УДК 624.131.21

© Р. А. Мангушев, д-р техн. наук, профессор

© Р. А. Усманов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: geotechnica@spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-62-70

© R. A. Mangushev, Dr. Sci. Tech., Professor

© R. A. Usmanov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: geotechnica@spbgasu.ru

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УПЛОТНЕННЫХ ГРУНТОВЫХ ПОДУШЕК НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

WAYS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF USING COMPACTED SOIL BEDS ON WEAK SOILS

Рассмотрены пути повышения эффективности применения уплотненных грунтовых подушек в условиях слабых водонасыщенных грунтов. Одним из эффективных направлений является уменьшение толщины подушки путем повышения ее прочности (жесткости), что может быть достигнуто значительным уплотнением материала подушки или установкой элементов высокой прочности в ее тело (армирование). С учетом этого в условиях слабых водонасыщенных лессовых грунтов были проведены экспериментальные и теоретические исследования по устройству высокоуплотненных ($\rho_d \geq 2,0 \text{ т/м}^3$) и армированных высокопрочными геосинтетическими материалами грунтовых подушек при статических и сейсмических (сейсмозрывных) воздействиях. Было установлено, что применение таких подушек позволяет в 1,5...3 раза уменьшить их толщину (высоту) и более чем в 5 раз увеличить несущую способность искусственных оснований в условиях слабых водонасыщенных грунтов и высокой сейсмической активности территорий.

Ключевые слова: слабый водонасыщенный лессовый грунт, уплотненные грунтовые подушки, высокоуплотненные и армированные подушки, статические нагрузки, сейсмозрывные воздействия, высокопрочные геосинтетические материалы.

The article discusses the ways of improving the efficiency of using compacted soil beds in conditions of weak water-saturated soils. One of the effective ways is to reduce the bed thickness by increasing its strength (stiffness), which can be achieved by significantly compressing the bed material or by installing elements of high strength in its body (reinforcement). With this in mind, in conditions of weak water-saturated loess soils, there were conducted experimental and theoretical studies on the design and research of highly compacted ($\rho_d \geq 2.0 \text{ t/m}^3$) and reinforced with high-strength geosynthetic materials of soil beds imposed to static and seismic (seismically explosive) effects. It was found that the use of these beds allows reducing their thickness (height) by 1.5 ... 3 times and more than 5 times increasing the carrying capacity of artificial bases in conditions of weak water-saturated soils and high seismic activity of the territories.

Keywords: weak water-saturated loess soil, compacted soil beds, highly compacted and reinforced beds, static loads, seismically explosive effects, high-strength geosynthetic materials.

В условиях слабых грунтов одним из наиболее широко применяемых методов подготовки оснований является устройство уплотненных грунтовых подушек из различных материалов, которые обычно устраиваются в пределах зоны

распределения максимальных сжимающих и касательных напряжений под фундаментом.

В последние годы наблюдается снижение объемов их применения в практике строительства. Это можно объяснить тем, что существующие

методы устройства и проектирования грунтовых подушек на слабых грунтах не отвечают современным требованиям и требуют совершенствования. В частности, в расчетах не учитывается влияние прочностных и деформационных характеристик грунтов (жесткости материала) на особенности распределения напряжений в теле подушек, что зачастую приводит к неоправданному увеличению их размеров и, следовательно, к повышению стоимости и трудоемкости устройства.

Расчетное обоснование применения конструктивных мероприятий в ряде случаев может быть выполнено с помощью простых аналитических методов.

При проектировании подушек следует установить их размеры — толщину и в плане¹. Для этого, первоначально задавшись материалом подушки, определяют размеры фундамента в предположении того, что он опирается на подушку неограниченной мощности. Оптимальную толщину подушки H_{cs} определяют исходя из величины вертикальных напряжений, которая может быть передана на слабый грунт, залегающий под ее подошвой.

