

https://doi.org/10.51885/3134-8041_IACS_2026_3_12

MPHTI 67.09.29

ПРИМЕНИМОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ УСТРОЙСТВА ВЕРТИКАЛЬНЫХ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЩЕБЕНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УПРОЧНЕНИИ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

ӘЛСІЗ ТОПЫРАҚТЫ НЫҒАЙТУ КЕЗІНДЕ ҚИЫРШЫҚ ТАСТЫ МАТЕРИАЛДАРДАН ЖАСАЛҒАН ТІК АРМАТУРАЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРДІ ОРНАТУ ӘДІСТЕРІНІҢ ҚОЛДАНЫЛУЫ МЕН ТИІМДІЛІГІ

APPLICABILITY AND EFFECTIVENESS OF METHODS FOR CONSTRUCTING VERTICAL REINFORCING ELEMENTS MADE OF CRUSHED STONE MATERIALS FOR STRENGTHENING WEAK SOILS

С.Ж. Джумадилова ¹, А.Т. Ергазы ¹, В.А. Хомяков ¹, А.О. Сагыбекова ^{2,3*},
Д.М. Мукашев ²

¹Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Казахстан

²Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан

³Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

*Автор-корреспондент: e-mail: Сагыбекова А.О., a-orazbekovna@inbox.ru

Ключевые слова:

слабые грунты,
упрочнение оснований,
щебёночные
материалы,
армирование,
щебёночные колонны,
Казахстан,
виброуплотнение,
сейсмические условия.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается применение метода улучшения грунтов для слабых оснований — устройства вертикальных армирующих элементов из крупнозернистых (щебёночных) материалов. Описаны принципы данного метода, классификация конструктивных решений и основные технологические особенности их возведения. Представлен обзор международного и отечественного опыта использования этой технологии для слабых и водонасыщенных грунтов. Особое внимание уделено условиям, влияющим на эффективность применения метода в Казахстане, где широко распространены слабые песчаные, глинистые и торфяные грунты с высоким уровнем грунтовых вод, а также районы с высокой сейсмической активностью. Обсуждаются преимущества и ограничения технологии, а также перспективные направления её дальнейшего развития в национальной геотехнической практике. Использование щебёночных свай широко распространено в мировой практике, особенно в странах с развитой транспортной и промышленной инфраструктурой. Данный метод активно применяется при строительстве насыпей, фундаментов зданий и различных инженерных сооружений, а также при укреплении склонов и дамб. Его основными преимуществами являются относительная простота устройства, экономическая эффективность, экологическая безопасность, надёжность в эксплуатации и возможность использования местных строительных материалов.



© 2026 С.Ж. Джумадилова, А.Т. Ергазы, В.А. Хомяков, А.О. Сагыбекова, Д.М. Мукашев

Данная работа распространяется на условиях лицензии

Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Түйінді сөздер:

әлсіз топырақтар, негізді
нығайту, қиыршық тасты
материалдар,
арматуралау, қиыршық
тасты бағаналар,
Қазақстан,
вибронығыздау,
сейсмикалық жағдайлар.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада әлсіз негіз топырақтарын нығайту әдісін қолдану қарастырылады - ірі түйіршікті (ұсақталған тас) материалдардан жасалған тік арматуралық элементтерді орнату. Онда осы әдістің принциптері сипатталады, жобалау шешімдері жіктеледі және оларды салудың негізгі технологиялық аспектілері зерттеледі. Сондай-ақ, бұл технологияны әлсіз және суға қаныққан топырақтарға қолданудың халықаралық және отандық тәжірибесіне шолу жасалады. Әсіресе, Қазақстанда бұл әдістің тиімділігіне әсер ететін жағдайларға, жер асты суларының деңгейі жоғары әлсіз құмды, сазды және шымтезекті топырақтарға, сондай-ақ сейсмикалық белсенділігі жоғары аймақтарға ерекше назар аударылады. Бұл технологияның артықшылықтары мен шектеулері, сондай-ақ оны ұлттық геотехникалық тәжірибеде одан әрі дамытудың перспективалы бағыттары талқыланады. Ұсақталған тас үйінділерін пайдалану бүкіл әлемде, әсіресе көлік және өнеркәсіптік инфрақұрылымы дамыған елдерде кең таралған. Бұл әдіс үйінділерді, ғимараттардың іргетастарын және әртүрлі инженерлік құрылымдарды салуда, сондай-ақ беткейлер мен бөгеттерді тұрақтандыруда белсенді қолданылады. Оның негізгі артықшылықтары – жобалаудың салыстырмалы қарапайымдылығы, үнемділігі, экологиялық қауіпсіздігі, пайдалану сенімділігі және жергілікті құрылыс материалдарын пайдалану мүмкіндігі.

keywords:

weak soils, ground
improvement, crushed
stone materials,
reinforcement, stone
columns, Kazakhstan,
vibrocompaction, seismic
conditions.

