

УДК 624.15

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПОСЛЕ ИНЪЕКЦИОННОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ

ШЕХОРКИНА Н. Е.^{1*}, аспирант, м.н.с.

^{1*} Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепрпетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: n_at.sh@ukr.net

Аннотация. *Цель.* В настоящее время данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) грунтового основания после инъекционного закрепления носят разрозненный характер в виду неточностей существующих способов моделирования и характера предоставления выходной информации. В этой связи требуется разработать методику исследования НДС грунта основания после инъекционного закрепления с использованием численного моделирования на основании метода конечных элементов с целью применения комплексного подхода при оценке достоверности результатов физического моделирования. *Методика.* Предложенная методика исследования НДС грунта основания после инъекционного закрепления в ПК Plaxis базируется на определении общих деформаций, горизонтальных и вертикальных перемещений в массиве грунта, а также подъема его поверхности. Для моделирования механических процессов цементации основания использована опция Объемная деформация (Volumetric strain), учитывающая объем закачанного раствора и давление его нагнетания в грунтовой массив. *Результаты.* Разработана модель и расчетная схема процесса закрепления песчаного основания методом высоконапорной цементации, на основании чего установлены характер распределения плотностей основания, зависимость общих деформаций и подъема поверхности грунта от объема закачанного раствора, подтверждена эффективность предварительного увлажнения основания и применения пластифицирующей добавки для повышения инъецируемости песка. *Научная новизна.* На основании выполненного численного моделирования процесса высоконапорной цементации основания получены экспериментальные данные о характере распространения раствора и закономерностей изменения физических характеристик основания для различных состояний по влажности с учетом водоцементного отношения раствора, вида и дозировки пластифицирующей добавки. *Практическая значимость.* Разработанная методика при использовании плоской версии (2D) ПК Plaxis и упруго-пластической модели грунта позволяет достоверно оценить характер распространения раствора и НДС грунта после инъекционного закрепления (относительная погрешность при сравнении с экспериментальными данными до 7,5%) и, следовательно, может найти дальнейшее применение при проектировании натурального усиления.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; песчаное основание; расчетная схема; высоконапорная цементация; радиус распространения раствора; упруго-пластическая модель грунта

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ ПІСЛЯ ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ

ШЕХОРКІНА Н. Є.^{1*}, аспірант, м.н.с.

^{1*} Кафедра основ та фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: n_at.sh@ukr.net

Анотація. *Мета.* На наш час дані про напружено-деформований стан (НДС) ґрунтової основи після ін'єкційного закріплення мають розрізнений характер через неточність існуючих способів моделювання та характеру надання вихідної інформації. В наслідок цього необхідно розробити методику дослідження НДС ґрунту основи після ін'єкційного закріплення з використанням чисельного моделювання на основі методу скінчених елементів з метою застосування комплексного підходу до оцінки вірогідності результатів фізичного моделювання. *Методика.* Запропонована методика дослідження НДС ґрунту основи після ін'єкційного закріплення в ПК Plaxis базується на визначенні загальних деформацій, горизонтальних та вертикальних переміщень в масиві ґрунту, а також підйому його поверхні. Для моделювання механічних процесів цементації основи застосована опція Об'ємна деформація (Volumetric strain), що враховує об'єм закачаного розчину і тиск його нагнітання в ґрунтовий масив. *Результати.* Розроблено модель та розрахункова схема процесу закріплення піщаної основи методом високо напірної цементації, в результаті чого встановлено характер розподілення щільності основи, залежність загальних деформацій та підйому ґрунту від об'єму закачаного розчину, підтверджено ефективність попереднього зволоження основи та застосування пластифікуючих домішок для підвищення ін'єктування піску. *Наукова новизна.* На основі виконаного чисельного моделювання процесу високонапірної цементації основи отримані експериментальні дані про характер розповсюдження розчину та закономірності зміни фізичних характеристик основи для різного її стану по вологості з урахуванням водоцементного відношення розчину, виду та дозування пластифікуючої домішки. *Практична значимість.* Розроблена методика за умови застосування плоскої версії (2D) ПК Plaxis та пружно-пластичної моделі ґрунту дозволяє вірогідно визначити характер розповсюдження розчину та НДС ґрунту після ін'єкційного закріплення (відносна похибка в

порівнянні з експериментальними даними до 7,5%), а отже може знайти подальше застосування при проектуванні натурального підсилення.