Расчетное сопротивление слабого грунта R_s устанавливается как на подстилающий слой слабого грунта. Обычно H_{cs} варьирует в пределах от 1 до 2,5 м. Расчет ведут методом последовательных приближений, добиваясь выполнения условия на кровле слабого слоя

$$p_z \leq R_s, \quad (1)$$

где p_z — сумма давлений, передаваемых на слабый слой от фундамента и веса подушки.

Плановые размеры подушки, и в частности ее толщина B_{cz} , определяются из условия ограничения горизонтальных давлений на слабый грунт. При этом исходят из распределения давлений в материале подушки под углом $\alpha = 30...45^\circ$. Отсюда

$$B_{cz} = b + 2H_{cs} \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Согласно рис. 1, в расчетах вместо криволинейной эпюры распределения давления 2 (по решению «Механики грунтов») с максимальным значением $\sigma_{zp, \max}$ под центром фундамента, принимается равномерно распределенная эпюра 3, действующая по условной площади A_z .

Исследованиями ряда авторов [1, 2, 5, 11], проведенными на двухслойных основаниях с верхним плотным и нижним слабым слоями, установлено уменьшение напряжений в подстилающих слабых слоях при повышении жесткости (плотности) верхнего слоя. С увеличением отношения модулей деформации составных слоев напряжения на месте их контакта уменьшаются. В связи с этим рекомендуется значительно уплотнять верхние слои, что позволит уменьшить их высоту, а размеры подушек в плане назначать из условия, чтобы давление на слабый слой грунта не превышало их «структурной прочности» ($\sigma_{zp} + \sigma_{zg} \leq p_{str}$).

Следует также отметить, что материал уплотненной грунтовой подушки относительно хорошо работает на сжатие и сдвиг, но не воспринимает растягивающие усилия. Установка в теле подушки высокопрочных армирующих элементов позволит значительно повысить устойчивость ее материала к растягивающим усилиям по направлению их укладки. В качестве армирующих элементов наиболее целесообразным является использование высокопрочных геосинтетических материалов, которые изготавливаются в виде плоских геосеток, объемных сотовых георешеток, плоских геотканей и др.² [3–5].

В настоящее время область применения грунтовых подушек в условиях слабых грунтов неоправданно ограничена, что связано с отсутствием соответствующих исследований и опыта проектирования. Следовательно, устройство

² Recommendation for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcement — EBGeo, 2015.

Рис. 1. Характер распределения давления в песчаной подушке: 1 — уплотненная песчаная подушка; 2 — теоретическая эпюра; 3 — расчетная эпюра

¹ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М., 2011.

уплотненных грунтовых подушек с высокими прочностными и деформационными характеристиками (высокоуплотненные или армированные) является эффективным направлением, которое позволит значительно уменьшить их размеры, а также размеры проектируемых на них фундаментов. Следует отметить, что их применение изменит характер работы искусственных оснований под нагрузкой, что потребует разработки новых или совершенствования существующих методов расчета и проектирования.

С учетом изложенного в Республике Таджикистан были проведены экспериментальные и теоретические исследования по устройству высокоуплотненных и армированных грунтовых подушек в условиях слабых водонасыщенных грунтов и высокой сейсмичности территорий, в задачу которых входили [5, 6, 11]:

- разработка технологии устройства уплотненных подушек из различных материалов с получением максимально возможного значения плотности сухого грунта в их теле;
- изучение и выявление оптимальных параметров грунтовых подушек и армирующих элементов из высокопрочных геосинтетических материалов;
- изучение особенностей напряженно-деформированного состояния высокоуплотненных и армированных грунтовых подушек при статических и сейсмических воздействиях;
- разработка рекомендаций по проектированию искусственных оснований с устройством указанных подушек на слабых водонасыщенных лессовых грунтах и при высокой сейсмической активности территорий.

