

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.138.23:622.24

К. М. МІШУК*

* Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (066) 582 34 26, ел. пошта mishukivk@gmail.com, ORCID 0000-0001-5480-6032

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЇ ГЛИБИННОГО ГРУНТОЗМІШУВАННЯ

Мета. Обґрунтувати доцільність поєднання струменевих і механічних способів виготовлення ґрунтоцементних армуючих елементів як фактору підвищення ефективності на основі виявлених взаємозалежностей між технологічними параметрами та оцінюючими показниками технологій. **Методика.** Бурозмішувальні технології виготовлення ґрунтоцементних армуючих елементів у вітчизняній та світовій практиці базуються на глибинних механічних та струменевих способах, які мають певні проблеми. Оцінювання технічних показників обох технологій виявило відповідні напрямки вирішення наявних завдань. Дослідження в достатній мірі відповідає практиці виробництва ґрунтобетонних елементів у виробничих вимогах, для чого використане спеціально запропоноване та виготовлене експериментальне обладнання. Його наявні робочі органи придатні різати ножами і повітряно-цементними струменями ґрунт та перемішувати утворену суміш. У підсумку, проявляється транспортуюча і ріжуча функції струменів різних параметрів. За показниками визначеної міцності ґрунтобетону та зміни перетину сформованого елемента визначали ефективність способу в залежності від маси впровадженого цементу в ґрунт та кута різання. Розміри елемента встановлювали після твердіння ґрунтобетону протягом після 28 діб в первісному стані в ґрунті з послідовним відкопуванням, вимірюваннями, випробуваннями на міцність. **Результати.** Встановлено переваги технологій механічного глибинного виготовлення елементів завдяки спрощеному та доступному обладнанню, але відносно невеликий перетин ґрунтобетонних формувальних зменшує ефективність способу. Струменеві технології надають елементам великого перетину, але потребують унікального обладнання високого тиску. Обидві технології утворюють ґрунтобетон низької міцності через використання значних об'ємів води. **Наукова новизна.** Поєднання в одному буровому обладнанні механічних та струменевих засобів надає змогу використати наявні ресурси, що дозволяє в підсумку усунути недоліки технологій, отримати ґрунтобетонні елементи підвищених показників міцності та продуктивності. Має місце вирішення проблеми регулювання постачання цементу та води замішування. **Практична значимість.** За рахунок названих заходів та виявленого оптимального кута дії повітряного струменю міцність ґрунтобетону зростає до 12...16 МПа і перетин елементів збільшується на 120...140 мм.

Ключові слова: ґрунтоцементні армуючі елементи, бурозмішувальні технології підсилення ґрунтів основ, ґрунтобетони, свердловина, технологія глибинного різання ґрунтів

Вступ

Погіршення геологічних умов, а також орієнтування на реконструкцію будівель і споруд диктують потребу в підсиленні ґрунтових масивів та фундаментів (ДБН В.2.1-10-2009, 2009; ДБН В.2.1-10:2018, 2018). В загальносвітовій практиці для таких цілей використовують так звані ґрунтобетонні армуючі елементи, тобто своєрідні палі. Такі елементи готують двома технологіями – механічною та струменевою, які включають різання зі стін попередньо вибуреної свердловини ґрунту та його змішування з цементною суспензією (Зоценко, 2013; Крисан,

В. І., Крисан, В. В., Петренко, & Тютюкін, 2023).

Процес виготовлення ґрунтобетонних елементів відбувається під час зворотнього руху бурової штанги після закінчення виготовлення свердловини без винесення ґрунту на поверхню. Зворотній рух поєднується з додатковим різанням зі стін свердловини ґрунту та його змішування з цементною суспензією (Зоценко, 2013; Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019).

Ріжучими та змішувальними засобами у механічних технологіях являється ножі. У струменевих – високонапірні струмені цементної

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

суспензії з можливим поєднанням зі струменем води і стислого повітря (Пшінько Радкевич, Нетеса М. І., & Нетеса, А. М., 2020).

За результатами оцінювання характеристик вище названих технологій виділені їхні позитивні та негативні показники. Якщо механічні технології орієнтовані на досить спрощене та доступне обладнання вітчизняного виробництва, то струменеві потребують закордонного високонапірного в 40...60 МПа обладнання. Струменевим способом готують ґрунтобетонні елементи перетином до 2000 мм і більше, в той час як механічними – 300...500 мм, що потребує їхньої додаткової кількості як заходу компенсації і тим самим додаткових витрат ресурсів та часу. При цьому в обох технологіях утворений ґрунтобетон має низькі фізико-механічні показники через занадто великий вміст води як наслідок використання водонасиченої цементної емульсії та водяних струменів у відповідних технологіях (Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019; Tiutkin, Neduzha, & Kalivoda, 2021).

