

dr hab. inż. Sławomir Kwiecień, prof. PS¹⁾*

ORCID: 0000-0001-6401-2471

dr inż. Sergey Ihnatov¹⁾

ORCID: 0000-0002-5747-291X

Wpływ technologii wymiany dynamicznej na kształt kolumn w warunkach laboratoryjnych

Influence of the dynamic replacement technology on the shape of columns in laboratory conditions

DOI: 10.15199/33.2023.10.07

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dotyczących wpływu technologii formowania kolumn wymiany dynamicznej, tj. głębokości wykonania krateru początkowego, wysokości jego zasypu oraz energii uderzenia na kształt kolumn i ich długość. Badania przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym obserwację procesu wbijania. Wyniki badań wskazują na możliwość wykonywania najdłuższych kolumn o optymalnym kształcie z zastosowaniem niewielkiej energii przy częściowym zasypie krateru początkowego równego wysokości ubijaka.

Słowa kluczowe: wymiana dynamiczna; geoinżynieria; wzmocnienie podłoża; kolumny kamienne; grunt słaby.

Abstract. The paper presents the results of laboratory tests on the influence of the dynamic replacement column formation technology, i.e. the depth of the initial crater, the height of its filling and the impact energy on the shape of the columns and their length. The tests were carried out at a stand enabling the observation of the driving process. The test results indicate the possibility of making the longest columns of optimal shape with the use of less energy with partial filling of the initial crater equal to the height of the pounder.

Keywords: dynamic replacement; geotechnical engineering; ground improvement; stone columns; soft soil.

Wymiana dynamiczna [1 ÷ 3] jest jedną z kilkunastu metod wzmocnienia podłoża w geoinżynierii [4] w postaci częściowej, wgłębnej wymiany gruntu [5]. W jej wyniku formowane są kolumny z gruntu niespoitego o frakcji od piaszczystej do kamienistej, a sama technologia wydaje się dosyć prosta. W wyniku rzutu ciężkiego ubijaka na powierzchnię terenu wykonywany jest krater, który następnie jest zasypywany materiałem kolumn. Kolejne rzuty ubijaka wtlaczają materiał w podłoże, a po ponownym uformowaniu krateru sytuacja powtarza się. W końcowym etapie formowania kolumn maleją wpedy ubijaka i zwiększają się wypiętrzenia gruntu wokół kolumny [6, 7]. Z naszych doświadczeń krajowych wynika, że długość uformowanych kolumn w warunkach polowych nie przekracza 4,5 m [8], natomiast z doświadczeń zagranicznych znane są przypadki uformowania kolumn do 9 m [9, 10]. Ponadto istotną ro-

lę w przenoszeniu obciążeń przez kolumnę odgrywa jej rodzaj (oparte na warstwie nośnej lub zawieszona) oraz kształt [8]. W trakcie wykonywania kolumn nie mamy bezpośredniego wpływu na ich długość i średnicę, w przeciwieństwie do metod takich, jak wibrowymiana [11] czy technologia „Geopier” [12]. Zasadne staje się zatem poszukiwanie odpowiedniej technologii formowania kolumn, tj. dobranie głębokości wykonania krateru początkowego, wysokości jego zasypu i energii uderzenia, w celu wykonania kolumn dłuższych, niż wynika to z dotychczasowych doświadczeń, oraz o odpowiednim kształcie. Skłoniło to nas do przeprowadzenia badań o takim zakresie w warunkach laboratoryjnych, w których odzwierciedlono proces wymiany dynamicznej z możliwością obserwacji formowania kolumny.

Kształt kolumn wymiany dynamicznej i jego znaczenie w przenoszeniu obciążeń

Dotychczasowe badania, przeprowadzone przez jednego z autorów artykułu, obejmujące inwentaryzacje 65 ko-

lumn wymiany dynamicznej w warunkach polowych, wykazały, że mogą one się charakteryzować różnym kształtem i różną długością, a to z kolei ma wpływ na pracę obciążonych kolumn i przekazywanie nacisku zarówno na podłoże wzmocniane, jak i warstwę nośną [8, 13].

W zależności od warunków grunto-wo-wodnych oraz technologii formowania możemy wyróżnić dwie grupy kolumn: oparte na warstwie nośnej i płaskiej podstawie oraz zawieszona w warstwie wzmocnianej i na podstawie półkolistej [6, 13]. W pierwszej grupie, w zależności od miąższości wzmocnionego podłoża, wyróżniamy kolumny o kształcie: cylindrycznym, odwróconego ściętego stożka, beczkopodobne o średnicy największej w środku długości i w dolnej jej części [6, 13]. W drugiej grupie zinventaryzowano kolumny cylindryczne, o poszerzonej podstawie i poszerzonej głowicy.

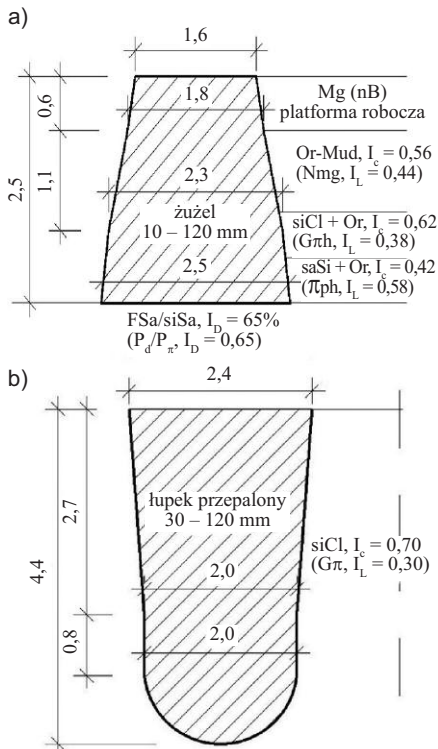
Przeprowadzone polowe próbnne obciążenia kolumn oraz analizy numeryczne [8, 13] wykazały wyraźny wpływ kształtu kolumn i sposobu opar-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*}) Adres do korespondencji:

slawomir.kwiecien@polsl.pl

cia na ich nośność oraz sztywność. Największą nośność i sztywność miały kolumny oparte na warstwie nośnej o płaskiej podstawie, a przede wszystkim te których średnica zwiększała się wraz z głębokością (rysunek 1a). Kolumny zawieszane o zmniejszającej się średnicy (rysunek 1b) charakteryzowały się najmniejszą nośnością i sztywnością. Zasadne jest więc dążenie w praktyce do wykonania pierwszego typu kolumn o długości przekraczającej dotychczasową, ustaloną na bazie doświadczeń (powyżej 4,5 m). Może to być możliwe przy odpowiednim doborze głębokości wykonania krateru początkowego, wysokości (objętości) jego zasypu oraz zastosowanej energii uderzenia.