Ключові слова: напружено-деформований стан; піщана основа; розрахункова схема; високо напірна цементация; радіус розповсюдження розчину; пружно-пластична модель ґрунту

THEORETICAL INVESTIGATION OF GROUND DEFLECTED MODE AFTER CEMENTATION

SHEKHORKINA N. E. ^{1*}, *post-graduate*

^{1*} Department of soil and foundation, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chemishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: n_at.sh@ukr.net

Abstract. Purpose. At present information about ground deflected mode after cementation is mostly disembodied because of inaccuracies of existent modeling methods and output information mode. Therefore it is necessary to develop principles of ground deflected mode after cementation investigation with computational modeling which based on finite-element method. There is a need to use comprehensive approach for simulation physical veracity evaluation. **Methodology.** Proposed principles of ground deflected mode after cementation in Plaxis were based on determination of total deformation, horizontal and vertical displacement in ground mass and raising of its daylight. Volumetric strain option was used for modeling the mechanical process of cementation. It also take into account volume of injected grout and injection pressure. **Findings.** Model and loading diagram of sand bed high pressure cementation were developed. As a results soil density distribution, relations between total deformation, soil daylight raising and grout volume were established and effectiveness of sand prior damping and plasticizer application for increasing the sand injection ability were verified. **Originality.** Based on the results of high-pressure cementation computational modeling experimental data of injection radius, sand physical characteristic modification for different damp state taking into account water-cement ratio of grout, plasticizer type and dosage were received. **Practical value.** Taking into account flat version (2D) Plaxis and elasto-plastic ground model developed principles can estimate for certain injection radius and ground deflected mode after cementation (ratio error is about 7.5%) and thus can be used for real strengthening designing.

Keywords: deflected mode, sand bed, loading diagram, high-pressure cementation, injection radius, elasto-plastic ground model

Введение

Очевидно, что использование сложного и громоздкого математического аппарата для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) основания при его инъектировании [2, 3, 5, 6, 13] значительно усложняет предпроектные работы. В современной практике строительства активно используются системы автоматизированного проектирования (САПР), основанные на методе конечных элементов. Для решения геотехнических задач, в основу которых положены процессы моделирования ґрунтов, а также взаимодействия между конструкциями и ґрунтами используются специализированные программные комплексы (ПК), такие как Plaxis, Z-Soil, SoilWorks, Abaqus, Ansys.

Впервые алгоритм численного моделирования закрепления ґрунтов был предложен И.И. Сахаровым. В дальнейшем эта методика, для реализации которой использовался программный комплекс А.Б. Фадеева «Геомеханика» [8], получила отражение в работах И.И. Сахарова и М. Аббуда [1]. Указанная методика имела ряд недостатков: невозможность учета консолидации ґрунта, а следовательно и его уплотнения между линзами, не предусматривалось моделирование режима неоднократных инъекций, методика численного моделирования фактически не позволяла оценить значения приобретенных механических характеристик закрепляемого ґрунта.

По данным рабочей группы European Geotechnical Thematic Network [11] для решения геотехнических задач рекомендуется применять ПК Plaxis.

Так, в работе Ермолаева В.А. [4] приведена методика моделирования НДС ґрунта при его закреплении инъектированием, а также анализ развивающихся поровых давлений. Однако, предложенная методика применима только для водонасыщенных ґрунтов, не указаны данные о характере распределения напряжений и радиусах уплотненных зон ґрунта.

Результаты численного моделирования в ПК Plaxis процесса образования контролируемого уширения на конце буроинъекционных свай приведены в работе Чикишева В.М. [9].

Следует отметить, что в перечисленных выше работах не указаны способы и характер приложения нагрузок для моделирования.

В работах [10] приводится анализ основных параметров численного моделирования поведения ґрунта и влияния геометрических размеров конечно-элементной модели на точность расчетов.

Рекомендации по моделированию цементации ґрунтового основания в ПК Plaxis предложены в [7].

Результаты моделирования цементации наиболее полно отражены в работе Chan Man Piu [12], однако, существенным недостатком является отсутствие какой-либо информации по характеру распределения

напряжений, значениям радиуса распространения раствора и объемам закачанного раствора.

