

УДК 624.131

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-51-58

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО АРМИРОВАНИЯ
СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВА СПЛОШНОЙ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ ЗДАНИЯ***канд. техн. наук А.Н. НЕВЕЙКОВ¹, В.Н. ДЕДОК²**¹ Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,**² Брестский государственный технический университет)**¹ geomonolith@gmail.com*

Статья посвящена проблемам проектирования и устройства искусственного основания из вертикальных армирующих элементов при устройстве сплошной фундаментной плиты здания в Республике Беларусь.

Ключевые слова: *слабое основание, вертикальное армирование основания, забивная свая, метод конечных элементов.*

Введение. Ограниченность территорий для строительства в черте города и их высокая стоимость вынуждают уплотнять существующую застройку и повышать этажность зданий, что сопровождается ростом нагрузок на фундаменты и основания зданий. Одним из решений в отмеченных условиях строительства является применение сплошной фундаментной плиты под всем зданием. Опыт применения таких фундаментов для возведения жилых высотных зданий оказался эффективным как с позиции способа ведения строительно-монтажных работ, так и надежности. Однако возведение таких фундаментов на слабых основаниях может приводить к развитию больших осадок фундаментов и их неравномерности, превышающих допустимые нормами величины. В таких условиях для снижения неравномерности осадок и деформаций плитных фундаментов потребуются применение свай для устройства свайно-плитного фундамента, или альтернативного варианта, – устройство искусственного основания под сплошным плитным фундаментом методом вертикального армирования, практическая реализация которого рассмотрена ниже.

Проектные решения по зданию и инженерно-геологические условия площадки строительства. Проектное решение здания – типовой одиннадцатипятиэтажный двухсекционный крупнопанельный жилой дом с перекрестно-стеновой конструктивной системой и узким шагом несущих поперечных стен в 3,6 м и несущими трехслойными наружными стенами. Пространственная жесткость здания обеспечена совместной работой поперечных и продольных несущих стен с замоноличенными бетоном стыками в сочетании с дисками перекрытий, опертыми на стены по контуру и трем сторонам. Под всем зданием предусмотрено техническое подполье, предназначенное для прокладки инженерных коммуникаций. Фундамент под жилой дом принят в виде сплошной фундаментной плиты толщиной 600 мм по бетонной подготовке толщиной 100 мм. Выбор исходного типа фундамента принят в соответствии с техническим заключением по инженерно-геологическим изысканиям после предварительно выполненных расчетов ленточных фундаментов. Нагрузки на фундамент здания приняты в соответствии с привязкой типового проекта.

Согласно выполненным инженерно-геологическим изысканиям на площадке строительства здания грунтовый массив в ее пределах сложен сверху вниз:

- техногенными отложениями из насыпных грунтов мощностью от 0,4 до 3,7 м (ИГЭ 1, 1а) преимущественно из песка мелкого с включениями строительного мусора;
- флювиогляциальными надморенными отложениями мощностью от 0,5 до 1,8 м из песка пылеватого средней прочности (ИГЭ 2 – $E = 14$ МПа) и прочного (ИГЭ 3 – $E = 16$ МПа);
- моренными отложениями мощностью от 10,9 до 24 м из супеси прочной (ИГЭ 4 – $E = 23$ МПа) и суглинков слабых (ИГЭ 5а – $E = 4,2$ МПа), средней прочности (ИГЭ 5 – $E = 8,5$ МПа), прочных (ИГЭ 6 – $E = 26$ МПа) и очень прочных (ИГЭ 7 – $E = 46$ МПа) с включениями гравия и гальки.

