

DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.01

УДК 624.159.4

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СХЕМ УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ КОНТУРНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ЖЕСТКИМИ АРМОЭЛЕМЕНТАМИ

М.Л. Нуждин¹, А.Б. Пономарев²

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 19 августа 2022

Одобрена: 12 октября 2022

Принята к публикации:

15 ноября 2022

Ключевые слова:

армирование грунтового основания, контурное армирование, усиление фундаментов мелкого заложения, пакетное высоконапорное инъецирование, адаптивный метод.

АННОТАЦИЯ

Эффективным способом усиления фундаментов мелкого заложения является контурное армирование – выполнение в грунтовой массе вдоль граней фундамента ряда вертикальных элементов. Внедрение армоэлементов, выполняющих функцию «компрессионной стенки», приводит к заметному снижению деформаций и повышению несущей способности основания усиливаемых фундаментов. В качестве армирующих элементов могут использоваться различные конструкции и материалы с прочностными свойствами, превышающими соответствующие свойства грунта.

Положительно зарекомендован способ формирования армоэлементов пакетным высоконапорным инъецированием. Сущность способа заключается в одновременной подаче цементно-песчаного раствора через несколько источников, установленных в ряд, под давлением, превышающим структурную прочность грунта, и последующим созданием в грунтовой массе плоских вертикальных инъекционных тел условно прямоугольной формы. Важным вопросом при контурном армировании является определение оптимальных параметров инъецирования – количества и шага расположения инъекционных тел в плане и по глубине, что может привести к существенному уменьшению трудоемкости и стоимости работ по усилению.

Для определения рациональных параметров контурного армирования фундаментов мелкого заложения инъекционными телами был выполнен комплекс численных экспериментов по расчету напряженно-деформируемого состояния грунтового основания при разных схемах усиления в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019. Расчеты проводились в 3D постановке с учетом нелинейного характера работы грунта.

По результатам расчета были определены наиболее эффективные схемы расположения армоэлементов при усилении фундаментов мелкого заложения контурным армированием инъекционными телами и обоснована технология последовательного проведения работ по усилению с поэтапным увеличением количества армоэлементов.

© ПНИПУ

© **Нуждин Матвей Леонидович** – кандидат технических наук, e-mail: 89139059520@mail.ru

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: andreypab@mail.ru

Matvey L. Nuzhdin – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: 89139059520@mail.ru

Andrey B. Ponomaryov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: andreypab@mail.ru

CALCULATION OF EFFECTIVE SCHEMES FOR STRENGTHENING SHALLOW FOUNDATIONS BY CONTOUR REINFORCEMENT WITH HARD ELEMENTS

M.L. Nuzhdin¹, A.B. Ponomaryov²

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

²Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 19 August 2022
Approved: 12 October 2022
Accepted for publication:
15 November 2022

Keywords:

soil foundation reinforcement, contour reinforcement, reinforcement of shallow foundations, group high-pressure injection, adaptive method.

ABSTRACT

An effective way to strengthen shallow foundations is contour reinforcement – the execution of vertical elements in the soil base along the edges of the foundation. The introduction of reinforcement elements that perform the function of a "compression wall" leads to a noticeable decrease in deformations and an increase in the bearing capacity of the soil at the base of the reinforced foundations. As reinforcing elements, various structures and materials with strength properties that exceed the corresponding properties of the soil can be used.

A positively recommended method for the formation of reinforcement elements is group high-pressure injection. The essence of the method lies in the simultaneous supply of a cement-sand mortar through several sources installed in a row, under pressure exceeding the structural strength of the soil and the subsequent creation of flat vertical injection bodies of conditionally rectangular shape in the soil. An important issue in contour reinforcement is the determination of the optimal injection parameters – the number and spacing of injection bodies in plan and in depth, which can lead to a significant reduction in cost of work.

To determine the rational parameters of the contour reinforcement with injection bodies, a set of numerical experiments was performed to calculate the stress-strain state of the soil foundation for different reinforcement schemes in the MIDAS GTS NX 2019 software package. The calculations were carried out in a 3D formulation, taking into account the nonlinear nature of the soil operation.

Based on the results of the calculation, the most effective schemes for the location of reinforcement elements were determined when strengthening shallow foundations with contour reinforcement with injection bodies, and the technology for consistent reinforcement work with a gradual increase in the number of reinforcement elements was substantiated.

© PNRPU

Введение

Эффективным способом усиления фундаментов мелкого заложения является контурное армирование – выполнение в грунтовом массиве вдоль граней фундамента ряда вертикальных элементов (Л.В. Нуждин и др. [1, 2]). Внедрение армоэлементов, выполняющих функцию «компрессионной стенки», приводит к существенному снижению деформаций и повышению несущей способности основания усиливаемых фундаментов, что доказано исследованиями Л.В. Нуждина, И.Т. Мирсаяпова, В.И. Клевеко, Р.А. Мангушева, Н.С. Никифоровой и др. [3–8]. В качестве армирующих элементов могут использоваться различные конструкции и материалы с прочностными свойствами, превышающими соответствующие свойства грунта (М.Н. Ибрагимов, А.Б. Пономарев, В.Г. Офрихтер, М.Л. Нуждин и др. [9–15]).