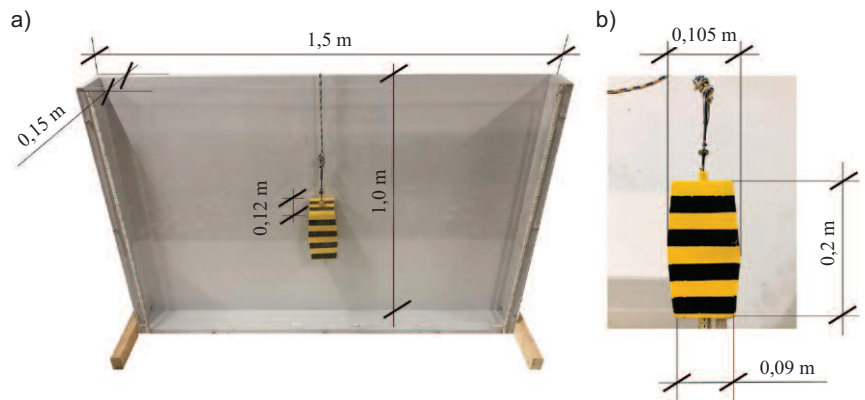
Rys. 1. Przykładowy kształt kolumn wymiany dynamicznej o skrajnie różnej nośności i sztywności [6]

Fig. 1. Example of dynamic replacement columns shapes with extremely different load-bearing capacity and stiffness [6]

Stanowisko badawcze i zastosowane materiały

Stanowisko badawcze przygotowano tak, aby była możliwość obserwacji procesu formowania kolumn w technologii wymiany dynamicznej. Badania prowadzono w prostokątnej skrzyni

o wymiarach zewnętrznych 1,5 m (szerokość) x 1,0 m (wysokość) x 0,15 m (grubość) wyposażonej w przedniej części w szybę ze szkła akrylowego (rysunek 2a). Grubość drewnianych ścianek skrzyni wynosiła 18 mm, a szkła akrylowego 16 mm [14].



Rys. 2. Stanowisko badawcze (a) i ubijak (b) [14]
Fig. 2. The test box (a) and the poulder (b) [14]

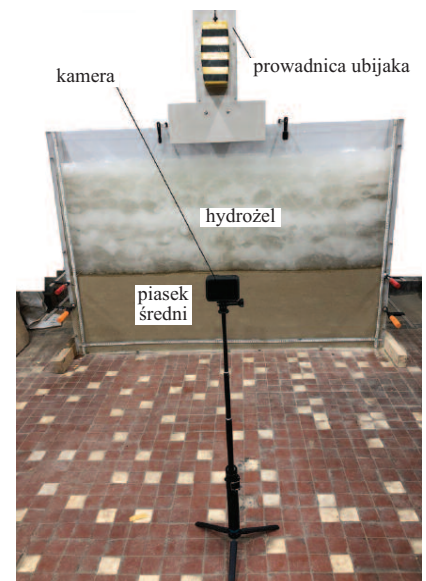
Wymiary ubijaka, uziarnienie kruszywa stosowanego na kolumny oraz miąższość warstwy wzmocnianej dobrano, stosując skalę geometryczną 1:10 w stosunku do warunków rzeczywistych. Kolumny były formowane ubijakiem w kształcie beczkopodobnym (rysunek 2b), zbliżonym do stosowanego w warunkach rzeczywistych, o wysokości 200 mm (H_p), szerokości środkowej 105 mm (D_p) oraz szerokości górnej i dolnej – 90 mm, grubości 120 mm i masie 11,02 kg. Ubijak w trakcie zrzutu był prowadzony w zamkniętej kwadratowej prowadnicy (fotografia 1), co pozwoliło na powtarzalne zrzuty z wysokości od 0,2 do 1,4 m [14].

Proces formowania kolumn był rejestrowany kamerą o częstotliwości nagrywania 100 kl/s. W przypadku każdego etapu badania wykonywano również dokumentację zdjęciową. Analizę przemieszczeń kruszywa w miękkoplastycznym hydrożelu przeprowadzono w programie GOM [15]. Dla poszczególnych zrzutów podczas formowania kolumn wyznaczono wektory przemieszczeń wypadkowych wprowadzanego materiału oraz ustalono końcowe kształty kolumn.

W przypadku wzmocnienia podłoża wymianą dynamiczną zwykle mamy do czynienia z trzema strefami materiałowymi. Są to słabe podłoże gruntowe, warstwa o dużej wytrzymałości i sztywności podścielająca warstwę słabą oraz

kolumny wymiany dynamicznej. Strefy te były symulowane w badaniach różnymi materiałami i gruntami. Warstwę nośną o miąższości 30 – 40 cm uformowano z piasku średniego. Kolumny wykonano ze żwiru średniego (średnicy ziaren 2 – 16 mm). Warstwę słabą modelował

usieciowany polimer akrylowy (p) mieszany z wodą (w). Przed ustaleniem właściwego stosunku p/w przeprowadzono dwuetapowe badania: przezroczystości i wytrzymałości mieszanki. Etap pierwszy, wstępny, obejmował makroskopowe sprawdzenie zachowanie mieszanki po wymieszaniu hydrożelu z wodą w proporcjach 1:6; 1:8; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25. Etap właściwy to wykonanie obciążenia próbnego wybranej mieszanki na stanowisku badawczym, w zakresie obciążeń pierwot-



Fot. 1. Stanowisko badawcze przed rozpoczęciem badań
Photo 1. The test box before tests

nych 0 – 285 Pa. Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku p/w – 1:15 (wagowo) zastosowana mieszanka charakteryzowała się dużym stopniem przezroczystości i stanem miękkoplastycznym. W przypadku mieszanki o p/w < 1:15 były trudności z wymieszaniem polimeru w wodzie (bardzo szybka reakcja z wodą, a w mieszanice pozostawały białe wtrącenia niezwiązanego polimeru), natomiast w przypadku zastosowania większej ilości wody (p/w > 1:15) hydrożel był w stanie płynnym [14]. Analiza wyników obciążenia próbnego oraz przeprowadzone obliczenia MES (analiza wsteczna) wykazały, że parametry mechaniczne mieszanki hydrożelu (p/w = 1:15) wybranej do badań wynosiły $E = 7 \text{ kPa}$; $\phi = 0,4^\circ$; $c = 75 \text{ Pa}$.