ABSTRACT

The article examines the application of a soil improvement method for weak foundations—the installation of vertical reinforcing elements made of coarse-grained (crushed stone) materials. It describes the principles of this method, classifies design solutions, and explores the key technological aspects of their construction. It also provides an overview of international and domestic experience using this technology for weak and water-saturated soils. Particular attention is paid to the conditions affecting the effectiveness of this method in Kazakhstan, where weak sandy, clayey, and peaty soils with high groundwater levels are common, as well as areas with high seismic activity. The advantages and limitations of this technology are discussed, as well as promising areas for its further development in national geotechnical practice. The use of crushed stone piles is widespread worldwide, particularly in countries with developed transport and industrial infrastructure. This method is actively used in the construction of embankments, building foundations, and various engineering structures, as well as in the stabilization of slopes and dams. Its main advantages are the relative simplicity of the design, cost-effectiveness, environmental safety, operational reliability and the possibility of using local building materials.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов, используемых для улучшения состояния слабых грунтов основания, является устройство вертикальных армирующих элементов из крупнозернистых материалов, известных как щебёночные, или каменные, колонны. Этот метод заключается в формировании вертикальных колонн из гравия или щебёночного камня в слабом грунтовом массиве. Эти колонны взаимодействуют с окружающим грунтом, увеличивая его несущую способность, уменьшая осадку и ускоряя уплотнение.



Благодаря высокой дренажной способности этих элементов эффективно удаляется поровая вода, что особенно важно при строительстве на слабых и водонасыщенных грунтах.

Использование щебеночных свай широко распространено в международной практике, особенно в странах с развитым транспортным и промышленным строительством. Этот метод применяется при возведении насыпей, фундаментов зданий и различных инженерных сооружений, а также для стабилизации склонов и дамб. Основными преимуществами этой технологии являются ее относительная простота, экономичность, экологичность и возможность использования местных материалов.

В Казахстане проблема укрепления слабых грунтов особенно актуальна, поскольку значительная часть территории страны состоит из водонасыщенных глинистых и торфяных грунтов с низкой несущей способностью и высокой сжимаемостью. Дополнительные проблемы возникают из-за сейсмических условий в некоторых регионах, которые требуют повышения устойчивости фундамента. Поэтому изучение условий применения щебеночных свай в местных инженерно-геологических условиях имеет как научное, так и практическое значение.

В данной статье представлен обзор метода укладки щебня, рассмотрены принципы его работы, классификация конструктивных решений и особенности его применения в Казахстане. В статье также представлен обзор международного опыта применения этой технологии и обсуждаются ее преимущества, ограничения и перспективы дальнейшего развития в национальной геотехнической практике.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод устройства каменных колонн был разработан в Европе в середине XX века как развитие технологий глубокого уплотнения грунтов (Kirsch & Kirsch, 2017). Первые применения связаны с работами немецких инженеров Франца Менара и Вильгельма Кирша в 1950-1960-х годах. Менар считается основоположником технологии виброзамещения, ставшей альтернативой методу виброуплотнения песчаных грунтов (Kirsch & Kirsch, 2017).

В 1970-х годах метод получил широкое распространение в Великобритании, Японии и США, где появились первые стандарты и рекомендации (Menard Soltraiteance, Keller Grundbau). В 1980-1990-е годы оборудование значительно усовершенствовалось - вибраторы стали мощнее, появилась подача щебня снизу, что позволило работать на глубинах более 20 м.

С 2000-х годов технология совершенствуется за счёт применения геосинтетических материалов, дренажных элементов и численного моделирования. В настоящее время метод широко используется по всему миру для упрочнения слабых глинистых, торфяных и песчаных грунтов при строительстве насыпей, фундаментов и инженерных сооружений.

Строительство сооружений часто предполагает использование грунта. Когда инженеры обнаруживают, что естественные условия грунта не подходят для запланированных ими работ, они сталкиваются с несколькими альтернативами:

1. Избегание использования неподходящих грунтов при выборе типа глубокого фундамента;
2. Извлечение слабых или неподходящих грунтов и замена их более прочными и устойчивыми материалами;
3. Перепроектирование конструктивных решений с учётом фактических инженерно-геологических условий;
4. Улучшение характеристик существующего основания до уровня, соответствующего проектным требованиям.

Перед выбором соответствующих мер по улучшению грунта необходимо определить требования, основанные на основных условиях предельного состояния и критериях пригодности к эксплуатации для нормальной эксплуатации сооружения. Эти требования включают:

- повышенная плотность и прочность на сдвиг, что положительно влияет на стабильность;
- снижение коэффициента сжимаемости, что положительно влияет на деформацию;
- снижение или увеличение проницаемости для уменьшения потока воды и/или ускорения уплотнения;
- повышение однородности для минимизации деформаций.

Если не учитывать способ замены грунта, то методы укрепления грунта можно разделить на уплотнение и армирование. В таблице 1 приведена классификация методов укрепления грунта, имеющих практическое значение в настоящее время.

