

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

СУПОНЄВ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 624.132.3

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ТА ПРАКТИКА СТВОРЕННЯ
МІНІМАЛЬНОЕНЕРГОСМНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ
КОМУНІКАЦІЙНИХ ПОРОЖНИН В ҐРУНТІ

05.05.04 – машини для земляних, дорожніх і лісотехнічних робіт

13 – механічна інженерія

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі будівельних та дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кравець Святослав Володимирович,
Національний університет водного господарства
й природокористування, м. Рівне, завідувач кафедри
будівельних, дорожніх, меліоративних машин
і обладнання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сукач Михайло Кузьмич,
Київський Національний університет будівництва
та архітектури, професор кафедри будівельних
і дорожніх машин.

доктор технічних наук, професор
Маслов Олександр Гаврилович
Кременчуцький Національний університет
імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри
галузевого машинобудування

доктор технічних наук, професор
Мусійко Володимир Данилович,
Національний транспортний університет, м. Київ,
професор кафедри дорожніх машин.

Захист відбудеться «26» березня 2020 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 64.059.01 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна) та на сайті університету: <https://www.khadi.kharkov.ua/science/specializovani-vcheni-radi/d-6405901/opriljudnennja-disertacii-ta-vidgukiv/>

Автореферат розісланий «20» лютого 2020 року

Учений секретар
спеціалізованої Вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



Р.В. Смолянюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне забезпечення життєдіяльності населення, особливо у великих містах, неможливо уявити без якісного постачання енергоносіїв, води та каналізаційного відводу відходів. Постійний розвиток інфраструктури населених пунктів, широке впровадження сучасних технологій інформаційного забезпечення вимагає прокладання нових мереж. Великі обсяги земляних робіт і трудомісткість супутніх операцій створюють значні труднощі щодо використання траншейного способу прокладання інженерних комунікацій в обмежених умовах щільної забудови міст. Альтернативою цього є безтраншейні технології виконання робіт.

З аналізу типорозмірів інженерних комунікацій розподільні мережі складають понад 85%. Для їх прокладання необхідно утворювати горизонтальну свердловину відносно невеликого діаметру – до 400 мм та довжиною підземних прольотів до 100 м.

Найбільш ефективними для прокладання підземних комунікацій в визначених умовах є малогабаритні машини і установки, які створюють горизонтально спрямовані свердловини шляхом статичного проколювання та продавлювання ґрунту. Але ці методи мають суттєві недоліки, які обмежують їх використання, це: значні задавлюючі зусилля, низька точність і недостатня відстань проходки та великі зони деформації ґрунту навколо свердловини.

З вище викладеного можливо визначити господарську проблему, яка полягає в забезпеченні безтраншейного прокладання розподільних інженерних комунікацій діаметром до 400 мм в стислих міських умовах з використанням високоефективних установок статичної дії для формування горизонтальних свердловин в ґрунті методами проколу, продавлювання та їх комбінаціями на довжину прольотів до 100 м за рахунок керованого процесу.

Значна енергоємність та низька якість проходки свердловини розглянутими методами, їх малі значення ККД і визначають актуальність пошуку нових ефективних рішень по інтенсифікації процесу формування горизонтальних свердловин при безтраншейному прокладанні інженерних комунікацій.

Отже, актуальною науковою проблемою є забезпечення більш ефективного та керованого формування горизонтальних свердловин для безтраншейного прокладання розподільних підземних комунікацій шляхом узагальнення наукових основ створення установок і обладнання, обґрунтування їх раціональних конструктивних параметрів та створення силового типоряду установок, розширення області використання та технологічних можливостей статичних методів формування комунікаційних порожнин в ґрунті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження дисертаційної роботи виконано у відповідності до наукових напрямків та завдань державних науково-технічних програм: «Енергетична стратегія розвитку України на період до 2030 року» (Постанова Кабінету Міністрів України №145-р від 15 березня 2008 р.), «Концепція розвитку, модернізації та переоснащення газотранспортної системи України на 2009–2015 роки» (Постанова

Кабінету Міністрів України №1417-р від 21 жовтня 2009 р.). Дослідження також виконувалися відповідно науковому напрямку кафедри будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ), пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України на період до 2020 року, зазначеними в Законі України від 9 вересня 2010 р. №2519-IV про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11 липня 2001 р. № 2623-III), а також плану науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт НВП «Газтехніка» «Розвиток і впровадження нової техніки підприємства на період 2012-2017 роки» за темою: «Розробка технологій безтраншейного прокладання розподільних газопроводів з полімерних матеріалів».

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей процесів формування горизонтальних свердловин спеціальним землерийним обладнанням методами статичного проколу і продавлювання ґрунту, їх комбінацій і створення алгоритмів для розрахунку технічних і конструктивних параметрів установок, їх робочих органів у вигляді конусних, конусно-циліндричних, загостреного кільця (кільцеподібний) і асиметричних наконечників на основі закону рівності мас ґрунту до і після його руйнування з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту та технологічних аспектів його розробки.

Основні завдання дослідження:

1. Виконати системний аналіз результатів досліджень процесів проколу і продавлювання ґрунту та сформулювати науково обґрунтовані передумови підвищення їх ефективності.

2. Обґрунтувати підходи до удосконалення існуючих наукових положень, теорій процесів взаємодії робочих органів для проколу і продавлювання ґрунту, їхніх комбінацій та на основі закону рівності мас ґрунту до і після його руйнування отримати узагальнені теоретичні залежності їх розрахунку з урахуванням відомих фізико-механічних характеристик ґрунтів та технологічних особливостей методів їх розробки.

3. Розробити метод розрахунку процесу статичного проколу ґранту та виконати комплексні дослідження впливу форми наконечника ґрунтопроколюючої головки на режимні параметри створення свердловин з урахуванням властивостей поширених типів ґрунтів.

4. Розробити метод розрахунку процесу статичного продавлювання ґрунту та виконати комплексні дослідження впливу форми наконечника ґрунтопродавлюючої головки на режимні параметри продавлювання ґрунтів з урахуванням властивостей їх поширених типів.

5. Розробити метод розрахунку процесу керованого проколу ґрунту та виконати комплексні дослідження впливу форми наконечника ґрунтопроколюючої головки на режимні параметри проколу ґрунтів з урахуванням властивостей їх поширених типів.

6. Розробити методику експериментальних польових досліджень процесів статичного методів формування комунікаційних порожнин в ґрунті та створити експериментальні установки, стенди та натурні зразки

наконечників робочих органів для відтворення процесів, підтвердити їх працездатність і провести порівняння отриманих опитних даних з теоретичними розрахунками.

7. За результатами запропонованих методологічних основ створення високоефективних робочих органів для статичного формування комунікаційних порожнин розробити алгоритм вибору типу робочого обладнання відповідно до обраної технології та запропонувати інженерні методики визначення їх раціональних параметрів з урахуванням фізико-механічних властивостей поширених типів ґрунтів.

Головна наукова ідея роботи полягає в підвищенні ефективності роботи спеціальних установок для створення горизонтальних свердловин при безтраншейному прокладанні підземних комунікацій на основі нового наукового підходу, що ґрунтується на законі збереження маси ґрунту до і після його руйнування.

Об'єкт дослідження є процеси взаємодії проколюючих, продавлюючих та комбінованих робочих органів з ґрунтом.

Предмет досліджень – закономірності процесів взаємодії з ґрунтом та створення наконечників робочих органів, які забезпечують керованість і мінімальні енергетичні витрати процесів утворення порожнин у ґрунті статичними методами, які призначені для безтраншейного прокладання інженерних комунікацій.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей процесів формування горизонтальних свердловин спеціальним землерийним обладнанням статичної дії та розробка методологічних основ створення мінімально енергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті методами проколу і продавлювання ґрунту та їх комбінації.

Наукова новизна та положення, які виносяться на захист. Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні узагальнених теоретичних залежностей, які вперше отримані на основі закону рівності мас ґрунту до і після його руйнування та нормативних фізико-механічних властивостей ґрунтів, що сприяють створенню спеціальних високоефективних землерийних установок для безтраншейного прокладання інженерних комунікацій на базі встановлених закономірностей взаємодії їх робочих органів з ґрунтовим середовищем методами статичного проколу ґрунту, його продавлюванням та їх комбінаціями. Зокрема **вперше** одержані наступні результати:

- обґрунтовані передумови підвищення ефективності безтраншейного прокладання підземних інженерних комунікацій за рахунок раціонального використання методів статичного проколу та продавлювання ґрунту і їх комбінації при створенні комунікаційних порожнин;

- отримані теоретичні залежності процесів формування свердловин в ґрунті та виконані комплексні дослідження впливу на режимні параметри виконання робіт форм наконечників проколюючих голівок у вигляді конусних,

конусно-циліндричних, загостреного кільця і асиметричного наконечника з урахуванням властивостей поширених типів ґрунтів;

- визначено величину зниження опору ґрунту при його проколі конусним наконечником з виступом та з умови мінімізації витрат зусиль встановлено його мінімально ефективний діаметр, який дозволив отримати розміри оптимального діаметру свердловини та межі ефективного використання методу проколу ґрунту, за якими слід переходити на інші методи формування свердловини;

- встановлено теоретичні залежності для визначення зони деформації ґрунту навколо кільцеподібних наконечників з зовнішнім конусом відповідно до їх параметрів, діаметру свердловини та властивостей поширених типів ґрунтів;

- визначено конструктивні та режимні параметри роботи асиметричного (зрізаного циліндра) наконечника ґрунтопроколюючої головки для керованого проколу в залежності від конструкції штанг, їх матеріалу і ґрунтового середовища, розроблені рекомендації для проектування траєкторії траси з максимально допустимим відхиленням руху головки від прямої осі;

- обґрунтовано області ефективного використання методів статичного формування комунікаційних порожнин в ґрунті, визначено алгоритми розрахунку раціональних параметрів робочих органів з конусно-циліндричним, кільцеподібним і асиметричним (зрізаним циліндром) наконечниками робочих органів та режимних параметрів приводу установок;

- розрахунками економічної ефективності обґрунтовано рекомендації для створення силового типоряду установок статичної дії з можливістю комбінації методів проколу і продавлювання ґрунту та керування траєкторією руху при створенні горизонтальних свердловин для безтраншейного прокладання розподільних інженерних комунікацій, що знаходяться в межах до 400 мм діаметром та довжиною до 100 м;

- розроблено узагальнені теоретичні положення процесів створення горизонтальних свердловин методами статичного проколу, продавлювання ґрунту та їхніх комбінацій на підставі запропонованого уявлення про зміну закону щільності ґрунту при ущільненні, що визначається компресійним модулем деформації ґрунту, який залежить від фізико-механічних властивостей ґрунтів і дозволяє отримати закони розподілення нормального тиску ґрунту на робочі поверхні виконавчих інструментів на основі закону збереження ґрунтової маси до та після його ущільнення (без проведення експериментальних досліджень);

- новизна пристроїв для формування горизонтальних свердловин шляхом статичного задавлювання робочих органів у ґрунт при безтраншейному прокладанні комунікацій, для яких загальним є раціональність конструктивних параметрів їх наконечників, підтверджена 9 патентами України.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в обґрунтуванні вибору високоефективних методів статичного формування свердловин для безтраншейного прокладання інженерних комунікацій в залежності від їх технологічних особливостей прокладання і умов ґрунтового середовища та в

створенні алгоритму визначення раціональних параметрів робочих органів і наконечників для їх реалізації. На основі розроблених алгоритмів та отриманих інженерних розрахунків було складено технічне завдання на створення типоряду установок, які були прийняті ТОВ «НВП «Газтехніка ЛТД» та ТОВ СКТБ «Гідромодуль» для впровадження в виробництво: для лідерного проколу ґрунту – малогабаритна установка – МП-125; для проколу ґрунту, його поетапного розширення конусними розширювачами або кільцевими робочими органами та можливістю окремого продавлювання ґрунту кільцеподібним наконечником – МП-250М; для гвинтового проколу ґрунту - УГ-2; для керованого проколу – установки МП-250К та УКР-180 з телеметричною системою контролю СКР-2.4; для формування свердловин в ґрунті під різними кутами статичними методами та бурінням – універсальна установка УБГТ-180.

Для їх впровадження було розроблено технологічні карти виконання робіт по безтраншейному прокладанню комунікацій. Практичне використання при будівництві переходів установки отримали в цілому ряді спеціалізованих та будівельних компаніях, а саме: ДП «Спеціалізоване управління механізованих робіт», ТОВ «Харьковспецстрой-1» та ТОВ «Перша слобідська будівельна компанія».

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі при вивченні студентами спеціальних дисциплін «Машини для земляних робіт», «Динаміка БДМ», «Машини для підземного прокладання інженерних комунікацій» для студентів спеціальності 6.05.05.03 «Машинобудування» та 133 «Галузеве машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно та опубліковані у роботах [1–56]. Роботи [21–23, 28–29, 32, 36] були опубліковані без співавторів. У друкованих працях, які опубліковані у співавторстві, автору належать: обґрунтування ефективності використання методів статичного формування горизонтальних свердловин шляхом проколу та продавлювання ґрунту, що призначені для безтраншейного прокладання розподільних мереж, які обмежуються діаметром до 400 мм та довжиною прольотів до 100 м, та висунуто ідею раціонального розроблення комунікаційних порожнин шляхом комбінації цих методів [1–5, 8–12, 19, 23]; розроблення аналітичних залежностей по визначенню силових параметрів розробки ґрунту різними наконечниками на основі закону зміни щільності ґрунту при ущільненні, що визначається компресійним модулем деформації ґрунту, який залежить фізико-механічних властивостей ґрунтів та дає можливість отримати закономірності розподілення нормального тиску ґрунту на робочі поверхні виконавчих інструментів на основі закону збереження ґрунтової маси до та після його ущільнення (без проведення експериментальних досліджень) [16, 17, 19–21, 27, 36]; встановлення закономірності утворення зон деформування ґрунту при просуванні робочих органів та визначенні їх розмірів [6, 7, 13, 15, 24, 26, 28, 33]; формулюванні підходів до визначення параметрів робочого органу у вигляді зрізаного циліндра та оцінки їх вплив на траєкторію руху головки в ґрунті, встановлено мінімальний

та максимальний кут його зрізу в залежності від ґрунтового середовища та жорсткості штанг [14, 19, 22, 25, 31]; формулюванні ідеї створення обладнання для реалізації робочих процесів розробки ґрунту з натурними зразками моделей наконечників робочих органів та перевірки теоретичних положень дисертації та обґрунтовані типоряду силових установок для створення горизонтальних порожнин в ґрунті робочим обладнанням для проколу, продавлювання ґрунту та їх комбінації [23, 30, 32, 34, 35, 37]; розробка нових конструкцій наконечників робочих органів для формування свердловин в ґрунті статичними методами [38–46] та удосконалення гідравлічного приводу установок для статичного формування свердловин в ґрунті [3, 51–53, 56]; оцінка фактичного стану інженерних комунікацій, визначення їх надійності та розробка рекомендацій по впровадженню безтраншейних технологій їх реновації [47–50, 54, 55].