Przed przystąpieniem do badań właściwych określono parametry fizyczne i mechaniczne stosowanych gruntów. Wyznaczono uziarnienie metodą analizy sitowej (wg PN-EN ISO 17892-4:2017-01 [16]), minimalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego (wg PN-88/B-04481 [17]), gęstość właściwą (wg PN-EN ISO 17892-3:2016-03 [18]), parametry wytrzymałościowe w aparacie bezpośredniego ścinania (wg PN-EN ISO 17892-10:2019-01 [19]) oraz parametry odkształceniowe w edometrze (wg PN-EN ISO 17892-5:2017-06 [20]). Badania cech mechanicznych wykonano przy założeniu minimalnej (ρ_{dmin}) i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (ρ_{dmax}) (tabela 1 i 2).

Tabela 1. Wybrane cechy fizyczne gruntów stosowanych w badaniach

Table 1. Selected physical properties of the used soils

Rodzaj gruntu	Wskaźnik jednorodności uziarnienia C_u	Wskaźnik krzywizny C_s	Gęstość właściwa ρ_s [t/m ³]	Minimalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{dmin} [t/m ³]	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{dmax} [t/m ³]
Piasek średni (MSa)	3,33	0,92	2,68	1,59	1,94
Żwir średni (MGr)	3,43	1,59	2,66	1,50	1,83

Tabela 2. Wybrane cechy mechaniczne gruntów stosowanych w badaniach

Table 2. Selected mechanical properties of the used soils

Rodzaj gruntu / gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [t/m ³]	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]	Moduł ścisłości [MPa]:	
		pierwotnej*	wtórnej*
Piasek średni (MSa) / 1,59	29,9	4,1 – 38,0	14,5 – 93,5
Piasek średni (MSa) / 1,80	33,6	8,3 – 74,9	38,0 – 108,5
Zwir średni (MGr) / 1,53	36,1	6,2 – 44,8	93,3 – 124,1
Żwir średni (MGr) / 1,82	42,5	19,6 – 102,9	100,4 – 192,9

* pierwsza wartość z przedziału 25 – 50 kPa, wartość druga: 400 – 800 kPa

Program badań

W programie badań uwzględniono dotychczasowe doświadczenia uzyskane na opisanym stanowisku [14]. Pierwsza faza badań wykonanych w ramach projektu badawczego (nr SzN/I/33/DRPRO/2022), dotycząca wpływu miąższości warstwy wzmacnianej na kształt kolumn wymiany dynamicznej wykazała, że kolumny formowane w warstwie hydrożelu o miąższości 50 cm (stosunek miąższości warstwy wzmacnianej (H_s) do wysokości ubijaka (H_p) wynosił 2,5) charakteryzują się podstawą o kształcie półkolistym i nie opierają się pełnym przekrojem na warstwie nośnej, a jedynie punktowo (w postaci styku styczn-okrąg), a zatem jest to praktycznie kolumna zawieszona [14]. Z punktu widzenia przenoszenia obciążeń na warstwę nośną nie jest to optymalne rozwiązanie. Postanowiono więc kontynuować badania w warstwie hydrożelu o tej samej miąższości i sprawdzić, jak poszczególne parametry techniczne, tj. wysokość początkowego krateru (H_k), wysokość (objętość) jego zasypu oraz dobrana energia uderzenia, wpływają na długość i kształt kolumn.

Przed przystąpieniem do badań uformowano warstwę nośną, symulowaną piaskiem średnim, układanym warstwami zagęszczanymi ubijakiem ręcznym do stopnia zagęszczenia $I_D = 0,44$. Miąższość wynosiła 0,4 m, ale po pierwszej serii badań zmniejszono ją do 0,3 m. Powodem było wydostawanie się miękko-

stycznego hydrożelu ze stanowiska na skutek jego wyparcia przez materiał kolumny. Po wykonaniu warstwy nośnej, układano wymieszany hydrożel warstwami, o gęstości 1,01 t/m³. Przewidziano wykonanie trzech typów kolumn (opisane jako typy A, B i C), w przypadku których pierwszy uformowany krater miał wysokość: 0,2 m (typ A, $H_k/H_s = 0,2/0,5 = 0,4$); 0,3 m (B, $H_k/H_s = 0,6$) oraz 0,4 m (C, $H_k/H_s = 0,8$). Krater zasypywano żwirem w 50% (kolumny A_50), 75% (kolumny B_75, C_75) oraz 100% (kolumny A_100, B_100, C_100). Przy niepełnym zasypie kolumn typu B i C, zdecydowano się zwiększyć wysokość zasypu krateru (z 50 do 75%) ze względu na problemy stateczności ścian krateru wykonanego w miękkoplastycznej mieszanice. Po uformowaniu każdej kolumny, była ona usuwana ze stanowiska, a następnie uzupełniano brakującą objętość hydrożelu. W przypadku każdej z kolumn wykonano trzy serie badań – łącznie – 18 kolumn (tabela 3).