Виявлені переваги та недоліки, а також необхідність ресурсозбереження в умовах розширення масштабів потребують пошуку можливостей вдосконалення технологій. Найбільш раціональним напрямком може бути спосіб поєднання механічного та пневмоструменевого з наданням додаткової функції стислому повітрі транспортувати цемент в заданій кількості в підготовлений ґрунт замість нагнітання цементної суспензії розчинонасосами. При цьому можливе регулювання витрат води змішування (Якименко, 2020; Петренко, Андрєєв, & Харченко, 2021; Tiutkin, Keršys, & Neduzha, 2021).

У відповідності до прийнятого варіанту сконструйовано та виготовлено обладнання, яке з достатньою імовірністю здатне імітувати процес формування ґрунтобетонного елемента у попередньо виготовленому шурфу Ø 100 мм. Використано ріжучі та змішуючі здатності ножа і змішаного пневмоцементного струменю.

За допомогою запропонованого обладнання ґрунтобетонну суміш готували паралельним різанням та змішуванням ґрунту ножами і струменем стислого повітря в суміші з цементом. При цьому періодично змінювали зони нагнітання регульованої кількості цементу по мірі підймання пристосування. Водцементну величину витримували в межах потреб гідрата-

ції в'язучого (Зоценко, 2013; Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, & Тютюкін, 2023).

Мета

Обґрунтувати доцільність поєднання струменевих і механічних способів виготовлення ґрунтоцементних армуючих елементів як фактору підвищення ефективності на основі виявлених взаємозалежностей між технологічними параметрами та оцінюючими показниками технологій.

Методика

Експериментальні дослідження спрямовані надати оцінку спроможності різання та змішування спільно механічними і струменевими засобами, розкрити залежності результатів формування ґрунтобетонного елемента від технологічних параметрів. Отримати названі результати дозволяє спеціально сконструйоване та виготовлене обладнання (рис. 1).

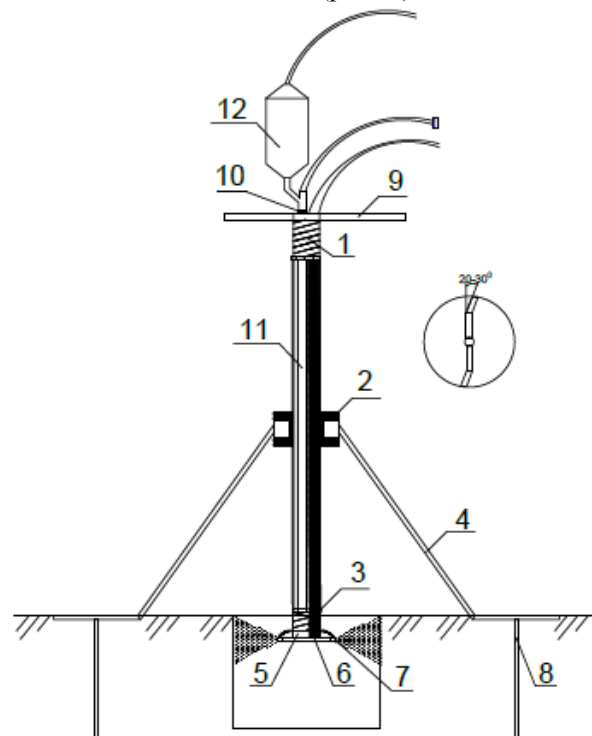


Рис. 1. Експериментальне обладнання для виготовлення досліджуваних ґрунтобетонних елементів:

- 1 – бурова штанга; 2 – обойма кріпильна; 3 – гайка;
- 4 – опора; 5 – бурове долото; 6 – отвір води;
- 7 – сопла повітряно-твердофазового струменю;
- 8 – фіксуєчий анкер; 9 – важіль обертання;
- 10 – гайка-штуцер; 11 – повітря-твердофазовий канал;
- 12 – ємність-дозатор цементу

Воно спроможне попередньо виготовити шурф Ø 100 мм і глибиною 600 мм з послідовним формуванням ґрунтобетонного елемента сумісною дією ножів та струменю стислого повітря в суміші з цементом.