Апробація результатів дисертації. Окремі розділи і дисертація в цілому обговорювалися і отримали позитивну оцінку на науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах: на Міжнародній науково-практичній конференції «Нові досягнення в дослідженнях будівельних, дорожніх і підйомно-транспортних машин» (м. Харків, ХНАДУ, 2014), Міжнародній науково-технічній конференції «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2015» (Росія, м. Казань, КГАСУ, 2014), VI Всеукраїнському науковому семінарі «Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур» (м. Харків, ХНУБА, 2014), Konferencyjne Foraz 2014: Techniki I technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja (Krakov, Republic of Poland, Stycznia 14-18, Instytut Nafty i Gazu, 2014), на конференціях: «Ефективне будівництво. Об'єкти будівництва, технології та матеріали» (м. Одеса, ОГАСА, 2015), Міжнародній науково-технічній конференції: «Нові досягнення в дослідженнях будівельних, дорожніх і підйомно-транспортних машин» (м. Харків, ХНАДУ, 2016), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів: «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (м. Полтава, ПНТУ ім. Ю.Кондратюка, 2016), Modern methods, Innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference (Radom, Republic of Poland, December 27–28, Radom Academy of Economics, 2017), Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення ефективності піднімально-транспортних, будівельних, дорожніх машин і комплексів» (м. Дніпро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2018), Міжнародній науково-практичній конференції «Underwater Technologies» (м. Київ, КНУБА, 2019).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані в 56 друкованих працях, в тому числі, в монографії, навчальному посібнику, підручнику, 37 статтях фахових видань (3 з яких входять до наукометричної бази даних SCOPUS та 2 – в міжнародних виданнях), 9 – у матеріалах і тезах збірників доповідей на Всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях. По темі роботи отримано 9 патентів України на винаходи.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 259 найменувань (26 сторінок) та

5 додатків. Повний обсяг роботи складає 419 сторінок, в тому числі 331 сторінок основного тексту, 24 таблиці, 149 ілюстрацій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано стан та актуальність наукової проблеми, подано загальну характеристику роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет, основні завдання дослідження та шляхи їх розв'язування. Викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, показано апробацію роботи.

У **першому розділі** розглянуто стан питання по темі досліджень. Наведено аналіз технологій та обладнання для безтраншейного прокладання інженерних комунікацій при будівництві переходів під дорогами, трамвайними та залізничними коліями, тимчасовими спорудженнями, парковими зонами та інше.

Встановлено, що в світовій практиці існує багато різних методів прокладання підземних інженерних комунікацій, які призначені для вирішення конкретних технологічних питань при будівництві інженерних мереж з урахуванням їх призначення та особливостей. Більшість з них була зорієнтована на прокладання трубопроводів і їх захисних футлярів з сталевих труби. Останнім часом з появою нових сучасних матеріалів для їх виготовлення (поліетилену, склопластику та інших), активно почали розвиватися технології безтраншейного прокладання інженерних мереж, які за способом розробки ґрунту умовно можна класифікувати на три групи: з радіальним вдавненням ґрунту в масив, з видаленням ґрунту на зовні та комбінованим методом.

Як показав аналіз технічних характеристик установок та машин для створення горизонтальних комунікаційних порожнин в ґрунті визначеним умовам найбільш відповідають установки статичної дії, які мають малі габарити та найкращі показники економічної ефективності. Згідно з розрахунками вони мають мінімальний узагальнений показник ефективності Π_{NG} , який в декілька разів менший, ніж для установок динамічного проколу і в десятки разів менший для установок шнекового буріння та проколу.

Робочі органи статичної дії можна класифікувати за їх призначенням та формі наконечників, які забезпечують ефективну роботу установок. На рис. 1 показано, які наконечники відповідають методам проколу ґрунту, його продавлюванню та комбінованому методу. Якщо метод проколу розрахований на повне радіальне витиснення ґрунту у стінки свердловини, то метод продавлювання навпаки розрахований на повну екскавацію ґрунту на зовні. Звісно, що в першому випадку створення свердловини буде значно дешевшим. Комбінований метод займає проміжне місце. Визначені особливості методів і їх установок впливають на сфери їх ефективного використання, які треба враховувати при проектуванні мереж. До головних недоліків, що суттєво обмежує область їх використання з довжиною переходів до 25 м є низька точність проходки та можливість руйнування основи доріг та прилеглих комунікацій від деформованого ґрунту.

Таким чином, для безтраншейного прокладання важливого та практичного значення набуває розширення уявлення про закономірності процесів формування

горизонтальних свердловин спеціальним землерийним обладнанням методами статичного проколу і продавлювання ґрунту та їх комбінаціями і створення узагальненого підходу для теоретичного розрахунку технічних та конструктивних параметрів установок і наконечників у вигляді конусних, конусно-циліндричних, кільцеподібних і асиметричних наконечників на основі закону рівності мас ґрунту до і після його руйнування з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту та технологічних аспектів його розробки.



Рисунок 1 – Обладнання статичної дії та форми наконечників робочих органів для створення свердловин в ґрунті

Для повного розуміння процесів проколу ґрунту необхідно мати уявлення по теорії механіки ґрунтів та базові положення по теоріях їх руйнування. Тому були проаналізовані дослідження відомих вчених в цій галузі. О.М. Зеленіна, М.Г. Домбровського, В.Л. Баладінського, В.І. Баловнєва, Ю.В. Вєтрова, А.М. Холодова, В.К. Руднєва, В.В. Нічке, Л.В. Назарова, Д.І. Федорова, Л.А. Хмари, С.В. Кравця та інших, якими створені наукові основи теорії різання та копання ґрунтів, використання яких вирішить питання щодо встановлення раціональних параметрів ріжучого та проколюючого обладнання згідно заданих умов їх роботи.

Дослідженнями процесів створення порожнин в ґрунті статичними методами займалося багато вчених: по проколу ґрунту – А.С. Вазетдінов, І.С. Полтавцев, В.К. Тимошенко, Н.І. Наумець, Ю.П. Кальнін, В.І. Конопльов, Н.К. Іпатов, В.В. Чижев, С.Г. Васильєв, В.Б. Орлов, С.Л. Хачатурян, Н.Є. Ромакін, В.М. Земсков й інші; по продавлюванню – В.П. Самойлов, Е.А. Демешко, Н.В. Васильєв, А.С. Григор'єв, В.І. Саричев, А.І. Панін, Н.І. Прохоров, І.І. Савін та інші; комбінованим – В.І. Саричевим, А.І. Паніним, Н.І. Прохоровим та І.І. Савіним. Дослідженню процесу корекції і управлінню

траєкторією при проколі ґрунту присвячений цілий ряд досліджень авторів: В.А. Бреннер Л.В. Лукієнко, К.А. Головін, А.Е. Пушкар'єв, М.Н. Каменський, В.В. Ленченко, Е.А. Меньшеніна, С.Е. Меньшенін, А.А. Репін, А.А. Рогачов, Н.І. Прохоров та інші.

Проведений системний аналіз робіт цих авторів показав переваги та недоліки існуючих теорій створення комунікаційних порожнин в ґрунті. Було встановлено, що більшість отриманих розрахункових залежностей мають вузько спеціалізовану направленість та носять емпіричний характер, отриманий по результатам експериментальних досліджень. Про це свідчать наявність прийнятих розрахункових коефіцієнтів і даних з довідникових відомостей про властивості ґрунтів. Відсутність аналітичних залежностей не дає можливості узагальнити результати досліджень для різних методів і ґрунтових умов, розширити уявлення про процеси та отримати узагальнений підхід до розрахунків раціональних параметрів робочого обладнання відповідно до технологічних задач, пов'язаних з утворенням горизонтальних свердловин в ґрунті. Це відображується на розбіжності результатів розрахунків зусиль проколу ґрунту відомими теоріями, що також підтверджує необхідність їх удосконалення.

У **другому розділі** представлено математичні моделі для визначення параметрів робочих процесів утворення ґрунтових порожнин методами проколу, продавливання та їх комбінаціями. Умовні позначення та вибір вихідних даних до розрахунків, які були використані при теоретичних дослідженнях наведені нижче.

D_K , $D_{\text{ц}}$ – діаметри основи конуса циліндра та конусно-циліндричного наконечника з виступами ($D_K > D_{\text{ц}}$);

D_{max} , $D_{\text{опт}}$ – максимальний і оптимальний діаметри конусно-циліндричного наконечника з виступами, м;

ω – вологість ґрунту у відсотках;

$f = \text{tg} \varphi$ – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту;

φ , φ_0 – кути зовнішнього та внутрішнього тертя ґрунту, град;

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту, МПа;

$\lambda = D_p / D$ – відношення діаметра зони пружно-пластичних деформацій

до діаметра конусного наконечника;

$\gamma_{\text{гр}}$ – питома сила тяжіння ґрунту, МН/м³;

$\rho_{\text{пр}}$, $\rho_{\text{тв}}$, ρ_x – щільність ґрунта в природному, в твердому та змінному стані, кг/м³;

σ_1 – напруження в ґрунті на границі пружної та пластичної зон, МПа;

$l_{\text{ц}}$ – довжина циліндричної частини конусно-циліндричного наконечника ($l_{\text{ц}} = 0,1-0,2$ м), м;

E_v – модуль об'ємної деформації, МПа;

$E_{\text{гр}}$ – компресійний модуль деформації, МПа;

$2\beta_K$ – кут загострення конусно-циліндричного наконечника ($2\beta_K = 45-50^\circ$);

$\bar{P}_{\text{пр}}$ – опір проколюванню конусно-циліндричного наконечника з виступами, МН;

l_n – довжина кільцеподібного наконечника, м;

$\gamma = D/d$ – відношення зовнішнього D до внутрішнього d діаметрів кільцеподібного наконечника;

$q_{кр}$ – критичний тиск на ґрунт за несучою спроможністю, МПа;

ξ – коефіцієнт бічного тиску;

β – кут нахилу еліптичної площини зрізаного наконечника до горизонту, град;

W – статичний момент перерізу наконечника, м³;

I – момент інерції поперечного перерізу наконечника, м⁴;

$[\sigma_{зг}]$ – гранично допустимі напруження матеріалу штовхаючих штанг на згин, МПа;

L_{min} – мінімальна довжина лінії прогину штанги або мінімальна довжина ділянки корекції траєкторії, м;

R_{min} – мінімальний гранично допустимий радіус згину штанг, м;

$E_{зг}$ – модуль пружності матеріалу штанг при згині, МПа;

f_{max} – максимально допустимий прогин штанг, м;

h – глибина прокладання підземних комунікацій, м;

q_3 – залишковий тиск на циліндричній частині наконечника, якщо $l_{ц} > 0,2$ м, ($q_3 = 0,016-0,035$ МПа), МПа;

q – погонна сила тяжіння штовхаючої штанги, Н/м;

S – поперечне відхилення асиметричного наконечника в залежності від довжини шляху (траси) L , м;

k_n – коефіцієнт постелі (основи) (для ґрунтів, $k_n = 5-50$ Н/см²);

N – числові коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних властивостей ґрунту та геометричних параметрів асиметричного наконечника (для супіску $N = 21,3$; для суглинку $N = 33,16$; для глини $N = 46,88$).

Для створення теорії формування ґрунтових порожнин у вигляді горизонтальних свердловин було закладено існуючі уявлення про процеси проколу та продавлювання ґрунту, а також фізико-механічні властивості найбільш поширених типів ґрунтів. Оскільки робочі процеси протікають з ущільненням ґрунту, то для визначення зміни його початкових природних властивостей були використані уявлення про компресію ґрунтів та їх природну вологість, які визначають практично всі властивості для кожного типу ґрунтів.

Розглянемо прокол ґрунту конусно-циліндричним наконечником, перед яким відсутнє постійне ґрунтове ядро ущільнення.

На рис. 2 наведено послідовність визначення лобової сили опору проколу ґрунту конусною частиною наконечника. На першому етапі було встановлено закономірність розподілу нормального тиску ґрунту на утворювану поверхню конусу, який представлений у вигляді (1). Цей тиск визначається щільністю ґрунтів в природному і твердому стані, його вологістю і коефіцієнтом компресії. Згідно із законом рівності мас ґрунту до його ущільнення та після деформування (див. формулу 2) з урахуванням (1) закон зміни тиску прийняв вигляд, який наведено у формулі (3)

$$q_x = \frac{(1 + \omega) \rho_{тв}}{c_k} \left(\frac{1}{\rho_{пр}} - \frac{1}{\rho_x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\pi D^2}{4} \rho_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - 4x^2) \rho_x, \quad (2)$$

$$q_x = E_{\text{гр}} \left(\frac{2x}{D} \right)^2. \quad (3)$$

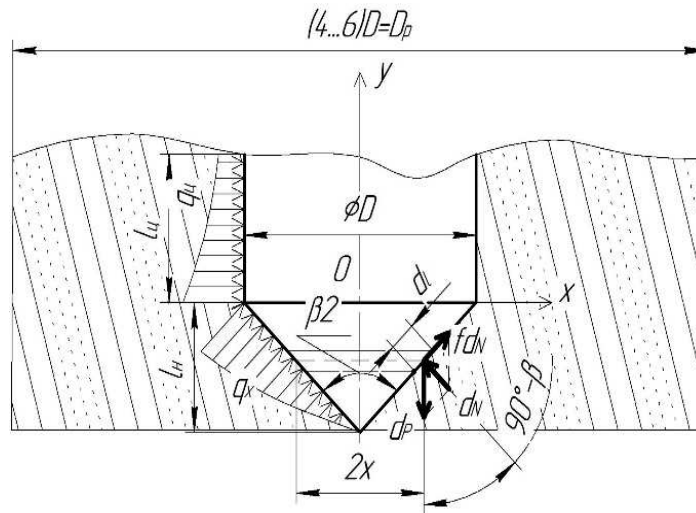


Рисунок 2 – Схема розподілу ґрунтового тиску на поверхні конусно-циліндричного наконечника для проколу ґрунту

Закономірність зміни тиску на бічній поверхні конусу для різних ґрунтів представлено на рис. 3, з якого видно, що він має нелінійний характер, який до цього визначався експериментально.

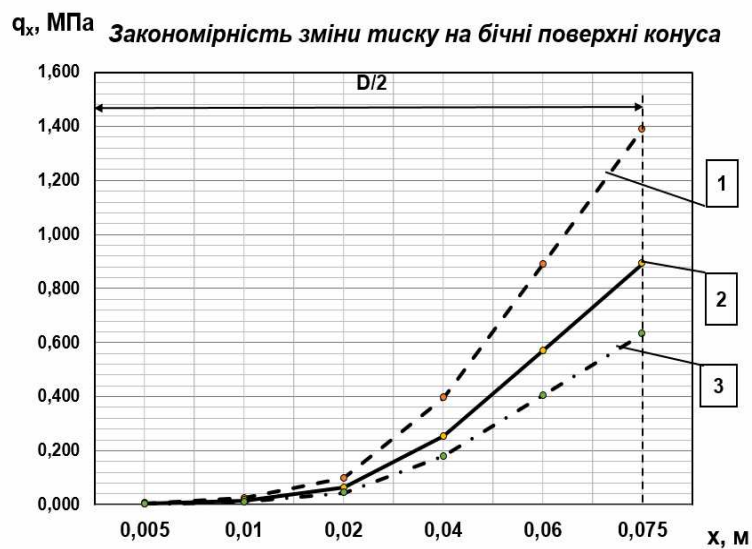


Рисунок 3 – Закономірність зміни тиску на бічну поверхню конусу в ґрунтах: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

На основі знання закону розподілу нормального тиску шляхом інтегрування його по конусній поверхні було отримано силу опору проколу ґрунту конусом (4)

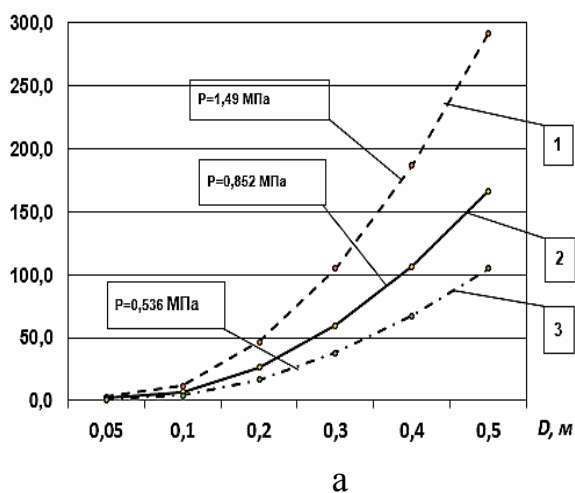
$$P_{\text{пр}} = \frac{\pi E_{\text{гр}} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta). \quad (4)$$

Графічне зображення залежності сили опору проколюванню конусом залежно від діаметру утворюваної свердловини приведено на рис. 4 а.