Высокоуплотненные грунтовые подушки. Исследования проводились на экспериментальной площадке, где уровень подземных вод (WL) расположен на глубине 2,0 м от дневной поверхности. До отметки WL грунты представлены суглинками полутвердой консистенции ($E = 12$ МПа), а ниже, на глубину более 16 м, — однородным слоем слабых водонасыщенных лессовых суглинков текучепластичной консистенции ($E_s = 3$ МПа). На экспериментальной площадке были подготовлены пять опытных участков размерами в плане 4×20 м до уровня подземных вод (рис. 2) [11].

Вначале проводились исследования технологии устройства грунтовых подушек с получением максимально возможного значения плотности сухого грунта в их теле. Уплотнение грунтов в теле подушек производилось слоями толщиной по 0,3...0,4 м двумя видами катков — кулачковым и гладким. Уплотнение первого слоя (на кровле слабого слоя) производилось кулачковым катком массой 6,5 т, так как при использовании вальцового катка появлялись валики выпирания и происходила его пробуксовка. При уплотнении кулачковым катком материал подушки вдавливался в слабый подстилающий слой основания с образованием прочного слоя (корки), что позволило при уплотнении последующих слоев использовать вальцовые катки массой 5 т [3–5, 11].

Исследования искусственных оснований на статические воздействия были проведены круглыми жесткими металлическими штампами площадью $A_{\text{ш}} = 1,0 \text{ м}^2$ ($d_{\text{ш}} = 1,13 \text{ м}$). Для качественного и количественного сравнения результатов штампы также были установлены непосредственно на кровлю слабого слоя грунта (на отметке WL) с измерением послойных перемещений грунтов по глубине основания специальными глубинными марками (рис. 2, опыт 1).

Исследования искусственных оснований на сейсмические воздействия проводились с помощью металлических жестких круглых штампов площадью $A_{\text{ш}} = 1,0 \text{ м}^2$, которые загружались статической нагрузкой, составляющей 80 % от вели-

Рис. 2. Схематические разрезы опытных участков: опыт 1 — естественное основание; опыт 2 — гравийно-галечниковая подушка ($H_{\text{ср}} = 0,5 \text{ м}$); опыт 3 — гравийно-галечниковая подушка ($H_{\text{ср}} = 0,75 \text{ м}$); опыт 4 — гравийно-галечниковая подушка ($H_{\text{ср}} = 1,0 \text{ м}$); опыт 5 — песчаная подушка ($H_{\text{ср}} = 1,0 \text{ м}$); опыт 6 — суглинистая подушка ($H_{\text{ср}} = 1,0 \text{ м}$)

чины, полученной по результатам статических испытаний ($0,8p_{ст}$). Перед началом испытания между загрузочной рамой и штампами устанавливались металлические катки для исключения влияния инерционной нагрузки, создаваемой пригрузочными блоками в процессе динамического воздействия. Имитация сейсмического воздействия осуществлялась с помощью короткозамедленных камуфлетных взрывов зарядов взрывчатого вещества (ВВ), которые помещались в специальные металлические контейнеры и погружались в буровые скважины на глубину 8...10 м. Взрывные скважины (40 шт.) были расположены тремя концентрическими рядами (13 + 13 + 14 скважин) на расстоянии 20, 25 и 30 м от экспериментального участка. Этот метод широко используется в практике геотехнических исследований Республики Таджикистан [7–9].

В качестве расчетного параметра интенсивности сейсмозрывного воздействия принималась скорость колебания грунта, хорошо коррелирующая с массой заряда и эпицентральной расстоянием. Расчет интенсивности в баллах производился по шкале С. В. Медведева³ [9] для взрывов и по аналогичной 12-балльной шкале MSK-64 [9].

Армированные грунтовые подушки. Исследования армированных подушек были проведены с использованием аналитических и численных методов расчета. В качестве армирующих элементов были выбраны высокопрочные геосинтетические материалы в виде геосеток⁴ с пределом прочности на растяжение не менее 200 кН/м.

Исследования включали определение следующих оптимальных параметров армированных грунтовых подушек:

- высота (толщина) и ширина подушки;
- размеры армирующих элементов в плане;
- количество и места (зоны) установки армирующих элементов в теле подушки.