Таблица 1. Классификация методов укрепления грунта

Способы укрепления грунта				
Уплотнение		Армирование		
Статические методы	Динамические методы	С заменой	Без замены	
			Механическое введение	Гидравлическое введение
предварительное нагружение	уплотнение посредством вибрации:	щебеночные сваи	метод МІР (смешивание на месте производства работ)	струйная цементация
предварительное нагружение с помощью уплотнения	использование глубинных вибраторов	бетонные сваи	метод СМІ (подготовка, смешивание и введение)	
уплотнение с цементацией	использование вибромолотов	песчаные набивные сваи	проникающая цементация	
воздействие на подземные воды	импульсное уплотнение:	опорные сваи из известняка или цемента	замораживание	
	сбрасываемый вес			
	взрыв			
	сжатый воздух			

Примечание – источник: Sondermann, W. and Kirsch, K. Baugrundverbesserung. In Grundbautaschenbuch, 7. Auflage. Teil 2: Geotechnische Verfahren. Hrsg.: Witt, K.J., Ernst und Sohn, Berlin, Germany, 2009; Topolnicki, M., In situ soil mixing, in Moseley, M.P. and Kirsch, K. (eds), Ground Improvement, Spon Press, London, UK, 2004.

В мировой практике устройство свай (или колонн) из щебня выполняется с использованием глубинных вибраторов для улучшения грунта. Уплотнение рыхлых грунтов достигается за счет динамических усилий, создаваемых вибратором, в то время как в связных грунтах армирование крупнозернистой засыпкой повышает несущую способность и прочность на сдвиг (Kirsch & Kirsch, 2017, Witt, K.J., Ernst, 2009). Глубинные вибраторы подвешиваются к крану и устанавливаются вертикально с помощью струи воды или воздуха, дополнительного веса или тяги вниз. В рыхлых грунтах окружающий материал уплотняется во время извлечения, тогда как в связных грунтах образуется жесткий столбик из материала обратной засыпки.

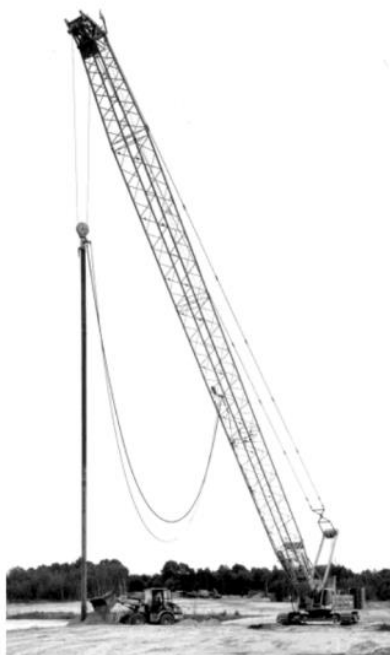


Рисунок 1. Глубинный вибратор, подвешенный на кране, рассчитанный на уплотнение на глубине до 40 м (материал любезно предоставлен компанией Keller Group plc, Лондон, Великобритания)

Примечание – рисунок взят из источника: *Ground improvement by Deep Vibratory Methods, Second edition.*, Klaus Kirsch and Fabian Kirsch. 2017 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group

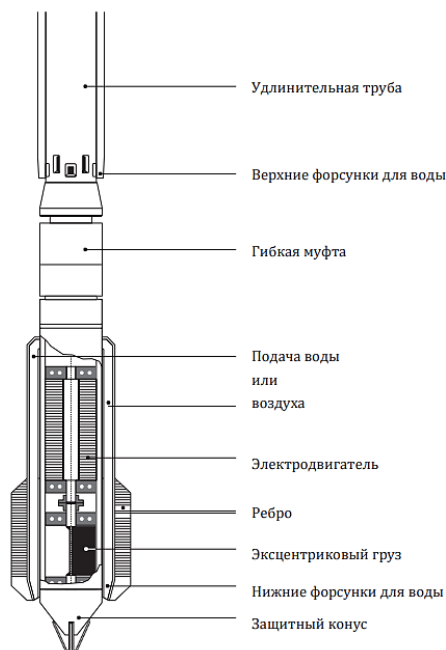


Рисунок 2. Глубинный вибратор в разрезе

Примечание – рисунок взят из источника *Ground improvement by Deep Vibratory Methods, Second edition.*, Klaus Kirsch and Fabian Kirsch. 2017 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group

Грунты, применимые для упрочнения методом глубинной вибрации. Метод виброуплотнения является эффективным средством повышения плотности и прочности грунтов, обладающих хорошо градуированным зернистым составом, низким содержанием мелких частиц и слабой когезией. Данный метод применим к следующим типам грунтов согласно классификации USCS:

- GW (хорошо градуированные гравийные грунты): обеспечивается значительное уплотнение;
- GP (плохо градуированные гравийные грунты): при $D_{60}/D_{10} \leq 2$ уплотнение ограничено, необходимы предварительные испытания;
- GM, GC (илистые и глинистые гравийные грунты): не применяются при содержании глины $> 2\%$ и ила $> 10\%$;
- SW (хорошо градуированные пески): наиболее подходящие для виброуплотнения;
- SP (плохо градуированные пески): при $D_{60}/D_{10} \leq 2$ – ограниченное уплотнение, требуются испытания;
- SM (илистые пески): допустимы при содержании ила $< 8\%$ (Witt, K.J., Ernst, 2009 и др.);
- SC (глинистые пески): не применяются при содержании глины $> 2\%$ (Kirsch & Kirsch, 2017).

