ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.271.53 https://doi.org/10.33271/crpnmu/85.007

© А.О. Бондаренко[1], А.А. Адамчук[1], В.Ю. Кухар[1], О.О. Шустов[1], Ю.О. Комісаров[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВПРОВАДЖЕННЯ СТРУМИННОНАСОСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ПІДВОДНОМУ ВИДОБУВАННІ КРУПНОЗЕРНИСТИХ ҐРУНТІВ

A. Bondarenko[1], https://orcid.org/0000-0002-7666-6752
A. Adamchuk[1], https://orcid.org/0000-0002-8143-3697
V. Kukhar[1], https://orcid.org/0000-0002-1849-4489
O. Shustov[1], https://orcid.org/0000-0002-2738-9891
Yu. Komissarov[1] https://orcid.org/0000-0002-5260-2156
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

IMPLEMENTATION OF JET PUMPING TECHNOLOGY IN UNDERWATER MINING OF COARSE-GRAINED MINERALS

Мета. Розробка конструкції і виконання дослідно-промислових випробувань ґрунтозабірного пристрою, обладнаного струминним насосом і струминною системою розмиву ґрунту, що дозволяє видобувати крупнозернисті ґрунти з підводного вибою і транспортувати їх напірним трубопроводом.

Методика. Застосовані стандартні методи постановки експерименту й виконання відповідних вимірів щодо дослідно-промислових випробувань з оцінкою впливу конструктивних параметрів ґрунтозабірного пристрою на технологічні параметри системи видобування і гідротранспортування зерен корисної копалини.

Результати. За результатами визначення технологічних і конструктивних параметрів ґрунтозабірного пристрою в основу якого закладено струминнонасосну технологію, був виготовлений дослідно-промисловий зразок, розроблений план і проведені дослідно-промислові випробування видобувної системи струминного землесосного снаряду. Дослідно-промислові випробування були проведені в умовах річкового полігону, при глибині видобування до 9 м. У ході дослідно-промислового експерименту також контролювали визначені гірничо-технічні параметри: глибину видобутку, висоту подачі, дальність транспортування, кількість видобутих каменів, тощо.

Наукова новизна. Встановлені залежності характерного діаметру видобутого каменя від тиску в напірному водопроводі та довжини пульпопровода дозволили виконати відповідні налаштування ґрунтозабірного пристрою і ежекторного земснаряду ЗНС 630-90 у цілому, завдяки чому він був допущений до промислової експлуатації.

Практична значимість. Технологію було розроблено для забезпечення можливості видобувати і транспортувати крупнозернисті ґрунти. В умовах дослідно-промислових випробувань можливість видобування і транспортування такої складної сировини забезпечували подаванням до усмоктувального патрубку у підводному вибої крупнозернистих мінеральних зерен із виміряними розмірами і масою.

Ключові слова: *ґрунтозабірний пристрій, струминний насос, ежекторний земснаряд, пульпопровід.*

Вступ. Існуюче різноманіття гірничовидобувної техніки як вітчизняного, так і імпортного виробництва для освоєння обводнених і підводних піщано-гравійних родовищ, що представлені на ринку, дозволяє вибрати необхідне обладнання для переважної більшості варіантів компоновки видобувних комплексів. У той же час на ринку відсутні пропозиції комплексів видобутку й транспортування, здатних розробляти специфічні складноструктурні родовища. До таких можна віднести річкові, озерні, обводнені піщано-гравійні рудні й нерудні родовища зі значним вмістом крупного гравію.

Освоєння таких родовищ за допомогою землесосних снарядів традиційної конструкції на базі ґрунтових насосів супроводжене рядом недоліків, що обумовлені їх конструктивними особливостями. Основним недоліком є неможливість гідротранспортувати крупнокусковий гравій. Проблему розробки покладів зі значним вмістом такого гравія наразі вирішують шляхом застосування механічних снарядів. Однак така технологія передбачає транспортування видобутої сировини стрічковими конвеєрами або транспортними машинами з кузовом чи бункером. Застосування таких традиційних технологій транспортування у цілому вирішує задачу, однак, при одночасному збільшенні видатків на транспортування. У свою чергу струминнонасосна технологія має ряд конструктивних переваг, що дозволяють видобувати крупнозернисті ґрунти при підводному видобутку і гідротранспортуванні на достатні відстані [1, 2].