Указанные параметры определялись на основе анализа характера развития напряжений и деформаций по глубине искусственного (двухслойного) основания с использованием аналитических методов решений из работы Р. А. Мангу-

шева, В. Д. Карлова и И. И. Сахарова [10] и численных методов расчета (программный комплекс PLAXIS, версия 7.2⁵).

Высокоуплотненные грунтовые подушки.

По результатам опытного уплотнения значения плотности сухого грунта в теле подушек составили:

- для гравийно-галечниковых грунтов — $\rho_d = 2,18...2,35 \text{ т/м}^3$;
- для песчаных — $\rho_d = 2,18...2,26 \text{ т/м}^3$;
- для суглинистых — $\rho_d = 1,70...1,73 \text{ т/м}^3$.

В целом среднее значение плотности сухого грунта в гравийно-галечниковых и песчаных подушках составило $\rho_d \geq 2,2 \text{ т/м}^3$, а значения коэффициента уплотнения $k_{com} = 1,23...1,15$, что позволяет отнести их к категории высокоуплотненных.

Следует отметить, что высокая плотность материала в теле этих подушек была достигнута при 50...70-кратном прохождении катков по одному следу, что приводит к повышению трудоемкости при их устройстве. Применение современных катков (в том числе виброкатков весом 25...30 т) позволит существенно сократить затраты труда и времени.

Результаты испытаний искусственных оснований штампами на статические воздействия приведены на рис. 3, 4 и в таблице [4, 5, 11]. По результатам испытаний расчетное сопротивление грунтов слабого слоя основания не превышало $R_s = 100 \text{ кПа}$ (опыт 1). При этом эпюры

⁵ Руководство пользователя ПК Plaxis — версия 7.2. НИП «Информатика».

Рис. 3. Эпюры развития послойных перемещений слоев грунтов по глубине однородного основания

³ СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированное издание СНиП II-7-81*. М., 2013.

⁴ Recommendation for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcement — EBGEO, 2015.

Рис. 4. Графики зависимости «осадка — нагрузка» штампов при статических испытаниях

развития перемещений по глубине основания штампов (рис. 3) свидетельствуют, что активная зона сжатия под штампом создается на глубину $0,75...1,0d_{\text{ш}}$, а в пределах глубины $0,5d_{\text{ш}}$ происходят около 60 % замеренных деформаций (где $d_{\text{ш}}$ — диаметр штампа).

Для искусственных оснований практически на всех ступенях загрузки зависимость между деформациями s и нагрузками p имеет выраженный линейный характер (рис. 4), даже при толщине уплотненных подушек меньше полуширины (диаметра) штампа $H_{\text{сз}} = 0,5 \text{ м} < 0,625 \text{ м}$ (опыт 2). При этом несущая способность искусственного основания (расчетное сопротивление грунтов основания) превышает $R_{\text{сз}} = 500 \text{ кПа}$. Полученные результаты свидетельствуют, что при устройстве высокоуплотненных и армированных грунтовых подушек их толщина должна назначаться в пределах $H_{\text{сз}} = 0,5...1,0d_{\text{ш}}$.

В графе 6 таблицы показаны значения приведенных модулей деформации искусственных оснований (составляющих слоев основания), которые в 9...17 раз превышают значения слабого подстилающего слоя.