Из этих оценок следует, что при увеличении количества мелких частиц ($< 0,06$ мм) и содержания ила или глины эффективность метода виброуплотнения снижается или полностью утрачивается. Эффективность метода представлена на схеме (рис. 3), где показано, что наилучшие результаты достигаются в зонах с хорошей градацией (зона В). В зонах с чрезмерным содержанием мелких частиц (зона А) метод становится неэффективным из-за низкой проницаемости ($k < 10^{-7}$ м/с), препятствующей движению вибратора. При проницаемости грунта выше ($k \geq 10^{-5}$ м/с) эффективность уплотнения возрастает, так как облегчается отвод воды и повышается плотность грунта. В зоне С метод может применяться при увеличении времени вибрации и мощности оборудования.

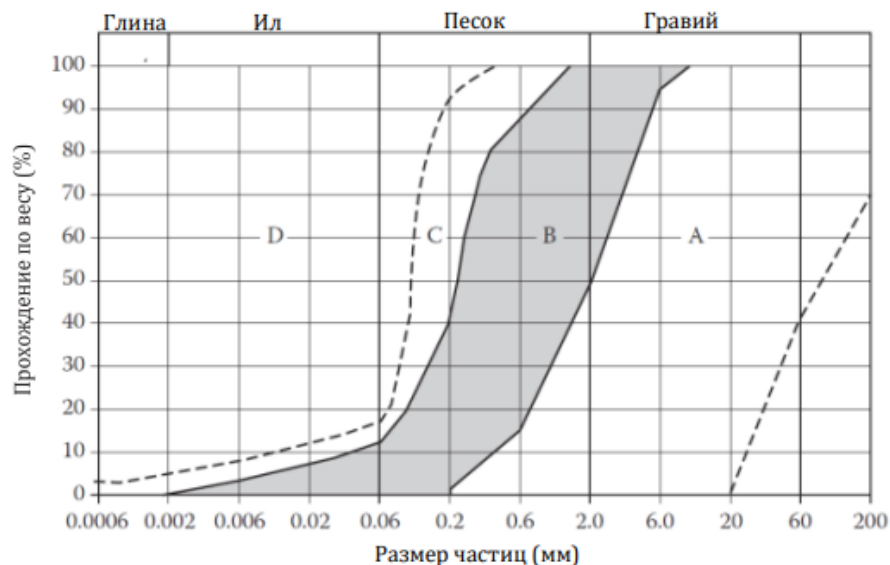


Рисунок 3. Классификация грунтов, подходящих для виброуплотнения

Massarsch (1994) показал зависимость применимости метода виброуплотнения от сопротивления конуса q_c при статическом зондировании (CPT) (рис. 4). Грунты считаются пригодными при $q_c > 3$ МН/м² и коэффициенте трения $R_f \leq 1\%$. Частичное уплотнение возможно при $R_f = 1-1,5\%$ и $q_c = 1-3$ МН/м². Существенным фактором является

проницаемость: при $k \leq 10^{-5}$ м/с процесс уплотнения замедляется, а при $k < 10^{-7}$ м/с движение вибратора практически прекращается из-за высокого сопротивления. Brown (1977) предложил коэффициент пригодности (SN), рассчитываемый по уравнению (1):

$$SN = 1.7 \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{3}{D_{20}^2} + \frac{3}{D_{10}^2}}, \quad (1)$$

где: D50: Диаметр частиц, меньше которого 50 % от общего объема;

D20: Диаметр частиц, меньше которого 20 % от общего объема;

D10: Диаметр частиц, меньше которого 10 % от общего объема.

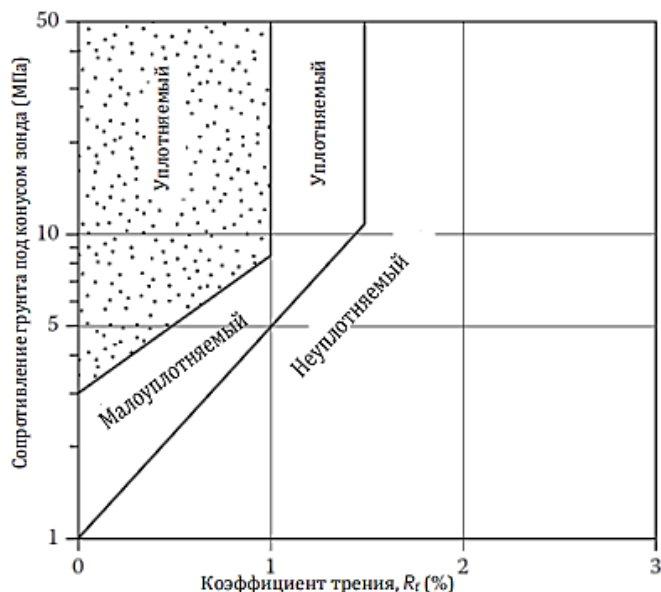


Рисунок 4. Уплотняемость грунтов в зависимости от сопротивления грунта под конусом зонда и коэффициента трения