Tabela 3. Program badań

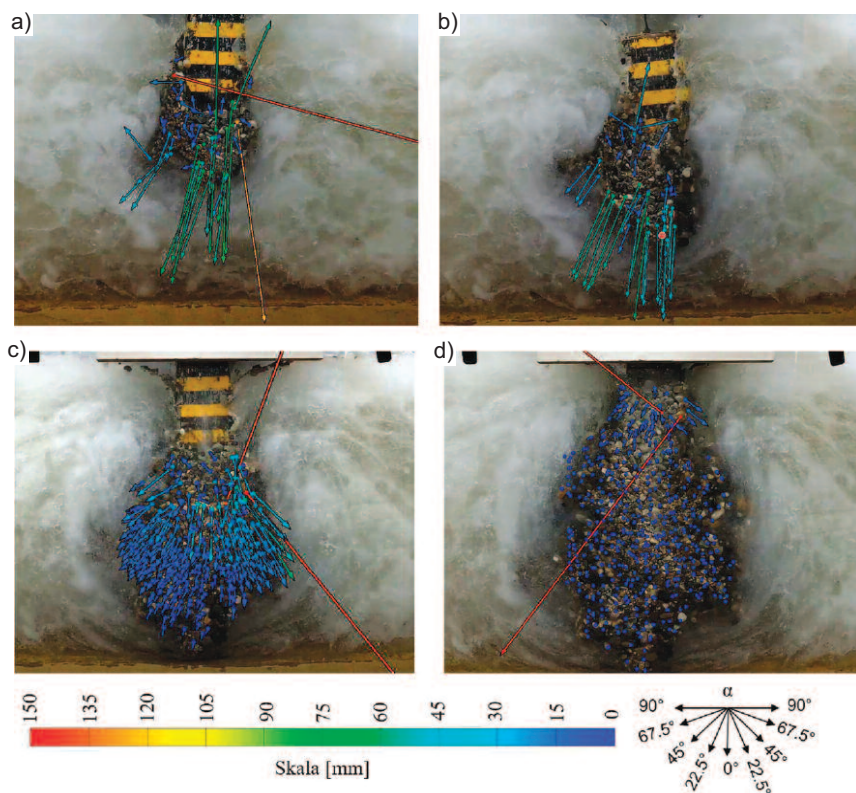
Table 3. The research program

Typ kolumny [-]	Wysokość uformowanego początkowego krateru [m]	H_k/H_s [-]	Zasyp krateru [%]	Liczba serii [-]
A_100/A_50	0,2	0,4	100/50	3/3
B_100/B_75	0,3	0,6	100/75	3/3
C_100/C_75	0,4	0,8	100/75	3 / 3

Wysokość zrzutu ubijaka wynosiła $0,2 \div 1,4 \text{ m}$ i była dobiera indywidualnie, np. w przypadku zbyt małego wpędu ubijaka zwiększano wysokość zrzutu i/lub nie stosowano zasypu krateru w danym kroku, z kolei zbyt duży początkowy wpęd ubijaka powodował zmniejszenie wysokości jego zrzutu. Przyjęto zasadę, że wpęd ubijaka powinien wynosić 75 ÷ 125% jego wysokości (z wyjątkiem krateru początkowego).

Wyniki badań

W trakcie formowania kolumny typu A, przy pełnym zasypie krateru (A_100), największe przemieszczenia pionowe występują w jej osi, co skutkuje powstaniem podstawy kolumny w kształcie półkolistym (fotografia 2a),



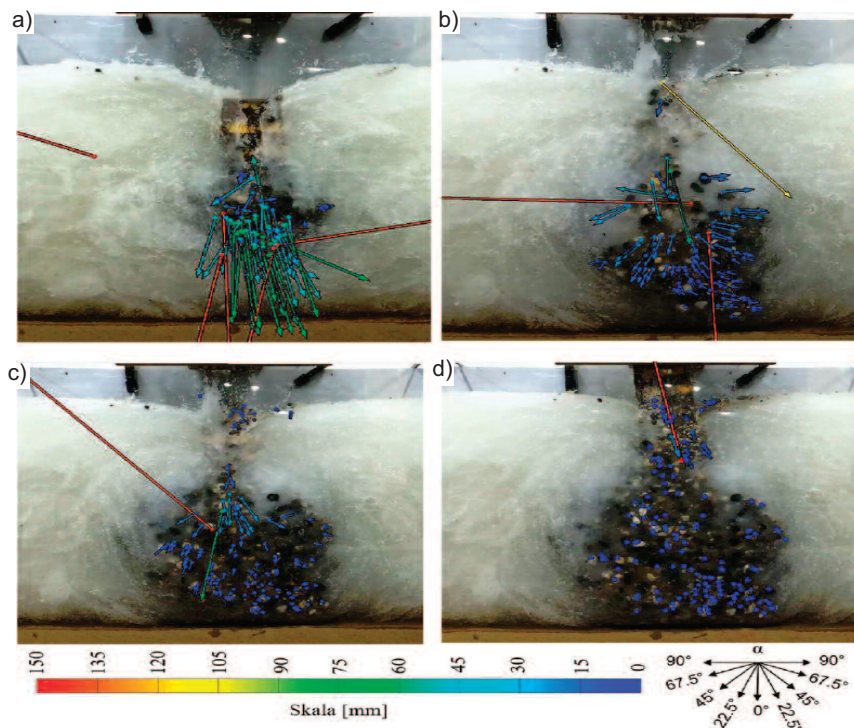
Fot. 2. Wektory przemieszczeń wypadkowych kolumny typu A przy pełnym zasypie krateru (A_100) po zrzucie ubijaka: a) 1.; b) 4.; c) 10.; d) 15. (dogęszenie głowicy kolumny)
Photo 2. The vectors of the resultant displacements of the backfill material column type A with full crater backfill (A_100), after pounder: a) 1st drop; b) 4th drop; c) 10th drop, d) 15th drop (compaction of column head)

która następnie, w wyniku wbijania, przemieszcza się w dół, równocześnie powiększając się na boki (fotografia 2b). W końcowej fazie formowania (fotografia 2c) największe przemieszczenia odnotowano w górnej części kolumny, a po uformowaniu (fotografia 2d) ma ona kształt „gruszki”, opierając się punktowo na warstwie nośnej.