Ці процеси відбуваються під час підймання робочих органів за допомогою гвинтової пари. Завдяки встановленим невеликим інтервалам змінюється кількість надходженого цементу завдяки зміні його вмісту в цементно-повітряній суміші. Регулюється також вода замішування у відповідності до розрахункової потреби гідратації та з урахуванням природної зволоженості ґрунту. Потрібна кількість води подається окремим каналом.

Сформований ґрунтобетонний елемент відкопували, встановлювали його перетин та визначали міцність в окремих зонах у відповідності до кількості цементу у ґрунтовій суміші.

Результати

Дослідження спрямовані на визначення закономірностей залежностей міцності та перетину утворених ґрунтобетонних елементів від надходження цементу в ґрунтову суміш і кута різання повітряними струменями. Результатами досліджень визначено міцність ґрунтобетону 12...16 МПа та збільшення перетину елемента на 120...140 мм. Наведено висновки, наукова та практична значимість результатів.

Підсумками аналізу та оцінювання технологій виготовлення ґрунтобетонних армуючих елементів глибинними механічними та струменевими способами знайдені ресурси їхнього подальшого вдосконалення за рахунок використання переваг кожного. Обидва способи потребують попереднього влаштування свердловини, але різання ґрунту зі стін свердловини та його змішування з нагнітаючою суспензією здійснюється під час зворотних рухів бурової штанги.

Простота, надійність та доступність обладнання надають безперечні переваги в технологіях глибинного механічного змішування. Але невеликий діаметр (300...400 мм) являється їхнім суттєвим недоліком, який компенсують додатковим виготовленням елементів.

В струменевих технологіях глибинного виготовлення елементів являються струмені цементної пульпи (одноструменеві) з можливим поєднанням дії стислого повітря (двострумене-

ві) та води (трюхструменеві). Переваги технології – ґрунтоцементні елементи можуть мати перетин Ø 800...1800 мм і більше. Їхнє використання у вітчизняній практиці обмежується потребами імпортованого малодоступного високонапірного обладнання (тиском 40...60 МПа). Загальним недоліком обох технологій являється низька міцність утвореного ґрунтобетону через обмежену можливість постачання цементу та надмірну кількість води в нагнітаючій цементній суспензії, а також води у разі трюхструменевих технологій. У підсумку виникає потреба у додаткових елементах і, відповідно, збільшення витрат усіх видів ресурсів та часу.

Згідно названого, чітко викреслюється напрямок подальшої модернізації технологій, перш за все, за рахунок сумісного використання переваг обох технологій та усунення їхніх недоліків. Технологію можливо класифікувати як струменево-механічну.

За допомогою експериментального обладнання (див. рис. 1), в якому своєрідне бурове долото має ріжучі та змішуючі ножі і пневмоцементні струмені комплексних функцій, а також має канал постачання води замішування в утворену суміш, виготовлені ґрунтобетонні елементи для послідовних досліджень.

Результати експериментальних досліджень (табл. 1) отримані з урахуванням регулювання вмісту цементу в окремих зонах утвореної ґрунтової суміші та кутів нахилу струменів до поверхні шурфу. Матриця планування експерименту та відповідні розрахунки ілюструють взаємозв'язки між міцністю ґрунтобетону, продуктивності технології та параметрами процесу.

Таблиця 1

Планування експерименту

X1	X2	Вміст цементу	Кут різання	Міцність МПа, У1	Продуктивність, мм У2
+	+	440	80	15,6	128
+	-	440	10	6,2	151
-	-	240	10	11,8	122
-	+	240	80	10,4	104
+	0	440	45	15,3	148
0	+	320	80	11,0	120
0	-	320	10	14,2	142
-	0	240	45	10,9	129

$$5,61176+0,2353X1+0,2824X2+ \\ +0,635X1X2 \rightarrow \text{opt } Y1 \\ 61,4118+4,2353X1-3,7059X2- \\ -0,294X1X2 \rightarrow \text{opt } Y2$$

Регулювання дозованого постачання цементу струменем стислого повітря та обмеження зволоженості ґрунтоцементної суміші потребами процесів гідратації в'язучого утворюють умови оптимізації показників міцності ґрунтобетону в межах 12...16 МПа. Різання ґрунту із стін експериментального шурфу і перемішування утвореної суміші спільно механічним та струменевим способами, а також перемішування утвореної суміші збільшують перетин ґрунтобетонного елемента до 240...280 мм. Запропонований варіант технології може бути віднесений (може мати назву) до глибинного струменево-механічного ґрунтозмішування.