Примечание – по материалам работы К.Р. Массарша, «Аспекты проектирования уплотнения методом глубинной вибрации» в «Материалах семинара по вопросам методов укрепления грунта», Геотехническое подразделение, Гонконгский инженерный институт, Гонконг, Китай, 19 мая 1994 г., стр. 61–74.

Коэффициент соответствия (SN) также отражает степень применимости гранулированных материалов, используемых для восполнения потерь объема, возникающих в результате уплотнения. Классификация материалов по коэффициенту соответствия (SN) представлена в таблице 2.

Таблица 2. Классификация гранулированных материалов по коэффициенту соответствия (SN)

Диапазон коэффициента соответствия (SN)	Степень соответствия (уплотняемость)
1–10	Отличная
10–20	Хорошая
20–30	Средняя
30–50	Низкая
>50	Непригодная
Примечание – составлено автором на основе данных (Brown, 1977)	

Колонны из щебня применяются в грунтах, соответствующих зонам В и выше на рисунке. Несущая способность упрочнённых грунтов зависит от взаимодействия колонн с окружающим грунтом, который должен иметь минимальную прочность. С увеличением содержания мелких частиц в песке расстояние между точками уплотнения уменьшается, а добавление крупнозернистого материала способствует достижению необходимой плотности. Если содержание мелких частиц превышает 10%, вибратор не может отделить частицы грунта из-за сцепления. Такие мягкие, малопроницаемые грунты можно укрепить, установив каменные колонны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Используются два основных метода, различающихся диапазоном прочности упрочнённого грунта, определяемого недренированной прочностью на сдвиг (c_u):

1. Мокрый (влажный) метод применяется в водонасыщенных мягких грунтах с $c_u = 10-30$ кН/м². Вибратор погружается под действием собственного веса и потока воды, вымывающей грунт. После достижения требуемой глубины вибратор извлекается и повторно погружается для очистки и расширения скважины. В скважину послойно засыпается крупнозернистый материал, который уплотняется вибрацией. Диаметр свай 0,8-1,2 м. Метод обеспечивает эффективное дренирование и ускоряет консолидацию грунта.

2. Сухой метод вытеснения применяется в более плотных связных грунтах ($c_u = 30-50$ кН/м²). Вибратор погружается с помощью вибрации и сжатого воздуха, а после извлечения в скважину засыпается материал, который уплотняется повторными погружениями вибратора. Формируются сваи диаметром 0,5-0,6 м с высокой адгезией к грунту. Для глубин свыше 20 м используется модифицированный вибратор с подачей материала снизу через трубу, соединённую с бункером. Диаметр таких свай - 0,5-0,8 м.

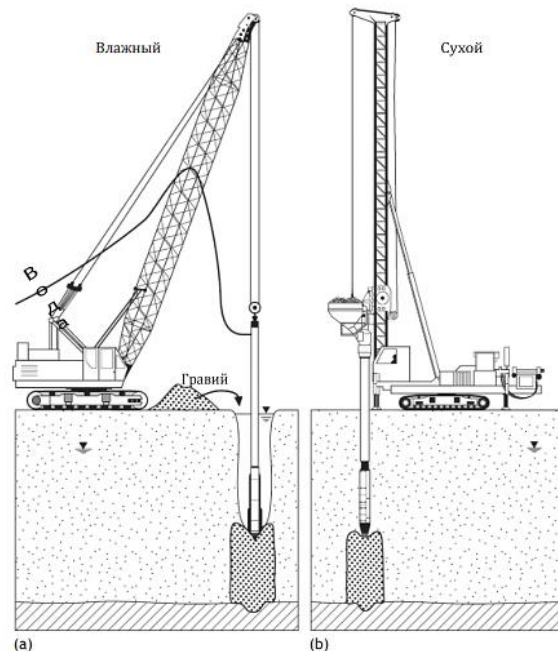


Рисунок 5. Щебеночные сваи, созданные (а) методом влажного виброобмена и (б) методом сухого смещения с подачей материала снизу

Примечание – рисунок взят из источника *Ground improvement by Deep Vibratory Methods, Second edition., Klaus Kirsch and Fabian Kirsch. 2017 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.*

При мокром виброобмене местный грунт заменяется крупнозернистым материалом с небольшим боковым смещением, тогда как сухой метод основан в основном на его перемещении. Оба метода относятся к технологиям виброперемещения с использованием каменных колонн. Смещение окружающего грунта способствует увеличению несущей способности свай.