Цель

Целью данной работы является разработка методики исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта основания после инъекционного закрепления с использованием численного моделирования на основании метода конечных элементов (МКЭ) с целью использования комплексного подхода при оценке достоверности результатов физического моделирования.

Методика

Проверка корректности применения 2D версии МКЭ для анализа НДС грунта после его закрепления высоконапорной цементацией выполнена с помощью тестовых задач моделирования лотковых испытаний в ПК Plaxis с использованием осесимметричной модели (Axisymmetry) и 15-узловых конечных элементов.

Размеры расчетной области при моделировании соответствуют размерам грунтового лотка – в плане 250 мм при высоте 500 мм. Модель инъектора также соответствует фактическим размерам: длина 500 мм, радиус 10 мм, длина перфорированной зоны 200 мм.

Для представления поведения грунта после инъекционного закрепления была использована упруго-пластическая модель Мора – Кулона (Mohr – Coulomb), позволяющая получить общее приближение к реальному поведению грунта.

Моделирование стенок грунтового лотка выполнено с помощью инструмента Плита (Plate), а инъектора – с использованием Геометрической линии (Geometry line).

Для моделирования взаимодействия грунта со стенками грунтового лотка по внутреннему контуру последнего создавались Интерфейсы (Interface). Эти элементы улучшают трансформируемость сетки конечных элементов, что позволяет избежать появления резких пиков напряжений в углах конструкции лотка, не имеющих физической природы. С помощью опции Стандартные закрепления (Standart fixities) автоматически задавался комплекс общих граничных условий геометрической модели.

Моделирование натурной глубины нагнетания $H = 3$ м выполнено приложением Полосовой нагрузки (Distributed Loads), равной нагрузке от собственного веса грунта $\sigma_{zg} = 45$ кПа, к геометрической линии соответствующей дневной поверхности грунта.

Для моделирования цементации использовать опцию Объемная деформация (Volumetric strain). С этой целью в расчетной схеме создан дополнительный кластер с размерами в плане 0,08 мм при высоте 200 мм, моделирующий цементный камень, получаемый после выполнения

инъекции. Величина Объемной деформации кластера рассчитывалась по выражению (1) исходя из объема закачанного раствора в результате лотковых испытаний. Принятые значения Объемной деформации приведены в табл. 1.

$$x + x \cdot y = V \quad (1)$$

где x – объем кластера цементного камня, m^3 ; y – значение Объемной деформации, %; V – объем закачанного раствора, m^3 .

Механические модели и их параметры для структурных элементов расчетной схемы приведены в табл. 2 – 4.

После создания геометрической модели и присвоения свойств материалов всем кластерам и структурным элементам, выполнялось генерирование сетки со средним уровнем крупности (Medium).

Таблица 1

Значения Объемной деформации /
Volumes of Volumetric strain

№ серии	Наименование	Объем раствора, m^3	Объемная деформация, %
1.	МП-ВС-ВЦ-50-Д-0	0,003	15
2.	МП-ВС-ВЦ-100-Д-0	0,005	12
3.	МП-ВС-ВЦ-50-ПО-02	0,003	21
4.	МП-ВС-ВЦ-50-ПО-04	0,0034	27,8
5.	МП-ВС-ВЦ-50-AD-03	0,004	64
6.	МП-09-ВЦ-50-Д-0	0,004	56,3
7.	МП-09-ВЦ-50-AD-03	0,0046	79,7
8.	МП-13-ВЦ-50-AD-03	0,0052	103,1

Таблица 2

Механическая модель и физико-механические характеристики песчаного основания /
Mechanical model and characteristics of sand bed

Параметры	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Модель грунта	<i>Model</i>	Mohr – Coulomb	-
Тип поведения грунта	<i>Type</i>	Drained	-
Удельный вес грунта: - воздушно-сухое состояние; - $W = 9\%$; - $W = 13\%$.	γ_{unsat}	13,6 14,7 15,7	кН/м ³
Коэф. фильтрации в горизонтальном направлении	k_x	1,0	м/сут
Коэф. фильтрации в вертикальном направлении	k_y	1,0	м/сут
Модуль деформации	E	1000	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν	0,3	-
Удельное сцепление	c	1,0	кН/м ²
Угол внутреннего трения	φ	7	град
Угол дилатансии	ψ	0	град

Таблица 3

Механическая модель и физико-механические характеристики стенок грунтового лотка / Mechanical model and characteristics of ground tank wall