Методика. Дослідно-промислові випробування супроводжувались застосуванням стандартних методів постановки експерименту [3–7], під час підготовки до експерименту, видобування тестових порцій крупнокускового гравію визначених розмірів і маси з підводного вибою, оцінки можливостей технології транспортувати розмірні мінерали гідравлічним транспортом у складі пульпи тощо. Дослідження виконане у такій логічній послідовності: підготовка вибою до подальшої розробки крупнокускового гравію; підготовка й накопичення порції мінерального матеріалу, вимірювання, визначення й фіксація характерних розмірів і маси зерен; подача крупнокускового гравію до вибою під час роботи видобувної системи, зміна конструктивних параметрів ґрунтозабірного пристрою і оцінка впливу на можливість видобувати і транспортувати зерна гравію. Роботи супроводжувались застосуванням стандартних вимірювальних пристроїв і методів вимірювання.

Основна частина (Результати). Задача проєктування системи струминної підготовки і гідротранспортування гравелистих ґрунтів була комплексно вирішена шляхом обгрунтування раціональних параметрів і розробки конструкції ґрунтозабірного пристрою спеціалізованого ежекторного землесосного снаряда ЗНС 630-90. При проєктуванні видобувної системи земснаряда ЗНС 630-90 були застосовані відомі і апробовані методики розрахунку струминних насосів, а також розроблений проф. Бондаренко А.О. метод розрахунку гідродинамічних і конструктивних параметрів гідравлічних розпушувачів землесосних снарядів [1].

Основним елементом системи видобутку й гідротранспортування ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 є ґрунтозабірний пристрій, схема якого приведена на рисунку 1. Ґрунтозабірний пристрій реалізовано на базі струминнонасосної технології, що дозволяє досягати можливості видобувати і транспортувати крупнозернисті гравелисті ґрунти.

Ґрунтозабірний пристрій (рис. 1) складається з напірного патрубка 1, що призначений для водопостачання напірної камери 2, усмоктувального патрубка 3, системи ежекційних 4 і розмивних 5 форсунок, змішувальної камери 6, горловини 7, напірного пульпопроводу 8. Усмоктувальний патрубок виступає за межі напірної камери. Сопла ежекційних форсунок, що закріплені в напірній камері, встановлені під кутом до її повздовжньої осі і спрямовані попутно напрямку руху пульпи в усмоктувальному патрубку. Сопла розмивних форсунок установлені під кутом до повздовжньої осі напірної камери і повернуті зустрічно напрямку руху пульпи в усмоктувальному патрубку. Напірна камера сполучена з напірним патрубком. Приведена конструкція дозволяє видобувати і транспортувати зерна матеріалу з розмірами не більше 50% від діаметру усмоктувального патрубка.