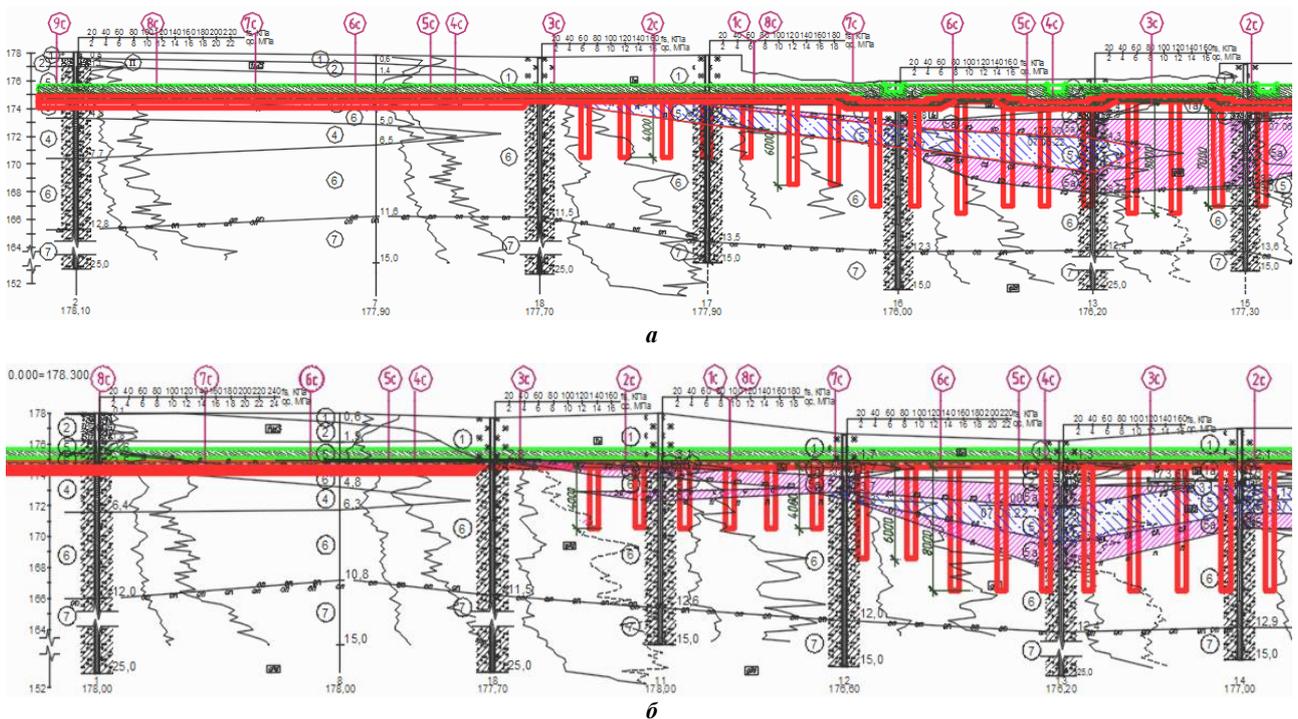
По совокупности факторов инженерно-геологические условия площадки строительства по данным изысканий, выполненных в июне 2022 года, отнесены к III категории сложности¹. Осложняющие факторы – наличие техногенных насыпных грунтов и суглинков моренных малопрочных. Класс геотехнического риска – Б², как для здания II уровня ответственности. Физико-механические характеристики грунтов основания представлены в таблице 1, а характерные продольные инженерно-геологические разрезы вдоль здания – на рисунке 1.

¹ СН 1.02.01-2019 Инженерные изыскания для строительства. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 113 с.

² ТКП 45-5.01-254-2012 Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения проектирования. Строительные нормы проектирования. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012. – 164 с.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики грунтов основания

ЭГП	Наименование грунта	Коеф. пор.	Показ. текуч.	Плотн., г/см ³	Удельный вес, кН/м ³			Удельное сцепление, кПа			Угол вн. трения, градусы			Мод. деф., МПа
		e	I_L	ρ_n	γ_{II}	γ_I	γ_{sb}	c_n	c_{II}	c_I	φ_n	φ_{II}	φ_I	E
1	Насыпной грунт	0,75	–	1,72	16,8	16,5	9,5	–	–	–	–	–	–	–
1a	Насыпной песок мелкий ср. прочности	0,62	–	-	–	–	–	2,0	2,0	1,3	33,0	33,0	30,0	23
2	Песок пылеватый ср. прочности	0,68	–	1,71	16,9	16,8	9,9	3,4	3,4	2,3	28,8	28,8	26,2	14
3	Песок пылеватый водонас. ср. прочности	0,61	–	2,03	19,9	-	10,3	4,0	4,0	2,7	31,3	31,3	28,5	16
4	Супесь моренная прочная	0,48	0,11	2,07	20,4	20,2	11,5	34,5	34,5	23,0	27,7	27,7	24,1	23
5	Суглинок моренный ср. прочности	0,62	0,43	1,94	19,3	19,3	10,5	33,1	32,5	32,0	24,4	23,8	23,3	8,5
5a	Суглинок моренный слабый	0,64	0,48	1,93	1,92	1,92	1,04	26,7	25,5	24,4	22,2	21,7	21,2	4,2
6	Суглинок моренный прочный	0,55	0,26	2,00	19,9	19,8	11,0	44,4	44,4	29,6	26,9	26,9	23,4	26
7	Суглинок моренный очень прочный	0,43	0,11	2,10	21,0	21,0	11,9	50,5	50,5	33,7	28,5	28,5	24,8	46



а – разрез 1-1; б – разрез 2-2

Рисунок 1. – Характерные продольные инженерно-геологические разрезы вдоль здания

Предварительные инженерные расчеты здания на сплошной фундаментной плите были выполнены методом конечных элементов в программном комплексе «Inp+2019»³ в пространственной постановке по комплексной схеме: надземные конструкции – фундаментная плита – основание. Для создания конечно-элементной расчетной схемы были

³ Описание компонентов программного комплекса «Инж-ПУ». URL: <http://www.tech-soft.ru/index.php/docru>.