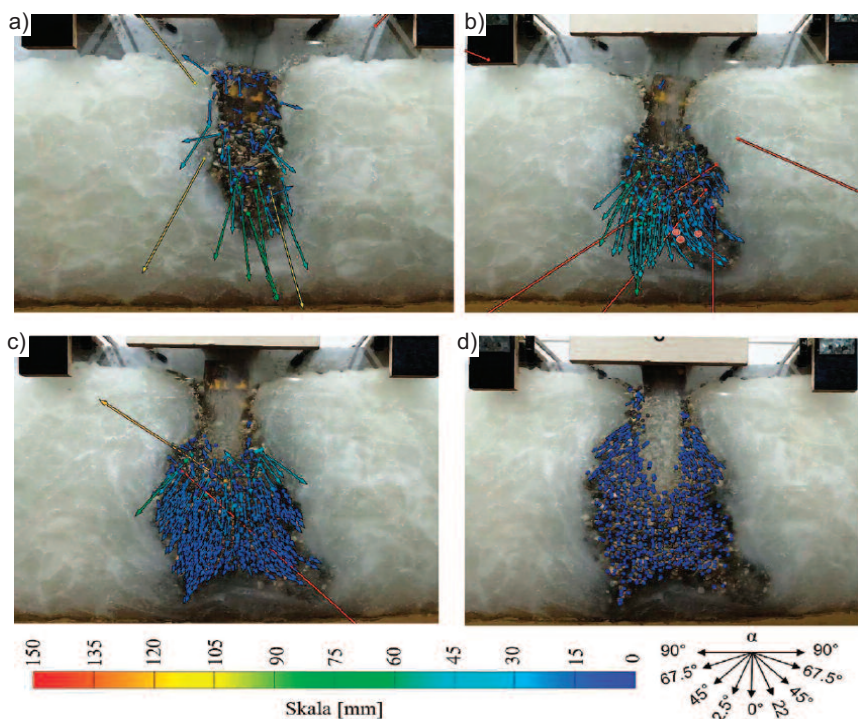
W przypadku zastosowania mniejszego zasypu krateru (kolumna A_50), w początkowej fazie wbijania trzon przemieszcza się niemal pionowo w kierunku warstwy nośnej (fotografia 3a), a po dojściu do stropu warstwy piasku materiał kolumny przemieszcza się na boki (fotografia 3b), przez co po kolejnych zrzutach formuje się płaska podstawa (fotografia 3c). W efekcie końcowym uzyskujemy kolumnę w kształcie zbliżonym do „gruszki” z płaską podstawą (fotografia 3d). Po wykonaniu wstępnego krateru kolumny typu B i przy jego pełnym zasypie (B_100) od początku formowania kolumny dochodzi do obrotu jej

trzonu (fotografie 4a i b), a wraz z kolejnymi zrzutami obrót zwiększa się do ok. 70° i wbijany materiał zaczyna przemieszczać się również z drugiej strony kolumny (dochodzi do ścięcia w górnej części trzonu kolumny, fotografie 4b i c). W końcowym etapie podstawa kolumny ma nieregularny kształt i nie osiąga warstwy nośnej. Trzon kolumny powyżej podstawy ma w miarę stałą średnicę, zwężając się w górnej części kolumny (fotografia 4d).

Stosowanie częściowego zasypu krateru kolumny typu B (B_75) powoduje pionowe przemieszczanie materiału kolumny w początkowej fazie wbijania (fotografia 5a), lecz przed osiągnięciem warstwy nośnej (fotografia 5b) trzon obraca się, a dalsze wbijanie kolumny zwiększa jego obrót do ok. 70° (fotografie 5c i d), materiał kolumny ponad podstawą zaczyna przemieszczać się obustronnie i powstaje nieciągłość na styku podstawa – trzon. Końcowy kształt przyjmuje postać smukłej „gruszki” (fotografia 5d) z punktowym oparciem na warstwie nośnej.

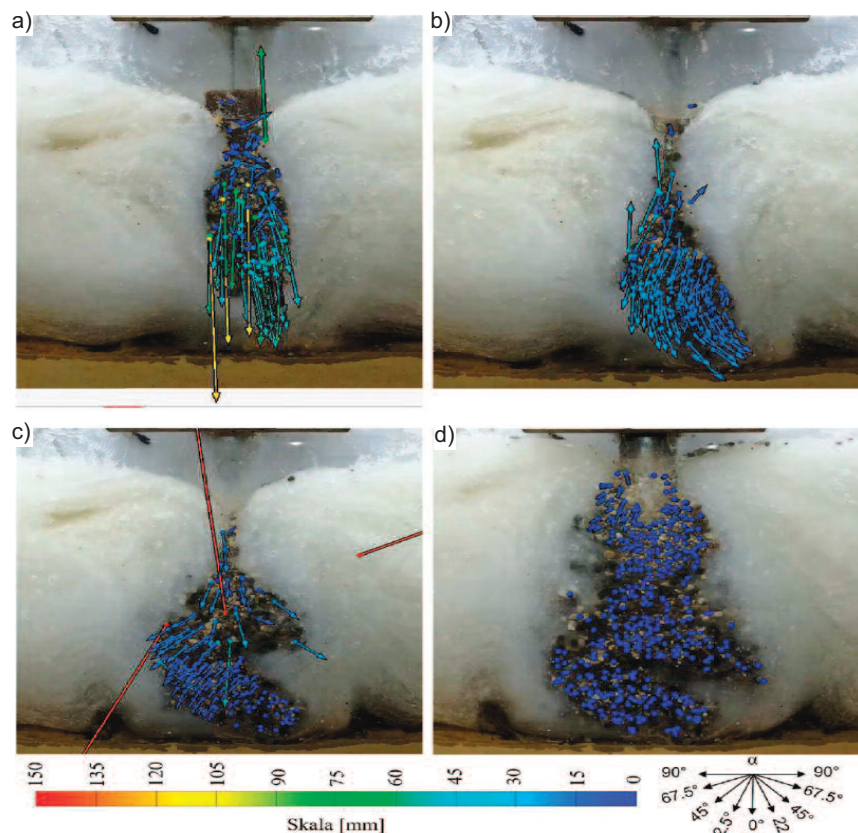


Fot. 3. Wektory przemieszczeń wypadkowych kolumny typu A przy częściowym zasypie krateru (A_50) po zrzucie ubijaka: a) 3.; b) 12.; c) 20.; d) 28. (dogęszenie głowicy kolumny)
Photo 3. The vectors of the resultant displacements of the backfill material column type A with partial crater backfill (A_50), after pounder: a) 3rd drop; b) 12th drop; c) 20th drop, d) 28th drop (compaction of column head)



