**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 4, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.12
УДК 624.15

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБИННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГРУНТА

Ф.Ф. Зехниев¹, Д.А. Внуков¹, А.И. Корпач²

¹НИИОСП им. Н.М. Герсевича, Москва, Россия

²ТОО «Время», группа «Келлер», Атырау, Казахстан

О СТАТЬЕ

Получена: 05 июля 2017
Принята: 21 августа 2017
Опубликована: 15 декабря 2017

Ключевые слова:

глубинное перемешивание грунта, грунтоцементные элементы усиления, оборудование для перемешивания грунта, контроль преобразования грунта, расчетные модели преобразованных грунтовых оснований

АННОТАЦИЯ

На основе анализа накопленного международного опыта в данной статье описана технология преобразования грунтов оснований зданий и сооружений методом глубинного перемешивания грунта (ГПГ). Приводятся варианты использования технологии в различных грунтовых условиях, указываются основные виды оборудования для выполнения работ. Представлены основные расчетные предпосылки проектирования преобразованных оснований и особенности обоснования проектного решения с учетом требований российских нормативных документов и имеющегося международного опыта проектирования работ по технологии глубинного перемешивания грунта. В качестве расчетной основы предложены три основных подхода: в рамках действующих СП по приведенному модулю деформации или по расчетной схеме свайного фундамента; с использованием метода ячейки, включающей грунтоцементный элемент и окружающий грунт; с применением конечно-элементных трехмерных программных комплексов. В дополнение к действующим строительным нормам предлагается использование стандарта организации как инструмента внедрения технологии глубинного перемешивания в практику фундаментостроения. В статье приведены основные параметры, подлежащие контролю в процессе производства работ, а также характеристики преобразованного грунта, подлежащие проверке на площадке строительства. Проектные и технологические аспекты применения глубинного перемешивания грунтов показаны на конкретном примере проектирования фундаментов здания на искусственном основании, освещены конструктивные и технологические преимущества технологии ГПГ на указанной площадке строительства. На основании технико-экономического сравнения вариантов указана экономия за счет применения технологии перемешивания по отношению к двум другим проектным решениям. Выводы в статье указывают на дальнейшее перспективное развитие данного метода с постановкой основной цели для последующих научно-практических работ.

© ПНИПУ

© **Зехниев Фаршед Фархатович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией № 2 «Основания и фундаменты на слабых грунтах», e-mail: Lab02@niiosp.ru.

Внуков Дмитрий Алексеевич – старший научный сотрудник лаборатории № 2 «Основания и фундаменты на слабых грунтах», e-mail: Lab02@niiosp.ru.

Корпач Александр Иванович – главный инженер-строитель, e-mail: a.korpach@keller-vremya.com.

Farshed F. Zekhniev – Ph.D. in Technical Science, Head of the Laboratory № 2 “Bases and Foundations on Weak Soils”, e-mail: Lab02@niiosp.ru.

Dmitrii A. Vnukov – Chief Researcher of the Laboratory № 2 “Bases and Foundations on Weak Soils”, e-mail: Lab02@niiosp.ru.

Aleksandr I. Korpach – Chief Construction Engineer, e-mail: a.korpach@keller-vremya.com.

SOIL BASES IMPROVEMENT BY USING DEEP SOIL MIXING TECHNOLOGY

F.F. Zekhniev¹, D.A. Vnukov¹, A.I. Korpach²

¹Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, Moscow, Russian Federation

²Vremya LLP, Keller Group plc, Atyrau, Kazakhstan

ARTICLE INFO

Received: 05 July 2017
Accepted: 21 August 2017
Published: 15 December 2017

Keywords:

deep soil mixing, soil-cement strengthening elements, equipment for soil mixing, control of soil improvement, calculation models of improved soil basements

ABSTRACT

Basing on the analyses of international experience in the article technology of soil bases improving by deep soil mixing (DSM) method is described. Variants of technology using in different soil conditions are provided, common types of equipment for works execution are pointed. The main design preconditions for the design of the improved bases and the features of the justification for the design solution are presented, taking into account requirements of Russian regulatory documents and available international experience in design of works by deep soil mixing technology. Three basic approaches are proposed as a calculation basis: within the framework of the existing SP for the averaged deformation module or the design scheme of the pile foundation; using the cell method, including a soil cement element and the surrounding soil; using of 3D finite-element software systems. In addition to the current building standards, it is proposed to use the organization standard as a tool for implementation of deep mixing technology into the practice of foundation engineering. The article gives the main parameters to be controlled during the production process, as well as the characteristics of the transformed soil, which are subject to verification at the construction site. The design and technological aspects of the application of deep soil mixing are shown on a specific example of foundations of the building design on the artificial base, the design and technological advantages of DSM technology at the pointed construction site are highlighted. Based on the technical and economic comparison of options, the savings are indicated through the use of mixing technology in relation to the other two design solutions. Conclusions in the article indicate a further promising development of this method with the formulation of the main goal for following scientific and practical work.