Результаты испытаний штампов статическими нагрузками

№ опыта	$H_{\text{сз}}$, м	p , кПа	s , мм	$R_{\text{сз}}$, кПа	$E_{\text{п}}$, МПа
1	0	100	24	100	3
2	0,5	500	9,6	500	45
3	0,75	500	6,5	500	63
4	1,0	500	4,9	500	80
5	1,0	500	9,8	500	41
6	1,0	500	14,9	400	27

Результаты опытов показывают, что устройство высокоуплотненных грунтовых подушек позволяет существенно снизить величину вертикального сжимающего напряжения $\sigma_{\text{зр}}$ на кровле слабого слоя основания ($\sigma_{\text{зр}} \ll R_s$, где R_s — расчетное сопротивление слабого слоя основания). В проведенных опытах величина действующего давления на слабый слой грунта основания (при ширине подушки $B_{\text{сз}} = 4,0 \text{ м}$) не превышает $\sigma_{\text{зр}} = 40...50 \text{ кПа}$, что почти в два раза меньше значения расчетного сопротивления слабого слоя $R_s = 100 \text{ кПа}$ и не превышает его структурной прочности ($\sigma_{\text{зр}} \leq p_{\text{стр}}$). В указанных условиях слабые грунты в основании будут работать только в фазе уплотнения и их осадки будут незначительны, что и подтверждается результатами всех испытаний. Следовательно, при назначении ширины высокоуплотненной подушки соответствующим подбором ее величины можно регулировать величину давления $\sigma_{\text{зр}}$ от фундамента на кровлю слабого слоя основания (в пределах $\sigma_{\text{зр}} = 0,5...1,0R_s$) и обеспечить надежную работу искусственного основания по всем предельным состояниям.

Ширину высокоуплотненных подушек $B_{\text{сз}}$, м, из различных материалов рекомендуется определять по формуле [11]

$$B_{\text{сз}} = b_{\text{ф}} k, \quad (4)$$

где $b_{\text{ф}}$ — ширина или диаметр фундамента, м; k — коэффициент, определяемый по графикам (рис. 5, а, б) для диапазона давлений $\sigma_{\text{зр}} = 0,5...1,0R_s$, $R_{\text{сз}}$ — расчетное сопротивление подушки, кПа; R_s — то же слабого слоя основания, кПа.

Рис. 5. Графики для определения ширины песчаной и гравийно-галечниковой подушки: а — для круглых, квадратных и прямоугольных фундаментов; б — для ленточных фундаментов (1 — при $\sigma_{zp} = R_s$; 2 — $\sigma_{zp} = 0,9R_s$; 3 — $\sigma_{zp} = 0,8R_s$; 4 — $\sigma_{zp} = 0,7R_s$; 5 — $\sigma_{zp} = 0,6R_s$; 6 — $\sigma_{zp} = 0,5R_s$)

Толщину (высоту) высокоуплотненных подушек H_{cz} рекомендуется определять по следующим формулам:

- для подушки из глинистых грунтов и грунтоизвестковых смесей

$$H_{cz} = (B_{cz} - b_{\phi}) / 2; \quad (5)$$

- для подушки из песчаного материала

$$H_{cz} = (B_{cz} - b_{\phi}) / 2,4; \quad (6)$$

- для подушки из гравийно-галечникового материала

$$H_{cz} = (B_{cz} - b_{\phi}) / 2,8, \quad (7)$$

где B_{cz} — ширина высокоуплотненной подушки; b_{ϕ} — ширина или диаметр проектируемого фундамента.

При проектировании высокоуплотненной грунтовой подушки величину среднего давления от условного фундамента на уровне кровли слабого слоя основания следует определять по формуле

$$p_{II} = \Sigma N_{II} / A_{cz}, \quad (8)$$

где $\Sigma N_{II} = N_{II} + N_{фг} + N_{cz}$ — сумма всех действующих нагрузок на уровне кровли слабого слоя, кН; N_{II} — нагрузка от надземных конструкций, кН; $N_{фг}$ — нагрузка от веса фундамента и грунта на его обрезах, кН; N_{cz} — нагрузка от веса материала подушки на уровне кровли слабого слоя, кН; A_{cz} — площадь подошвы уплотненной армированной подушки на уровне кровли слабого слоя грунта, м², принимаемая равной:

- для ленточного фундамента $A_{cz} = B_{cz}$;

- для прямоугольного фундамента $A_{cz} = B_{cz} L_{cz}$; (9)

- для квадратного фундамента $A_{cz} = B_{cz}^2$,

где L_{cz} — длина прямоугольного фундамента.