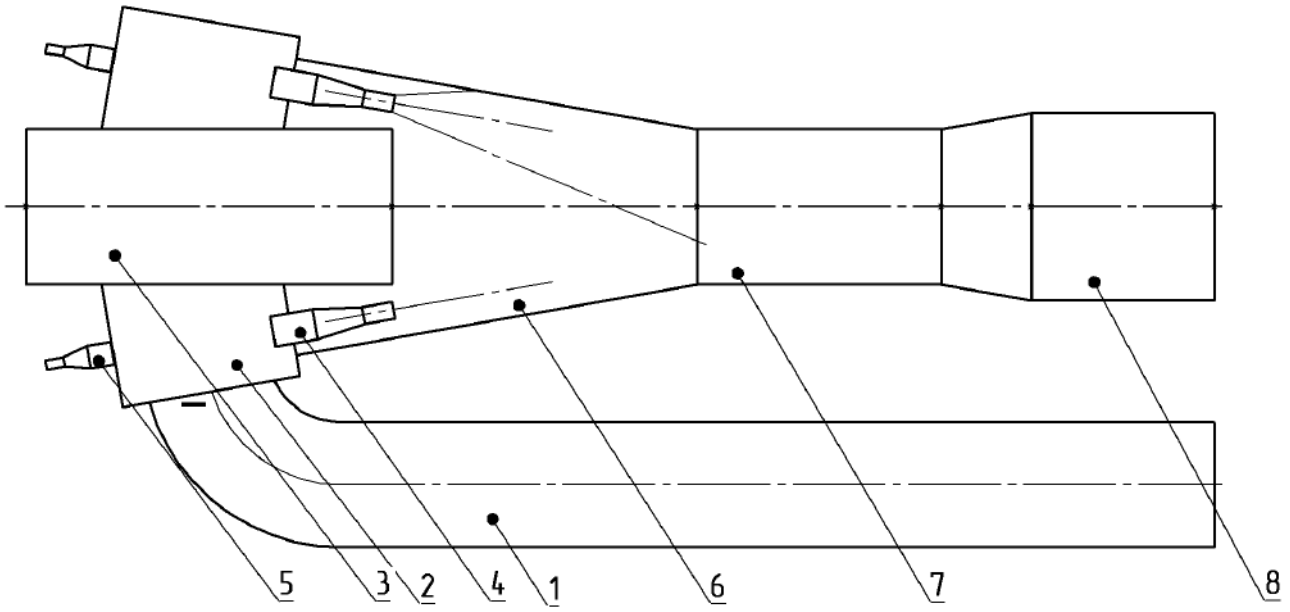


Рис. 1. Схема струминного ежекторного ґрунтозабірного пристрою

Струминний ежекторний ґрунтозабірний пристрій працює таким чином: вода по напірному трубопроводу 1 подається під тиском до напірної камери 2. З напірної камери вода витікає через ежекційні форсунки 4 до камери змішування 6, і через розмивні форсунки 5 витікає до масиву ґрунту, розмиває й насичує його. Під впливом високонапірних водяних струменів, що витікають через ежекційні форсунки 4 до змішувальної камери 6, в усмоктувальному патрубку 3 утворюється область низького тиску, під впливом якої підготовлений у вибої ґрунт рухається до змішувальної камери 6, де потоки перемішуються. Через горловину 7 пульпа транспортується в напірний пульпопровід 8, після чого – до місця складування або переробки. Рекомендована технологія застосування розробленої конструкції ґрунтозабірного пристрою, при якій можна досягти його максимальної ефективності – ямкова технологія видобутку.

Після обґрунтування раціональних параметрів, розробки конструкторської документації ґрунтозабірний пристрій було виготовлено і у складі видобувної і гідротранспортної системи встановлено на ежекторному земснаряді ЗНС 630-90 (рис. 2).



Рис. 2. Прототип ежекторного земснаряда ЗНС 630-90

Дослідно-промислові випробування були проведені в умовах річкового полігону, при глибині видобування до 9 м. Зазначену технологію було розроблено для забезпечення можливості видобувати і транспортувати крупнозернисті ґрунти. В приведених умовах дослідно-промислових випробувань можливість видобування і транспортування такої складної сировини забезпечували подаванням до усмоктувального патрубку у підводному вибої крупнозернистих мінеральних зерен із виміряними розмірами і масою. У ході дослідно-промислового експерименту також контролювали визначені гірничо-технічні параметри: глибину видобутку, висоту подачі, дальність транспортування, кількість видобутих каменів, тощо. За результатами дослідно-промислових випробувань, контролювали і вимірювали такі гірничо-технічні параметри:

$H_П$ – тиск в усмоктувальному патрубку (датчик тиску встановлений біля компенсатора усмоктувального патрубка), м.в.ст.;

$H_В$ – тиск в напірному водопроводі (датчик тиску встановлений біля компенсатора напірного патрубка), м.в.ст.;

$L_П$ – довжина пульпопроводу, м;

$h_п$ – геометрична висота підіймання пульпи над рівнем води, м;

h_3 – геометрична висота усмоктування пульпи, м;
n_e – кількість ежекційних форсунок в роботі, шт.;
n_p – кількість розмивних форсунок в роботі, шт.;
$n_н$ – частота обертання привідного валу водяного насоса, об/хв.;
$D_к$ – характерний діаметр видобутого каменя, мм;
$n_к$ – кількість видобутих каменів, шт.;
T – тривалість роботи видобувного обладнання, хв.

Для фіксації кількісних параметрів результатів дослідно-промислових випробувань записували кількісні значення гірничо-технічних параметрів, а також визначали комплексну оцінку загальних видобувних і транспортних можливостей системи за 12-бальною шкалою. Результати випробувань старанно фіксували і заносили до журналу (табл. 1–4).