© PNRPU

Введение

Последние 10–15 лет ознаменовались появлением на российском строительном рынке большого количества геотехнических фирм (как отечественных, так и международных). Развитие геотехнологий на базе современного оборудования позволило по-новому взглянуть на методы устройства искусственных оснований зданий и сооружений. Практика геотехнического строительства естественным образом стимулирует развитие расчетных методов, инженерных изысканий, регулирующих документов. Естественно, что многообразие природно-климатических, инженерно-геологических и организационно-правовых факторов на территории России требует проведения всестороннего анализа, тщательных расчетов и нормативного обоснования принимаемых решений. В качестве примера рассмотрим различные аспекты применения одной из разновидностей буросмесительного метода.

1. Описание метода глубинного перемешивания грунта

Технология глубинного перемешивания грунта (англ. deep soil mixing, DSM) получила широкое применение в мире для устройства различного вида грунтоцементных элементов [1]. Методика заключается в перемешивании грунта природного сложения с вяжущим материалом практически без извлечения бурового шлама наружу (рис. 1).

Глубинное перемешивание грунта (ГПГ) предусматривает создание элементов закрепленного вяжущим грунта требуемой формы, размеров, а также прочностных и деформационных характеристик. Применение технологии распространяется как на преобразование грунтовых оснований [2], так и на ограждение котлованов [3].

Рис. 1. Технологическая схема производства работ по технологии
глубинного перемешивания грунта

Fig. 1. Technological scheme of works on deep soil mixing technology

Существуют различные варианты подачи вяжущего вещества: сухое (Dry DSM) и мокрое (Wet DSM) перемешивание. Технология заключается в погружении в массив грунта буровой трубы со специальным смесителем, состоящим из поперечных лопастей и специального режущего наконечника. Смеситель имеет сопла для подачи вяжущего материала под давлением.

2. Оборудование для производства работ

В качестве базового оборудования для технологии глубинного перемешивания грунта DSM могут применяться как универсальные установки роторного бурения, например Liebherr серии LRB или Bauer типа BG (рис. 2), так и специально изготовленные станки для перемешивания.

Кроме того, устройство грунтоцементных элементов методом глубинного перемешивания требует наличия специально разработанного оборудования, включающего в себя растворный узел, станцию для перемешивания и насос для подачи раствора под давлением через буровую штангу в смеситель (рис. 3).

Погружение буровой трубы со смесителем происходит без значительной вибрации с одновременной подачей вяжущего. После достижения проектной глубины наступает фаза формирования элемента усиления DSM обычно диаметром от 400 до 2000 мм. В это время вращающийся и подтягиваемый вверх смеситель обеспечивает равномерное смешивание вяжущего с грунтом. В результате формируется грунтоцементный элемент круглого сечения (колонна). В зависимости от грунтовых условий, требуемого сечения грунтоцементного элемента, необходимости заглубления в достаточно плотный несущий слой, а также для исключения скоплений неперемешанного грунта применяются различные виды смесителей. Для создания грунтоцементных элементов прямоугольного сечения и часто для сплошного перемешивания грунта применяется гидрофреза.

Рис. 2. Установки роторного бурения с навесным оборудованием
для мокрого глубинного перемешивания грунта
Fig. 2. Rotary drilling rigs with equipment for wet deep soil mixing

Рис. 3. Растворно-насосные станции для технологии ГПП
Fig. 3. Pump and grout mixing stations for DSM technology

Технологический режим может предусматривать несколько циклов поднятия-опускания (проходок) смесителя с непрерывным вращением. В ходе перемешивания может варьироваться количество проходок на заданной глубине для улучшения перемешивания слоя плотного глинистого грунта или случая чередования песчаных и глинистых слоев грунта. Длина сформированного таким образом грунтоцементного элемента с применением стандартных буровых установок может достигать 25–30 м, а специальное оборудование позволяет осуществлять перемешивание на глубину до 70 м от рабочей платформы.