Результаты испытаний естественных и искусственных оснований на сейсмические (сеймовзрывные) воздействия приведены на рис. 6. При этом однородный слабый слой грунта (опыт 1) был загружен статической нагрузкой $p = 80$ кПа ($p = 0,8R_s$), а гравийно-галечниковая подушка толщиной $H_{cz} = 0,75$ м (опыт 3) — нагрузкой $p = 480$ кПа ($p \approx R_{cz}$). После стабилизации деформаций были имитированы сейсмические воз-

Рис. 6. Результаты испытания естественных и искусственных оснований на сеймовзрывные воздействия

действия интенсивностью 9 баллов (по шкале MSK-64).

На однородных (слабых) основаниях наблюдалось развитие непрерывных деформаций штампов и произошла потеря их устойчивости (несущей способности), а на искусственных основаниях величина деформации составила всего 7 % от величины статических нагрузок, что также указывает на высокую эффективность применения уплотненных подушек из гравийно-галечникового и песчаного материалов для повышения сейсмостойкости искусственных оснований и значительного снижения их деформируемости.

С учетом полученных результатов в сейсмических районах ширину высокоуплотненных подушек B_{cz} на уровне кровли слабого слоя грунта рекомендуется назначать исходя из выполнения следующих условий:

- при сейсмичности 7 баллов $\sigma_{zp} \leq 0,8R_s$;
- при сейсмичности 8 баллов $\sigma_{zp} \leq 0,7R_s$;
- при сейсмичности 9 баллов $\sigma_{zp} \leq 0,6R_s$,

где σ_{zp} — величина вертикального сжимающего напряжения на кровле слабого слоя основания, кПа; R_s — расчетное сопротивление слабого слоя основания.

Сравнительные расчеты показали, что деформации (осадки) искусственных оснований с верхними высокоуплотненными подушками не представляется возможным определить ни одним из существующих методов, вводя в расчет модули деформации материала подушки и слабого слоя (расхождения между расчетными и фактическими осадками штампов составили 300...800 % и более).

Поэтому для практического применения был разработан инженерный метод расчета деформаций фундаментов, который рекомендуется использовать при соотношениях модулей деформации составных слоев $E_{cz} / E_s \geq 10$ (где E_{cz} — модуль деформации грунта подушки, МПа; E_s — то же слабого слоя грунта, МПа). Расчет деформаций производится с использованием метода послойного суммирования⁶ [6], в котором двухслойное основание рассматривается как однородное и линейно деформируемое. Глубина сжимаемой толщи основания определяется из

условия $\sigma_{zp} \leq 0,2\sigma_{zg}$, и в ее пределах при расчете деформаций фундаментов следует использовать значение приведенного модуля деформации $E_{пр}$ (в графе 6 таблицы есть его рекомендуемые значения). Кроме того, при расчете деформаций фундаментов на этих подушках хорошие результаты также были получены при использовании численных методов (программный комплекс PLAXIS, версия 7.2⁷).

Армированные грунтовые подушки следует устраивать из гравийно-галечниковых, песчано-гравийно-галечниковых, песчаных, глинистых и грунтоизвестковых материалов. Значения плотности уплотненного сухого грунта в теле подушек следует назначать равными $\rho_{d,com} \geq 1,80$ т/м³ (для глинистой и грунтоизвестковой подушек $\rho_{d,com} \geq 1,70$ т/м³), при которых уплотненные грунтовые подушки будут обладать достаточно высокими значениями прочности (жесткости) и модуля деформации. Установка в тело подушек высокопрочных геосинтетических материалов позволит значительно повысить их жесткость и увеличить сопротивление касательным (растягивающим) усилиям [6].