Таблиця 1

Результати дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 при довжині пульпопроводу 104 м

Параметр	№ експерименту		
	1	2	3
$H_П$	4–4,5	4,5–5	4,5
$H_В$	90	95	100
$h_п$	2,5	2,5	2,5
h_3	6–8	8	4–5
n_e	6	6	8
n_p	4	4	2
$n_н$	1500	1520	1570
$D_к$	90	100	180
T	40	20	40

Таблиця 2

Результати дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 при довжині пульпопроводу 128 м

Параметр	№ експерименту		
	1	2	3
$H_П$	3,5	2	3,5–4,2
$H_В$	90	95	100
$h_п$	2	2,5	2,3
h_3	7–9	7–8	6–7
n_e	8	7	8
n_p	4	4	4
$n_н$	1500	1520	1570
$D_к$	70	90	150
T	40	15	40

Таблиця 3

Результати дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 при довжині пульпопроводу 152 м

Параметр	№ експерименту		
	2	3	4
$H_П$	3,5–4,5	6,2	6
$H_В$	90	95	100
$h_п$	2	2	2
$h_З$	7–8	8	6–8
$n_е$	8	6	6
$n_р$	4	4	8
$n_н$	1500	1520	1570
$D_к$	60	80	100
Т	30	40	20

Таблиця 4

Результати дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 при довжині пульпопроводу 224 м

Параметр	№ експерименту		
	2	3	4
$H_П$	2	2,2	5–5,5
$H_В$	90	95	100
$h_п$	1,7		
$h_З$	6–7		
$n_е$	8		
$n_р$	4		
$n_н$	1500	1520	1570
$D_к$	30	40	45
Т	30	40	20

Відповідно до результатів дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 був визначений раціональний режим експлуатації ґрунтозабірного пристрою і всієї системи видобування і гідротранспортування. Найвищу ефективність система показала при таких гірничо-технічних параметрах:

- тиск в усмоктувальному трубопроводі – 4,5 м.в.ст.;
- тиск в напірному трубопроводі – 100 м.в.ст.;
- довжина пульпопроводу – 104 м;
- геометрична висота підйому пульпи над рівнем води – 2,5 м;
- геометрична висота усмоктування пульпи – від 4 до 5 м;
- кількість ежекційних форсунок в роботі – 8 шт.;
- кількість розмивних форсунок в роботі – 4 шт.;
- частота обертання привідного валу водяного насосу – 1570 об/хв.;
- характерний діаметр видобутого каменя – 180 мм;
- тривалість увімкнення видобувного обладнання – 40 хв.

Дана технологія цінна можливістю видобування і транспортування крупнозернистих ґрунтів. Саме тому одним з вимірюваних параметрів був характерний діаметр видобутого каменя. Дані свідчать про вплив тиску в напірному водопроводі й довжини пульпопроводу на характерний діаметр видобутого каменя. Залежність характерного діаметру видобутого каменя від тиску в напірному водопроводі при різній довжині пульпопроводу приведено на рисунку 3.

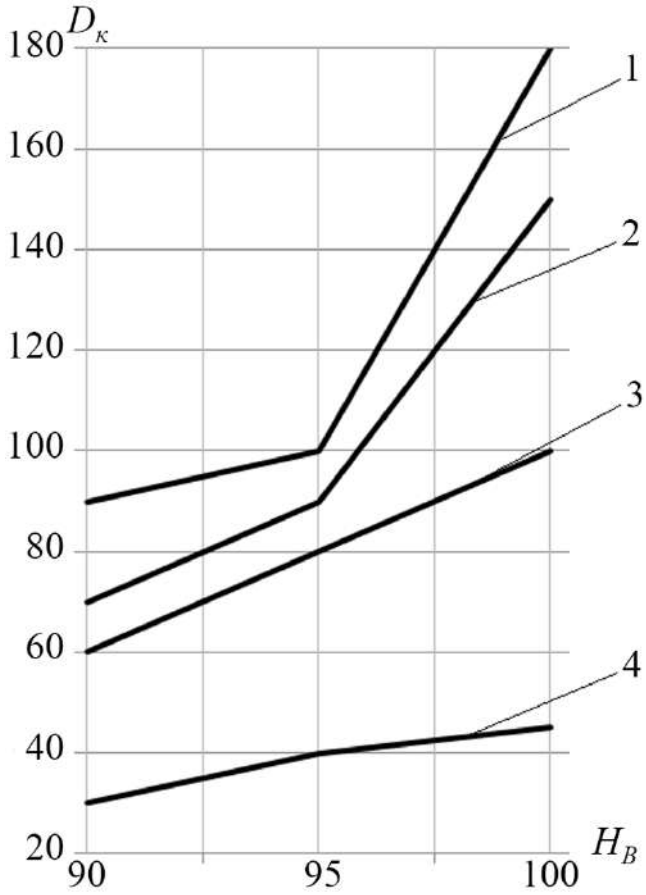


Рис. 3. Залежність характерного діаметру видобутого каменя від тиску в напірному водопроводі при довжині пульпопроводу: 1 – 104 м; 2 – 128 м; 3 – 152 м; 4 – 224 м