Залежність опору ґрунту з урахуванням його бічного тиску на циліндричну частину наконечника має вигляд (5). З графічного зображення розрахунків (рис. 4б) при їх порівнянні з попереднім видно, що опір ґрунту на боковій поверхні досягає, наприклад, при довжині циліндричної частини наконечника 0,5 м складає до 40% від загальної опору.

$$P_{\Sigma} = \frac{\pi E_{\text{гр}} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + 0,1 \pi \lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_{\text{ц}} - 0,2) q_3. \quad (5)$$

$P_{\text{пр}}, \text{кН}$ Залежність зусилля заглиблення конусної частини наконечника



$P_{\Sigma}, \text{кН}$

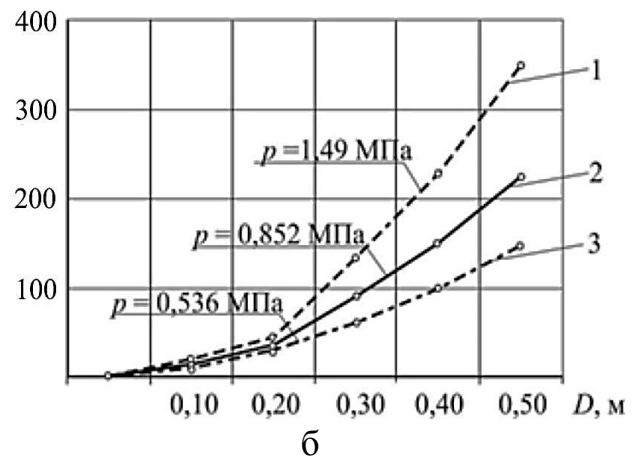


Рисунок 4 – Залежності лобового та сумарного опору переміщенню конусно-циліндричного наконечника від діаметра (при $l_{\text{ц}} = 0,5 \text{ м}$) в різних типах ґрунтів: а – лобовий опір проколу; б – сумарний опір проколу
1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок;
3 – тугопластична глина; p – питомий опір проколу

Для усунення витрат зусиль тертя на циліндричну частину наконечника конусну частину наконечника необхідно робити з виступами в його основі. З умови рівності сумарної сили опору ґрунту наконечників з виступом $D_{\text{к}} > D_{\text{ц}}$ та без виступів $D_{\text{к}} = D_{\text{ц}} = D$ було отримано залежність (6) для визначення еквівалентного діаметра наконечника. Його залежність від діаметра свердловини має лінійний характер.

З умови усунення дії пружних деформацій на циліндричну частину наконечника його пружної деформації визначено зниження сил опору при проколі ґрунту конічним наконечником з виступами та встановлено його мінімальний діаметр (7), що усуває цю дію, який при роботі в супіску дорівнює 1,08 від діаметра циліндричної частини (свердловини), в глині – 1,22 та в суглинку – 1,31

$$D_e = D \sqrt{1 + 8f \frac{0,1\lambda\sigma_1 + (l_{\text{ц}} - 0,2)q_3}{DE_{\text{гр}}(1 + f \cdot \text{ctg}\beta)}} \quad (6)$$

$$D_{\text{к}}^{\text{min}} = D \left(1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right). \quad (7)$$

З графіка видно (рис. 5), що зниження сил опору може досягати до 10 кН, що дозволяє максимально знизити опір ґрунту проколу, наприклад при діаметрі свердловини 0,1 м до 40%. Оскільки з графіків видно, що існує оптимум зниження зусилля проколу і максимальні діаметри при яких зниження вже не відбувається.

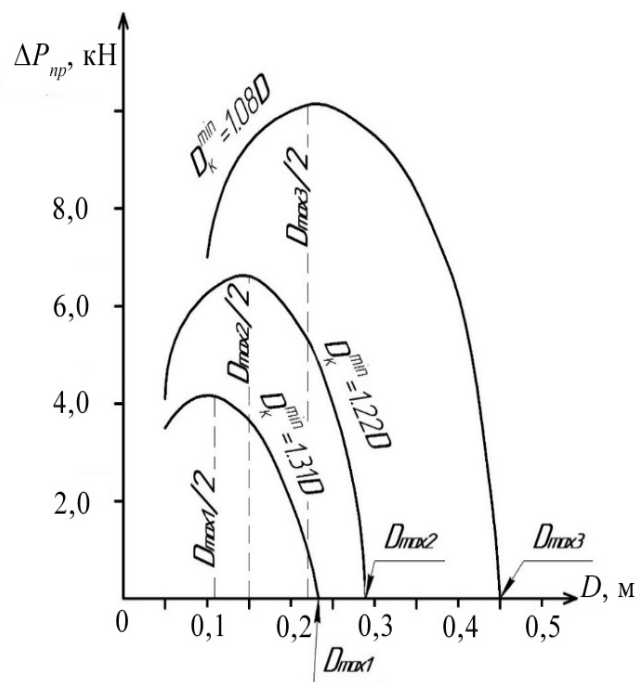


Рисунок 5 – Залежність опору проколу ґрунту та його мінімального діаметра

Шляхом диференціювання закономірностей зниження сили опору по діаметру свердловини були отримані залежності для визначення оптимального (8) та максимально ефективного діаметрів (9) конічних наконечників з виступами, які дорівнюють для суглинку – 236 мм, для глини – 295 мм та для супіску – 444 мм, що дорівнюють двом оптимальним діаметрам. Якщо діаметр свердловини більший за максимально-граничний, то прокладання підземних комунікацій необхідно здійснювати не проколом, а іншими способами, наприклад, продавлюванням або комбінованими методами

$$D_{\text{опт}} = 4 \frac{0,1f\lambda\sigma_1 + f(l_{\text{ц}} - 0,2)q_3}{\left[\left(1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right)^2 - 1 \right] E_{\text{гр}} (1 + f\text{ctg}\beta)}, \quad (8)$$

$$D_{\text{max}} = 8f \frac{0,1\lambda\sigma_1 + (l_{\text{ц}} - 0,2)q_3}{\left[\left(1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right)^2 - 1 \right] E_{\text{гр}} (1 + f\text{ctg}\beta)}. \quad (9)$$

Процес продавлювання ґрунту був розглянутий, як процес взаємодії кільцеподібного наконечника з загостреною кромкою (рис. 6). Для визначення сили опору ґрунту при його продавлюванні кільцеподібним наконечником з двоконусним загостренням був прийнятий аналогічний прийом як і при проколі. Спочатку із закону збереження ґрунтових мас та встановленої залежності зміни щільності ґрунту були отримані закономірності нормального тиску ґрунту на внутрішню та зовнішню конусні поверхні наконечника.

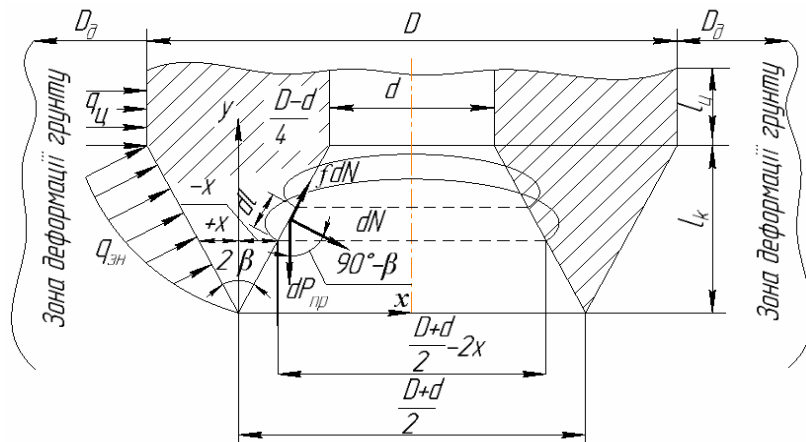


Рисунок 6 – Схема взаємодії кільцеподібного наконечника з ґрунтом

Потім, з урахуванням його розподілу та інтегрування по поверхні обох конусів отримано залежності для визначення сил опору ґрунту для двоконусного та для одноконусного наконечників (10)

$$P_{\text{к}} = \pi E_{\text{гр}} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \left(\frac{3\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[1 - \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{\frac{(\gamma+1)^4}{\gamma^2}}{128 \left[1 - \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma} \right)^2 \right]} \right) \frac{D^2}{\gamma^2}. \quad (10)$$

Графічні зображення залежності сил опору ґрунту продавлюванню кільцеподібним наконечником з зовнішнім конусом для типових ґрунтів наведені на рис. 7. У всіх випадках зі збільшенням діаметра 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.

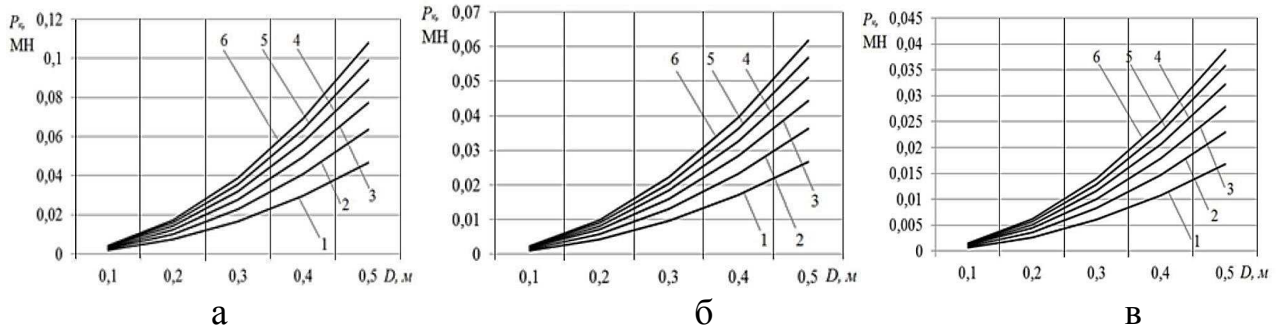


Рисунок 7 – Залежність сили опору P_k від діаметра одноконусного наконечника D при різних значеннях γ :
 1 – $\gamma = 1,2$; 2 – $\gamma = 1,3$; 3 – $\gamma = 1,4$; 4 – $\gamma = 1,5$; 5 – $\gamma = 1,6$; 6 – $\gamma = 1,7$
 для різних типів ґрунтів: а – напівтвердого суглинку;
 б – твердого супіску;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

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 % ефективніша. Зіставлення сил опору ґрунту втисненню одноконусного наконечника з двоконусним показав, що перший - ефективніший більш, ніж на 25 %. Тому для подальших досліджень був вибраний кільцеподібний наконечник з зовнішнім конусом.

Визначення максимальної довжини кільцеподібного наконечника (рис. 8) та його сили тертя переміщенню (11) було отримано з умови рівноваги елементарних сил (12) і незабиваємості внутрішньої порожнини частини наконечника (13) та представлена в графічному вигляді (рис. 9), з якого видно, що довжина керну, який визначає потрібну довжину наконечника суттєво залежать від типу ґрунту та внутрішнього діаметру наконечника, яка змінюється в межах від 0,4 м до 1,2 м відповідно для діаметрів 14 та 35 см.

Умова рівноваги елементарних сил має вигляд:

$$\frac{\pi d^2}{4} \sigma_x - \pi d f \xi \sigma_x \partial x - \frac{\pi d^2}{4} (\sigma_x + \partial \sigma_x) = 0. \quad (11)$$

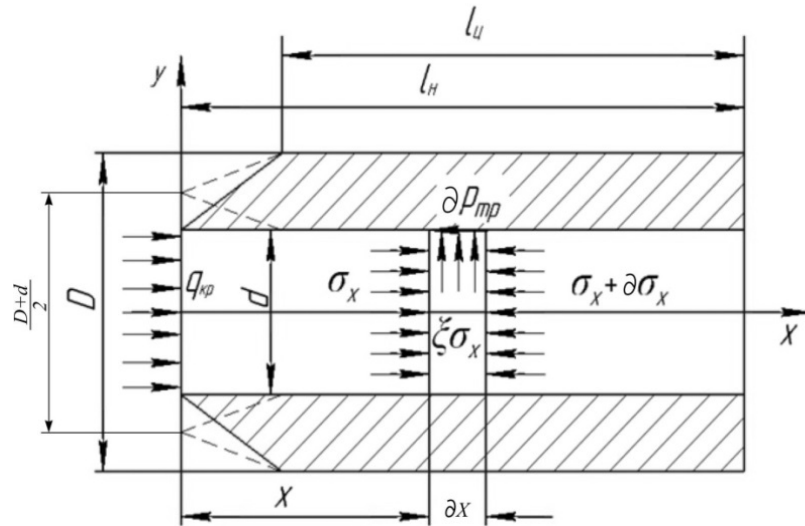


Рисунок 8 – Розрахункова схема для визначення довжини ґрунтового керну

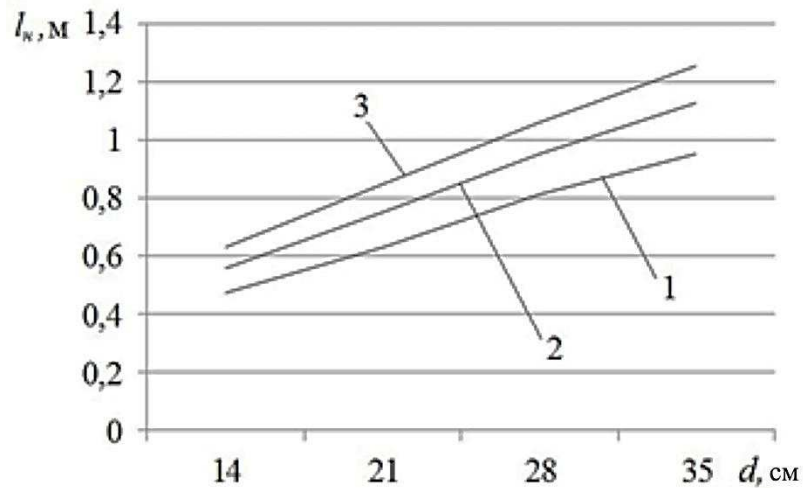


Рисунок 9 – Графічне зображення залежності довжини наконечника від внутрішнього діаметра труб для ґрунтів:
1 – для твердого супіску; 2 – для напівтвердого суглинку;
3 – для тугопластичної глини

Сила тертя по внутрішній поверхні дорівнює:

$$P_{\text{тр}}^{\text{вн}} = \frac{\pi d^2}{4} q_{kp} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{4f\xi l_n}{d}}} \right). \quad (12)$$

З умови незабиваємості наконечника ґрунтом:

$$q_{kp} \frac{\pi d^2}{4} > \frac{\pi d^2}{4} q_{kp} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{4f\xi l_n}{d}}} \right) + \frac{\pi d^2}{4} l_n \gamma_{\text{гр}}. \quad (13)$$

Із умови руху визначається максимальна довжина наконечника

$$l_{\text{н}} e^{\frac{4f_{\Sigma} l_{\text{н}}}{d}} < \frac{q_{\text{кр}}}{\gamma_{\text{гр}}} . \quad (14)$$

Розрахунки по отриманій залежності для визначення сумарного опору ґрунту продавлюванню кільцеподібним наконечником з зовнішнім конусом (15), з яких видно (рис. 10), що опір наконечника суттєво залежить від типу ґрунту в якому він працює та може змінюватися в 3–4 рази.