Положительно зарекомендован способ формирования армоэлементов пакетным высоконапорным инъецированием. Сущность способа заключается в одновременной подаче цементно-песчаного раствора через несколько источников, установленных в ряд, под давлением, превышающим структурную прочность, грунта и последующим формированием в грунтовом массиве плоских инъекционных тел условно прямоугольной формы (М.Л. Нуждин и др. [16–20]). Важным вопросом при контурном армировании является определение

оптимальных параметров инъектирования – количества и шага расположения инъекционных тел в плане и по глубине, что может привести к существенному уменьшению трудоемкости и стоимости работ по усилению (Р.В. Мельников, Я.А. Пронозин, А.А. Тарасенко [21], А.В. Лубягин, В.К. Федоров [22]).

Методика и постановка задачи

Для определения рациональных параметров контурного армирования фундаментов мелкого заложения инъекционными телами был выполнен комплекс численных экспериментов по расчету напряженно-деформируемого состояния грунтового основания при разных схемах усиления. Численное моделирование осуществлялось в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019. Расчеты проводились в 3D постановке с учетом нелинейного характера работы грунта.

В качестве примера рассматривался фундамент мелкого заложения существующего здания, претерпевшего значительные деформации. Размеры подошвы фундамента в плане $2,4 \times 2,4$ м, давление по подошве $P = 210$ кПа. Грунтовое основание до глубины 10 м сложено суглинком легким, пылеватым, текучепластичным, непросадочным, незасоленным: $\rho = 1,95$ г/см³, $\varphi = 14^\circ$, $C = 15$ кПа, $E = 4,5$ МПа. Осадка фундамента в процессе возведения здания достигла 156 мм, что существенно превышает предельное значение, рекомендованное СП 22.13330.2016, – 10 см.

Армоэлементы в расчете были приняты прямоугольной формы с размерами $0,5 \times 0,2$ м, высотой 0,7 м; расстояние до граней фундамента 25 см; зазор между элементами по глубине 50 и 75 мм в плане; физико-механические характеристики: $\gamma = 20$ кН/м³, $\nu = 0,2$, $E = 100$ МПа. Материал фундамента – тяжелый бетон.

Были рассмотрены варианты со сплошным и прерывистым контурным армированием вдоль всего периметра и с двух противоположных сторон фундамента. Для каждого варианта рассчитывались случаи пяти-, четырех-, трех-, двух- и одноуровневого армирования, на глубину $1,5b$; $1,2b$; $0,9b$; $0,6b$; $0,3b$ соответственно (рис. 1).

Расчетная схема в ПК MIDAS состояла из сетки гексаэдральных и тетраэдрических элементов, включающей 26 070 конечных элементов и 13 908 узлов с 42 231 степенью свободы. Габаритные размеры расчетной области были приняты $13,5 \times 13,5 \times 15$ м.

Расчеты фундамента, усиленного контурным армированием, выполнялись последовательно в три стадии: расчет напряженно-деформированного состояния основания от собственного веса грунта; после устройства фундамента и внедрения элементов усиления; расчет усиленного основания после приложения нагрузки.

Результаты расчетов и их анализ

Значение осадки фундамента на естественном (не усиленном) основании, рассчитанное в ПК MIDAS с использованием упругопластической модели Мора – Кулона, составило 144 мм, что близко к величине осадки реального фундамента.

Результаты расчетов фундамента на усиленном основании приведены в таблице, изолинии вертикальных перемещений грунтового основания, усиленного по характерным схемам, – на рис. 2.

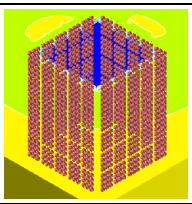
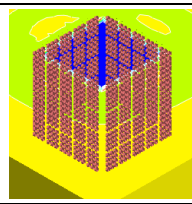
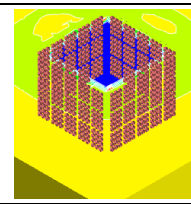
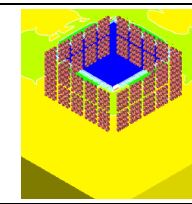
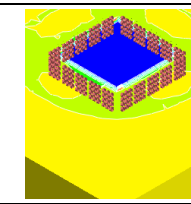
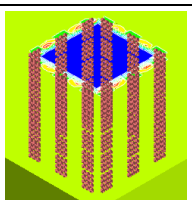
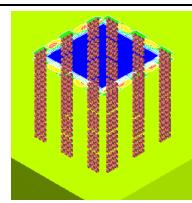
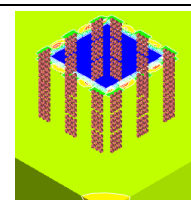
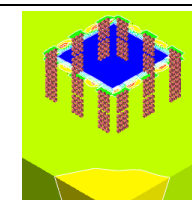
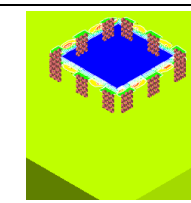
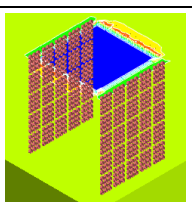
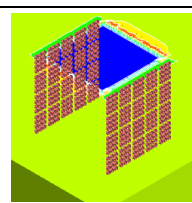
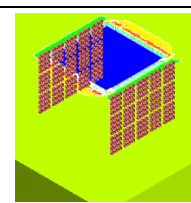
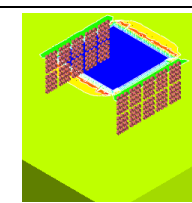
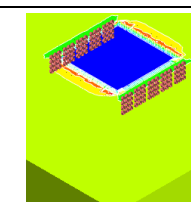
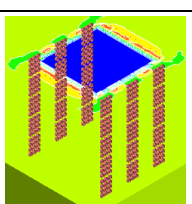
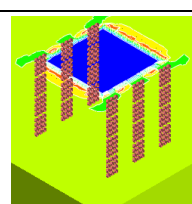
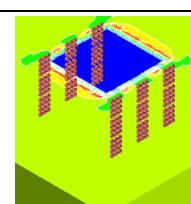
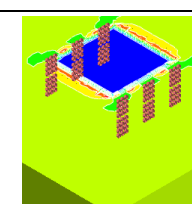
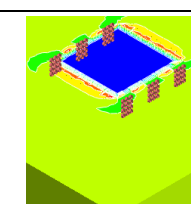
«20/5»	«20/4»	«20/3»	«20/2»	«20/1»
				