Соответствующими сравнительными вычислениями было установлено, что основные размеры армированных грунтовых подушек можно назначать аналогично размерам высокоуплотненных грунтовых подушек. Толщину (высоту) H_{cz} армированной подушки рекомендуется назначать с использованием формул (5)–(7). При этом минимальная ее толщина должна приниматься $H_{cz} \geq 1,0$ м.

Ширину армированной подушки B_{cz} на уровне кровли слабого слоя основания рекомендуется назначать по формулам (4) и (10). При этом необходимо учитывать следующее:

- при величине среднего давления по подошве ленточного или прямоугольного фундамента $p_{II} = 200...300$ кПа ширина уплотненной подушки принимается $B_{cz} = 3,0b_{\phi}$ (b_{ϕ} — ширина фундамента), а для большей стороны прямоугольного фундамента — $L_{cz} = 3,0l_{\phi}$ (l_{ϕ} — длина фундамента);
- при величине среднего давления по подошве ленточного или прямоугольного фундамента $p_{II} = 300...400$ кПа ширина уплотненной подушки

⁶ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М., 2011.

⁷ Руководство пользователя ПК Plaxis — версия 7.2. НИП «Информатика».

Рис. 7. Схема армирования песчаной подушки:
1 — слабый водонасыщенный грунт; 2 — песчаная подушка; 3 — армирующие элементы

принимается $B_{cz} = 3,5b_{\phi}$, а для большей стороны прямоугольного фундамента — $L_{cz} = 3,5l_{\phi}$;

- при величине среднего давления по подошве ленточного или прямоугольного фундамента $p_{II} = 400...500$ кПа ширина уплотненной подушки принимается $B_{cz} = 4,0b_{\phi}$, а для большей стороны прямоугольного фундамента — $L_{cz} = 4,0l_{\phi}$.

При проектировании армированных грунтовых подушек важным вопросом является назначение размеров армирующих элементов в плане, определение количества и выявление места (зоны) их установки по высоте тела песчаной подушки.

Размеры армирующих элементов в плане назначаются в соответствии с размерами проектируемой уплотненной подушки с учетом угла наклона откоса траншеи или котлована.

Установку армирующих элементов в теле подушек рекомендуется производить по схеме, приведенной на рис. 7, которая разработана на основании исследований характера развития напряжений и деформаций искусственного основания аналитическими и численными методами, а также обобщения существующего опыта их проектирования и устройства.

Количество армирующих элементов в теле подушки должно приниматься не менее четырех. Для ограничения развития боковых перемещений грунтовых подушек при передаче нагрузки от фундаментов нижний слой армирующего элемента должен сплошным ковром покрывать все основание, боковые откосы и всю поверхность грунтовой подушки под подошвой фундамента, т. е. должна устраиваться конструкция в виде жесткой обоймы из высокопрочных геосинтетических материалов. При проектировании уплот-

ненной армированной подушки величину среднего давления от условного фундамента на уровне кровли слабого слоя основания также следует определять по формуле (8).

На основании проведенных исследований были разработаны рекомендации по устройству и проектированию высокоуплотненных и армированных грунтовых подушек на слабых водонасыщенных лессовых грунтах в условиях сейсмической активности территорий.

Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что высокоуплотненные и армированные грунтовые подушки весьма эффективны и надежны, позволяют значительно повысить несущую способность искусственных оснований со слабым подстилающим слоем грунта и снизить их деформируемость при статических и сейсмических воздействиях.

2. Применение указанных подушек позволит в 1,5...3 раза уменьшить их толщину по сравнению с традиционно применяемыми методами, а также уменьшить размеры фундаментов. В технологическом отношении устройство указанных подушек не требует использования сложных механизмов и машин. Применение современных уплотняющих механизмов позволит значительно сократить затраты времени и труда при их устройстве.

3. Обладая большой распределительной способностью (жесткостью), они позволяют снизить величину вертикального сжимающего напряжения σ_{zp} на слабый слой грунта основания до величины его структурной прочности ($\sigma_{zp} \leq p_{str}$). В указанных условиях слабые слои грунтов будут работать только в фазе уплотнения, их осадки будут незначительны и будут быстро затухать (стабилизироваться).