использованы исходные данные и параметры, соответствующие реальным условиям строительства. Грунты основания задавали объемными элементами в виде упругого изотропного полупространства. Характеристики грунтов принимали по данным инженерно-геологических изысканий. Для моделирования железобетонных конструкций здания применили линейно-упругие плоские элементы с физико-механическими свойствами, соответствующими свойствам железобетона, приняв $\gamma_m = 24 \text{ кН/м}^3$; $E_c = 30000 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,2$.

По результатам статического расчета здания определено, что при осредненном расчетном давлении ($\gamma_f = 1,0$) от фундамента на основание в 175 кПа осадки сплошной фундаментной плиты превышают допустимые нормами⁴ значения по неравномерности и максимальной величине, что впоследствии было подтверждено расчетом в специализированной геотехнической программе «GEO5-FEM»⁵, основанной на методе конечных элементов.

Опираясь на полученные результаты, было предложено под частью сплошной фундаментной плиты заполнить искусственное основание методом вертикального армирования с эквивалентным модулем деформаций не менее 20 МПа , а под оставшейся частью фундаментной плиты выполнить замену грунта на уплотненную песчаную подушку. Искусственное основание предложено выполнять вертикальным армированием слабых грунтов забивными сваями сечением $300 \times 300 \text{ мм}$ переменной длины от 4 до 8 м . Дополнительно под всей плитой был предусмотрен буферный слой из песчано-гравийной смеси толщиной 500 мм с модулем деформации (E) 35 МПа . Такое решение позволило отказаться от применения длинных свай и свайно-плитного фундамента. Применение забивных свай было обосновано технико-экономическим сравнением с буронабивными и щебеночными сваями. Полученное искусственное основание подстилают:

– суглинок моренный средней прочности (ИГЭ 5) со следующими характеристиками: $E = 8,5 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 24,4$; $c_{II} = 33,1 \text{ кПа}$; $\gamma_{II} = 19,3 \text{ кН/м}^3$ (под уплотненной песчаной подушкой и буферным слоем в месте отсутствия свай под плитой);

– суглинок моренный прочный (ИГЭ 6) с характеристиками $E = 26 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 26,9$; $c_{II} = 44,4 \text{ кПа}$; $\gamma_{II} = 19,9 \text{ кН/м}^3$ (под вертикальными армирующими элементами и ИГЭ5).

Отличительной особенностью такого основания является то, что отсутствует контакт между фундаментом и сваями, а нагрузка передается через буферный слой грунта. За счет расположения этого слоя нагрузка на сваи передается равномерно. Также одним из отличий является отсутствие ограничений к диаметру и длине вертикальных элементов армирования. Отмеченные особенности существенным образом влияют на напряженно-деформированное состояние такого основания, которое необходимо определить расчетом.

Примененные методы расчета вертикального армирования основания. Несмотря на значительный опыт применения метода вертикального армирования оснований в фундаментостроении Беларуси [1–3] и наличие практических рекомендаций по их расчету и проектированию⁶, позднее отраженных в национальном нормативном документе СП 5.01.01-2023⁷, широкое применение данного метода все еще вызывает затруднения. Основные вопросы связаны с тем, что в публикуемых сведениях отражены неполные данные об инженерно-геологических условиях площадки строительства, применяемых проектных решениях, методах и результатах опытных полевых исследований при отсутствии каких-либо сведений о выполняемых расчетах численными методами, что затрудняет верификацию предложенных рекомендаций по расчету проектными организациями. При этом в рекомендациях в части сплошного плитного фундамента не оговорены возможности применения вертикального армирования под его частью, назначение минимально необходимых длин армирующих элементов и толщины буферного слоя. Также требует уточнения и дополнительного разъяснения определение эквивалентных физико-механических характеристик полученного таким образом искусственного основания.

Поэтому при проектировании искусственного основания дополнительно были выполнены уточняющие расчеты по ряду методов:

– практическому методу, предложенному В.Г. Федоровским и С.Г. Безволевым [4] и уточненному в своей работе А.М. Карауловым [5];

– методу конечных элементов в специализированной геотехнической программе «GEO5-FEM», которая предназначена для моделирования и анализа широкого спектра геотехнических задач (расчеты устойчивости основания, напряженно-деформированного состояния основания и др.) в плоской постановке.