«12/5»	«12/4»	«12/3»	«12/2»	«12/1»
				
«10/5»	«10/4»	«10/3»	«10/2»	«10/1»
				
«6/5»	«6/4»	«6/3»	«6/2»	«6/1»
				

Рис. 1. Схемы расположения армоэлементов при усилении фундамента мелкого заложения контурным армированием (в обозначении схем: первая цифра – количество столбцов, вторая – количество уровней армоэлементов по глубине)

Fig. 1. Arrangement schemes of reinforcement elements when strengthening shallow foundation with contour reinforcement (in the designation of schemes: the first number – the number of columns, the second – the number of levels of reinforcing elements in depth)

Эффективность разных схем усиления наглядно показывает коэффициент приведенного расхода материала $K_{ПРМ}$ (табл. 1), равный отношению объема используемых армоэлементов к разности осадок фундамента на естественном основании и после усиления, численно тождественный объему армоэлементов в кубических метрах, необходимому для снижения осадки на 1 см.

Так, например, как и следовало ожидать, минимальное значение осадки фундамента достигается максимальным армированием (сплошное 5-уровневое по глубине «20/5») – $S = 110$ мм, что на 34 мм или на 24 % меньше осадки фундамента на естественном основании. Однако, прерывистое армирование вдоль двух противоположных сторон фундамента одноуровневое по глубине («6/1») позволяет уменьшить осадку на 8 мм, т.е. на 6 %, при этом объем используемых армоэлементов отличается в 17 раз – 0,42 против 7,00 м³ в первом случае. При усилении по схеме «20/5» коэффициент приведенного расход материала $K_{ПРМ} = 2,06$, а по схеме «6/1» $K_{ПРМ} = 0,53$, т.е. удельная эффективность усиления при максимальном армировании ниже в 4 раза.

Результаты расчетов фундамента мелкого заложения, усиленного контурным армированием с расположением армоэлементов по разным схемам

The results of calculations of the shallow foundation, reinforced hard elements with different layouts

«20/5»	«20/4»	«20/3»	«20/2»	«20/1»
$S = 110$ мм	$S = 112$ мм	$S = 114$ мм	$S = 116$ мм	$S = 122$ мм
$\Delta S = 34$ мм	$\Delta S = 32$ мм	$\Delta S = 30$ мм	$\Delta S = 28$ мм	$\Delta S = 22$ мм
$V = 7,00$ м ³	$V = 5,60$ м ³	$V = 4,20$ м ³	$V = 2,80$ м ³	$V = 1,40$ м ³
$K_{\text{ГРМ}} = 2,06$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,75$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,40$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,00$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,64$
«12/5»	«12/4»	«12/3»	«12/2»	«12/1»
$S = 121$ мм	$S = 123$ мм	$S = 123$ мм	$S = 124$ мм	$S = 128$ мм
$\Delta S = 23$ мм	$\Delta S = 21$ мм	$\Delta S = 21$ мм	$\Delta S = 20$ мм	$\Delta S = 16$ мм
$V = 4,20$ м ³	$V = 3,36$ м ³	$V = 2,52$ м ³	$V = 1,68$ м ³	$V = 0,84$ м ³
$K_{\text{ГРМ}} = 1,83$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,60$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,20$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,84$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,53$
«10/5»	«10/4»	«10/3»	«10/2»	«10/1»
$S = 126$ мм	$S = 127$ мм	$S = 128$ мм	$S = 129$ мм	$S = 132$ мм
$\Delta S = 18$ мм	$\Delta S = 17$ мм	$\Delta S = 16$ мм	$\Delta S = 15$ мм	$\Delta S = 12$ мм
$V = 3,50$ м ³	$V = 2,80$ м ³	$V = 2,10$ м ³	$V = 1,40$ м ³	$V = 0,70$ м ³
$K_{\text{ГРМ}} = 1,94$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,65$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,31$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,93$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,58$
«6/5»	«6/4»	«6/3»	«6/2»	«6/1»
$S = 133$ мм	$S = 134$ мм	$S = 134$ мм	$S = 134$ мм	$S = 136$ мм
$\Delta S = 11$ мм	$\Delta S = 10$ мм	$\Delta S = 10$ мм	$\Delta S = 10$ мм	$\Delta S = 8$ мм
$V = 2,10$ м ³	$V = 1,68$ м ³	$V = 1,26$ м ³	$V = 0,84$ м ³	$V = 0,42$ м ³
$K_{\text{ГРМ}} = 1,91$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,68$	$K_{\text{ГРМ}} = 1,26$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,84$	$K_{\text{ГРМ}} = 0,53$