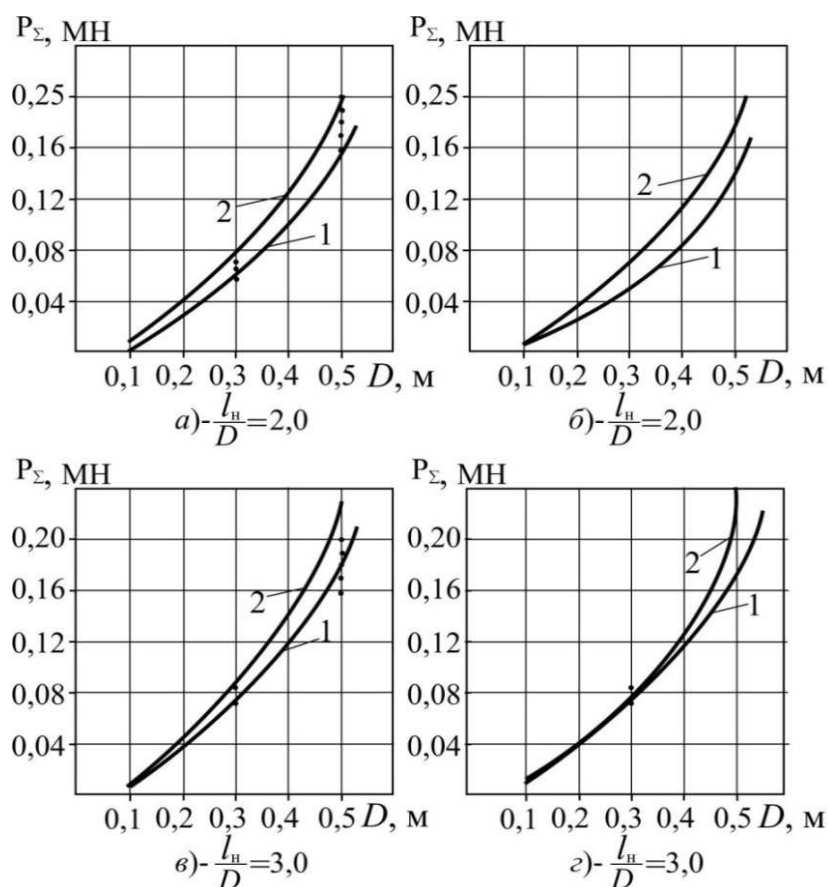


Рисунок 10 – Залежності сумарного зусилля переміщення кільцеподібного наконечника:

а, в – для твердого супіску (1 – $\gamma = 1,2$; 2 – $\gamma = 1,7$); б, г – для тугопластичної глини (1) та напівтвердого суглинку (2) ($\gamma = 1,2-1,7$)

Залежність від співвідношення зовнішнього діаметра його циліндричної частини до внутрішнього від 1,2 до 1,7 показала, що сила опору може коливатися від 2 до 4 рази в залежності від типу ґрунту. В залежності від довжини циліндра в межах $1,5 D-3,0 D$ для цих ґрунтів опір може змінюватися до 37 %. Залежність сили опору ґрунту від діаметра циліндра має нелінійний характер і з його збільшенням має суттєвий зріст (рис. 11).

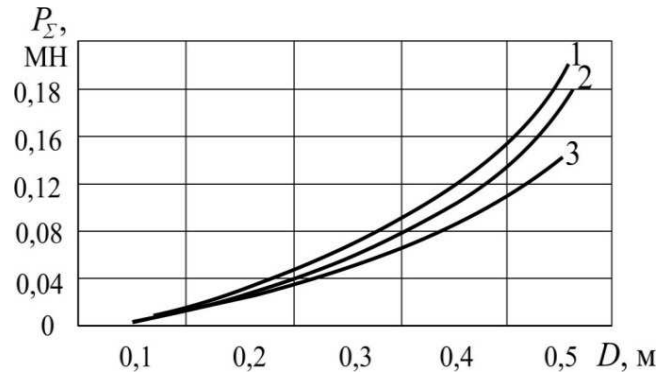


Рисунок 11 – Залежності сумарного зусилля продавлювання від діаметра наконечника при $\gamma = 1,4$ та $l_n/D = 2$ для різних ґрунтів:
1 – напівтвердий суглинок; 2 – твердий супісок; 3 – тугопластична глина

Так, наприклад, для напівтвердого суглинка з довжиною циліндра $2D$ та для $\gamma = 1,4$ при зміні діаметра від $0,2$ до $0,3$ м сила опору збільшується з $0,03$ МН до $0,067$ МН, а при зміні діаметра з $0,4$ м до $0,5$ м сила опору зростає з $0,12$ МН до $0,186$ МН

$$P_{\Sigma} = \pi E_{\text{гр}} (1 + f \text{ctg} \beta) \cdot \left[\frac{3\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[1 - \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{\frac{(\gamma+1)^4}{\gamma^2}}{128 \left[1 - \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma} \right)^2 \right]} \right] \frac{D^2}{\gamma^2} + \frac{\pi D^2}{4\gamma^2} q_{\text{кр}} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{4f\xi l_n}{D}}} \right) + \pi D \sigma_1 f l_n. \quad (15)$$

Важливим питанням з наукової та практичної точки зору є визначення величини зони деформування ґрунту кільцеподібним наконечником із зовнішнім конусом. Для цього запишемо рівняння (16) рівності мас ґрунту до і після ущільнення його наконечником

$$\left[\frac{\pi D_p^2}{4} - \frac{\pi \left(\frac{D+d}{2} \right)^2}{4} \right] \rho_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4} (D_p^2 - D^2) \rho_{\text{сер}}. \quad (16)$$

Звідки, з урахуванням залежності з визначення середньої щільності ґрунтової порожнини (17) та після перетворювань вираз для діаметра зони руйнування прийме вигляд (18).

$$\rho_{\text{сер}} = \frac{\rho_{\text{пр}}}{1 - \frac{1}{\lambda^2}}, \quad (17)$$

$$D_p = \sqrt{\lambda^2 D^2 - (\lambda^2 - 1) \left(\frac{D+d}{2} \right)^2}. \quad (18)$$

Якщо ввести $\gamma = \frac{D}{d}$ та прийняти, що відповідно даним С.В. Кравця $\lambda = 5,4-6,0$ – для твердого супіску; $\lambda = 4,3-4,8$ – для напівтвердого суглинку; $\lambda = 4,0-4,3$ – для тугопластичної глини отримаємо залежність D_p/d від відношення діаметрів γ , яка в графічному вигляді приведена на рис. 12.

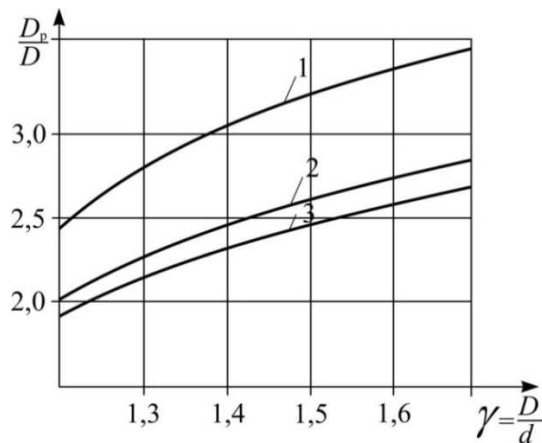


Рисунок 12 – Залежність відношення діаметра зони пружно-пластичних деформацій (зони руйнування) до діаметра ґрунтової порожнини від співвідношення зовнішнього до внутрішнього діаметрів наконечника з кільцеподібним перерізом
1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

Із рис. 12 видно, що величина зони руйнування прямопропорційно збільшується із збільшенням діаметра ґрунтової порожнини D і непрямопропорційно зростає із зростанням співвідношення зовнішнього та внутрішнього діаметрів наконечника. Відношення D_p/D знаходиться в межах: для твердого супіску – $D_p/d = 2,46-3,55$; для напівтвердого суглинку – $D_p/d = 2,02-2,85$; для тугопластичної глини – $D_p/d = 1,91-2,67$.

Теоретичні дослідження процесу керованого проколу асиметричним наконечником були вирішені на основі уявлення про ефективну траєкторію руху робочого органу у ґрунті. В дослідженнях було запропоновано керування траєкторією проколу здійснювати за рахунок сил опору ґрунту на лобову частину головки, яка утворюється у вигляді еліпса в перерізі площиною циліндра, що нахилена під кутом β до осі. Розрахункова схема дії сил опору ґрунту на наконечник проколюючої головки з нахиленою еліптичною площиною представлена на рис. 13.

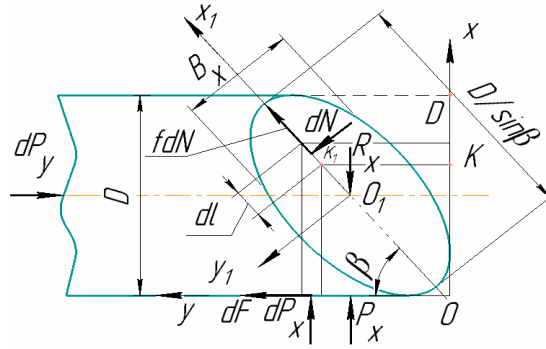


Рисунок 13 – Розрахункова схема наконечника з похилою площиною

Для розрахунку сили осьового зусилля опору ґрунту проколу необхідно встановити її залежність від параметрів площини зрізу циліндра та від кута нахилу β . Для цього в напрямку осі OX_1 зробимо переріз наконечника під кутом β до його осі та виділимо елементарну площадку, довжина якої dl . Значення її ширини B_x , може бути визначено шляхом тригонометричних співвідношень до рівняння поперечного перерізу – еліпса:

$$B_x = 2\sqrt{(D-x)x}. \quad (19)$$

Вирішення системи рівнянь балансу сил відносно координатних осей дозволили отримати інтегральне визначення осьової сили P_y в залежності від кута похилу β площини (20).

$$P_y = 2 \int_0^D \left[(1-f^2) + 2f \operatorname{ctg} \beta \right] \sqrt{(D-x)x} q dx. \quad (20)$$

Закономірність зміни тиску ґрунту на похилій площині визначається за змінною площею поперечного перерізу ґрунту на цій площині, яка на основі закону рівності мас (21) має вигляд (22)

$$\frac{\pi D^2}{4 \sin \beta} \rho_{\text{пр}} = \frac{B_x (D-x) \rho_x}{\sin \beta}; \quad (21)$$

$$q = \frac{(1+\omega) \rho_{\text{ТВ}}}{C_k \rho_{\text{пр}}} \left[1 - \frac{8(D-x) \sqrt{(D-x)x}}{\pi D^2} \right]. \quad (22)$$

Після інтегрування виразу (20) було отримано:

$$P_y = 0,36 \frac{(1+\omega) \rho_{\text{ТВ}}}{C_k \rho_{\text{пр}}} \left[(1-f^2) + 2f \cdot \operatorname{ctg} \beta \right] D^2. \quad (23)$$

Аналогічним чином отримаємо вираз для визначення P_x :

$$P_x = 0,36 \frac{(1+\omega) \rho_{\text{ТВ}}}{C_k \rho_{\text{пр}}} (\operatorname{ctg} \beta - f) D^2. \quad (24)$$

Залежності сил P_y і P_x для різних ґрунтів приведені на рис. 14.

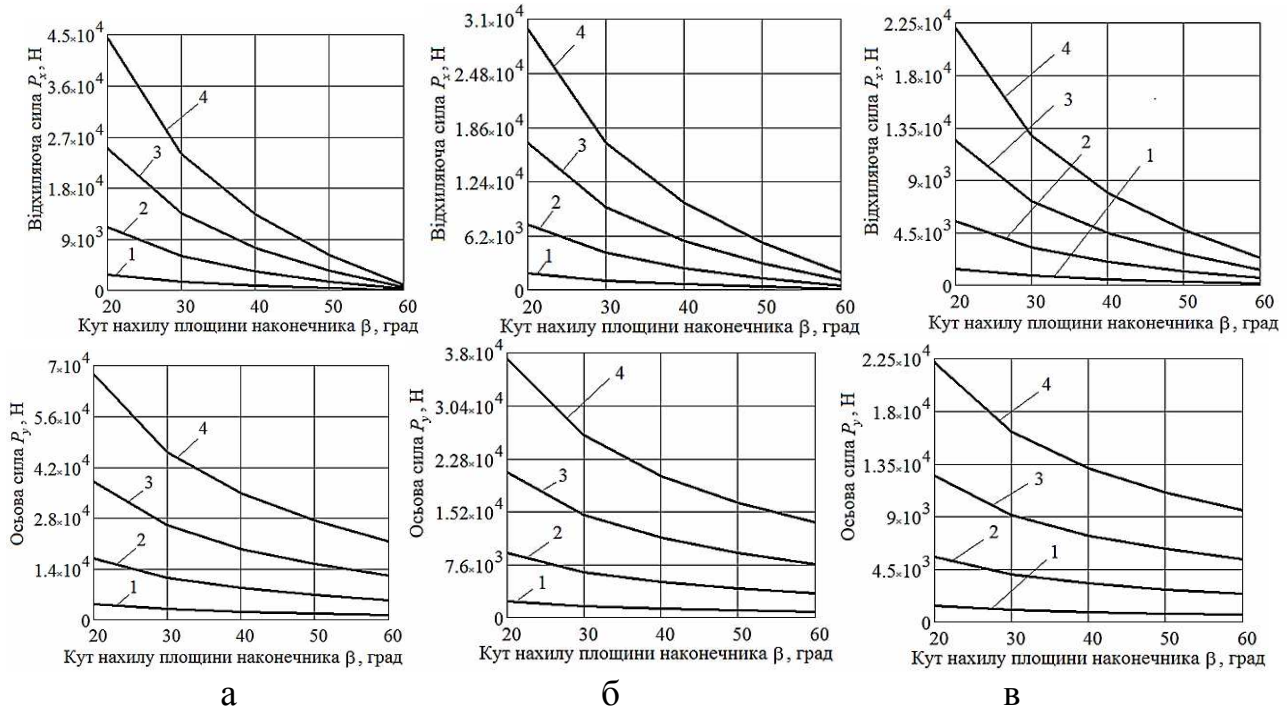


Рисунок 14 – Залежності сил опору від кута нахилу для різних ґрунтів при різних значеннях діаметрів свердловини:

а – супісок; б – суглинок; в – глина;

1 – $D = 0,05$ м; 2 – $D = 0,1$ м; 3 – $D = 0,15$ м; 4 – $D = 0,2$ м

З наведених графіків (рис. 16) видно, що ці сили залежать від кута нахилу лобової поверхні головки, її діаметру та типу ґрунту. Розглянемо умову руху ґрунту вгору по похилій еліптичній площині (див. рис. 13). Активна сила P_y викликає реакцію зі сторони ґрунту $R_y = P_y$. Під дією цієї реакції ґрунт рухається вгору по похилій еліптичній площині. При цьому сумарна сила тертя ґрунту $F_{тр}$, яка направлена в протилежну сторону руху (реакції ґрунту R_y), повинна бути більшою за силу тертя ґрунту та задовольняти умові $R_y \cos \beta \geq F_{тр}$. Із цієї умови визначений кут β , що забезпечує рух ґрунту на похилій площині та відхилення від прямолінійної траєкторії руху.

$$\beta < \arcsin \sqrt{\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{f}{1+f^2} \right)^2}}. \quad (25)$$

Допустимий робочий кут нахилу β зрізаної площини наконечника до горизонту визначений із умови міцності штанги на згин під дією сили P_x (27):

$$\beta \geq \operatorname{arccotg} \left(f + \frac{8W[\sigma_{зг}] - qL_{\min}^2}{1,44E_{гp}D^2L_{\min}} \right). \quad (26)$$

Залежність допустимого кута β із умови міцності штанги на згин приведена на рис. 15. Графіки побудовані для штанг із сталі 45 ($[\sigma_{зг}] = 300 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; $E = 21 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $f_{\max} = 0,3 \text{ м}$).