Параметры	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Модель грунта	<i>Model</i>	Linear Elastic	-
Тип поведения грунта	<i>Type</i>	Non-porous	-
Нормальная жесткость	<i>EA</i>	$5 \cdot 10^6$	кН/м
Изгибная жесткость	<i>EI</i>	1100	кНм ² /м
Эквивалентная толщина	<i>d</i>	0.051	м
Вес	<i>w</i>	4.01	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	<i>v</i>	0.15	-

Таблица 4

Механическая модель и физико-механические характеристики цементного камня / Mechanical model and characteristics of cement stone

Параметры	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Модель грунта	<i>Model</i>	Linear Elastic	-
Тип поведения грунта	<i>Type</i>	Non-porous	-
Удельный вес	$\gamma_{\text{сат}}$	21	кН/м ³
Модуль деформации	<i>E</i>	$2.3 \cdot 10^4$	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	<i>v</i>	0.2	-

Принятая расчетная схема для моделирования лотковых экспериментов приведена на рис. 1.

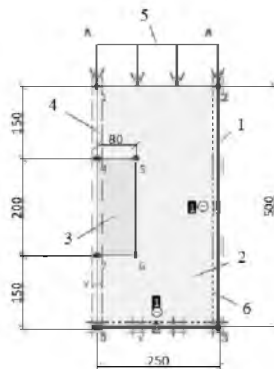


Рис. 1. Расчетная схема / Design model: 1 – стенки грунтового лотка / wall of ground tank; 2 – грунтовое основание / earth foundation; 3 – кластер цементного камня / cement stone cluster; 4 – инъектор / injector; 5 – нагрузка / load; 6 – интерфейс / interface

Задача исследования НДС грунта после инъекционного закрепления решалась в три этапа:

1. Начальный этап (Initial phase): создание в массиве грунта природных напряжений на основании данных о собственном весе грунта с последующим обнулением деформаций;

2. Этап 1 (Phase 1): приложение внешней погонной нагрузки от собственного веса грунта на натурной глубине инъектирования;

3. Этап 2 (Phase 2): активирование в расчетной схеме кластера цементного камня с последующим присвоением объемной деформации.

Результаты

Наиболее характерные параметры НДС грунтового основания, полученных в результате численного моделирования в ПК Plaxis_8.2, приведены на рис. 2 – 4 (для серии МП-13-ВЦ-50-AD-03).

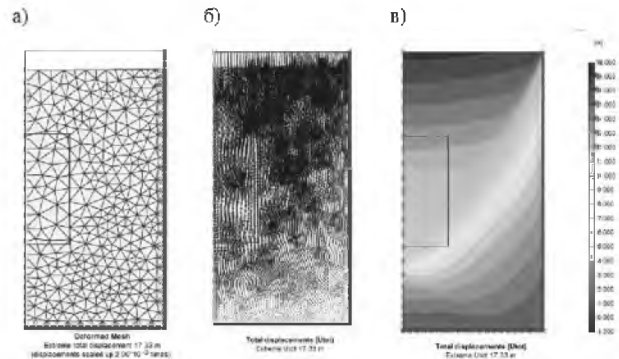


Рис. 2. Результаты расчета Этап 1 / Calculation results (Phase 1): а) – деформированная сетка / deformed mash; б) – направления общих перемещений / total displacement direction; в) – эпюра общих деформаций / total displacement epture

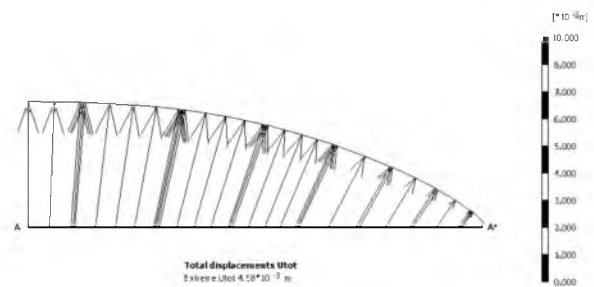


Рис. 3. Эпюра перемещений поверхности грунта после закрепления (Этап 2) / Total displacement epture of soil daylight(Phase 2)