Расчет в этой программе позволил учесть фактическое состояние грунтов основания с использованием упругопластической модели Кулона – Мора. Для расчета в программе вводили характеристики грунтов по данным инженерно-геологических изысканий. Моделирование свай и сплошной фундаментной плиты выполняли упругими стержнями с интерфейсными элементами, физико-механические свойства которых соответствовали свойствам

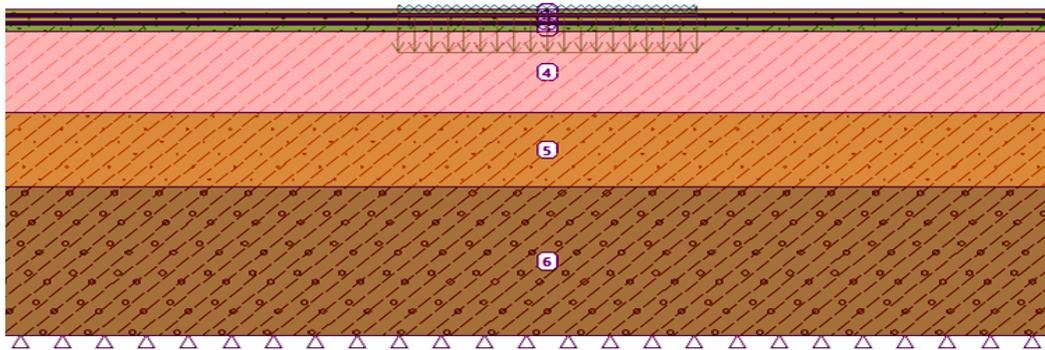
⁴ СП 5.01.01-2023 Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2023. – 150 с.

⁵ Технические руководства к программе «GEO5 – FEM». URL: <https://www.finesoftware.ru/geotekhnicheskikh-raschetov/teoreticheskie-rukovodstva/>.

⁶ Р1.02.133-2014 Рекомендации по проектированию и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов) для плитных фундаментов зданий и сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2014. – 28 с.

⁷ См. сноску 4.

железобетона, приняв $\gamma_m = 24 \text{ кН/м}^3$; $E_m = 30000 \text{ ГПа}$; $\nu_m = 0,2$. Расчетные схемы (разбиение на конечные элементы условно не показано) представлены на рисунках 2 и 3.

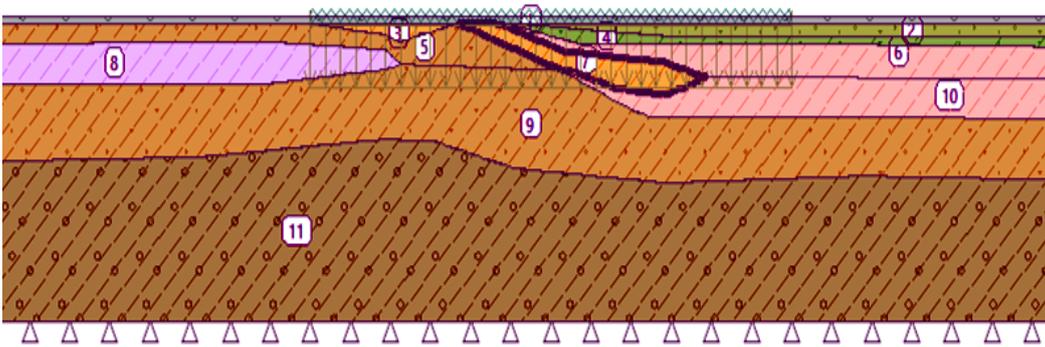


a

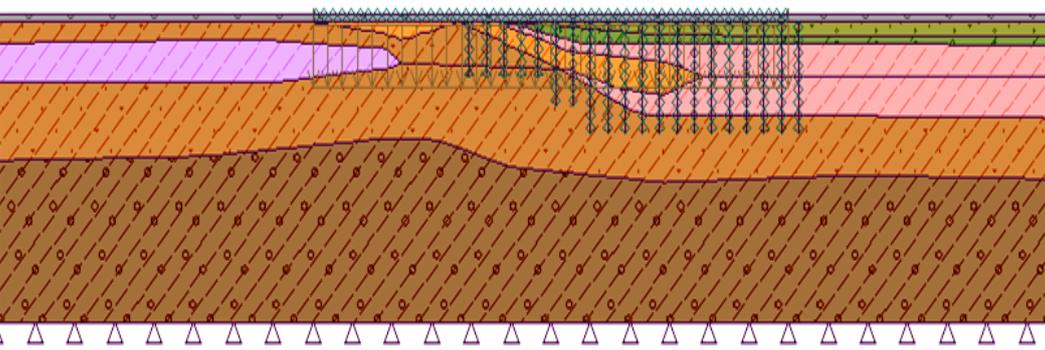


б

Рисунок 2. – Расчетные схемы фундамента на естественном (a) и усиленном вертикальным армированием (б) основаниях по скважине 15



a



б

Рисунок 3. – Расчетные схемы фундамента для продольного разреза на естественном (a) и усиленном вертикальным армированием (б) основаниях

Расчет в программе выполнен по характерным скважинам (в статье представлены результаты по наиболее неблагоприятной скважине 15) и для одного из разрезов. Расчеты в программе выполняли в плоской постановке по этапам:

- моделирование природного состояния грунта (этап 1);
- моделирование возведения здания с приложением нагрузки в виде давления на фундамент в 170 кПа от выше возводимых конструкций (этапы 2, 3, 4).