Примечание: S – осадка фундамента на усиленном основании, ΔS – разность осадок фундамента на естественном и усиленном основании, V – объем армоэлементов, $K_{\text{ГРМ}}$ – коэффициент приведенного расхода материала, равный отношению объема V армоэлементов к разности осадок ΔS .

Прерывистое контурное армирование рентабельнее сплошного. Коэффициент приведенного расхода материала при прерывистом контурном 5-уровневом армировании вдоль всего периметра фундамента («12/5») составляет $K_{\text{ГРМ}} = 1,83$ и при одноуровневом («12/1») $K_{\text{ГРМ}} = 0,53$. При сплошном 5-уровневом армировании коэффициент приведенного расхода материала равен $K_{\text{ГРМ}} = 2,06$ и при сплошном одноуровневом $K_{\text{ГРМ}} = 0,64$. Сплошное армирование вдоль двух противоположных сторон имеет также большую удельную эффективность по сравнению со сплошным армированием вдоль всего периметра фундамента – $K_{\text{ГРМ}} = 1,94$ и $K_{\text{ГРМ}} = 0,58$ соответственно.

Анализируя значения коэффициента $K_{\text{ГРМ}}$, справедливо утверждать, что во всех случаях увеличение как количества столбцов армоэлементов, так и уровней по глубине приводит к уменьшению деформаций грунтового основания, но при этом снижение осадки от схемы с меньшим к схеме с большим армированием непропорционально росту объема используемых армоэлементов, т.е. удельная эффективность усиления снижается.

Сравнение деформаций грунтового основания, усиленного армированием, по схемам с одинаковым количеством уровней позволяет сделать вывод о практически прямой зависимости значения осадки от количества армоэлементов в плане при примерно равных значениях $K_{\text{ГРМ}}$. Например, при 5-уровневом армировании разность осадок фундамента на естественном основании и на основании, усиленном прерывистым контурным армированием с двух противоположных сторон («6/5»), составляет 11 мм, при сплошном контурном армировании с двух противоположных сторон («10/5») – 18 мм, при прерывистом с четырех сторон («12/5») – 23 мм и при сплошном контурном армировании с четырех сторон фун-

дамента («20/5») – 34 мм. Значение $K_{ПРМ}$ при этом находится в пределах от 1,83 до 2,06, и, что характерно, наименьшее значение $K_{ПРМ} = 1,83$ соответствует схеме прерывистого контурного армирования с четырех сторон фундамента («12/5»). Последнее справедливо также для вариантов с четырех-, трех-, двух- и одноуровневым армированием.