3. Расчетные предпосылки

В зарубежной практике накоплен значительный опыт проектирования [4–6] и производства работ по технологии DSM [7–9].

Анализ международного опыта позволяет выделить различные подходы для проведения расчетов преобразованных грунтовых массивов грунта по двум группам предельных состояний применительно к российской нормативной базе:

– расчеты по методикам СП 22.13330 (с определением приведенного модуля общих деформаций армированных слоев грунта) и СП 24.13330 (как свайный или условный фундамент);

- расчет методом ячейки, включающей бетонный армирующий элемент и окружающий его грунт (решение осесимметричной задачи);
- расчеты методом численного моделирования с использованием трехмерных конечно-элементных программных комплексов.

Согласно разделу 16 СП 22.13330 глубинное перемешивание DSM относится к закреплению грунтов цементацией по бурсмесительной технологии. В зависимости от диаметра и шага элементов усиления здесь предусмотрено использование расчетных схем как для свайных фундаментов или преобразованных массивов.

Проведение расчетов преобразованных массивов грунта с применением технологии глубинного перемешивания по двум группам предельных состояний имеет ряд особенностей [10]:

1) в зависимости от расположения в плане грунтоцементных элементов (отдельные элементы, блок элементов, сплошное перемешивание) будет преобладать либо расчет по несущей способности, либо по деформациям;

2) в случае отдельных грунтоцементных элементов (круглого или прямоугольного сечения), расположенных с определенным шагом, обеспечивающим передачу нагрузки раздельно каждым элементом, представляется целесообразным проведение расчета по аналогии с буронабивными сваями;

3) основными критериями здесь будут выступать прочность материала грунтоцементных элементов (основополагающий фактор в отличие от классических свай), наличие их заглубления в несущий слой;

4) в качестве базового параметра для выбора расчетной методики в действующих нормах используется диаметр закрепленных по бурсмесительной технологии массивов (столбов): так, при диаметре от 0,6 до 1,0 м проектирование должно быть выполнено как для свайных фундаментов в соответствии с СП 24.13330;

5) в то же время при создании эффекта армирования грунта следует вести проектирование в соответствии с разделом 5 СП 22.13330, т.е. по принципам расчета естественных грунтовых оснований;

6) очевидно, что и при диаметрах, не попадающих в указанный диапазон, может проявиться свайный характер работы искусственного основания под нагрузкой (шаг в несколько диаметров, наличие малосжимаемого слоя под подошвой грунтоцементного элемента).

Следует отметить, что наиболее эффективным является сочетание аналитических и численных методов расчета с применением трехмерных моделей, в частности в программном комплексе Plaxis (рис. 4). Моделирование в современных программных комплексах позволяет выявить места концентрации напряжений в грунтоцементных элементах, определить их оптимальную расстановку в плане и по глубине. Следует отметить, что в отличие от железобетона свай при проектировании преобразованного массива ограничивающим фактором является именно напряжение в грунтоцементе, тогда как несущая способность по грунту превышает крайне редко [11].

Несмотря на то что действующие СНиП регламентируют общие методики расчета преобразованных грунтов, а также проведение работ по технологии глубинного перемешивания (как разновидности бурсмесительного способа), для выполнения проектов, успешного прохождения их в государственной экспертизе неотъемлемым условием является разработка узконаправленных нормативных документов, дополняющих требования СНиП. В качестве такого документа может выступать стандарт организации, разработанный на базе НИИОСП им. Герсееванова для технологии DSM компании «Келлер» [12].

Рис. 4. Пример результатов численного моделирования
Fig. 4. Example of numerical modelling results

Стандарт организации призван решить спорные вопросы относительно проектирования и производства работ по технологии глубинного перемешивания, в частности:

- установить применимость технологии в различных грунтовых условиях;
- определить перечень требований для преобразования грунтов в основании зданий различного уровня ответственности;
- конкретизировать требования проектирования по двум группам предельных состояний;
- уточнить мероприятия по контролю качества работ и необходимым испытаниям.

4. Контроль производства работ

Контроль качества работ по технологии ГПГ/DSM включает в себя различные этапы: входной, операционный, приемочный. Основой операционного контроля в режиме реального времени являются автоматизированные системы определения и записи производственных параметров буровой установки и насосной станции [13], позволяющие анализировать и при необходимости корректировать следующие параметры:

- расход вяжущего материала и его соотношение с водой в растворе;
- расход добавок при их наличии;
- давление и скорость подачи вяжущего и/или его водного раствора;
- скорость вращения и поступательного перемещения смесителя;
- глубину погружения смесителя;
- крутящий момент и усилие вдавливания;
- фактический расход вяжущего или его раствора в объеме преобразованного грунта.