Технологічні залежності вдосконаленого способу виготовлення ґрунтоцементних елементів визначені з використанням обладнання, в який своєрідне долото має ріжучі ножі і пневмоцементні струмені, а також канал надходження води замішування в утворену суміш. За рахунок дозованим цементу та води замішування отримані оптимальні значення параметрів технології та результатів. Наведені дані вказують на можливість отримати міцність ґрунтобетону в діапазоні 12...16 МПа та досягти перетину елемента 240...280 мм.

В кінцевому підсумку можливий наступний алгоритм реалізації представленої технології. Доцільна деяка модернізація традиційного бурового обладнання, перш за все, бурової штанги і долота. В порожнині бурової штанги мають бути розміщені трубки-канали пневмоцементної суміші і води замішування. Відповідно до цього змінюється конструкція вертлюга. В буровому долоті мають бути виходи повітряноцементних струменів в діаметрально-протилежних напрямках під кутом 10...15° до осі ножів. Вихід води замішування розміщується між струменями. В такому варіанті для постачання цементу може бути використане обладнання типу піскоструменевого апарату або цемент-гармати в сукупності з відповідними дозаторами.

Наукова новизна і практична цінність

Виявлені взаємозалежності між параметрами процесу і властивостями утворених ґрунтобетонних формувань надають обґрунтування теоретичним аспектам струменево-механічної технології.

Розроблені аналітичні залежності, які встановлюють взаємозв'язки міцності ґрунтобетону та водоцементним співвідношенням що підтверджує теоретичні положення про можливість дозованого постачання в'язучого і обмеженням води замішування граничними потребами гідратації в'язучого.

Виявлені залежності продуктивності струменево-механічного процесу від кута різання повітряно-цементного струменю до поверхні різання ґрунту.

Струменево-механічна технологія глибинного виготовлення ґрунтобетонних армуючих елементів спроможні знизити витрати ресурсів, термінів роботи та підвищити продуктивність процесу завдяки спільному різанню ґрунту струменями і ножами, а також покращити міцність ґрунтоцементу за рахунок нагнітання запрограмованої кількості цементу і обмеження води-замішування потребами гідратації в'язучого.

Підвищення ефективності технології потребує маловитратної модернізації бурового обладнання, яке обмежується заміною розчинозмішувального обладнання і трактів транспортування цементної суспензії на обладнання типу піскоструменевого апарату або цемент-гарматою та відповідними пневмопроводами.

Усувається необхідність систематичного очищення розчинозмішувачів та каналів транспортування цементних суспензій від їхніх залишків як факторів нераціональних витрат матеріалу, трудових ресурсів та часу.

Висновки

Відомі технології глибинного різання ґрунту струменями цементної суспензії з можливим поєднанням зі струменями води та стислого повітря спрямовані формувати ґрунтоармуючі елементи перетином 600...2000 мм, але потребують унікального високонадірного обладнання (тиск 40...60 МПа) імпортованого постачання. Механічні ґрунтозмішувальні технології виконують спрощеним доступним обладнан-

ням. Утворені при цьому елементи мають перетин до 300 мм. Обидві технології формують ґрунтобетон обмеженої міцності через недостатній вміст цементу та завелику насиченість суміші водою, яку містить цементна суспензія, а також використання струменів води у відповідних способах.

Доцільним напрямком подальшого вдосконалення технологій глибинного формування ґрунтобетонних елементів, тобто своєрідних паль, може бути варіант спільної роботи струменевого та механічного засобів різання ґрунту з наданням повітряному струменю додаткової функції транспортування визначеної кількості цементу.

Струменево-механічна технологія спроможна покращити ефективність результатів в частині збільшення міцності, продуктивності та скорочення термінів виготовлення ґрунтобетонної продукції.

Орієнтування струменево-механічної технології потребує обмеженої модернізації бурового обладнання.

Визначені характерні показники струменево-механічної технології підтверджують можливість отримати міцність та перетин ґрунтобетонних елементів відповідно до 16 МПа та 280 мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Tiutkin, O., Keršys, R., & Neduzha, L. (2021). Comparative analysis of options for strengthening the railway subgrade with vertical elements. *TRANSPORT*

MEANS 2021. *Sustainability: Research and Solutions*, II, 604-608.

Tiutkin, O. L., Neduzha, L., & Kalivoda, J. (2021). Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*, 16(2), 1-10.