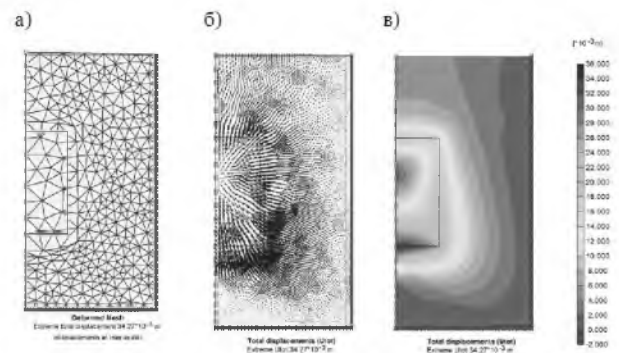


Рис. 4. Результаты расчета Этап 2 / Calculation results (Phase 2): а) – деформированная сетка / deformed mash; б) – направления общих перемещений / total displacement direction; в) – эпюра общих деформаций / total displacement epture

Для анализа полученных параметров НДС грунтового основания результаты численного моделирования лотковых экспериментов сведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**Результаты моделирования НДС /
Volumes of Volumetric strain**

№ серии	Наименование	Общие деформации, мм	Горизонтальные перемещения, мм	Вертикальные перемещения, мм	Подъем поверхности, мм
1.	МП-ВС-ВЦ-50-Д-0	5,68	3,14	5,66	0,69
2.	МП-ВС-ВЦ-100-Д-0	5,23	2,87	5,20	0,51
3.	МП-ВС-ВЦ-50-ПО-02	7,55	4,24	7,54	1,07
4.	МП-ВС-ВЦ-50-ПО-04	11,32	6,44	11,31	1,9
5.	МП-ВС-ВЦ-50-AD-03	19,05	11,00	18,98	3,49
6.	МП-09-ВЦ-50-Д-0	21,62	12,50	21,55	4,01
7.	МП-09-ВЦ-50-AD-03	26,83	16,01	26,65	3,67
8.	МП-13-ВЦ-50-AD-03	34,27	20,42	34,08	4,58

Таблица 6

**Значения радиусов распространения раствора /
Volumes of injection radius**

№ серии	Наименование	Значение радиуса инъецирования, мм		Относит. погрешность, %
		экспериментальное	МКЭ	
1.	МП-ВС-ВЦ-50-Д-0	0,121	0,129	6,2
2.	МП-ВС-ВЦ-100-Д-0	0,115	0,12	4,3
3.	МП-ВС-ВЦ-50-ПО-02	0,132	0,142	7,5
4.	МП-ВС-ВЦ-50-ПО-04	0,143	0,148	3,5
5.	МП-ВС-ВЦ-50-AD-03	0,162	0,151	6,8
6.	МП-09-ВЦ-50-Д-0	0,135	0,141	4,4
7.	МП-09-ВЦ-50-AD-03	0,173	0,167	3,5
8.	МП-13-ВЦ-50-AD-03	0,193	0,184	4,7

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Аббуд М. Геотехническое обоснование стабилизации осадков фундаментов с помощью инъекционного закрепления грунтов: дис. канд. технич. наук.: 05.23.02 / Аббуд Мухаммед – Санкт-Петербург, 2000. – 163 с.

Abbud M. Geothnicheskoe obosnovanie stabilizacii osadok fundamentov s pomoshu inekcionnogo zakreplenia gruntov [Geotechnic basis foundation settlement stabilization ground and inection] PhD Thesis. Sankt-Peterburg., 2000. 163 p.

2. Вахрамеев И.И. Теоретические основы тампонажа горных пород / И.И. Вахрамеев. – М.: Недра, 1968. – 294 с.

Vahrameev I.I. Teoreticheskie osnovy tamponaja gornih porod [theory rock and tamping]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 294 p.

3. Головки С.И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной

Научная новизна и практическая значимость

Сравнивая результаты моделирования МКЭ и лотковых экспериментов установлено, что плоская версия МКЭ при использовании упруго-пластической модели грунта достаточно адекватно оценивает характер распространения раствора (относительная погрешность до 7,5 %) и НДС грунта после инъекционного закрепления. Следовательно, разработанная расчетная схема может использоваться при проектировании натурного усиления.