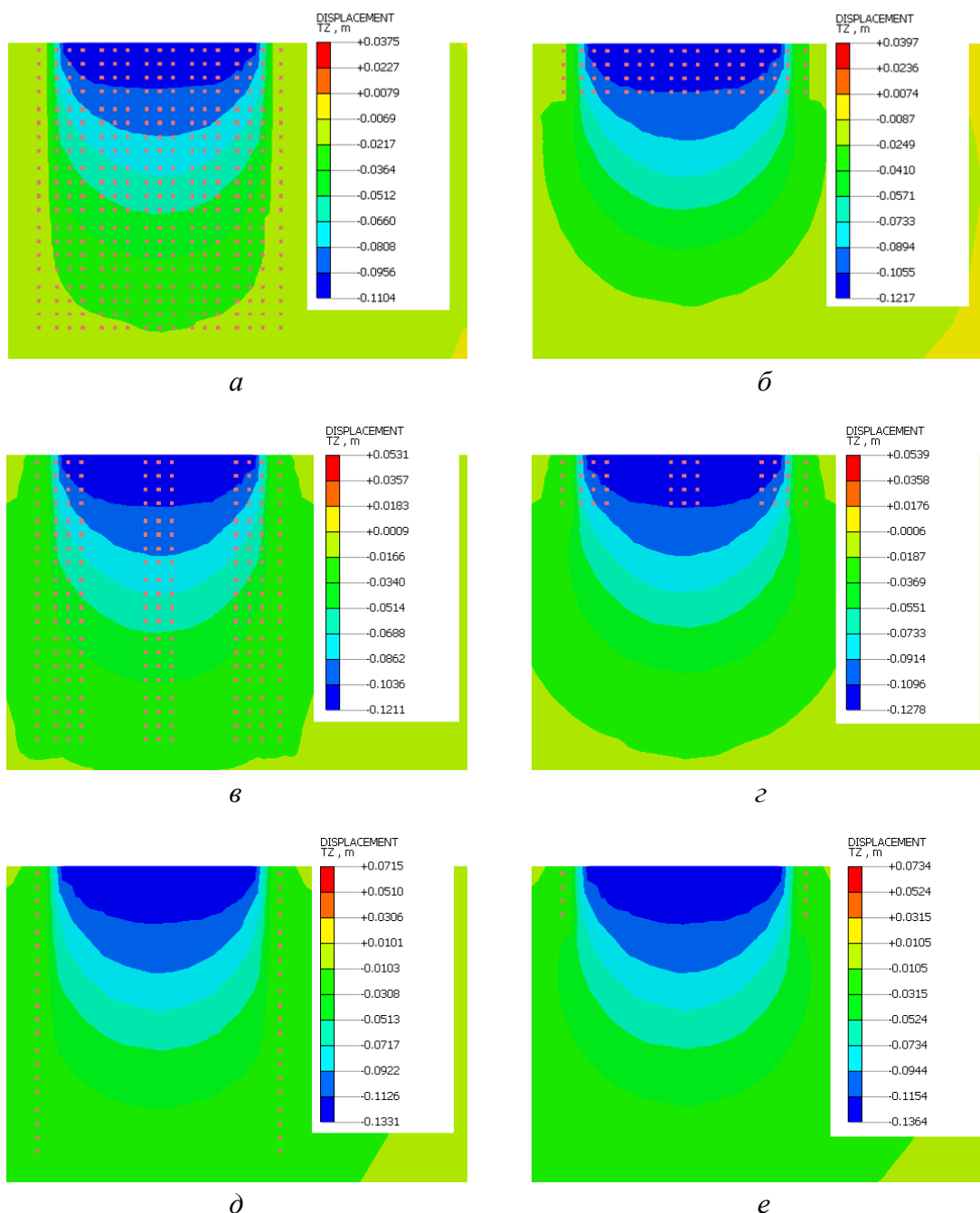


Рис. 2. Изолинии вертикальных перемещений грунтового основания фундамента при усилении контурным армированием: а, б – сплошным 5-уровневым («20/5») и одноуровневым; в, г – прерывистым 5-уровневым («12/5») и одноуровневым («12/1»); прерывистым, вдоль двух противоположных сторон фундамента: д, е – 5-уровневым («6/5») и одноуровневым («6/1»)

Fig. 2. Isolines of vertical displacements of the foundation soil base when reinforced with contour reinforcement: а, б – solid 5-level («20/5») and one-level; в, г – intermittent 5-level («12/5») and one-level («12/1»); discontinuous, along two opposite sides of the foundation: д, е – 5-level («6/5») and one-level («6/1»)

Так как выполнение дополнительных уровней армозащитных элементов «сверху вниз» при усилении реальных фундаментов крайне затруднительно [22], глубину армирования необходимо назначать на стадии проектирования.

Для определения эффективной глубины контурного армирования было выполнено сравнение деформационных изолиний грунтового основания фундамента без усиления и после него. Расчет проводился для всех схем, в качестве примера на рис. 3 представлены результаты деформаций грунтового основания до и после усиления сплошным контурным армированием вдоль всего периметра для вариантов с разным количеством уровней по глубине.