Заполняющий материал подбирается в зависимости от метода:

- При мокром виброобмене используется щебень с размером частиц 30-60 мм, обеспечивающий плотное уплотнение с вымыванием мелких частиц.
- При подаче материала снизу применяют щебень или гравий 10-40 мм; допускается использование хорошо просеянного песка, но это снижает прочность колонны.

Заполняющий материал должен быть экологически чистым (гравий, щебень, переработанный бетон или кирпич), обладать высокой прочностью и химической инертностью, устойчивостью к агрессивным грунтовым водам и абразивным воздействиям при вибрации.



Рисунок 6. Виброкат с вибратором с нижней подачей

(материал любезно предоставлен компанией Keller Group plc, Лондон, Великобритания)

Примечание – рисунок взят из источника Ground improvement by Deep Vibratory Methods, Second edition., Klaus Kirsch and Fabian Kirsch. 2017 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group

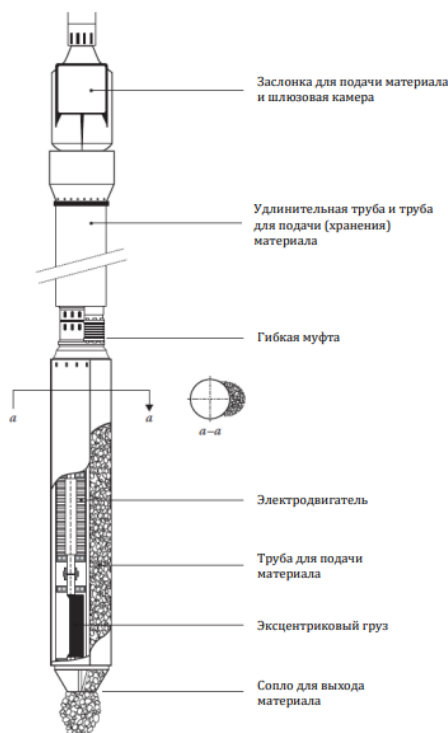


Рисунок 7. Особенности вибратора с подачей щебня

Примечание – рисунок взят из источника *Ground improvement by Deep Vibratory Methods, Second edition., Klaus Kirsch and Fabian Kirsch. 2017 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group*

Применимость метода в Казахстане и при сейсмических воздействиях. Метод виброобмена имеет ограниченную эффективность в связных грунтах из-за низкой проницаемости и значительного сцепления между частицами, что препятствует плотному уплотнению. Однако при правильно подобранной технологии и параметрах засыпки он может успешно применяться для упрочнения суглинков, супесей и слабых глинистых грунтов, особенно при наличии высокого уровня грунтовых вод.

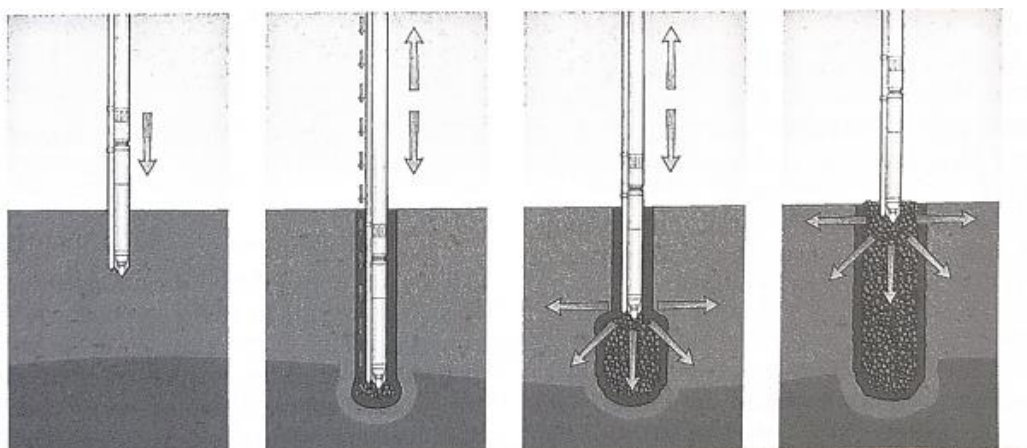


Рисунок 8. Процесс установки виброкаменных колонн с сухой нижней подачей

Примечание – рисунок взят из источника *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Second edition, Volume II: Geotechnical design, construction and verification*