Fot. 4. Wektory przemieszczeń wypadkowych kolumny typu B przy pełnym zasypie krateru (B_100) po zrzucie ubijaka: a) 1.; b) 4.; c) 9.; d) 14. (dogęszczenie głowicy kolumny)

Photo 4. The vectors of the resultant displacements of the backfill material column type B with full crater backfill (B_100), after poulder: a) 1st drop; b) 4th drop; c) 9th drop; d) 14th drop (compaction of column head)



Fot. 5. Wektory przemieszczeń wypadkowych kolumny typu B przy częściowym zasypie krateru (B_75) po zrzucie ubijaka: a) 1.; b) 4.; c) 12.; d) 25. (dogęszczenie głowicy kolumny)

Photo 5. The vectors of the resultant displacements of the backfill material column type B with partial crater backfill (B_75), after poulder: a) 1st drop; b) 4th drop; c) 12th drop; d) 25th drop (compaction of column head)

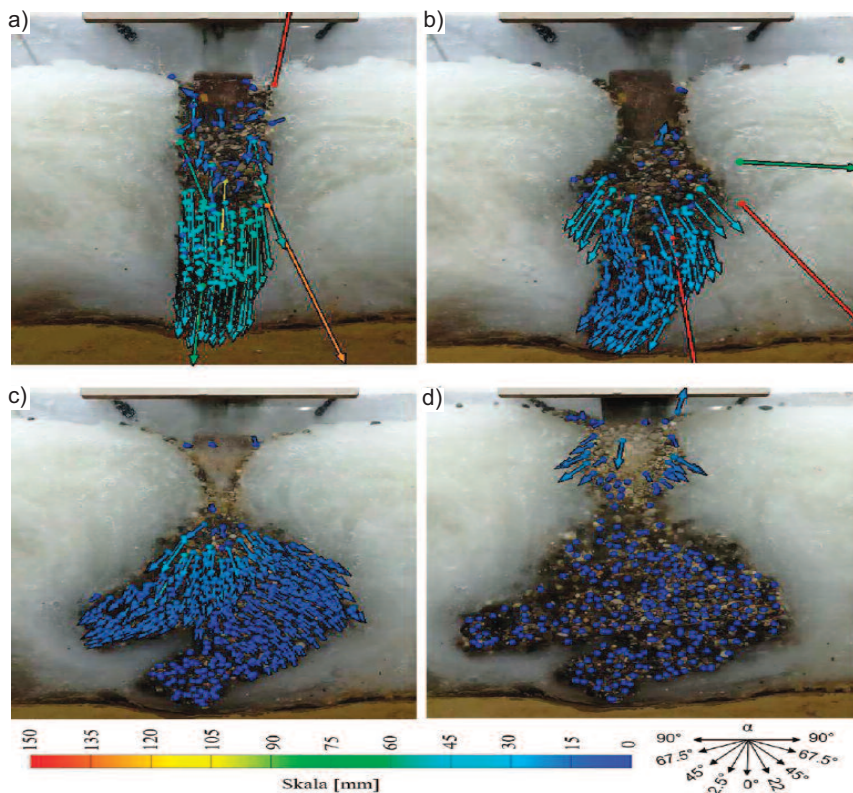
W przypadku wykonania krateru o największej długości (typ C) i przy pełnym jego zasypie (C_100) po początkowym pionowym przemieszczeniu trzonu kolumny (fotografia 6a), ale jeszcze przed osiągnięciem stropu warstwy nośnej, dochodzi do powiększenia trzonu kolumny w jej górnej części (obustronne rozchodzenie kruszywa na boki), a w dolnej odpowiednio do jego obrotu (fotografia 6b). W przypadku dalszego wbijania obrót dolnej części trzonu powiększa się, a z drugiej strony kolumny materiał przemieszcza się na boki (fotografia 6c) i w efekcie kolumna jedynie punktowo osiąga strop warstwy nośnej oraz charakteryzuje się nieregularnym kształtem (fotografia 6d).

Podobne zachowanie materiału kolumny typu C w trakcie wbijania obserwowane jest w przypadku częściowego zasypu krateru (kolumna C_75) i ma mniejszą średnicę niż typu C_100, ze względu na krótszy, obracający się trzon (fotografia 7a – d).

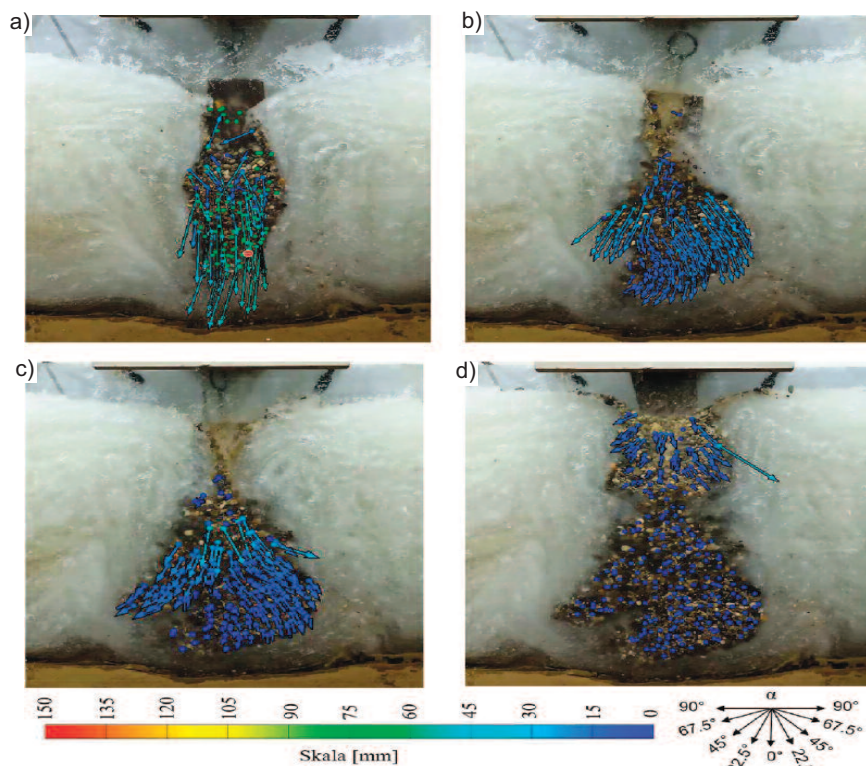
Wielkość energii uderzenia w trakcie formowania kolumn, określonej jako suma iloczynu wysokości zrzutu, masy ubijaka oraz działającej grawitacji podzielonej przez powierzchnię podstawy ubijaka, oraz ilość użytego żwiru na formowane kolumn przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Analiza wyników badań i wnioski