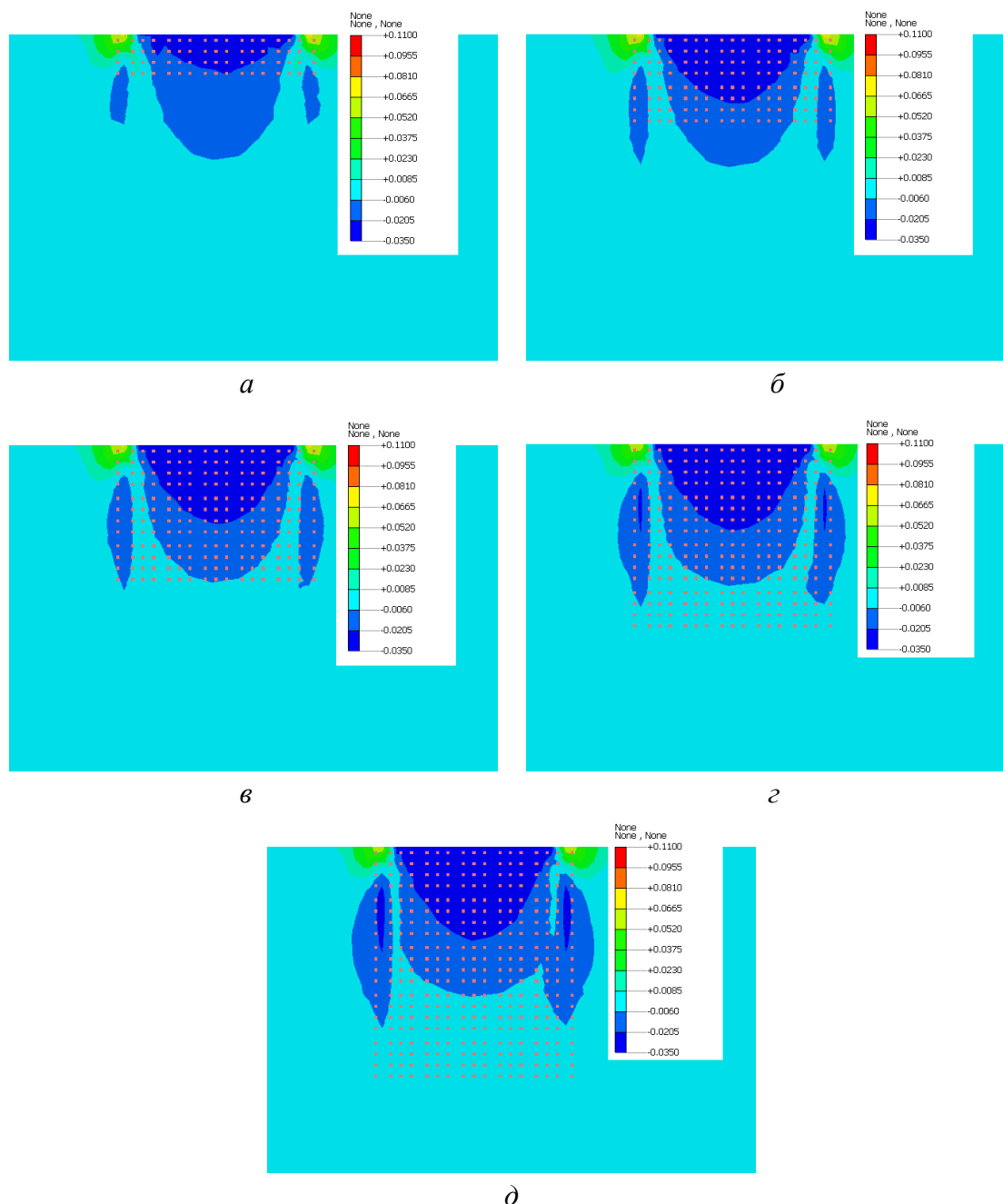


Рис. 3. Изолинии разностей деформаций грунтового основания до и после усиления:
а – при одноуровневом («20/1»), *б* – двух («20/2»), *в* – трех («20/3»), *г* – четырех («20/4») и
д – пятиуровневом («20/5») сплошном армировании

Fig. 3. Isolines of differences in soil base deformations before and after reinforcement: *a* – with a single («20/1»), *б* – two («20/2»), *в* – three («20/3»), *г* – four («20/4») and *д* – five-level («20/5») solid reinforcement

Рис. 3 показывает, что контурное армирование приводит к существенному изменению деформационного состояния грунтового массива – зона разности деформаций основания до и после усиления имеет клиновидную форму и распространяется на глубину $0,81b$, $0,86b$, $0,90b$, $0,91b$ и $0,97b$ при 1-, 2-, 3-, 4- и 5-уровневом армировании соответственно. При 1- и 2-уровневом армировании граница зоны располагается ниже ($0,3b$ и $0,60b$), при 3-уровневом практически совпадает ($0,9b$), при 4-уровневом выше ($1,2b$), а при пяти уровнях существенно выше глубины армирования ($1,5b$). При устройстве 2-го, 3-го и 4-го уровней отчетливо наблюдается уменьшение боковых деформаций в пределах и за контуром усиления. Элементы 5-го уровня способствуют некоторому увеличению главным образом боковых зон трансформированного состояния грунтового массива, однако они при этом не распространяются ниже элементов 4-го уровня. Следовательно, наиболее эффективны схемы с 3- и 4-уровневым армированием, что соответствует глубине $0,9b \dots 1,2b$ от подошвы фундамента. Это утверждение справедливо для всех схем размещения армоэлементов в плане при контурном армировании фундаментов мелкого заложения.

Выводы

На основе выполненного авторами численного моделирования по прогнозу напряженно-деформируемого состояния грунтового основания при разных схемах усиления в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019 можно сделать следующие выводы:

1. Усиление фундаментов мелкого заложения контурным армированием жесткими армоэлементами трансформирует напряженно-деформированное состояние грунтового массива; изменение схемы усиления с увеличением количества армоэлементов уменьшает напряжения и вертикальные деформации. При прерывистом контурном армировании фундаментов мелкого заложения снижение осадки может достигать 16 % относительно осадки на неусиленном основании, при сплошном контурном армировании осадка может быть снижена на 24 %.

2. К максимальному уменьшению деформаций грунтового основания приводит усиление наибольшим количеством армоэлементов. Однако любая схема армирования снижает осадку, при этом в большинстве случаев коэффициент приведенного расхода материала $K_{ПРМ}$ растет вместе с увеличением объема используемых армоэлементов.

3. Прерывистое контурное армирование рентабельнее сплошного, коэффициент приведенного расхода материала $K_{ПРМ}$ при армировании участков одинаковой длины в первом случае меньше. Прерывистое контурное армирование вдоль всего периметра фундаментов эффективнее усиления сплошным армированием вдоль двух противоположных сторон – деформации основания и значение коэффициента приведенного расхода $K_{ПРМ}$ во втором случае выше.