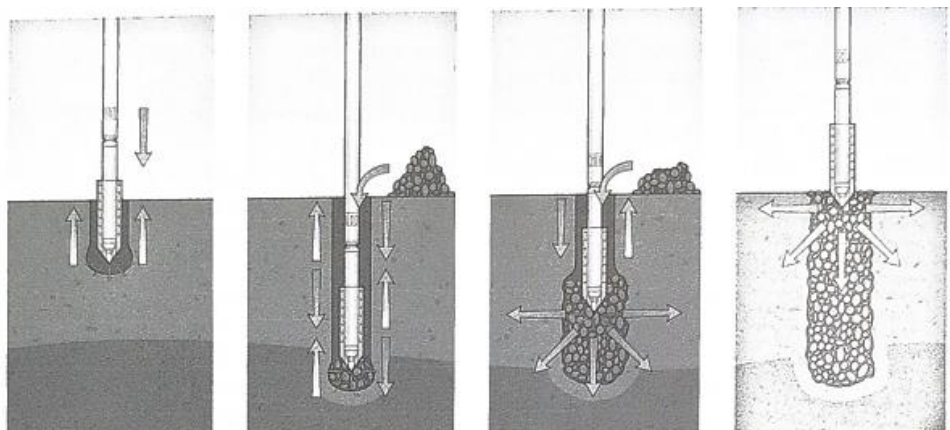


Рисунок 9. Процесс установки виброкаменных колонн с мокрой верхней подачей

Примечание – рисунок взят из источника ICE Manual of Geotechnical Engineering, Second edition, Volume II: Geotechnical design, construction and verification)

В таких условиях каменные колонны служат не только для уплотнения грунта, но и в качестве дренажных и армирующих элементов, образуя устойчивый несущий каркас. Это ускоряет уплотнение, уменьшает осадку и увеличивает несущую способность фундамента. Для связных грунтов наиболее подходящим является метод сухого виброзамещения, поскольку грунт частично смещается и заменяется обратной засыпкой из гравия или щебня, создавая плотные включения, которые улучшают общую прочность и проницаемость почвенного массива.

В сейсмически активных регионах Казахстана (таких как Алматинская, Жамбылская и Восточно-Казахстанская области) метод виброзамещения обеспечивает дополнительные преимущества за счет снижения риска разжижения и неустойчивости грунта при динамической нагрузке. Использование каменных колонн улучшает дренаж, снижает избыточное давление поровой воды, повышает сейсмостойкость и равномерность осадки фундамента.

Однако для обеспечения эффективного применения метода в различных геологических условиях Казахстана необходимы комплексные полевые и лабораторные исследования, включая испытания на проницаемость грунта и прочность на сдвиг, а также моделирование взаимодействия каменных колонн с грунтовым массивом при динамических нагрузках. Такие исследования помогут оптимизировать проектные параметры и обеспечить надежность и сейсмические характеристики фундаментов в различных регионах страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ показывает, что метод виброобмена является эффективным методом повышения прочности, жесткости и дренажных свойств слабых, водонасыщенных грунтов. Однако его эффективность в значительной степени зависит от состава почвы, проницаемости и доли мелких частиц, которые влияют на степень уплотнения и достигаемую стабильность.

В сейсмических условиях каменные колонны или щебенистые сваи могут улучшить характеристики фундамента за счет снижения избыточного порового давления, улучшения дренажа и повышения общей сейсмостойкости. Однако динамическое взаимодействие между колоннами и окружающим грунтом остается недостаточно изученным в условиях Казахстана, особенно в отношении характера деформации и долговременных характеристик при циклических нагрузках.

Поэтому рекомендуется провести дальнейшие исследования для определения эффективности метода в различных грунтовых и сейсмических условиях, включая лабораторные испытания и численное моделирование. Такие исследования помогут

уточнить конструктивные параметры и обеспечить надежное применение метода виброзамещения в различных геотехнических условиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без целевого внешнего финансирования, за счет собственных средств авторов.

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ОДОБРЕНИИ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫМ ЭТИЧЕСКИМ КОМИТЕТОМ (IRB): поскольку работа носила исключительно технический характер и не включала участие людей или животных, данный раздел отмечен как «Не применимо».

ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ИНФОРМИРОВАННОМ СОГЛАСИИ: Не применимо.