Аналіз графічних залежностей показав, що із збільшенням діаметра ґрунтової порожнини від 0,05 до 0,2 м критичний кут нахилу також збільшується: у твердому супіску від 6° для штанг діаметром 0,1 м до 57° для штанг діаметром 0,05 м; аналогічно в напівтвердому суглинку від 4° до 60° ; у тугопластичній глині від 3° до 61° . Такі закономірності пояснюються тим, що із збільшенням діаметра порожнини збільшується лобова площа наконечника та поперечне згинаюче зусилля. А тому для стабілізації згинаючого штангу моменту необхідно збільшувати кут нахилу площини наконечника до горизонту.

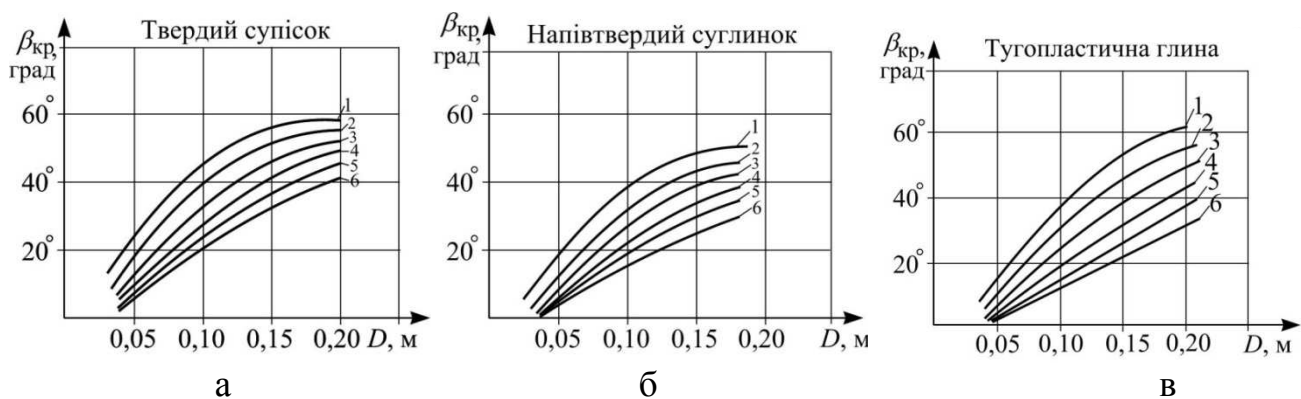


Рисунок 15 – Залежність допустимого робочого кута нахилу лобової площини наконечника (головки) до горизонту:
а – для твердого супіску; б – для напівтвердого суглинку; в – для тугопластичної глини; 1 – $D_{шт} = 0,05 \text{ м}$; 2 – $D_{шт} = 0,06 \text{ м}$; 3 – $D_{шт} = 0,07 \text{ м}$; 4 – $D_{шт} = 0,08 \text{ м}$; 5 – $D_{шт} = 0,09 \text{ м}$; 6 – $D_{шт} = 0,1 \text{ м}$

Для визначення максимального відхилення головки в ґрунті необхідно знати рівняння згину осі наконечника, яке залежить від параметрів наконечника та фізико-механічних властивостей ґрунту. Наконечник з приводними штангами будемо розглядати як балку на пружній основі, на яку діє реакція ґрунту $R_x = P_x$. Розрахункова схема і рівняння для визначення прогину (відхилення) під силою R_x для такої задачі приведена на рис. 13

$$\Delta_{пр} = \frac{R_x}{8E_{зг}I\beta_n^3} \quad (27)$$

де $E_{зг}$ – модуль пружності штанги при згині ($E_{зг} = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$); I – момент інерції поперечного перерізу наконечника

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{k_n}{4E_{зг}I}} \quad (28)$$

де k_n – коефіцієнт постілі (основи) (для ґрунтів середньої щільності, $k_n = 5\text{--}50 \text{ Н/см}^2$).

Тоді з урахуванням моменту інерції кільцевого перерізу штанги залежність (27) прийме вигляд

$$\Delta_{\text{пр}} = 0,9 \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{зг}}} \cdot \frac{\text{ctg}\beta - f}{D^2 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_n^3}. \quad (29)$$

Після припинення обертального руху наконечника для навантаження його похилої площини силою R_x йому необхідно переміститися на відстань $D \text{ctg}\beta$ (див. рис. 13). При цьому наконечник відхилиться від траєкторії прямолінійного руху на відстань $\Delta_{\text{пр}}$. Щоб відхилитися наконечнику від траєкторії прямолінійного руху на відстань S , йому необхідно пройти шлях без передачі крутного моменту (без обертання) довжиною L , тому

$$L = \frac{SE_{\text{зг}} D^3 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_n^3}{0,9 E_{\text{гр}} (1 - f \cdot \text{tg}\beta)}. \quad (30)$$

Залежність відношення L/S від кута нахилу площадки наконечника до горизонту β приведена на рис. 16.

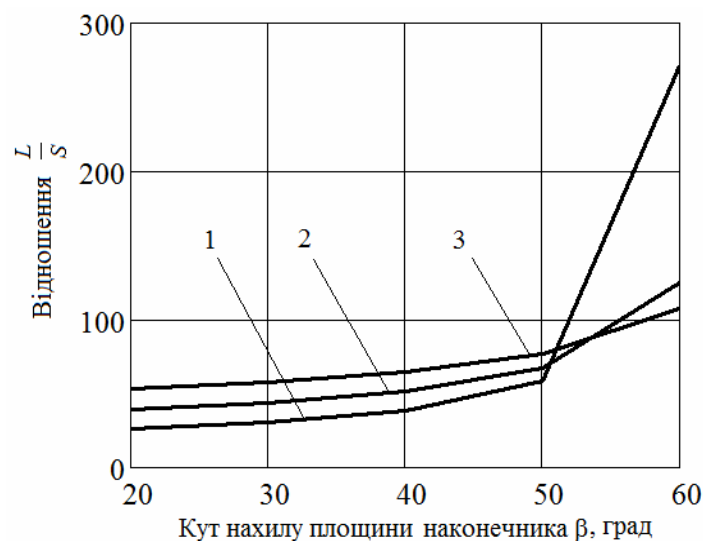


Рисунок 16 – Залежність відношення L/S від кута нахилу площадки наконечника до горизонту β для різних ґрунтів:

1 – супісок; 2 – суглинок; 3 – глина

З отриманого графіка видно, що з ростом значення кута нахилу площини наконечника відхилення траєкторії зменшується. Найбільшого відхилення від прямої траєкторії руху проколююча головка досягає при меншому куті нахилу площини, тобто у межах $30\text{--}40^\circ$ в залежності від типу ґрунту. При куті нахилу більш ніж $60\text{--}70^\circ$ рух ґрунту на площині припиняється, про що свідчать умови управління траєкторією руху головки, які відображені на графіку, рис. 16. При

цьому на похилій поверхні виникає ядро ущільнення, яке за своєю формою приближається до симетричного конуса, на якому врівноважуються сили в просторі і які не можуть вплинути на процес відхилення наконечника.

Третій розділ присвячено розробленню методики і програми проведення експериментальних досліджень, метою яких є підтвердження отриманих наукових основ створення горизонтальних свердловин робочим обладнанням, яке реалізує методи статичного формування комунікаційних порожнин в ґрунті.

Згідно з отриманими вимогами до установок, що реалізують статичні методи створення горизонтальних свердловин в ґрунті, було спроектовано та виготовлено універсальну експериментальну установку (рис. 17), в основу якої був покладений принцип створення малогабаритного гідравлічного приводу, який забезпечує поступовий та обертовий рух робочого органу. Силкові можливості установки було закладено відповідно до теоретичних розрахунків сил опору ґрунту, які виникають при формуванні свердловини кожним з методів формування свердловин, що розглядаються.

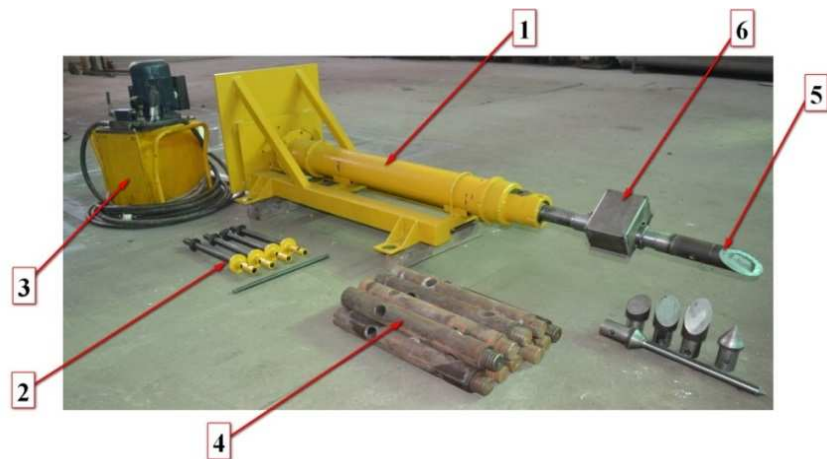


Рисунок 17 – Експериментальна установка для дослідження процесів статичного формування порожнин у ґрунті:

- 1 – силова проколююча установка; 2 – гвинтові якоря;
3 – гідравлічна станція; 4 – штовхаючі штанги; 5 – наконечник робочого органу; 6 – з'єднувальна муфта з пристроєм для виміру крутного моменту

Експериментальна установка (1) являє собою раму з опорною плитою та встановленим на ній гідроциліндром, яка закріплюється на дні приямку гвинтовими анкерами (2). Силний привід являє собою гідроциліндр з діаметром циліндру 125 мм і діаметром штоку 55 мм. Робота установки здійснюється за допомогою гідравлічної рідини, що надходить від гідравлічної станції (3) з тиском 16 МПа, яке забезпечується насосом НШ-10. Швидкість прямого ходу, відповідно до цих умов, становить 0,05 м/с, а зворотного 0,065 м/с. Максимальне робоче зусилля осевого натиснення установки складає 200 кН. Шток гідроциліндра з'єднаний з набірними штангами (4), які, в свою чергу, поєднані з проколюючою головою (5) через спеціально розроблений проміжний вузол для передачі штовхаючих зусиль на штанги або вузол для виміру крутного моменту (6).

Особливістю силового приводу універсальної установки є наявність у середині силового циліндра несамогальмованої пари, що забезпечує можливість створювати як поступальний рух робочого органу, так і поступально-обертовий.

В процесі проведення досліджень визначалися фізико-механічні властивості ґрунтів, такі як: показник консистенції та його щільність, пористість і коефіцієнт пористості. З механічних показників – коефіцієнт компресії, питоме зчеплення, модуль деформації, кут внутрішнього та зовнішнього тертя. Визначення питомого зчеплення та кута внутрішнього тертя проводилось по методу одноплоскісного зрізу в приладі ПЛЛ-9 конструкції І.М. Литвинова.

Для проведення польових досліджень роботи обладнання було відрито дві паралельні траншеї на відстані 12 м одна від одної, яка визначена була розміром залікової ділянки 10 м. Одна з траншей з підчищеними місцями для розміщення установки виконувала роль стартового котловану, а друга траншея – роль прийомного котловану, в якому фіксувався вихід робочого органу.

З метою кількісної оцінки основних аналітичних залежностей, що описують процеси формування свердловини методами статичного проколу ґрунту, його продавлювання та шляхом їх комбінації робочими органами та їх відповідності при роботі в реальних ґрунтових умовах було створено їх натурні зразки наконечників робочих органів конусно-циліндричної, кільцеподібної та асиметричної (зрізаний циліндр) форми та інші (рис. 18). Головне завдання полягало у визначенні сил опору ґрунту в найбільш поширених його типах: у твердому супіску, у напівтвердому супіску і тугопластичній глині.



Рисунок 18 – Експериментальні зразки робочих органів та їх наконечників

Замір і реєстрація сил опору розробки ґрунту робочим обладнанням ґрунтопрокоючої установки здійснювалося шляхом вимірювання рівня тиску

рідини в поршневій порожнині гідроприводу установки. Фіксація рівня тиску здійснювалося тензоперетворювачем тиску ЕСО-1. Невід'ємною частиною реєструючої апаратури було її програмне забезпечення, за допомогою якого виконувалися запис, перегляд та конвертація збережених файлів в розширення *.dat, в якому результати вимірювань представлені у вигляді матриці, що дозволяє обробляти дані стандартними математичними методами.

Оскільки, багатofакторність процесів вже відображена в отриманих в теоретичному розділі математичних залежностях, то було поставлено ціль перевірити окремі положення теорії процесу. Для адекватності відтворювання процесу кількість замірів кожного типу наконечника була визначена не менше 4-5 разів з умови довірчого інтервалу 0,95, а їх розміри повинні охоплювати увесь діапазон розбігу отриманих теоретичних даних та складати не менше ніж три рівномірно розподілених точки.

Для дослідження процесів проколу ґрунту було розроблено експериментальну модель універсальної ґрунтопроколюючої головки з можливістю заміни наконечників та контролю його рухом, схематичний склад якої наведено на рис. 19.