Слід відмітити, що відповідно до розробленої конструкції, здатність ґрунтозабірного пристрою до видобування й транспортування зернистої сировини забезпечена саме ежекційними й розмивними форсунками. У відповідності до розрахунку раціональних параметрів струминних систем ґрунтозабірного пристрою, виконаних з використанням розробленого математичного апарату [1] раціональною кількістю ежекційних форсунок є 8 шт., а розмивних форсунок 4 шт. Саме при використання розрахункової кількості ежекційних і розмивних форсунок був експериментально підтверджений раціональний режим експлуатації ґрунтозабірного пристрою що супроводжувався сталою роботою обладнання при максимальній дальності транспортування 104 м, сировини найбільшого характерного розміру 180 мм.

Базуючись на отриманих результатах роботи обладнання були виконані відповідні налаштування ґрунтозабірного пристрою і ежекторного земснаряду ЗНС 630-90 у цілому. Після чого земснаряд був допущений до промислової експлуатації. Наразі ежекторний земснаряд ЗНС 630-90 широко застосовують при виробництві днопоглиблювальних робіт в акваторії р. Тиса (рис. 4) і видобувних робіт в акваторії р. Дніпро.



Рис. 4. Ежекторний земснаряд ЗНС 630-90 при виконанні днопоглиблювальних робіт в акваторії р. Тиса

Модернізація ґрунтозабірного пристрою, а також системи видобування й транспортування у цілому в приведених умовах експлуатації дозволили:

– зберегти продуктивність з видобутку піску на попередньому рівні;

– зменшити видатки по статті «Витрати на утримання й експлуатацію обладнання» на 15%;

– скоротити терміни технічного обслуговування й поточного ремонту обладнання на 28%;

– отримати виняткову можливість видобувати ґрунти, що мають характерну крупність зерен до 200 мм;

– знизити собівартість видобутку піску на 12%.

За результатами проведених дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряда ЗНС 630-90, обладнаного модернізованим ґрунтозабірним пристроєм і системою видобутку й транспортування сировини, обґрунтовані його переваги та недоліки. До переваг віднесені:

– можливість видобувати і транспортувати крупнокусковий зернистий матеріал;

– високі показники надійності струминного насоса за відсутності обертальних елементів конструкції, що працюють в умовах абразивної дії мінеральної сировини;

– низька вартість обладнання;

– простота обслуговування й ремонту;

– попередня підготовка сировини до подальшої переробки.

Однак приведена конструкція ґрунтозабірного пристрою має також і недоліки:

– низький напір, що створює струминний насос;

– дальність гідротранспортування переважно менша, ніж при роботі систем з ґрунтовими насосами;

– обмежена висота підйому пульпи.

У цілому ежекторний земснаряд ЗНС 630-90 з модернізованою системою видобутку й транспортування сировини успішно пройшов дослідно-промислові випробування, за результатами яких визначені його експлуатаційні характеристики:

– тип ґрунтів – незв'язний пісок, гравій крупністю до 200 мм;

– глибина розробки – до 8 м;

– дальність транспортування піщано-гравійної пульпи по горизонталі – до 250 м;

– робочий насос – Д 630-90;

– привід насоса – дизель ЯМЗ238 (250 кВт);

– продуктивність по пульпі – 1100 м^3/год;

– продуктивність по ґрунту – 90 т/год.

Отримані результати дозволили рекомендувати ежекторний земснаряд ЗНС 630-90 до серійного виробництва. Наразі вже виготовлені декілька машин, що експлуатують на річкових родовищах піску та гравію в Україні та Ліберії.

Висновки. Враховуючи результати, отримані у ході дослідно-промислових випробувань ежекторного земснаряду ЗНС 630-90, обладнаного інноваційною конструкцією ґрунтозабірного пристрою забезпечена можливість видобувної і гідротранспортної системи видобувати крупнозернисту сировину крупністю до 200 мм з глибини до 9 м з можливістю її транспортування на достатньо значну відстань до 250 м по горизонталі.