Методы обеспечения и контроля качества для сухого [14] и мокрого [15] перемешивания имеют ряд особенностей, связанных главным образом с прочностью грунтоцемента. Например, если для сухого перемешивания зачастую применяется зондирование, то для мокрого – разрушающие методы (стандартные кубики и керны).

5. Пример практического применения

Компанией «Келлер» при научно-консультационной поддержке специалистов НИИОСП им. Герсевича был разработан проект усиления грунтового основания по технологии глубинного перемешивания грунта в основании фундаментной плиты многоэтажного здания по ул. Мира в г. Краснодаре.

По инженерно-геологическим условиям в соответствии с СП 11-105-97 площадка относится к III (сложной) категории сложности. Расчетная сейсмичность площадки по итогам геофизических исследований принята равной 7 баллам. Необходимость устройства искусственного основания под фундаментную плиту вызвана наличием в сжимаемой зоне слабых грунтов ИГЭ-5, ИГЭ-6, суглинков мягко- и текучепластичной консистенции (рис. 5). При среднем давлении под фундаментной плитой свыше 300 кПа с концентрацией до 410 кПа неравномерность осадок на естественном основании превышала бы допустимые значения. С учетом развития подтопления района площадки строительства и в целом г. Краснодара прогнозировались длительные осадки глинистых грунтов основания.

Рис. 5. Характерный разрез площадки строительства
Fig. 5. Typical cross-section of the construction site

Базовое проектное решение предусматривало устройство буронабивных свай диаметром 800 мм под защитой обсадных труб или непрерывным полым шнеком длиной до 23 м с заглублением в плотные пески средней крупности. С учетом стесненности площадки строительства, необходимости армирования свай на всю длину в условиях сеймики, а также для повышения производительности была предложена альтернативная технология для преобразования строительных свойств грунтов.

Концепция устройства искусственного основания по технологии ГПГ предусматривает выполнение грунтоцементных колонн DSM диаметром 1050–1100 мм, длиной до 9 м (рис. 6).

Предложенное техническое решение устройства преобразованного основания по технологии глубинного перемешивания грунта по сравнению с базовым проектным решением – буронабивными сваями по технологии непрерывного полого шнека – показало снижение затрат до 35 %; по сравнению со струйной цементацией – до 30 %.

Рис. 6. Фрагмент расположения грунтоцементных элементов в плане высотной части и паркинга
Fig. 6. Fragment of soil-cement elements layout in the areas of the high-rise part and parking

В ходе проведения работ по устройству грунтоцементных колонн, а также до момента окончания строительства предусмотрено проведение геотехнического мониторинга, включающего в себя:

- испытания грунтоцементных кубиков, отобранных непосредственно из элементов усиления;
- отбор кернов из готовых грунтоцементных колонн;
- испытания отдельной грунтоцементной колонны статической нагрузкой для сопоставления проектных жесткостных характеристик с полученными в натуре;
- наблюдения за осадками здания в процессе строительства.

Выводы

Технология глубинного перемешивания грунта представляет несомненный интерес с точки зрения научного изучения, нормативно-технического обоснования, а также расширения практического применения. Проведение дальнейших исследований с одновременным развитием руководящих документов позволит более успешно применять данную технологию при решении различных геотехнических задач.

Библиографический список

1. Bell A., Kirsch K. Ground improvement. – 3rd ed. – CRC Press, 2012.
2. Богданов О.И., Корпач А.И. Применение технологии глубинного перемешивания грунта DSM для усиления грунтовых оснований // Инновационные конструкции и технологии в фундаментостроении и геотехнике: материалы науч.-техн. конф. с междунар. участием, Липецк, 27–29 октября 2013 г. – М.: Палеотип, 2013. – С. 271–276.

