Александр Сергеевич. – М., 2005. – 112 с.
7. Кантович Л.И. Результаты исследования продавливающих установок для бестраншейной технологии строительства подземных инженерных коммуникаций / Л.И. Кантович, В.П. Ружицкий, С.М. Григорьев, А.С. Григорьев // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 2 – 5.
8. Машина для проходки скважин диаметром до 400 мм и забивание труб / К.С. Гурков, В.В. Климашко, В.В. Мухаев [и др.] // Механизация строительства. – 1977. – №7. – С. 20 – 21.
9. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (напряжённо –деформированные и прочностные характеристики грунтов) /М.Н. Гольштейн. – М.: Стройиздат, 1979, -304с.
10. Ешуткин Д.Н. Высокопроизводительные гидropневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций /Д.Н. Ешуткин, Ю.М. Смирнов, В.М. Цой, В.Л. Исаев.- М.: Стройиздат, 1990, -176с.