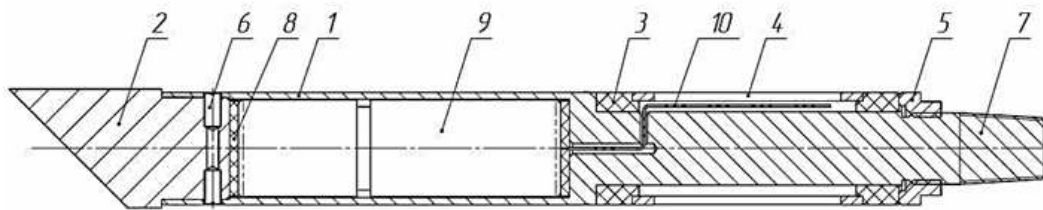


Рисунок 19 – Експериментальна модель ґрунтопроколюючої головки зі змінним наконечником та датчиком для контролю її положення в ґрунті: 1 – корпус головки; 2 – змінний наконечник; 3 – ізолятори; 4 – щілини випромінювача; 5 – гайка; 6 – штифт; 7 – хвостовик з різьбою для з'єднання зі штангою; 8 – прокладка; 9 – датчик сигналу; 10 – антена

Зовнішній та внутрішній діаметри циліндричної частини відповідають розмірам стандартної сталевих труби, з якої вона була зроблена, дорівнюють 65 мм та 48 мм відповідно. Її довжина, відповідно до розрахункових даних була прийнята 500 мм. Також в циліндричній частині передбачено відсік для розміщення датчика звукових коливань навігаційної системи. По периметру циліндра нарізані повздовжні щілини для випромінювання коливань на зовні.

Для контролю відхилення траєкторії проколу від прямолінійної осі проектної траси під час проколу та для визначення положення головки в ґрунті був застосований пошуковий прилад «СПРУТ-5М» і генератор частоти «ГІ СПРУТ-5М».

Для визначення впливу на процес керування ґрунтопроколюючої головки у масиві ґрунту від конструкції штанги та механічних властивостей їх матеріалу

було зроблено спеціальний стенд з можливістю моделювання відхилення штанг при їх поперечному навантаженні.

Для виявлення характеру зміни властивостей ґрунту навколо свердловини після його проколу конусно-циліндричним наконечником або при формуванні свердловини комбінованим методом кільцеподібним наконечник шляхом повного чи часткового ущільнення ґрунту була розроблена методика, згідно з якою з горизонтального зрізу на рівні проколу ґрунту вбік від свердловини необхідно було визначити його пористість та щільність по ударнику ДорНДІ.

Планування експериментальних досліджень взаємного впливу основних параметрів наконечників робочих органів для проколу і продавлювання ґрунту на опір їх переміщенню було проведено на основі теорій ймовірності і математичної статистики. Повторність дослідів (n) для однофакторного експерименту, визначалась на основі розподілу випадків величин, який описується законом Ст'юдента. З урахуванням відносної помилки середньої арифметичної величини, що замірюється $\varepsilon = 0,1-0,15$ та коефіцієнту варіації випадків величини $V = 0,1-0,2$ при надійності результатів 0,95 необхідна повторність дослідів складала 4–5.

В четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень зо перевірки теоретичних досліджень кожного положення теоретичних дослідів.

Визначені особливості фізики процесу створення горизонтальних свердловин у ґрунті методами його статичного проколу, продавлювання та їх комбінації полягають у наступному.

При продавлюванні ґрунту кільцево-трубчастим наконечником навколо свердловини після його радіального ущільнення виникають дві зони (рис. 20). Навколо свердловини – зона максимального стиснення ґрунту, тобто – зона руйнування. При цьому пористість ґрунту та кількість ударів ударника ДорНДІ на усьому протязі остається не змінною.

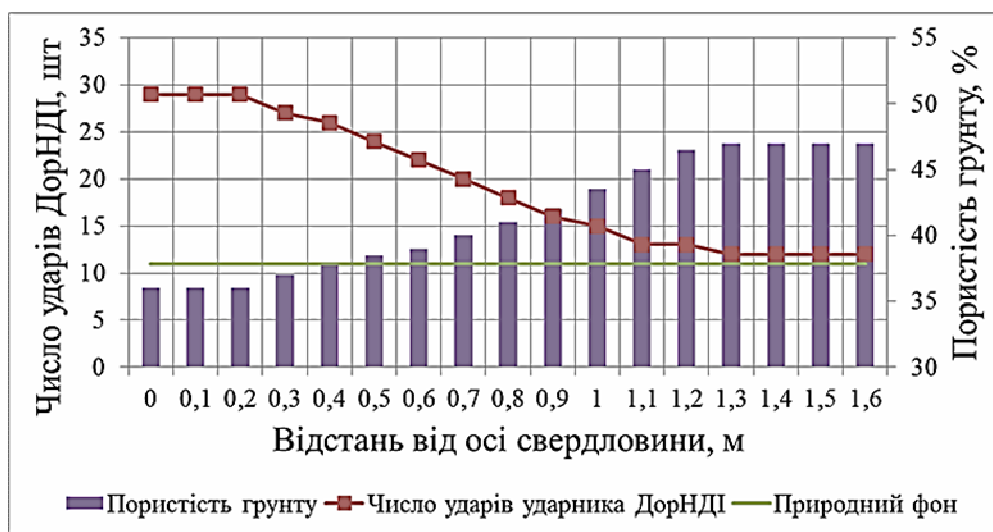


Рисунок 20 – Результати визначення щільності ґрунту в радіальному віддаленні від осі свердловини при його проколі кільцево-циліндричним наконечником діаметром 140 мм

Друга зона – характеризує пружний стан деформованого ґрунту, коли його щільність плавно зменшується поки не досягне природного стану. Перша дорівнює 3,9–4,6 від D – діаметра свердловини. Пористість в цієї зоні на 6,1 % менше, ніж у природному стані, а число ударів ударника ДорНДІ зростає майже в 2,5–3,0 рази. Перехід щільності ґрунту в другій зоні в залежності від діаметру свердловини складає декілька метрів. Наприклад, для конічного наконечника діаметром 140 мм ця зона досягає 1,5–1,8 м в залежності від типу ґрунту.

На відміну від процесу формування свердловини проколом при комбінованому методі з використанням кільцево-трубчастого наконечника з співвідношенням зовнішнього і внутрішнього діаметрів $\gamma = D/d = 1,4$, при якому забезпечується зменшення екскавації ґрунту на зовні в 2 рази зона руйнування буде менша також майже в 2 рази. А це означає, що і відстань проходження до прилеглих комунікацій або дорожньої основи може бути скорочена до 2 разів.

Порівняння отриманого експериментального співвідношення зони руйнування до діаметру свердловини з теоретичними розрахунками, яке склало $D_p/d = 2,02$ – $2,85$ для суглинки, та для глини – $D_p/d = 1,91$ – $2,67$, звідки можна заключити про достатню збіжність результатів, яка знаходиться в межах 10 %.

Результати експериментальних досліджень у цілому підтвердили теоретичні положення по визначенню параметрів робочих органів та їх впливу на опір ґрунту в залежності від його фізико-механічних властивостей при формуванні свердловини. Розходження розрахункових значень з опитними даними не перевищує 15%.

Збільшення відношення зовнішнього до внутрішнього діаметру конічно-циліндричних наконечників від $\gamma = 1,2$ до $\gamma = 1,6$ призводить до зростання сил опору ґрунту для двоконусного наконечника в 2,7–2,9 рази, а для одноконусного в 2,0–2,2, що підтверджує більш ефективнішу роботу наконечника з зовнішнім загостренням відносно до двоконусного на 25–30 %.

Експериментально підтверджено, що максимальне відхилення головки зі скошеним наконечником досягається при менших кутах нахилу лобової поверхні, а найменша величина відбувається в глині. Так, при дистанції проколу 10 м для кута 25° в супісі головка відхилюється на 40 мм, а в глині - на 20 мм. В той же час при куті 55° відхилення головки в цих же умовах склало 14 та 13 мм відповідно. При куті 70° вплив скосу лобової поверхні наконечника на процес втрачається.

Виробниче випробування натурального зразка установки підтвердило реальну можливість розробки свердловини до 400 мм, в тому числі і комбінованим методом. Експлуатаційна продуктивність спорудження підземного переходу складає 1,7 м/хв. Реальні переваги метода визначаються малими габаритами установки, скороченням об'єму видаленого ґрунту, зменшенням відстані до поверхні доріг та прилеглих комунікацій в 1,5–2 рази.

В п'ятому розділі наводиться алгоритм та методика створення робочого обладнання для статичного утворення ґрунтових комунікаційних порожнин діаметром до 400 мм на відстань до 100 м, які розроблені на основі проведених

досліджень, що ґрунтуються на отриманих знаннях робочих процесів. Вибір технологій створення ґрунтових порожнин і розрахунки параметрів робочого обладнання для їх реалізації визначаються умовами закладання захисного футляру в ґрунті, які встановлюються на стадії проектно-геологічних робіт, а саме: його діаметром, глибиною закладання, довжиною прольоту та фізико-механічними властивостями ґрунту.

Першою умовою алгоритму є відповідність глибини прокладання свердловини та її діаметра мінімально-допустимому значенню глибини закладання горизонтальної свердловин в конкретному типі ґрунту. Якщо умова по мінімальній глибині виконується, то свердловину виконують методом проколу. Якщо ні – методом продавлювання або комбінованим.

При розробці свердловини методом проколу головною умовою подальшого вибору технології розробки свердловини є її довжина. Якщо траса не перевищує гарантованої довжини прямолінійного проколу 20 м, свердловину можна утворювати трубою з конусним наконечником за один прохід або за декілька проходів шляхом утворення лідерної свердловини та її розширення конічними розширювачами. Якщо дистанція перевищує 20 м, лідерну свердловину слід утворювати керованим проколом шляхом почергової зміни форми головки наконечника з конусної на асиметричну та навпаки. Розширення свердловини до встановленого діаметру $D_{\text{св}}$ відбувається також конусними розширювачами.

Перевірка ефективності створення свердловини за умови мінімізації опору ґрунту проколу виконується шляхом порівняння заданого діаметру проколу з розрахунковим максимально ефективним – оптимальним діаметром свердловини $D_{\text{св}} \leq D_{\text{опт}}$, який визначається по залежності (10). Зусилля проколу визначаємо по залежності (7).

Якщо діаметр свердловини перевищує максимально-ефективну величину, яка дорівнює $D_{\text{max}} = 2D_{\text{опт}}$, то слід перейти на поетапну технологію утворення свердловини шляхом створення лідерної свердловини та її розширення конусними розширювачами.

Умовою використання комбінованого методу продавлювання ґрунту з кільцево-трубчастим наконечником є захищеність дорожнього полотна від пошкодження, коли відстань до свердловини буде меншою від зони руйнування ґрунту, яка утворюється при деформації навколо робочого органу при його просуванні і має вигляд:

$$H_{\text{пр}} \geq 0,5(D_p - D_{\text{св}}) = 0,5 \left(\sqrt{\lambda^2 D^2 - (\lambda^2 - 1) \left(\frac{D+d}{2} \right)^2} - D_{\text{св}} \right), \quad (31)$$

де

$$\lambda = \frac{\left(\gamma_{\text{гр}} h + \frac{c}{\text{tg} \varphi_0} \right) \text{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_p}{2} \right)}{\sigma_1}. \quad (32)$$

Створення свердловини кільцево-трубчастим наконечником, який використовується при методі продавлювання відбувається в режимі дискретно-поступального руху. Довжина просування обох типів наконечників визначається умовою забиваємості внутрішньої порожнини труби, яка визначає необхідну кількість циклів екскавації ґрунту визначаються залежностями, наведеним в дисертації.

Послідовність визначення параметрів і величини відхилення асиметричного наконечника в ґрунті для керованого проколу наступна:

1. Визначаємо кут нахилу лобової площини наконечника до горизонту із умови руху ґрунту по лобовій площині по залежності (28).

2. Визначаємо обмеження куту нахилу лобової площини наконечника до горизонту із умови міцності матеріалу штанги на згин по залежності (29).

3. Визначаємо осьову та поперечну сили, що діють на наконечник (24)–(25).

4. Вираховуємо поперечне відхилення циліндричного наконечника зі зрізаною еліптичною головкою в залежності від довжини пройденого шляху L по залежності (30) з урахуванням (31).

5. Визначаємо відстань, на яку розповсюджуються руйнівні деформації в ґрунті по залежності (18), або з графіка (рис. 12).

В шостому розділі дисертації наведені практичні результати дослідження, які полягають в створенні вискоєфективних та малогабаритних установок статичної дії для безтраншейного прокладання підземних комунікацій, що були прийняті до виробництва ТОВ «Науково-виробниче підприємство «Газтехніка ЛТД» разом з ТОВ СКТБ «Гідромодуль». Розроблені технічні завдання та розрахунки лягли в основу проектування та виготовлення установок, які наведені на рис. 20: для лідерного проколу ґрунту – малогабаритна установка – МП-125; для проколу ґрунту, його поетапного розширення конусними розширювачами або кільцевими робочими органами та можливістю окремого продавлювання ґрунту кільцеподібним наконечником – МП-250М; для гвинтового проколу ґрунту УГ-2; для керованого проколу – установки: МП-250К та УКР-180 з телеметричною системою контролю СКР-2.4; для формування свердловин в ґрунті під різними кутами статичними методами та бурінням – універсальна установка УБГТ-180. Всі установки пройшли виробничі та експлуатаційні випробування. Рекомендовані до використання при безтраншейному прокладанні підземних комунікацій. Для їх впровадження було розроблено технологічну карту виконання робіт по безтраншейному прокладанню комунікацій. Установки пройшли практичне випробування при будівництві переходів. Установки пройшли випробування в цілому ряді спеціалізованих та будівельних компаніях, а саме: ДП «Спеціалізоване управління механізованих робіт», ТОВ «Харьковспецстрой-1» та ТОВ «Перша слобідська будівельна компанія».

В дисертаційній роботі визначено перспективний напрямок для подальшого дослідження, який пов'язаний з використанням гвинтового робочого органу для формування свердловин у ґрунті. Його використання приводить до зменшення силової дії на ґрунтопроколюючий робочий орган та прилеглий ґрунт, зменшення деформування ґрунту навколо свердловини, підвищення точності проколу та зняття напруженого стану штанг завдяки тягнутої сили від гвинтового приводу.



Рисунок 20 – Установки, які розроблені за результатами дисертаційних досліджень та прийняті до виробництва «Науково-виробничим підприємством «Газтехніка ЛТД» та ПТЦ «Гідромодуль»

Проведена в роботі оцінка економічної ефективності використання створених установок підтвердила доцільність їх використання. Так, наприклад, згідно з розрахунками прокол ґрунту новим обладнанням забезпечує зниження питомих витрат на 27,5%. А при продавлюванні ґрунту кільцеподібним наконечником для комбінованого методу цей ефект досягає 60%.

Ефект досягається за рахунок зменшення об'єму земляних робіт при формуванні горизонтальної свердловини та розробці стартового і прийомного напрямків, зменшення маси установки і її вартості, зменшення кількості використаних засобів технологічного забезпечення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено методологічні основи створення робочих органів для формування комунікаційних порожнин у ґрунті, які мають більш високі показники по енергоємності, мають можливість керування траєкторією руху обладнання в ґрунті та забезпечення якості створення горизонтальних порожнин в ґрунті статичними методами при безтраншейному прокладанні розподільних інженерних мереж, що є актуальним при проведенні робіт у стислих міських умовах.