3. Кorpach A.И., Лофицкий A.В. Возможности применения технологии глубинного перемешивания грунта DSM для ограждения котлованов // Геотехника. – 2015. – № 3 – С. 16–22.
4. Topolnicki M. Geotechnical design and performance of road and railway viaducts supported on DSM columns – a summary of practice // International Conference on Deep Mixing. – San Francisco, 2015.
5. Topolnicki M., Pandrea P. Design of in-situ soil mixing // ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement – Brussels.
6. Topolnicki M., Soltys G. Novel application of wet deep soil mixing for foundation of modern wind turbines // Proceedings 4th Int. Conference on Grouting and Deep Mixing. – New Orleans, 2012.
7. EN 14679. Execution of special geotechnical works – Deep mixing, ICS 93.020. – 2005.
8. DIN 4093/A1. Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl, Deep Mixing oder Injektions Verfahren, Beuth Verlag GmbH. – Berlin, 2014.
9. FHWA 2013-11. Federal highway administration design manual: deep mixing for embankment and foundation: support publication No. FHWA-HRT-13-046. – URL: <https://www.fhwa.dot.gov/> (дата обращения: 10.06.2017).
10. Кorpach A.И. Особенности расчета оснований, усиленных по технологии глубинного перемешивания грунта DSM // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: тр. междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск, 2015. – С. 134–137.
11. Bohn C. Influence of the column/soil stiffness on the settlement of soil reinforcement columns. – Baugrundtagung, Mainz, 2012.
12. Укрепление слабых грунтовых оснований способом глубинного перемешивания грунта по технологии DSM (Deep Soil Mixing): стандарт организации. – М., 2015.
13. Nakanishi M. Execution and equipment of cement deep mixing (CDM) method // Proceedings Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing. – Tokyo, 2002. – P. 80–90.
14. Topolnicki M. Quality control of wet deep mixing with reference to Polish practice and applications // Proceedings Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing. – Tokyo, 2002. – P. 167–175.
15. Larsson S. On the use of CPT for quality assessment of lime-cement columns // Proceedings Int. Conf. on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances. – Stockholm, 2005. – P. 555–560.

References

1. Bell A., Kirsch K. Ground Improvement. 3rd ed. CRC Press, 2012.
2. Bogdanov O.I., Korpach A.I. Primeneniye tehnologii glubinnogo peremeshivaniya grunta DSM dla usileniya gruntovyh osnovaniy [Application of technology of deep soil mixing DSM for strengthening soil bases]. *Innovatsyonnye konstruksii i tehnologii v fundamentostroyenii i geotekhnike. Materialy nauchno-technicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*, 27-29 October 2013, Lipetsk. Moscow, Peleotip, pp. 271-276.
3. Korpach A.I., Lofitskiy A.V. Vosmozhnosti primeneniya tehnologii glubinnogo peremeshivaniya grunta DSM dla ograzhdeniya kotlovanov [The possibilities of application of technology of deep soil mixing DSM for fencing of pits]. *Geotekhnika*, 2015, no. 3, pp. 16-22.
4. Topolnicki M. Geotechnical design and performance of road and railway viaducts supported on DSM columns – a summary of practice. *International Conference on Deep Mixing*, 2-5 June, 2015, San Francisco.
5. Topolnicki M., Pandrea P. Design of in-situ soil mixing. *ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement*, 31 May - 6 Yuni, Brussel, 2012.

6. Topolnicki M., Soltys, G. Novel application of wet deep soil mixing for foundation of modern wind turbines. *Proceedings 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans, 2012.
7. EN 14679. Execution of special geotechnical works - Deep mixing, ICS 93.0202005, 2005.
8. DIN 4093/A1. Bemessung von verfestigten Bodenkörpern - Hergestellt mit Düsenstrahl, Deep Mixing oder Injektions Verfahren. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2014.
9. FHWA, 2013-11. Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation, Support Publication No. FHWA-HRT-13-046.
10. Korpach A.I. Osobennosti rascheta osnovaniy, usilennykh po technologii glubinnogo peremeshivaniya grunta DSM [The characteristics of the grounds, reinforced by the technology of deep soil mixing DSM]. *Mechanika gruntov v geotechnike i fundamentostroyenii. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novocherkassk, 2015, pp. 134-137.
11. Bohn C. Influence of the column/soil stiffness on the settlement of soil reinforcement columns. Baugrundtagung, Mainz, 2012.
12. Standart organizatsii «Ukreplenie slabych gruntovych osnovaniy sposobom glubinnogo peremeshivaniya grunta po technologii DSM (Deep Soil Mixing). Moscow, 2015.
13. Nakanishi M. Execution and equipment of cement deep mixing (CDM) method. *Proceedings of Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing*, Tokyo, 2002, pp. 80-90.
14. Topolnicki M. Quality control of wet deep mixing with reference to Polish practice and applications. *Proceedings of Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing*, Tokyo, 2002, pp. 167-175.
15. Larsson S. On the use of CPT for quality assessment of lime-cement columns. *Proceedings of International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*, Stockholm, 2005, pp. 555-560.