ДБН В.2.1-10-2009 (2009). *Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДБН В.2.1-10:2018 (2018). *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Зоценко, М. Л. (2013). Ґрунтоцементні палі, що виготовляються бурозмішувальним методом. *Галузеве машинобудування, будівництво*, 3 (38), 110-122.

Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, В. Д., & Тютькін, О. Л. (2023). Аналіз результатів випробування підсилення земляного полотна армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 45-53.

Петренко, В. Д., Андреев, В. С., & Харченко, В. В. (2021). Порівняльний аналіз технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 69-77.

Петренко, В. Д., Тютькін, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74.

Пшінько, О. М., Радкевич, А. В., Нетеса, М. І., & Нетеса, А. М. (2020). *Технологія спеціальних робіт*. Дніпро: Журфонд.

Якименко, О. В. (2020). *Сучасні методи влаштування паль та шпунтових обгороджень*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

K. M. MISHUK

Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (066) 582 34 26, e-mail mishukivk@gmail.com, ORCID 0000-0001-5480-6032

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CLAY SOIL MIXING TECHNOLOGY

Purpose. Strengthen the effectiveness of the use of jet and mechanical methods for the preparation of soil-cement reinforcing elements as a factor of increasing efficiency based on the identified interdependencies between technological parameters and other displays of technology. **Methodology.** Drilling mixing technologies for the production of soil-cement reinforcing elements in industrial and industrial practice are based on clay mechanical and jet methods, which pose significant problems. An assessment of the technical indicators of both technologies has revealed consistent directions for achieving the highest targets. Research in a sufficient amount of the world supports the practice of producing soil-concrete elements in casting machines, for which the laboratory has specially designed and prepared experimental equipment. It's obvious working parts are to cut the soil with knives and air-cement jets and mix the mixture thoroughly. The pouch exhibits transport and cutting functions of various parameters. Accord-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ing to the indicators of the importance of soil concrete and changing the beam of the molded element, the effectiveness of the method in the presence of a mass of cement injected into the soil and cutting was determined. The dimensions of the element were established after hardening the soil concrete with a stretch of 28 inches in the first place in the soil with subsequent digging, vibrating, and testing for the purpose. **Findings.** The advantages of the technology of mechanical clay preparation of elements have been established due to the simplified and accessible technology, but the relatively small span of soil-concrete moldings changes the efficiency of the method. Jet technologies give the elements a great grip, but require a unique use of a high vice. Both technologies create low-value soil concrete through varying amounts of water. **Originality.** The combination of mechanical and jet-powered equipment in one drilling allows for the accumulation of obvious resources, which allows you to put a few technologies into the bag, remove soil-concrete elements of moving indicators. news and productivity. There are also problems with regulating cement and water mixing. **Practical value.** Based on these steps and the identified optimal cut of the wind jet, the value of soil concrete increases to 12...16 MPa and the span of the elements increases by 120...140 mm.

Keywords: soil-cement reinforcing elements, drilling and mixing technologies for strengthening soils, soil-concrete, well, technology of deep cutting of soils

REFERENCES

- Tiutkin, O., Keršys, R., & Neduzha, L. (2021). Comparative analysis of options for strengthening the railway subgrade with vertical elements. *TRANSPORT MEANS 2021. Sustainability: Research and Solutions*, II, 604-608. (in English)
- Tiutkin, O. L., Neduzha, L., & Kalivoda, J. (2021). Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*, 16(2), 1-10. (in English)
- DBN V.2.1-10-2009 (2009). *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.2.1-10:2018 (2018). *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Zotsenko, M. L. (2013). Gruntotsementni pali, shcho vyhotovliaiutsia burozmishuvalnym metodom. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 3 (38), 110-122. (in Ukrainian)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2023). Analiz rezultativ vyprovuvannia pid-sylennia zemlianooho polotna armovanyh gruntotsementnyh paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 45-53. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Andriev, V. S., & Kharchenko, V. V. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnolohii vlashtuvannia mikropal pid chas pidsylennia slabkykh gruntovykh osnov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 69-77. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianooho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnyh elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)
- Pshinko, O. M., Radkevych, A. V., Netesa, M. I., & Netesa, A. M. (2020). *Tekhnolohiia spetsialnykh robot*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
- Yakymenko, O. V. (2020). *Suchasni metody vlashtuvannia pal ta shpuntovykh obhorodzen*. Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 24.10.2023.

Прийнята до друку 29.11.2023.