У дисертаційному дослідженні отримано такі результати:

1. На підставі аналізу літературних відомостей сучасних технічних та наукових досягнень в галузі безтраншейного прокладання підземних комунікацій було отримано:

- розроблено класифікацію установок для розробки горизонтальних свердловин у ґрунті і безтраншейного прокладання розподільних інженерних комунікацій у стислих міських умовах і встановлено, що за узагальненому показнику ефективності по продуктивності, потужності та вазі, найбільш ефективними є установки та обладнання, які працюють по методу статичного проколу і продавлюванню ґрунту;

- встановлено, що статичні методи формування комунікаційних порожнин у ґрунті мають значні обмеження по використанню, які пов'язані з низькою точністю проходки та великою зоною радіального ущільнення ґрунту, що обмежує їх область використання в межах довжини проходки до 20–25 м та діаметру свердловини до 250–300 мм, що не відповідає сучасним вимогам до прокладання розподільних комунікацій, для яких діаметр свердловини складає 400 мм, а довжина проходки досягає 100 м;

- визначено, що підвищити ефективність робіт установок статичної дії і їх використання відповідно до визначених умов можливо за рахунок керованості процесу проколу ґрунту та зменшення впливу від його деформації на основу доріг і прилеглі комунікації шляхом використання комбінованого методу розроблення свердловини – проколу і продавлювання.

2. Розроблено методологічні основи створення робочих органів для формування комунікаційних порожнин у ґрунті, які базуються на наступних підходах:

- вперше було систематизовано наконечники робочих органів статичної дії різного технологічного призначення для створення комунікаційних порожнин у ґрунті, які в узагальненому вигляді мають форми конічно-циліндричну, кільцево-трубчасту та асиметричну;

- вперше для визначення закономірності розподілу тиску ґрунту на робочих поверхнях наконечників було застосовано закон збереження маси ґрунту до і після його деформування;

- вперше запропоновано методику отримання теоретичних залежностей розрахунку процесів створення горизонтальних свердловин з урахуванням геометричних параметрів наконечників та нормативних відомостей про властивості типових ґрунтів.

3. Розроблено метод розрахунку процесу статичного проколу ґрунту конічно-циліндричним наконечником, який включає:

- розробку теоретичної залежності для визначення закономірності розподілу нормального тиску ґрунту на робочі поверхні наконечника та теоретичних залежностей для розрахунку сил опору ґрунту його просуванню;

- визначення величини сили тертя на бічній поверхні циліндричної частини наконечника, яка досягає до 40–60% від загального опору просування його в ґрунті, яка складає, наприклад, при утворюванні свердловини діаметром

200 мм в твердому супіску понад 85 кН, в напівтвердому суглинку більше 50 кН, в тугопластичній глині – 25 кН при опорі конусної частині у цих ґрунтах 60, 30 та 15 кН відповідно;

- визначення еквівалентного і оптимального діаметрів виступу конусної частини конусно-циліндричного наконечника, що дозволяє знизити опір просування конічно-циліндричного наконечника в ґрунті більш ніж на 25%;

- встановлення максимального зниження зусилля при проколі ґрунту еквівалентним конусно-циліндричним наконечником, що має місце для ґрунтової свердловини діаметр якої у 2 рази менший за максимально-граничні діаметри, які дорівнюють: для твердого супіску – 0,444 м; для напівтвердого суглинку – 0,295 м; для тугопластичної глини – 0,236 м. Якщо діаметр свердловини більший за максимально-граничний, то прокладання підземних комунікацій необхідно здійснювати продавлюванням або комбінованими методами.

4. Розроблено метод розрахунку процесу статичного продавлювання ґрунту кільцево-трубчастого наконечником, який включає:

- розробку теоретичних залежностей розрахунку сил опору ґрунту від вдавлювання кільцево-трубчастого наконечника, всебічний аналіз якої дозволив встановити, що наконечник з двоконусним загостренням ріжучої кромки має більший опір ґрунту на 25–30% порівняно до наконечнику з зовнішнім загостренням кромки за рахунок створення додаткового опору від деформування ґрунту від поверхні внутрішнього конусу;

- визначення довжини ґрунтового керну та величину сили тертя в кільцевому-трубчастому наконечнику з зовнішнім загостренням кромки, яка залежить від співвідношення його зовнішнього та внутрішнього діаметрів. Так, збільшення співвідношення діаметрів з 1,2 до 1,7 призводить до зменшення сил тертя майже у 2 рази, а збільшення внутрішнього діаметру у 2 рази призводить до збільшення довжини ґрунтового керна в 1,75 рази. Довжина ґрунтового керну не перевищує для різних ґрунтів 0,4–1,2 м відповідно внутрішньому діаметру наконечника 14–35 см.

- визначення зони руйнування ґрунту при формуванні комунікаційної порожнини комбінованим методом з використанням товстостінного кільцево-трубчастого наконечника з зовнішнім загостренням ріжучої кромки навколо свердловини, яка складає для твердого супіску - 2,46–3,55 діаметра свердловини; для напівтвердого суглинку відповідно - 2,02–2,85 та для тугопластичної глини - 1,91–2,67.

5. Розроблено метод розрахунку процесу керованого проколу ґрунту асиметричним наконечником (у вигляді зрізаного циліндра), який включає:

- розробку теоретичної залежності для визначення горизонтальної та вертикальної реакції ґрунту на скошену лобову площину наконечника;

- розробку залежності для визначення величини поперечного відхилення наконечника на відповідній відстані в залежності від куту нахилу площини та фізико-механічних властивостей ґрунту з урахуванням впливу на процес конструкції та пружних властивостей матеріалу штанг;

– встановлення залежності для визначення критичного куту нахилу похилої площини, який визначається з умови збереження штанг від поламки при згині, мінімальний радіус якого складає 17,5 м для штанг діаметром 0,05 м і 35,0 м для штанг діаметром 0,1 м.

– визначення максимального кута нахилу площини з умови втрати керованості процесу проколювання з причини утворення постійного ґрунтового ядра ущільнення, який для поширених типів ґрунтів складає 60–70°.

6. Розроблена методика експериментальних польових досліджень процесів статичного проколу та продавлювання ґрунтів і створені експериментальні установки, стенди та натурні зразки наконечників робочих органів, що дозволило відтворити процеси і підтвердити їх працездатність. Результати досліджень в цілому підтвердили теоретичні положення з визначення параметрів робочих органів та їх впливу на опір при просуванні в ґрунті залежно від його фізико-механічних властивостей та технологічних особливостей методів створення горизонтальних свердловин. Розходження розрахункових значень з дослідними даними не перевищує 15°.

7. На основі отриманих в дисертації методологічних основ створення мінімальноенергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті отримано:

– алгоритм створення вискоефективних наконечників відповідно до визначених методів формування горизонтальних свердловин для вимог безтраншейного прокладання розподільних мереж, які визначаються діаметром горизонтальної свердловини, довжиною і траєкторією траси, умовою залягання комунікації по глибині та властивостями найбільш поширених типів ґрунтів;

– розроблені інженерні методики визначення раціональних параметрів робочого обладнання для технологій проколу, продавлювання, їх комбінації та обладнання для формування керованої траєкторії горизонтальних свердловин, можуть бути використані, як для визначення силового приводу установок, так і при проектуванні траєкторії траси пролягання комунікацій у стислих міських умовах.

8. Здійснено впровадження результатів дисертаційної роботи, яке полягає:

– у створенні силового типоряду установок статичної дії, які були прийняті до виробництва підприємствами ТОВ «НВП «Газтехніка ЛТД» та ТОВ «СКТБ «Гідромодуль»;

– у розробленні технологічної карти «На безтраншейне прокладання труб діаметром до 400 мм ґрунтопроколюючими установками статичної дії з використанням комбінованого методу розробки свердловини (прокол і продавлювання)»;

– у практичному використанні при будівництві переходів розроблені установки отримали в цілому ряді спеціалізованих та будівельних компаніях, а саме: ДП «Спеціалізоване управління механізованих робіт», ТОВ «Харьковспецстрой-1» та ТОВ «Перша слобідська будівельна компанія», яке підтвердило можливість зниження собівартості прокладання підземних

комунікацій до 50% за рахунок зменшення об'єму земляних робіт, зростанню темпів та якості робіт, малих габаритів, ваги та потужності установок;

– у навчальному процесі при вивченні студентами спеціальних дисциплін «Машини для земляних робіт», «Динаміка БДМ», «Машини для підземного прокладання інженерних комунікацій» студентами спеціальності 6.05.05.03 «Машинобудування» та 133 «Галузеве машинобудування».

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія:

1. Супонев В.М. Створення обладнання для розробки горизонтальних свердловин комбінованими способами статичної дії: монографія. Харків, ХНАДУ, 2018. 196 с.

Статті у міжнародній наукометричній базі даних SCOPUS та міжнародних виданнях:

2. Супонев В.Н., Олексин В.И. Определение допустимого диаметра скважины и способ его увеличения для бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций методом прокола. *Prace naukowe Instytutu Nafty i Gazu. Panstwowego Instytutu Badawczego, dawczego, № 194 Wydanie konferencyjne Techniki I technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja*. Krakov. 2014. С. 173–182.

3. Пенчук В.А., Супонев В.Н., Олексин В.И. и др. Механика процессов прокола и расширения горизонтальных скважин. *Механизация строительства*. 2015. №8. С. 40–42.

4. Rudnev V.K., Suponiyv V.N., Saenko N.V. at all. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. №2. С. 100–107. (*Scopus, Web of Science*)

5. Kravets S., Suponev V., Rieznikov O. at all. Determination of the resistance of the cylindrical-tubular drill for trenchless laying of underground communications. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 3/7(93). С. 64–71. (*Scopus*)

6. Volodymyr Suponyev. Determination of equivalent and optimal sizes of wedge tip from flange for the static perforation of soil Olexander Posmituha, Svyatoslav Kravets, Volodymyr Suponyev and Kazimir Glavatsky¹ MATEC Web Conf. **Volume 230**, 2018. 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2018) <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823001011> (*Scopus*)

Статті у наукових фахових виданнях з переліку ДАК МОН України, що входять до інших міжнародних наукометричних баз даних:

7. Руднев В.К., Супонев В.Н. Выбор бестраншейной технологии для подземной прокладки коммуникаций. *Науковий вісник будівництва ХДТУБА*. 2008. Вып.49. С. 179–184.

8. Руднев В.К., Каслин Н.Д., Супонев В.Н. Перспективные технологии прокладки распределительных газопроводов и водоводов. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2010. №5. С. 66–74.
9. Ремарчук М.П., Супонев В.М., Олексин В.І. Експериментальне визначення характеру зміни тиску у робочому циклі прокольної машини. *Науковий вісник будівництва*. 2010. №60. С. 70–74.
10. Супонев В.Н., Олексин В.И. Обоснование параметров установок для бестраншейной прокладки распределительных сетей инженерных коммуникаций методом гидростатического прокола. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2010. №5. С. 66–74.
11. Руднев В.К., Супонев В.Н., Олексин В.И. Расширение горизонтальных скважин кольцевыми ножами. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. №3. С. 72–77.
12. Руднев В.К., Супонев В.Н., Олексин В.И. Минимальная глубина заложения горизонтальных скважин для инженерных коммуникаций. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. №2. С. 34–40.
13. Супонев В.Н., Олексин В.И., Вивчар С.М. Требования, выдвигаемые к параметрам горизонтальных скважин, и эффективность бестраншейных методов их разработки. *Вестник ХНАДУ: сб. науч. ст.* 2014. Вып. 65–66. С. 101–106. ([Index Copernicus](#))
14. Супонев В.Н., Пенчук В.А., Гусаков В.Н. и др. Точность и управление траекторией прокола грунта. *Нові технології в будівництві*. 2015. № 29. С. 18–22. ([Googel Scholar](#))
15. Супонев В.Н., Хачатурян С.Л., Олексин В.И. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины после её формирования методом статического прокола грунта. *Вестник ХНАДУ: сб. науч. ст.* 2016. Вып. №73. С. 196–202. ([Index Copernicus](#), [DOAJ](#))
16. Кравець С.В., Супонев В.М., Посмітюха О.П. Визначення еквівалентного та оптимального діаметрів конічно-циліндричного наконечника з виступами для проколювання ґрунту. *Наука та прогрес транспорту Вісник ДНУЖДТ*. 2017. №4 (70). С. 89–98. ([Googel Scholar](#))
17. Супонев В.М., Кравець С.В. Аналітичний спосіб визначення лобового опору заглибленню в ґрунт кільцевого наконечника. *Підйомно-транспортна техніка*. 2017. №1(53). С. 70–80. ([Googel Scholar](#))
18. Супонев В.М., Вивчар С.М., Балесный С.П. Тенденции развития технологий и оборудования для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций в городских условиях. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2017. № 12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2017_12_8. ([Googel Scholar](#))
19. Кравець С.П., Супонев В.М., Балесный С.П. Встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осевого руху при його проколі асиметричним наконечником. *Автомобільний транспорт: сб. науч. тр.* 2017. Вып. 41. С. 155–163. ([Index Copernicus](#), [DOAJ](#))
20. Кравець С.В., Супонев В.М., Посмітюха О.П. Аналітичний спосіб визначення опору ґрунту занурення конусного наконечника в ґрунт. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение: сб. науч. тр.*

Приднепровской академии строительства и архитектуры. 2017. № 97. С. 91–98. (*Directory of Research Journals Indexing, Research Bib*)

21. Супонев В.М. Наукові основи робочих процесів створення горизонтальних порожнин статичним задавлюванням робочого обладнання в ґрунт. Під'ємно-транспортна техніка. № 3 (59). 2018. С. 34–36. (*Googel Scholar*)

22. Супонев В. М. Технологія управління проколом ґрунту та вибір силового приводу установки для її реалізації. Наукові вісті Дніпровського університету : електронне наукове фахове видання. 2018. №15. (*Googel Scholar*)

23. Suponyev V., Kravets S., Posmituha A., Kulashenko Y. Determination of the size seal zone and the soil pressure on underground communications in the process of soil deformation by the wedge-shaped tep. *Technology audit and prodaction reserves*. 2018. №5/1(43), P. 11–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146626. (*Index Copernicus, DOAJ, PИИЦ*)

24. Супонев В.М. Керування процесом корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту. Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. 2018. № 43. С. 125–131. (*Index Copernicus, DOAJ*)

25. Супонев В.М. Визначення величини зони деформування ґрунту конусно-циліндричним наконечником і тиску на бічній поверхні. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2018. Вып. 83. С. 22–28. (*Index Copernicus, DOAJ*)

26. Супонев В.М. Визначення сили опору ґрунту при очищенні свердловини після її розширення кільцевим ножом. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2018. Вип. №7. С. 82–88. *Copernicus*

27. Супонев В.Н., Чепусенко Е.А. Телеметрическая система определения координат прокалывающей головки в грунте. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2019. Вып. 84. С. 13–20. (*Index Copernicus, DOAJ*)

28. Супонев В.М., Балесний С.П. Рівняння траєкторії корекції руху головки в ґрунті та його експериментальна перевірка. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних та дорожніх машин. Серія: під'ємно-транспортні, будівельні, дорожні машини і обладнання: сб. наук. пр. Придніпровської академії будівництва і архітектури. 2019. №107. С. 94–102. (*Directory of Research Journals Indexing, Research Bib*)

29. Супонев В.М. Визначення алгоритму вибору та робочого обладнання для ефективного утворювання свердловин при прокладанні підземних комунікацій. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2019. Вип. 87, том 2. С. 9–16. (*Index Copernicus, DOAJ*)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

30. Руднев В.К., Супонев В.Н., Олексин В.И. Выбор бестраншейной технологии для подземной прокладки коммуникаций: Сб. науч. тр. восемнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции г. Бердянск 7–11 июня 2010 г. Харьков, УкрВОДГЕО. С. 508–514.