4. Исходя из вышесказанного усиление фундаментов мелкого заложения жесткими армоэлементами – инъекционными телами – целесообразно выполнять поэтапно, увеличивая количество армоэлементов на каждом этапе и соответственно меняя схему армирования – от прерывистого контурного армирования вдоль противоположных сторон к сплошному контурному армированию вдоль периметра всего фундамента. Необходимость проведения последующих работ должна определяться по результатам мониторинга за динамикой развития деформаций грунтового основания в процессе и после завершения каждого этапа.

5. Оптимальная глубина армирования грунтового основания фундаментов мелкого заложения составляет $0,9b \dots 1,2b$ (где b – ширина подошвы фундамента).

Дальнейшее направление исследований авторов будет связано с созданием общих принципов подхода к усилению фундаментов пакетным высоконапорным инъецированием на основе результатов математического моделирования.

Благодарности

Авторы статьи благодарят сотрудников кафедры «Геотехника» Тюменского индустриального университета – кандидата технических наук, доцента Р.В. Мельникова и кандидата технических наук, доцента Д.В. Рачкова за ценные советы и рекомендации при выполнении исследований.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Нуждин Л.В., Кузнецов А.А. Армирование грунтов основания вертикальными стержнями // Труды международного семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – М., 2000. – С. 204–206.
2. Nuzhdin L.V., Skvortsov E.P. Analyses vibration foundation, reinforcement contour arming ground basis, finite elements methods // Proceedings of International Geotechnical Symposium. – Astana, 2005. – P. 264–267.
3. Армирование грунтового основания 16-ти этажного жилого дома жесткими вертикальными стержнями / Л.В. Нуждин, В.П. Писаненко, П.А. Гензе, А.А. Кузнецов, А.М. Караулов, М.Л. Нуждин, В.А. Ступников // Известия вузов «Строительство». – 2002. – № 3. – С. 141–146.
4. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: издание второе, дополненное и переработанное / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М., 2016. – 1040 с.
5. Мирсаяпов И.Т., Шарафутдинов Р.А. Напряженно-деформированное состояние грунтового основания, армированного вертикальными и горизонтальными элементами // Известия КГАСУ. – 2017. – № 1 (39). – С. 153–158.
6. Мирсаяпов И.Т., Попов О.А. Расчет осадки армированных вертикальными стержневыми элементами грунтовых оснований // Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства: тр. междунар. конф. – Пермь, 2011. – С. 407–413.
7. Богданова Е.О., Клевко В.И. Компьютерное моделирование развития осадок здания на основании, усиленном вертикальным армированием // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 4. – С. 73–77.
8. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. – М.: АСВ, 2017. – 168 с.
9. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Закрепление грунтов в подземном строительстве. – М.: АСВ, 2022. – 434 с.

10. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. – М.: Стройиздат, 2010. – 226 с.
11. Ramya M., Jeyapriya S. Behavioural Study on Geopolymer Column Soil // *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. IGS 2016.* – Singapore, Springer, 2019. – Vol. 2. – P. 1–9.
12. Kumar P. Bearing Capacity of Strip Footing on Clay Soil Reinforced with Metal Strips and with Anchors // *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. IGS 2016.* – Singapore, Springer, 2019. – Vol. 2. – P. 77–84.
13. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting. Technology, design and control. – L.: CRC Press, 2014. – 284 p.
14. Пономарев А.Б., Офрихтер В.Г. Анализ и проблемы исследований геосинтетических материалов в России // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура.* – 2013. – № 2. – С. 68–73.
15. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г., Пономарев А.Б. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами полипропилена // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура.* – 2012. – № 1. – С. 44–55.
16. Нуждин М.Л. Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура.* – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01
17. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V., Ponomaryov A.B. Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions // *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Lecture Notes in Civil Engineering.* – Singapore: Springer, 2019. – Vol. 62. – P. 193–197. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_24
18. Нуждин М.Л., Нуждин Л.В. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы // *Известия вузов. Строительство.* – 2019. – № 10. – С. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112
19. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Strengthening of supporting ground of a damaged building by high-pressure injection of a moving cement-sand mixture // *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (7–9 October 2019, Cape Town).* – University of Pretoria, Pretoria, South Africa, 2019. – P. 785–788.
20. Пронозин Я.А., Кайгородов М.Д. Регулирование геометрического положения зданий, в условиях сильносжимаемых грунтовых оснований // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф.* – Новочеркасск, 2018. – С. 462–467.
21. Мельников Р.В., Пронозин Я.А., Тарасенко А.А. Численное определение областей грунта для исправления крена здания // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения.* – 2021. – № 4 (59). DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_108
22. Лубягин А.В., Федоров В.К. Модификация грунтовых оснований методом компенсационного нагнетания // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 2015. – № 2. – С. 28–31.

References

1. Nuzhdin L.V., Kuznetsov A.A. Armirovanie gruntov osnovanija vertikal'nymi sterzhnjami [Reinforcement of foundation soils with vertical rods]. *Proceedings of the international seminar on soil mechanics, foundation engineering and transport facilities.* Moscow, 2000, pp. 204–206.