Stosowanie różnej wysokości formowania krateru początkowego oraz wielkości jego zasypu ma wpływ na konieczną do zastosowania energię uderzenia, ilość stosowanego kruszywa, a w konsekwencji kształt kolumn. Największa początkowa energia zrzutu ubijaka konieczna jest do zastosowania w przypadku kraterów całkowicie zasypywanych spełniających warunek $H_k/H_s = 0,6$ i $0,8$ (odpowiednio kolumny B_100 i C_100) – rysunek 3. Jest to spowodowane koniecznością przebiccia warstwy słabej znajdującej się pod podstawą formowanej kolumny w celu jej pograżenia – im dłuższy zasypywany krater początkowy, tym mniejsze naprężenia w podstawie krateru przy tej samej wysokości zrzutu ubijaka. Mniejsze wartości energii uderzenia, wymuszone przez zbyt duże wpędy zrzucanego ubi-



Fot. 6. Wektory przemieszczeń wypadkowych kolumny typu C przy pełnym zasypie krateru (C_100) po zrzucie ubijaka: a) 1.; b) 3.; c) 12.; d) 23. (dogęszczenie głowicy kolumny)
 Photo 6. The vectors of the resultant displacements of the backfill material column type B with full crater backfill (C_100), after poulder: a) 1st drop; b) 3th drop; c) 12th drop; d) 23th drop (compaction of column head)

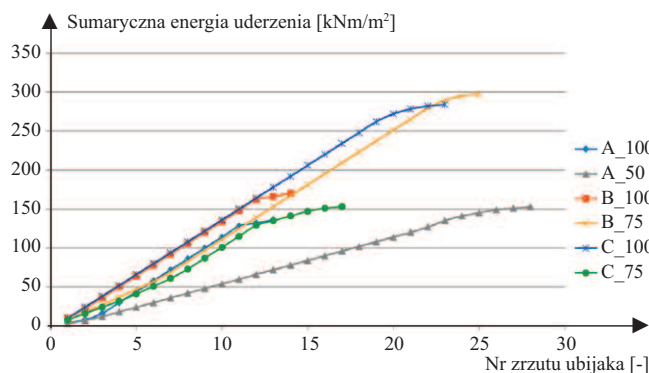


Fot. 7. Wektory przemieszczeń kolumny typu C przy częściowym zasypie krateru (C_75) po zrzucie ubijaka: a) 1.; b) 4.; c) 10.; d) 16. (dogęszczenie głowicy kolumny)
 Photo 7. The vectors of the resultant displacements of the backfill material column type C with partial crater backfill (C_75), after poulder: a) 1st drop; b) 4th drop; c) 10th drop; d) 16th drop (compaction of column head)

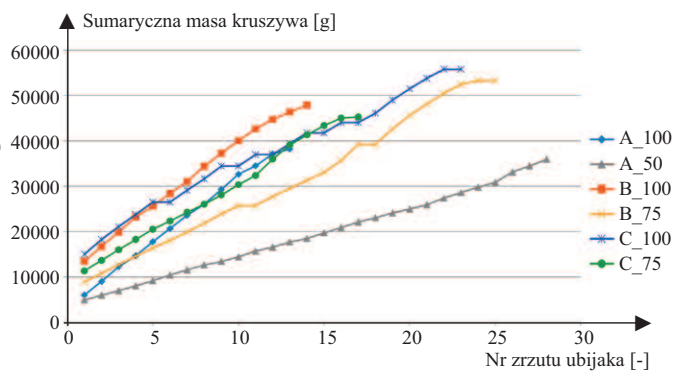
jaka, zaobserwowano w przypadku kolumn o mniejszym zasypie krateru (A_50, B_75, C_75) oraz krateru w pełni zasypanego ($H_k/H_s = 0,6$, kolumna A_100), przy czym wartość najmniejsza dotyczyła kolumny A_50.

Mniejszy zasyp krateru w przypadku kolumn A_50 i B_75 skutkuje większą liczbą zrzutów ubijaka, choć z mniejszej wysokości, ale z większą sumaryczną energią uderzenia niż przy stosowaniu pełnego zasypu (rysunek 3). Wraz ze zwiększaniem długości początkowej krateru zwiększa się ilość zastosowanego kruszywa na kolumnę (rysunek 4). Dla dwóch skrajnych przypadków, masa kruszywa kolumny B_75 jest o 50% większa niż kolumny typu A_50. Zwiększone zapotrzebowanie na kruszywo kolumn typu B i C jest spowodowane próbą uzyskania kolumny o ciągłym trzonie i płaskiej podstawie, po wystąpieniu obrotu trzonu. Wtedy też, w górnej części trzonu dochodzi do ścięcia materiału i kolejno wbijany materiał przemieszcza się jedno- lub dwustronnie, nadmiernie zwiększając średnicę kolumny i ilość zastosowanego materiału.