31. Супонев В.Н., Ремарчук Н.П., Олексин В.И., Резников А.А. Определение уровня давления жидкости в гидросистеме машины для прокалывания грунта. Материалы Международной научно-технической конференции 5–8 октября 2010 г. «Интерстроймех-2010». Белгород, Изд-во белгород. госуд. Технологического ун-та им. В.Г.Шухова, 2010. С. 107–109.

32. Супонев В.Н., Олексин В.И. Сохранность городской инфраструктуры путём применения современной технологии бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций. *Энергосберегающие технологии теплоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры*: материалы научно-практической интернет-конференции. ХНУМГ имени Бекетова, 2013. С. 78–81.

33. Супонев В.Н., Балесный С.П. Выявление причин, влияющих на точность траектории движения прокольной головки в грунтовом массиве. Тези за матеріалами VI всеукраїнського міжнародного семінару «Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур». Харків, ХНУБА, 2014. С. 145–147.

34. Пенчук В.А., Супонев В.Н., Олексин В.И. и др. Механика процессов прокола и расширения горизонтальных скважин. *Интерстроймех-2015*: материалы Международной научно-технической конференции. Казань, Изд-во казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. С. 161–168.

35. Супонев В.Н., Балесный С.П., Вивчар С.М. Исследование процессов формирования горизонтальных скважин для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций. Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд: матеріали VIII міжнар. наук. конф., ХНУБА, 18–19 жовтня 2017 р. Харків, 2017. С. 28–30.

36. Супонев В.М. Теоретичний спосіб Визначення лобового опору заглибленню в ґрунт кільцевого наконечника. *Modern methods, Innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences*: International research and practice conference, Radom, Republic of Poland, December 27–28, Radom Academy of Economics, 2017. С. 153–156.

37. Кравець С.В., Супонев В.М., Посмітюха О.П. Використання плоского робочого органу для прокладання підземних комунікацій способом статичного проколу. *Проблеми надійності та довговічності споруд і будівель на зал. тр-ті*: 7-а Міжнародна науково-техн. конференція, 14–16 листопада 2018. Х.: УкрДУЗТ, 2018. С. 49–51.

38. Сідак В.С., Супонев В.М., Слатова О.М. Дослідження основних причин витоків газу на підземних газопроводах. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (тези доповідей), присвяченої 80-річчю кафедри хімії ХНУМГ ім. О. М. Бекетова 7–8 листопада 2019 р. Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2019. С. 83.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

39. Пат. 67560 Україна, МПК E02F5/18. Установка для проколу ґрунту та розширення горизонтальних свердловин при бестраншейній прокладці підземних комунікацій / Супонев В.М., Каслін М.Д., Руднев В.К., Олексин В.І.;

заявник та патентовласник Супонев В.М., Каслін М.Д., Руднев В.К., Олексин В.І. № u201109739; заявл. 05.08.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. №4.

40. Пат. 72790 Україна, МПК E02F5/18. Спосіб розширення горизонтальної свердловини / Олексин В.І., Супонев В.М., Каслін М.Д., Руднев В.К., заявник та патентовласник Олексин В.І., Супонев В.М., Каслін М.Д., Руднев В.К. № u201202507; заявл. 02.03.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. №16.

41. Пат. 95501 Україна, МПК E02F 5/18. Установка для керованого проколу ґрунту / Супонев В.М., Пенчук В. О., Белицький Д. Г., Олексин В. І., Балесний С.П.; заявник і патентовласник Харківський нац. автомоб.-дорожній ун-т. № u201407764; заявл. 10.07.2014; опубл. 25.12.2014. Бюл. №24.

42. Пат.116258 Україна, МПК E21B 7/04. Пілотна ґрунтопроколююча головка для керованого проколу / Супонев В.М., Пенчук В.О., Балесний С.П., Щукін О.В., Сідак В.С.; заявник і патентовласник Харківський нац. автомоб.-дорожній ун-т. № u 2016 12583; заявл. 09.12.2016; опубл.10.05.2017. Бюл. № 9.

43. Патент на корисну модель UA 92260 U, МПК E02F 5/18 (2006.01). Спосіб розширення горизонтальної свердловини / Супонев В.М., Пенчук В.О., Вівчар С.М., Олексин В.І. Опубл. 11.08.2014. Бюл. № 15. С. 6.

44. Патент на корисну модель UA 109838 U, МПК E21B10/44 (2006.01). Пристрій для безтраншейної прокладки інженерних комунікацій / Супонев В.М., Балесний С.П., Вівчар С.М. Опубл. 12.09.2016. Бюл. № 17.

45. Патент на корисну модель UA 111733 U, МПК E21B17/22 (2006.01). Установка з гвинтовим ґрунтопроколюючим робочим органом для безтраншейної прокладки підземних комунікацій / Супонев В.М., Пенчук В.О., Балесний С.П., Щукін О.В. Опубл. 25.11.2016. Бюл. № 22.

46. Патент на корисну модель UA 113041 U, МПК E21B17/22 (2006.01). Спосіб розширення горизонтальної свердловини при безтраншейній прокладці підземних комунікацій / Супонев В.М., Вівчар С.М. Пенчук В.О., Балесний С.П., Щукін О.В. Опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.

47. Патент на корисну модель UA 138466 U, Україна, МПК E21B 7/04. Пілотна ґрунтопроколююча головка для керованого проколу / Супонев В.М., Балесний С.П., Васильєв С. Крісанов Д. Сідак В. С.; заявник і патентовласник Харківський нац. автомоб.-дорожній ун-т. – u201905817; заявл. 09.06.2019. Опубл. 25.11.2019. Бюл. № 22/2019.

48. Каслин Н.Д., Супонев В.Н. Оценка качества безопасности инженерно-коммуникационных сетей. *Коммунальное хозяйство городов: научно-технический сборник ХНАГХ*. 2008. Вып. 84. С. 414–418.

49. Руднев В.К., Кравец С.В., Супонев В.М., Каслин Н.Д. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: учеб. пособие. Харьков: ООО «Фавор», 2008. 256 с.

50. Седак В.С., Супонев В.Н., Каслин Н.Д. Надёжность и качество процессов регулирования современных систем газоснабжения: монографія. Харьков: ХНАМГ, 2011. 248 с.

51. Сідак В.С. Супонев В.Н., Бронеvский Ю.Ф. Сучасні та інноваційні технології в безпеці газопостачання: монографія. Харків: ХНУМГ імені О.М. Бекетова, 2015. 434 с.

52. Ремарчук М.П., Супонев В.М., Олексин В.І. Гидропривід як складова машин для безтраншейної прокладки підземних комунікацій. *Вісник НТУ «КПІ». Серія: Машинобудування*. 2011. №61. Том 2. С. 183–185.

53. Супонев В.Н., Ремарчук М.П. Усовершенствование гидросистемы машины для прокола грунта. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2011. Вип. 3 (33). С. 97–100.

54. Пенчук В.А., Супонев В.Н., Олексин В.И., Вивчар С.М. Расширение скважин в грунте с использованием пневмовакuumных установок. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование*. сб. наук. пр. Придніпровської академії будівництва і архітектури. Вип. 79. 2014. С. 237–244.

55. Хмара Л.А., Кравець С.В., Скоблюк М.П. та ін. Машини для земляних робіт: підручник. Харків, ХНАДУ. ТОВ ВКФ «Фавор LTD», 2014. 548 с.

56. Вивчар С.М., Супонев В.Н., Константиненко В.В. Влияние осевой силы пригруза на крутящий момент завинчивания винтовых свай. *Будівельне виробництво*. 2016. №61/1. С. 44–49. ([Google Scholar](#))

АНОТАЦІЯ

Супонев В.М. Методологічні основи та практика створення мінімально енергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.04 «Машини для земляних, дорожніх і лісотехнічних робіт» (13 – Механічна інженерія). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення більш ефективного та керованого формування горизонтальних свердловин для безтраншейного прокладання розподільних підземних комунікацій шляхом узагальнення наукових основ створення установок і обладнання, обґрунтування їх раціональних конструктивних параметрів та створення силового типоряду установок, розширення області використання та технологічних можливостей статичних методів формування комунікаційних порожнин в ґрунті.

В роботі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт, предмет, мету і завдання дослідження, описано методи дослідження, а також визначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; надано інформацію про апробацію та публікації результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні узагальнених теоретичних залежностей, які вперше отримані на основі закону

рівності мас ґрунту до і після його руйнування та нормативних фізико-механічних властивостей ґрунтів, що сприяють створенню спеціальних високоефективних установок для безтраншейного прокладання інженерних підземних комунікацій на базі встановлених закономірностей взаємодії їх робочих органів з ґрунтовым середовищем методами статичного проколу ґрунту, його продавлювання та їх комбінації.

Ключові слова: безтраншейні технології, прокол ґрунту, продавлювання ґрунту, комбінований метод, інженерні комунікації, горизонтальна свердловина.

АННОТАЦИЯ

Супонев В.Н. Методологические основы и практика создания минимально энергоемких рабочих органов для формирования коммуникационных скважин в грунте. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.04 «Машины для земляных, дорожных и лесотехнических работ» (13 – механическая инженерия). – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет Министерства просвещения и науки Украины, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы обеспечения более эффективного и управляемого формирования горизонтальных скважин для бестраншейной прокладки распределительных подземных коммуникаций путем обобщения научных основ создания установок и оборудования, обоснования их рациональных конструктивных параметров и создания силового типоряда установок, расширения области использования и технологических возможностей статических методов формирования коммуникационных пустот в грунте.

Научная новизна полученных результатов состоит в разработке обобщенных теоретических зависимостей, которые впервые получены на основе закона равенства масс ґрунта до и после его уплотнения и нормативных физико-механических свойств ґрунта, которые способствуют созданию специальных высокоэффективных установок для бестраншейной прокладки инженерных подземных коммуникаций на основе установленных закономерностей взаимодействия их рабочих органов с ґрунтовой средой методами статического прокола ґрунта, его продавливания и их комбинации.

Предложенный подход дал возможность установить закономерности распределения нормального давления ґрунту на поверхности рабочих органов и разработать методы расчёта рабочих процессов взаимодействия с ґрунтом наконечников конусно-цилиндрической, кольцево-трубной и ассиметричной формы, что позволило установить следующее:

– сила трения на боковой поверхности цилиндрической части конусно-цилиндрического наконечника прокалывающей головки достигает 60% и более от суммарного сопротивления прокола ґрунта;

– определены эквивалентный и оптимальный диаметры конусно-цилиндрического наконечника с выступами обеспечивают максимальное снижение усилия прокола при диаметре скважины, который в 2 раза меньше максимально-граничного диаметра, равного: для твердого супеска – 0,444 м; для полутвердого суглинка – 0,295 м; для тугопластичной глины – 0,236 м при превышении которых необходимо создавать скважину продавливанием или комбинированным методами;

– сила сопротивления грунта вдавливанию кольцеобразного наконечника с двухсторонним заострением режущей кромки по сравнению с наконечником с внешним заострением кромки больше на 25–30% за счет создания дополнительного сопротивления от деформирования грунта от внутреннего конуса;

– силы трения по внутренней поверхности кольцево-трубного толстостенного наконечника при смене соотношения внешнего диаметра к внутреннему с 1,2 до 1,7 уменьшится почти в 2 раза, а длина керна увеличится в 1,75 раз;

– величина зоны деформирования грунта вокруг кольцево-трубного толстостенного наконечника находится в пределах: для твердого супеска – (2,46–3,55); для полутвердого суглинка – (2,02–2,85); для тугопластичной глины – (1,91–2,67) диаметров скважины, что почти в 2 раза меньше зоны, которая образуется при проколе грунта;

– максимальный угол скоса плоскости ассиметричного цилиндрического наконечника, при котором теряется процесс управления проколом грунта от поперечных сил отклонения соответственно физико-механическим свойствам грунта, составляет 60–70°, после чего создается постоянное грунтовое ядро уплотнения;

– критический угол наклона скошенной плоскости цилиндрического наконечника при условии сохранения толкающих штанг от поломки при утрате стойкости и ее изгиба на участке 10 м составляет: для твердого супеска при отклонении от оси 6–57°; для полутвердого суглинка при 4–60°; для тугопластичной глины при 3–61°, причем минимальный радиус изгиба толкающих штанг диаметром 0,05 м составляет 17,5 м, а для штанг диаметром 0,1–35,0 м.

Для проведения экспериментальных полевых исследований процессов статического прокола и продавливания грунтов была разработана программа и методика, которые базировались на создании экспериментальной установки, специальных стендов и натурных образцов наконечников рабочих органов. Расхождение расчетных значений с опытными данными во всех случаях не превышает 15%.

По результатам диссертационной работы создано:

– алгоритм выбора оборудования для технологий создания коммуникационных пустот в грунте путем статичного задавливания рабочего органа для условий прокладки распределительных сетей пролётом до 100 м и диаметром скважины до 400 мм в стесненных городских условиях, разработаны инженерные методики установления их рациональных параметров

в зависимости от грунтовых условий и технологических особенностей бестраншейной прокладки подземных коммуникаций;

– создан типоряд установок и их модификации, которые были приняты для производства и практического применения при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций;

– разработана технологическая карта выполнения работ по бестраншейной прокладке инженерных коммуникаций с использованием методов прокола, продавливания и их комбинации.

Ключевые слова: бестраншейные технологии, прокол грунта, продавливание грунта, комбинированный метод, инженерные коммуникации, горизонтальная скважина.

ABSTRACT

Suponev V.M. Methodological foundations and practice of creating low-power working elements to form utilities trenches in the ground – Manuscript.

The thesis for a Doctor Degree in Engineering (DSc), speciality 05.05.04 «Earth-moving, road and forestry machines» (13 – Mechanical Engineering). – Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The thesis deals with solving the urgent scientific and applied problem of providing more efficient and controlled forming the horizontal wells for trenchless laying of distributing underground utilities by summarizing the scientific foundations for creating some installations and equipment, substantiating their rational design parameters and creating a sample set of power installations, expanding the scope of use and engineering resources of static methods of forming utility cavities in the soil.

The relevance of the topic is substantiated in the work, the object, the subject, the aim and the objectives of the study are formulated, the research methods are described, as well as connection of the work with scientific programs, plans, themes is determined; information on the dissertation result testing and publishing is provided.

The scientific novelty of the obtained results is to develop the generalized theoretical dependences, first obtained on the basis of the law of equality of soil masses before and after soil destruction and the standard physical and mechanical properties of soils, contributing to the creation of special highly efficient installations for trenchless laying of underground engineering utilities based on established patterns of interaction between their actuators with the soil ground by methods of soil static puncturing, pressing and their combinations.

Key words: trenchless technologies, soil puncturing, soil pressing, combined method, engineering utilities, horizontal well.