2. Nuzhdin L.V., Skvortsov E.P. Analyses vibration foundation, reinforcement contour armoring ground basis, finite elements methods. *Proceedings of International Geotechnical Symposium*. Astana, 2005, pp. 264–267.
3. Nuzhdin L.V., Pisanenko V.P., Genze P.A., Kuznetsov A.A., Karaulov A.M., Nuzhdin M.L., Stupnikov V.A. Armirovanie gruntovogo osnovanija 16-ti jetazhnogo zhilogo doma zhestkimi vertikal'nymi sterzhnjami [Reinforcement of the soil base of a 16-storey residential building with rigid vertical rods]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2002, no. 3, pp. 141–146.
4. Spravochnik geotekhnika. Osnovanija, fundamenty i podzemnye sooruzhenija: izdanie vtoroe, dopolnennoe i pererabotannoe [Handbook of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures.]. 2nd ed. Eds. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. Moscow, 2016, 1040 p.
5. Mirsajapov I.T., Sharafutdinov R.A. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie gruntovogo osnovanija, armirovannogo vertikal'nymi i gorizontálnymi jelementami [Stress-strain state of a soil base reinforced with vertical and horizontal elements]. *Izvestija KGASU*, 2017, no. 1 (39), pp. 153–158.
6. Mirsajapov I.T., Popov O.A. Raschet osadki armirovannyh vertikal'nymi sterzhnevymi jelementami gruntovyh osnovanij [Calculation of the settlement of soil foundations reinforced with vertical rod elements]. *Fundamenty glubokogo zalozenija i problemy osvoenija podzemnogo prostranstva: trudy mezhdunarodnoj konferentsii*. Perm, 2011, pp. 407–413.
7. Bogdanova E.O., Kleveko V.I. Komp'juternoe modelirovanie razvitija osadok zdanija na osnovanii, usilennom vertikal'nym armirovanijem [Computer modeling of the development of the settlement of a building on a foundation reinforced with vertical reinforcement]. *Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN*, 2017, no. 4, pp. 73–77.
8. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Tehnologicheskie osadki zdaniy i sooruzhenij v zone vlijanija podzemnogo stroitel'stva. Moscow, ASV, 2017, 168 p.
9. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Zakreplenie gruntov v podzemnom stroitel'stve. Moscow, ASV, 2022, 434 p.
10. Malinin A.G. Strujnaja cementacija gruntov [Jet grouting of soils]. Moscow, Strojizdat», 2010, 226 p.
11. Ramya M., Jeyapriya S. Behavioural study on geopolymer column soil. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. IGS 2016*. Singapore, Springer, 2019, vol. 2, pp. 1–9.
12. Kumar P. Bearing capacity of strip footing on clay soil reinforced with metal strips and with anchors. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. IGS 2016*. Singapore, Springer, 2019, vol. 2, pp. 77–84.
13. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting. Technology, Design and Control. London, CRC Press, 2014, 284 p.
14. Ponomarev A.B., Ofrihter V.G. Analiz i problemy issledovanij geosinteticheskikh materialov v Rossii [Analysis and problems of geosynthetic materials research in Russia] // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013, no. 2, pp. 68–73.
15. Kuznetsova A.S., Ofrihter V.G., Ponomarev A.B. Issledovanie prochnostnyh harakteristik peska, armirovannogo diskretnymi voloknami polipropilena [Study of strength characteristics of sand reinforced with discrete polypropylene fibers]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2012, no. 1, pp. 44–55.
16. Nuzhdin M.L. Jeksperimental'nye issledovanija usilenija gruntovogo osnovanija svajnyh fundamentov armirovanijem zhestkimi vkljuchenijami [Experimental studies of strengthening the

soil base of pile foundations by reinforcing with rigid inclusions]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2019, vol. 10, iss. 3, pp. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01.

17. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V., Ponomaryov A.B. Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer, 2019, vol. 62, pp. 193–197. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_24.

18. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Jeksperimental'noe podtverzhdenie vozmozhnosti sozdaniya v gruntovom massive inekcionnyh tel ustanovlennoj formy [Experimental confirmation of the possibility of creating injection bodies of the established shape in the soil mass]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2019, no. 10, pp. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112/

19. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Strengthening of supporting ground of a damaged building by high-pressure injection of a moving cement-sand mixture. *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (7–9 October 2019, Cape Town). University of Pretoria, Pretoria, South Africa, 2019, pp. 785–788.

20. Pronozin Ja.A., Kajgorodov M.D. Regulirovanie geometricheskogo polozhenija zdaniy, v usloviyah sil'noszhimaemyh gruntovyh osnovanij [Regulation of the geometric position of buildings, in conditions of highly compressible soil foundations]. *Mehanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. Novocherkassk, 2018, pp. 462–467.

21. Mel'nikov R.V., Pronozin Ja.A., Tarasenko A.A. Chislennoe opredelenie oblastej grunta dlja ispravlenija krena zdaniya [Numerical determination of ground areas to correct building roll]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*, 2021, no. 4 (59), DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_108.

22. Lobjagin A.V., Fedorov V.K. Modifikacija gruntovyh osnovanij metodom kompensacionnogo nagnetanija [Modification of soil bases by the method of compensatory injection]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2015, no. 2, pp. 28–31.