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ: Данные, подтверждающие результаты данного технического исследования, могут быть предоставлены соответствующим автором по обоснованному запросу.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке рукописи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для редактирования и структурирования текста. Используемая модель оформлена в списке литературы согласно установленным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Barron, R. A. (1948). Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(2346), 718–742.
- Brown, M., Burland, J., Chapman, T., Higgins, K., Skinner, H., & Toll, D. (Eds.). (2024). *ICE manual of geotechnical engineering: Volume II. Geotechnical design, construction and verification* (2nd ed.). Emerald Publishing Limited.
- Brown, R. E. (1977). Vibroflotation compaction of cohesionless soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(GT12), 1437–1451.
- European Committee for Standardisation. (2005). *Execution of special geotechnical works – Ground treatment by deep vibration*. CEN, Brussels.
- Greenwood, D. A. (1970). *Mechanical improvement of soils below ground surface*. Ground Engineering, The Institution of Civil Engineers.
- Greenwood, D. A. (1976). *Ground treatment by deep compaction: Discussion*. The Institution of Civil Engineers.
- Greenwood, D. A. (1991). Load tests on stone columns. In M. I. Esrig & R. C. Bacchus (Eds.), *Deep foundation improvements: Design, construction and testing* (ASTM STP 1089). ASTM.
- Greenwood, D. A., & Kirsch, K. (1984). Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods. In *Piling and ground treatment*. The Institution of Civil Engineers, Thomas Telford.
- Kirsch, F. (2008). Evaluation of ground improvement by groups of vibro stone columns using field measurements and numerical analysis. In M. Karstunen et al. (Eds.), *Geotechnics of soft soils – Focus on ground improvement: Proceedings of the 2nd International Workshop on Geotechnics of Soft Soils*. CRC Press.
- Kirsch, F., & Borchert, K.-M. (2006). Probelastungen zum Nachweis der Baugrundverbesserungswirkung. In 21. Chr. Veder Kolloquium: *Neue Entwicklungen der Bodenverbesserung*. TH Graz, Graz, Austria.
- Kirsch, F., & Sondermann, W. (2003). Field measurements and numerical analysis of the stress distribution below stone column supported embankments and their stability. In P. A. Vermeer et al. (Eds.), *Geotechnics of soft soils: Theory and practice*. VGE.

- Kirsch, K. (1979). Erfahrungen mit der Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttler. *Geotechnik*, 1.
- Kirsch, K. (1985a). Application of deep vibratory compaction in harbour construction. In *Egyptian-German Seminar on Foundation Problems in Egypt and Northern Germany*. Cairo, Egypt.
- Kirsch, K. (1985b). Over 50 years of deep vibratory compaction: Milestones of German geotechnique. *Geotechnik*, Special Issue. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau.
- Kirsch, K., & Kirsch, F. (2017). *Ground improvement by deep vibratory methods* (2nd ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Massarsch, K. R. (1991). Deep soil compaction using vibratory probes. In *Deep foundation improvements* (ASTM STP 1089). ASTM.
- Massarsch, K. R. (1994). Design aspects of deep vibratory compaction. In *Proceedings of the Seminar on Ground Improvement Methods* (pp. 61–74). Geotechnical Division, Hong Kong Institution of Engineers.
- Massarsch, K. R., & Fellenius, B. H. (2005). Deep vibratory compaction of granular soils. In B. Indraratna & C. Jian (Eds.), *Ground improvement – Case histories* (Chap. 19, pp. 633–658). Elsevier.
- Sondermann, W., & Kirsch, K. (2009). Baugrundverbesserung. In K. J. Witt (Ed.), *Grundbautaschenbuch: Teil 2. Geotechnische Verfahren* (7th ed.). Ernst & Sohn.
- Thurner, R., & Kirsch, F. (2014). Combination of bored piles and stone columns for the earthquake resistant design. In *Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Istanbul, Turkey.
- Topolnicki, M. (2004). In situ soil mixing. In M. P. Moseley & K. Kirsch (Eds.), *Ground improvement*. Spon Press.

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Джумадилова Сауле Жакинбековна – Философия докторы (PhD),
Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан

Джумадилова Сауле Жакинбековна – доктор философии PhD,
Международная образовательная корпорация, г. Алматы,
Казахстан

Jumadilova Saule – Doctor of Philosophy (PhD),
International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan

e-mail: s.dzhumadilo@kazgasa.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2198-5112>



Ерғазы Альтаир Талғатулы – Құрылыс мектебінің магистрі, Қазақ
бас сәулет-құрылыс академиясы, Алматы қ., Қазақстан

Ерғазы Альтаир Талғатулы – магистр факультета «Школы
строительства» при КазГАСА (Казахская головная архитектурно-
строительная академия, г. Алматы, Казахстан)

Yergazy Altair – Master's student of the School of Construction, Kazakh
Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty,
Kazakhstan

e-mail: altair.yergazy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6183-2170>



Хомяков Виталий Анатольевич – техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық білім беру корпорациясы (МОК), Алматы қ., Қазақстан

Хомяков Виталий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Международная образовательная корпорация (МОК), г. Алматы, Казахстан

Khomyakov Vitaliy – Doctor of Technical Sciences, Professor, International Educational Corporation (IEC), Almaty, Kazakhstan

e-mail: khomyakov57@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0384-7170>



Сағыбекова Акмарал Оразбековна – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль жолдары институты, Алматы қ., Қазақстан

Сағыбекова Акмарал Оразбековна – кандидат технических наук, профессор, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан

Sagymbekova Akmaral – Candidate of Technical Sciences, Professor, L.B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, Kazakhstan

e-mail: a-orazbekovna@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5679-5816>



Мукашев Данияр Мәлисович – PhD докторанты, Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ., Қазақстан

Мукашев Данияр Мәлисович – докторант PhD, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан

Mukashev Daniyar – PhD student, L. Goncharov Kazakh automobile and road institute, Almaty, Kazakhstan

e-mail: danik_2001@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9344-5945>