Выводы

Анализ результатов моделирования лотковых экспериментов позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1. результаты численной модели показали хорошую сходимость с экспериментальными данными (относительная погрешность: 3,5 – 7,5%);

2. эпюра общих перемещений свидетельствует о характере изменения плотности грунта – уменьшается по мере удаления от инжектора к стенкам грунтового лотка;

3. с увеличением объема закачанного раствора наблюдается увеличение общих деформаций грунта, которые достигают пикового значения на контакте «раствор - грунт» и затухают к стенкам лотка;

4. в процессе закрепления основания наблюдается подъем дневной поверхности грунта, значение которого возрастает по мере увеличения объема закачанного раствора;

5. результаты численного моделирования подтвердили эффективность применения пластификатора Adium 150, установленную экспериментальным путем. При моделировании серии 8 (МП-13-ВЦ-50-AD-03) лотковых экспериментов наблюдаются наибольшие значения общих деформаций и подъема поверхности по сравнению с сериями 1 – 7.

цементации: Монография. / С.И. Головки. – Днепропетровск: Пороги, 2010. – 247 с.

Golovko S.I. Teoria i praktika usilenia gruntovih osnovanii metodom visokonapornoj cementacii [Theory practice high-pressure cementation strengthen and ground]. Dnipropetrovsk, Porogy Publ., 2010. 247 p.

4. Ермолаев В.А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъецировании: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» / В.А. Ермолаев. – Санкт-Петербург, ФГБОУ ВПО СПбГАСУ, 2013. – 24 с.

Ermolaev V.A. zakreplenie osnovaniy zanii i sooryjeniy metodom gidrorazriva pri neodnokratnom inektirovanii [strength building structure foot hydraulic break repeat and inject] Abstract of PhD Thesis. Sankt-Peterburg., 2013. 24 p. http://www.spbgasu.ru/upload-files/users/i/Ermolaev_VA.docx

5. Камбефор А. Инъекция грунтов. Принципы и методы / А. Камбефор; [пер. с фр. Р.В.Казаковой, В.Б.Хейфица]. – М.: «Энергия», 1971. – 333 с.

Kambefor A. Inekcia gruntov. Principy i metody [ground injection principl and method] Moskow, Energy Publ., 1971. 333 p.

6. Никитенко М.И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений: Монография. / Никитенко М.И. – Минск: БНТУ, 2007. – 580 с.

Nikitenko M.I. Buroinekcionnie ankery i svai pri vozvedenii i rekonstrukcii zdaniy i sooruzheniy [Drill inject anchor pile erection econstruction building and structure] Minsk, BNTU Publ., 2007. 580 p.

7. СТО 36554501-007-2006 Проектирование и устройство вертикального или наклонного геотехнического барьера методом компенсационного нагнетания. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство» 2006. – 26 с.

STO 36554501-007-2006 Proektirovanie i ustroistvo vertikalnogo ili naklonnogo geotehnicheskogo bariera metodom kompensacionnogo nagnetania [Design organization vertical inclin geotechnic barrier compensat and cement] Moskow, FGUP "SIC "Construction" Publ., 2006. 26 p.

8. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

Fadeev A.B. Metod konechnih elementov v geomehanike [finit element method and geomechanic] Moskow, Nedra Publ., 1987. 221 p.

9. Чикишев В.М., Самохвалов М.А. Результаты теоретических исследований взаимодействия буроинъекционной сваи, имеющей контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием [Электронный ресурс] – Режим доступа :<http://www.science-education.ru/120-16480>.

Chikishev V.M., Samohvalov M.A. Resultati teoreticheskikh issledovaniy vzaimodeystvia buroinekcijonnih svai, imeushey kontroliruemoe ushirenie, s pilevato-glinistim gruntom [results theoretical investigation pile control widening clay footing] <http://www.science-education.ru/120-16480>

10. Amanullah Marri, M. Eng. The mechanical behaviour of cemented granular materials at high pressure. PhD Thesis. – Nottingham, 2010. – 279 pp. <http://core.ac.uk/download/pdf/99488.pdf>

11. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, 2D Version 8 [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.plaxis.nl>

12. Chan Man Piu Analysis and modeling of grouting and its application in civil engineering [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://eprints.usq.edu.au/467/1/Dissertation.pdf>

13. Bell F.G. Engineering treatment of soils. University of Natal, Durban, 1993. – 299 pp. <http://www4.hcmut.edu.vn/~cnan/CT%20tren%20dat%20yeu/Engineering%20treatment%20of%20soils/0419177507.pdf>

Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015