В результате проведенных расчетов удалось получить качественную и количественную оценку работы армированного вертикальными элементами грунтового массива.

Результаты расчетов и контрольных испытаний на объекте и их анализ. Результаты расчетов позволили окончательно назначить длину свай от 4 до 8 м и шаг в 1,8 м, рассчитать максимальное усилие в армоэлементах и осадку плитного фундамента и ее неравномерность. По результатам расчета в «GEO5-FEM» был определен эквивалентный модуль деформации полученного искусственного основания, равный 25 МПа, который был далее применен в программе «ING+2019» для совместного расчета здания с основанием для определения армирования плиты.

Результатами расчета в программе «GEO5-FEM» установлено, что:

- максимальная осадка фундаментной плиты на естественном основании не превышает 205 мм при относительной разности осадок не более 0,005, а на искусственном – 95 мм и 0,0015 соответственно;
- максимальное расчетное усилие в армирующем элементе не превышает 475–525 кН при передаче грунтом на верхний и нижний концы расчетного усилия не более 275–325 кН;
- применение вертикального армирования основания привело к равномерной передаче давления на грунтовый массив, которое не превышало расчетного сопротивления грунта распределительного и подстилающего слоев, снизило осадку плитного фундамента почти на 55%, обеспечило передачу нагрузки на слои грунта, расположенные глубже.

При расчете по рекомендациям и методу, предложенному В.Г. Федоровским и А.М. Карауловым, для наиболее неблагоприятных условий (скважины) установлено, что максимальная осадка фундаментной плиты не превышает 79 и 104 мм соответственно при максимальном расчетном усилии в свае до 500 кН.

Результаты всех расчетов сведены в таблицу 2. Результаты расчета в программах «GEO5-FEM» и «ING+2019» представлены на рисунках 4–6.

Таблица 2. – Основные результаты расчета фундамента на вертикально армированном основании различными методами

Метод расчета	Рассчитываемый показатель в методе			
	Осадка фундамента	Усилие в армоэлементе	Шаг армоэлементов	Эквивалентный модуль деформации
Практический метод по рекомендациям Р1.02.133-2014 [4]	79	***	1,9	20
Практический метод, разработанный В.Г. Федоровским, С.Г. Безволевым, А.М. Карауловым [5; 6]	104	497	2**	***
Метод конечных элементов: – в программе «GEO5-FEM» – в программе «ING+2019»	81 (95) 72 (84)*	475–525	1,8**	25

Примечание. Приняты следующие обозначения:

* – расчет выполнен по эквивалентному модулю деформации;

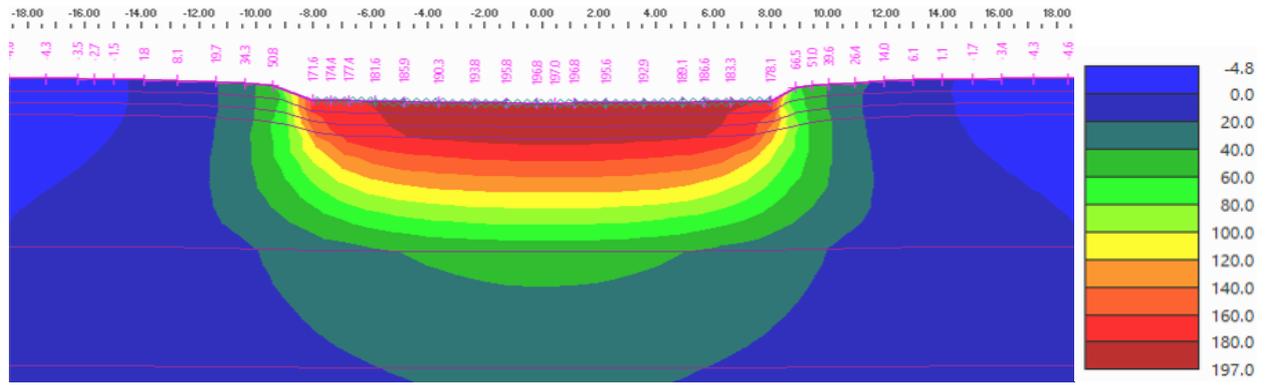
** – назначен шаг армоэлементов в методе;