Підтвердженими перевагами ежекторного земснаряда ЗНС 630-90 є: можливість видобувати і транспортувати крупнокусковий зернистий матеріал, високі показники надійності струминного насоса, низька вартість обладнання, простота обслуговування й ремонту, попередня підготовка сировини до подальшої переробки.

Вдячність. Робота пов'язана з науковим напрямком кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні НТУ «Дніпровська політехніка» та виконана у співробітництві з гірничо-видобувним підприємством ТОВ «Собі».

Дослідження виконано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України в межах виконання науково-дослідної роботи «Розробка циркулярних технологій освоєння критичної сировини з природних та техногенних мінеральних ресурсів» (номер державної реєстрації 0126U002424, шифр проєкту ДТ-533).

Перелік посилань

1. Bondarenko, A., Kukhar, V., & Nurmanova, A. (2024). Substantiating the Jet Agitator Parameters for Dredgers. *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT, 12*(1) , 271–278.
2. Bondarenko, A. O., Shustov, O. O., Pavlychenko, A. V., & Adamchuk, A. A. (2023). Substantiation of technological resource-saving conditions for the use of equipment in the sand deposit mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1269*(1), 12024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1269/1/012024
3. Medvedieva, O., Semenenko, Y., Blyuss, B., & Skosyriev, V. (2022). Justification of the hydromechanical systems operating modes, used for restoring accumulation capacity of tailings storages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 970*(1), 12043. https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012043
4. Moldabayev, A., Babets, D., Moldabayev, S., Sdvyzhkova, O., Bascetin, A., & Sultanbekova, Z. (2026). Numerical simulation of quarry wall stability considering the fault location in the bottom part. *Mining of Mineral Deposits, 20*(1), 41–51. https://doi.org/10.33271/mining20.01.041
5. Saik, P., Cherniaiev, O., Anisimov, O., & Rysbekov, K. (2023). Substantiation of the direction for mining operations that develop under conditions of shear processes caused by hydrostatic pressure. *Sustainability, 15*(22), 15690. https://doi.org/10.3390/su152215690
6. Pavlychenko, A., Shvets, V., Papizh, Y., & Pashchenko, D. (2026). Ecological and economic aspects of integrating sustainable development principles into the management of mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1630*(1), 12062. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1630/1/012062
7. Lozhnikov, O. V., Sobko, B. Y., Pavlychenko, A. V., & Kirichek, Yu. O. (2023). Utilization of the secondary resources of titanium-zirconium pits when constructing highways. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 124–129. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/124

ABSTRACT

Purpose. Design development and implementation of pilot-industrial tests of a working member equipped with a jet pump and a jet agitator system, which allows for the mining of coarse-grained soils from an underwater face and their transportation by a pressure pipeline.

The methods. The standard methods of setting up the experiment and performing the relevant measurements in relation to experimental and industrial tests with an assessment of the impact of the design parameters of the working member on the technological parameters of the system of mining and hydrotransportation of mineral grains are applied.

Findings. Based on the results of determining the technological and design parameters of the working member based on jet pump technology, a pilot-industrial sample was manufactured, a plan was developed and pilot-industrial tests of the mining system of the jet pump dredger were carried out. Experimental and industrial tests were carried out in river landfill conditions, with a mining depth of up to 9 m. During the pilot-industrial experiment, certain mining and technical parameters were also monitored: mining depth, feed height, transportation distance, number of mined stones, etc.

The originality. The established dependences of the characteristic diameter of the extracted stone on the pressure in the pressure water supply and the length of the slurry pipeline allowed for the appropriate settings of the working member and the ZNS 630-90 ejector dredger as a whole, thanks to which it was admitted to industrial operation.

Practical implementation. The technology was developed to enable the extraction and transportation of coarse-grained soils. In experimental and industrial tests, the possibility of extracting and transporting such complex raw materials was ensured by feeding coarse-grained mineral grains with measured sizes and weights to the suction pipe in the underwater face.

Keywords: *working member, jet pump, jet pump dredger, slurry pipeline.*

дата першого надходження статті до видання	10.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026

© 2026. A. Bondarenko, A. Adamchuk, V. Kukhar, O. Shustov, Yu. Komissarov
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.