Najistotniejsze z punktu widzenia sposobu przekazywania obciążenia jest uformowanie kolumny o podstawie płaskiej, opartej na warstwie nośnej oraz trzonie ciągłym i poszerzającym się wraz z głębokością. Wymaganie takie spełnia kolumna typu A_50, której krater początkowy spełniał warunek $H_k/H_s = 0,4$ i w 50% był zasypywany. Przy pełnym zasypie krateru (A_100) uzyskiwano również poszerzający się trzon, ale podstawa była punktowo oparta na warstwie nośnej. Powiększona podstawa kolumny skutecznie zmniejsza penetrację jej trzonu w warstwę wzmacnianą, natomiast stosowanie dłuższych, zasypanych w pełni bądź częściowo kraterów początkowych (kolumny typu B i C), ze względu na większą od kolumny typu A smukłość początkowego trzonu, zwiększa prawdopodobieństwo obrotu trzonu i uformowanie kolumn tylko częściowo opartych na warstwie nośnej (wszystkie przypadki B i C) oraz nieciągłym trzonie (B i C z wyjątkiem kolumny B_75). W warunkach połowych prawdopodobieństwo obrotu trzonu zwiększa



Rys. 3. Energia uderzenia stosowana przy formowaniu kolumn
Fig. 3. Impact energy used in columns formation



Rys. 4. Masa żwiru zastosowanego przy formowaniu kolumn
Fig. 4. Mass of gravel used in columns formation

sza fakt, że uderzenia ubijaka mogą być przesunięte względem osi formowanego trzonu (podczas formowania kolumny dźwig wielokrotnie odkłada na bok ubijak w trakcie zasypu krateru). Ponadto wraz ze zmniejszaniem się odległości między podstawą kolumny a warstwą nośną, zwiększa się wpływ tej ostatniej, zmniejszając penetrację podstawy w warstwę wzmocnianą [14]. Kształt uformowanych kolumn typu A_100 jest identyczny z kształtem kolumn z wcześniejszych badań [14].

Należy podkreślić, że kolumna o optymalnym kształcie (A_50) została uformowana z zastosowaniem najwolniej zwiększającej się energii uderzenia (zrzuty ubijaka z najmniejszej wysokości) oraz najmniejszej ilości kruszywa. W praktyce może to oznaczać, że dysponując niewielkim sprzętem, przy odpowiednim formowaniu i zasypie krateru, jesteśmy w stanie wykonać kolumnę opartą na warstwie nośnej, z poszerzającą się wzdłuż długości średnicą.

Przeprowadzone badania nie obejmowały wpływu stanu wzmocnionej warstwy oraz kształtu stosowanego ubijaka na technologię formowania kolumn. Może to być dalszym kierunkiem badań laboratoryjnych i/lub polowych. Zdajemy sobie sprawę z jakościowego charakteru badań, na który wpływ mają m.in. efekt skali czy możliwość rozchodzenia się kruszywa jedynie w dwóch wymiarach (powoduje to np. zwiększenie średnicy kolumn w obserwowanej płaszczyźnie). Wyniki te są podstawą do przeprowadzenia testów w skali naturalnej, w gruntach o małej

wytrzymałości i sztywności (np. torfach), a następnie opracowania wytycznych dotyczących technologii formowania kolumn wymiany dynamicznej.

Literatura

[1] Hamidi B. Distinguished ground improvement projects by dynamic compaction or dynamic replacement. Ph. D. Thesis, Curtin University. 2014.

[2] Gryczmański M. Wzmacnianie podłoża wbijanymi kolumnami kamiennymi. Przegląd doświadczeń śląskich. Inżynieria i Budownictwo. 2003; 3: 123 – 126.

[3] Kłosiński B. Wzmacnianie podłoża słupami tłuczniowymi formowanymi metodą ubijania. Inżynieria Morska i Geotechnika. 1992; 3: 171 – 173.

[4] Pisarczyk S. Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2020.

[5] Gryczmański M. Dynamiczne metody wzmocniania podłoża gruntowego. XVI Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji. Ustroń, 2001; 2: 41 – 57.

[6] Kwiecień S. Wzmacnianie podłoża gruntowego metodą wymiany dynamicznej. Materiały Budowlane. 2023. DOI: .

[7] Kanty P. Analiza doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej gruntu na otoczenie. Praca doktorska. Gliwice; 2014.

[8] Kwiecień S. Odształcalność kolumn wymiany dynamicznej ustalana na podstawie próbnych obciążeń. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej; 2019.

[9] Chu J, Varaksin S, Klotz U. Mengé P.: Construction Processes. State of the Art Report. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria. 2009: 3006 – 3135.

[10] Guo J, Wang R, Yang Z, Zhu C. Mucky clay treatment by dynamic compacted gravel column method. Rock and Soil Mechanics. 1993; 14: 2: 61 – 74.

[11] Castro J. Modeling stone columns. Materials. 2017; 10 (7): 782, 1 – 23.

[12] Razeghi HR, Niroumand B, Ghiassian H. A field study of the behavior of small-scale single rammed aggregate piers, testing methodology and interpretation. Scientia Iranica. 2011; 18 (6): 1198 – 1206.

[13] Kwiecień S. Influence of Load Plates Diameters, Shapes of Columns and Columns Spacing on Results of Load Plate Tests of Columns Formed by Dynamic Replacement. Sensors, 2021; DOI: 10.3390/s21144868.

[14] Kwiecień S., Ihnatov S., Kowalska M. Influence of soft layer thickness on the aggregate displacement in the backfill material of dynamic replacement columns – results of laboratory model tests. Archives of Civil Engineering. 2023; DOI: 10.24425/ace.2023.146079.

[15] Jasiński R, Stebel K, Domin J. Application of the DIC Technique to Remote Control of the Hydraulic Load System. Remote Sensing. 2020; https://doi.org/10.3390/rs12213667.

[16] PN-EN ISO 17892-4:2017-01 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Badanie uziarnienia gruntów. 2017.

[17] PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu. 1988.

[18] PN-EN ISO 17892-3:2016-03 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 3: Badanie gęstości właściwej. 2016.

[19] PN-EN ISO 17892-10:2019-01 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 10: Badania w aparacie bezpośredniego ścinania. 2019.

[20] PN-EN ISO 17892-5:2017-06 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów. PKN. 2017.

Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Solidarni z naukowcami, nr SzN/I/33/DRPRO/2022, pt. Analiza doświadczalna procesu formowania kolumn wymiany dynamicznej w warunkach laboratoryjnych.

Przyjęto do druku: 02.10.2023 r.