*** – показатель в методе не определяется;

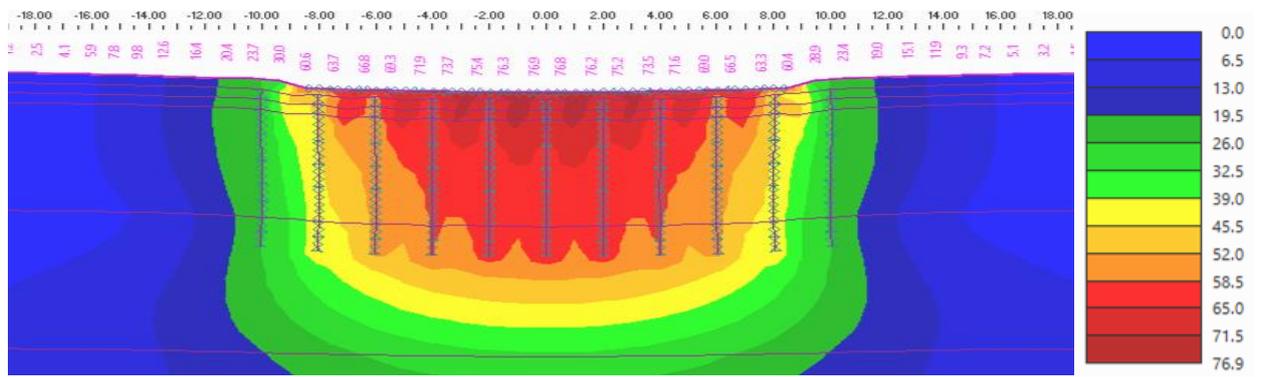
значение в скобках – для участка плиты без вертикального армирования.

Для контроля качества работ в дополнение к стандартным методам контроля (определение отказа забивных свай, контроль коэффициента уплотнения отсыпаемого грунта) проектом были запланированы три опытных полевых испытания геомассива и одно опытное полевое испытание естественного основания в месте отсутствия геомассива. Испытания выполняли через распределительный слой большеразмерным железобетонным штампом размером 3,00×1,75 м, который загружался ступенчато возрастающей статической вдавливающей вертикальной нагрузкой до достижения давления под штампом в 250 кПа. Результаты испытаний представлены на рисунке 7.

В результате проведенных штамповых испытаний был определен эквивалентный модуль деформаций грунтов с вертикальным армированием, который составил 35–45 МПа, что превысило проектное значение.



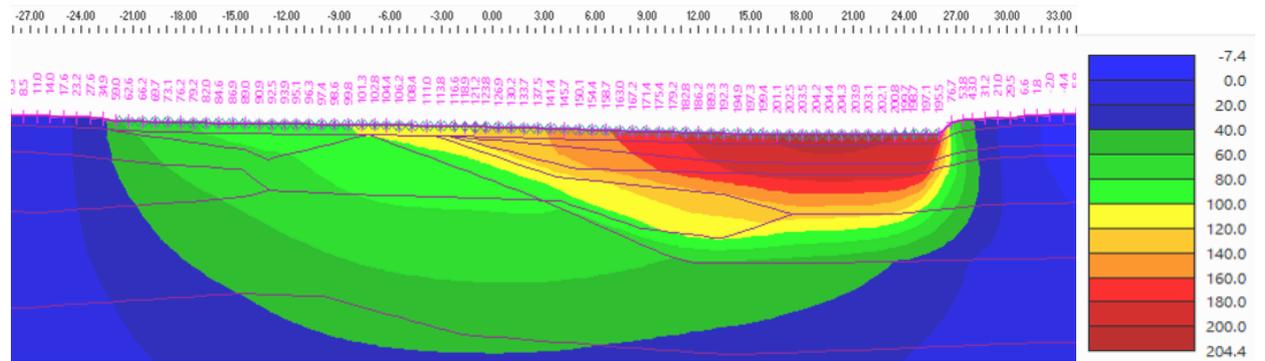
a



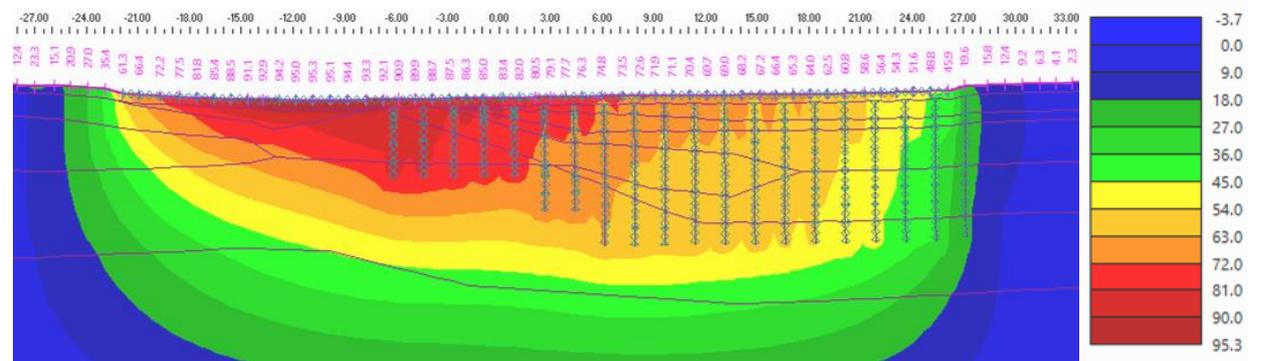
б

a – на естественном основании (максимальная осадка 197 мм);
б – на усиленном вертикальным армированием основании (максимальная осадка 77 мм)

Рисунок 4. – Осадка фундамента по скважине 15 в программе «GEO5-FEM»



a



б

a – на естественном основании (максимальная осадка 204 мм);
б – на усиленном вертикальным армированием основании (в зоне без свай максимальная осадка 95 мм; в зоне свай длиной 8 м максимальная осадка 81 мм)

Рисунок 5. – Осадка фундамента для продольного разреза в программе «GEO5-FEM»

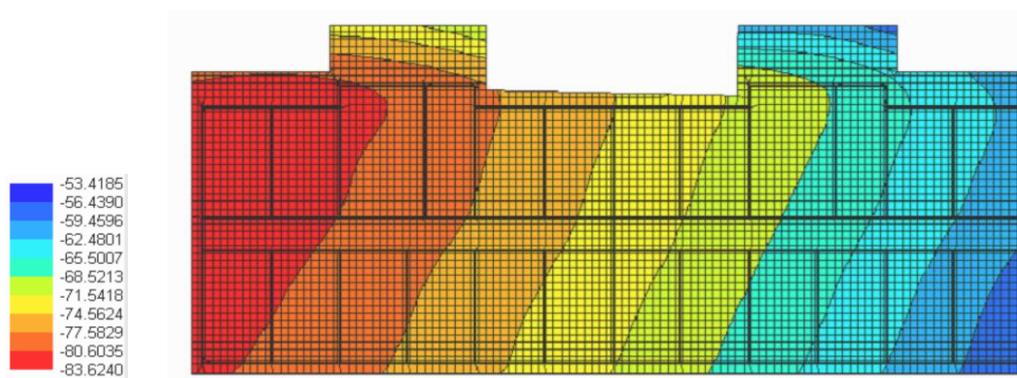
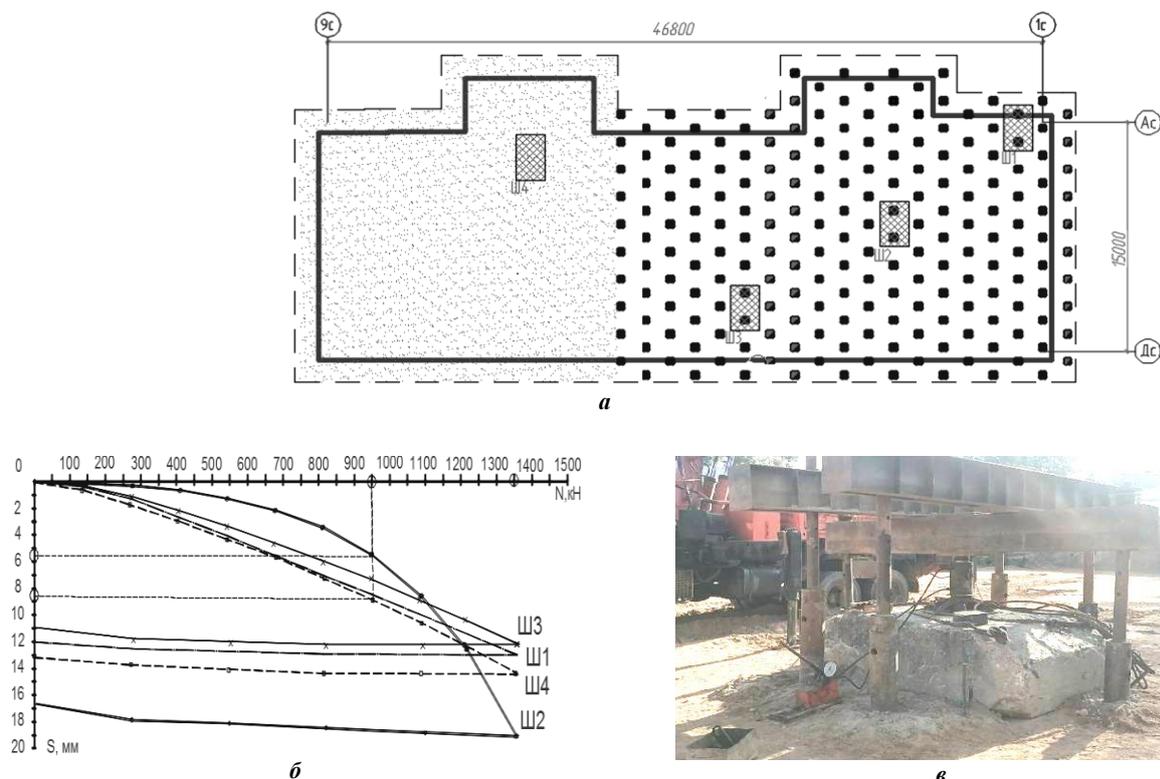


Рисунок 6. – Осадка фундамента на искусственном основании в программе «ING+2019»
(в зоне без свай максимальная осадка 84 мм, в зоне свай длиной 8 м максимальная осадка 72 мм)



а – схема искусственного основания с размещением опытных штампов;
б – графики штамповых испытаний Ш1–Ш4;
в – общий вид проводимых штамповых испытаний

Рисунок 7. – Контрольные штамповые испытания вертикально армированного основания

Заключение. С учетом полученных результатов по окончательному проектному решению под частью сплошного плитного фундамента одиннадцатизэтажного двухсекционного жилого крупнопанельного дома было принято вертикальное армирование слабых грунтов забивными сваями длиной от 4 до 8 м, а под оставшейся частью фундамента – замена слабого грунта на уплотненную песчаную смесь. Дополнительно под всей плитой предусмотрен распределительный слой из уплотненной песчано-гравийной смеси мощностью 500 мм. Это обеспечит равномерную расчетную осадку здания, не превышающую допустимых нормами значений. Эффективность принятого решения подтверждена результатами расчетов методом конечных элементов в программах «GEO5-FEM» и «ING+2019» и опытных полевых штамповых испытаний статической вдавливающей нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сернов В.А., Тронда Т.В. Применение геомассива при строительстве трех девятиэтажных жилых домов в г.п. Колодищи // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: сб. тр. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара, Новополоцк, 28–29 нояб. 2012 г. / гл. ред.: Д.Н. Лазовский, А.А. Бакатович. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2012. – С. 286–292.

2. Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатин П.В. Исследование вертикально армированных оснований плитных фундаментов грунтобетонными микросваями и апробация их результатов в производственных условиях // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2015. – № 16. – С. 40–47.
3. Тронда Т.В., Сернов В.А. Натурное исследование основания, армированного цилиндрическими и коническими вертикальными элементами из сухой бетонной смеси // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. II Междунар. науч. конф., Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / гл. ред.: Л.М. Парфенова. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2019. – С. 47–51.
4. Федоровский В.Г., Безволев С.Г. Метод расчета свайных полей и вертикально армированных грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. – № 3 – С. 11–15.
5. Караулов А.М. Решение одномерной задачи уплотнения вертикально армированного основания // Тр. НГАСУ. – 1998. – № 3(3). – С. 29–33.

REFERENCES

1. Sernov, V.A. & Tronda, T.V. (2012). Primenenie geomassiva pri stroitel'stve trekh devyatiyazhnykh zhilykh domov v g.p. Kolodishchi. In D.N. Lazovskii (Eds.) & Bakatovich, A.A. (Eds). *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke inzhenernykh kadrov v Respublike Belarus'*: sb. tr. XVIII Mezhdunar. nauch.-metod. seminara (286–292). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ).
2. Kravtsov, V.N, Yakunenko, S.A. & Lapatin, P.V. (2015). Issledovanie vertikal'no armirovannykh osnovanii plitnykh fundamentov gruntobetonnymi mikrosvayami i aprobatsiya ikh rezul'tatov v proizvodstvennykh usloviyakh [Research of Vertical Reinforced by Soil-concrete Micropiles Slab Foundations Ground Bases and Testing Results in Industrial Practice]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Vestnik of Polotsk State University, Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (16), 40–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Tronda, T.V. & Sernov, V.A. (2019). Naturnoe issledovanie osnovaniya, armirovannogo tsilindricheskimi i konicheskimi vertikal'nymi elementami iz sukhoy betonnoi smesi [In-situ Research of Foundation Soils Reinforced with Cylindrical and Conical Vertical Elements of Dry Concrete]. In L.M. Parfenova (Eds.) *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii: elektronnyi sb. statei II Mezhdunar. nauch. konf.* (47–51). Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Fedorovskii, V.G. & Bezvolev, S.G. (1994). Metod rascheta svainykh polei i vertikal'no armirovannykh gruntovykh massivov. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov.* (3), 11–15. (In Russ).
5. Karaulov, A.M. (1998). Reshenie odnomernoi zadachi uplotneniya vertikal'no armirovannogo osnovaniya. *Tr. NGASU*, 3(3), 29–33. (In Russ).

Поступила 15.05.2024

THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF VERTICAL REINFORCEMENT OF A WEAK BASE FOR THE DEVICE OF A SOLID FOUNDATION SLAB OF THE BUILDING

A. NEVEJKOV¹, V. DEDOK²

¹ Belarusian State University of Transport, Gomel,

² Brest State Technical University)

The article is devoted to the vertically reinforced basement designing and constructing problems while slab foundation erection in the Republic of Belarus.

Keywords: *weak basement, basement vertical reinforcement, driven pile, finite element method, foundation settlement.*