Библиографический список

1. Бирюля А. К. Механические свойства слоев уплотненного грунта и их исследование в многослойных дорожных одеждах // Сб. тр. ХАДИ. 1963. № 30. С. 56–59.
2. Кованев Б. М. Экспериментальное исследование работы песчаных подушек // Материалы Всесоюзного совещания «Строительство на слабых грунтах». Рига: РПИ, 1970.

3. Geosynthetics: Applications, Design and Construction. Proceedings of the first European geosynthetic conference EuroGeo 1. DeGroot M. B., den Hoedt G., Termaat R. J. (eds.). Rotterdam: Balkema, 1996.

4. Мангушев Р. А., Усманов Р. А., Ланько С. В., Конюшков В. В. Методы подготовки и устройства искусственных оснований. М.: АСВ, 2012. 272 с.

5. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Усманов Р. А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах / под ред. Р. А. Мангушева. СПб.: Лань, 2018. 460 с.

6. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2016. 1040 с.

7. Лекаркин В. К. Методика исследования влияния сейсмозрывных воздействий на несущую способность фундаментов // Материалы междунар. науч. конф. «Современные аспекты развития сейсмостойкого строительства и сейсмологии»: сб. тр. Душанбе, 2005. С. 169–172.

8. Ильичев В. К., Курдюк А. К., Лиховцев В. М. Методика оценки влияния искусственного основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. № 6. С. 28–30.

9. Медведев С. В. Оценка сейсмической безопасности при взрывах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1967. № 5. С. 24–26.

10. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 264 с.

11. Усманов Р. А. Слабые водонасыщенные грунты, образованные обводнением лессов, как основания сооружений в условиях Республики Таджикистан: дис. ... д-ра техн. наук. Астана, 2009. 252 с.

References

1. Biryulya A. K. *Mekhanicheskie svoystva sloev uplotnennogo grunta i ikh issledovanie v mnogosloynnykh dorozhnykh odezhдах* [Mechanical properties of compacted soil layers and investigating them in multi-layer road clothes]. *Trudy KhADI – Bulletin of KhADI*, 1963, no. 30, pp. 56–59.

2. Kovanev B. M. *Ehksperimental'noe issledovanie raboty peschanykh podushek* [Experimental study of sand soil beds]. *Trudy Vsesoyuznogo soveshchaniya «Stroitel'stvo na slabykh gruntakh»* [Proc. of the All-Union Meeting "Construction on weak soils"]. Riga, RPI Publ., 1970.

3. Geosynthetics: Applications, Design and Construction. Proc. of the first European geosynthetic conference EuroGeo 1. DeGroot M. B., den Hoedt G., Termaat R. J. (eds.). Rotterdam, Balkema Publ., 1996.

4. Mangushev R. A., Usmanov R. A., Lan'ko S. V., Konyushkov V. V. *Metody podgotovki i ustroystva iskusstvennykh osnovaniy* [Methods of preparation and construction of artificial bases]. Moscow, ASV Publ., 2012, 272 p.

5. Mangushev R. A., Osokin A. I., Usmanov R. A. *Ustroystvo i rekonstruktsiya osnovaniy i fundamentov na slabykh i strukturno-neustoychivyykh gruntakh* [Arrangement and reconstruction of bases and foundations on weak and structurally unstable soils]. Ed. Mangushev R. A. St. Petersburg, Lan Publ., 2018, 460 p.

6. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Handbook of geotechnical engineers. Bases, foundations and underground structures]. Eds. Il'ichev V. A., Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2016, 1040 p.

7. Lekarkin V. K. *Metodika issledovaniya vliyaniya seysmovzryvnykh vozdeystviy na nesushchuyu sposobnost' fundamentov* [Methodology of researching the influence of seismic effects on the bearing capacity of foundations]. *Trudy mezhdunar. nauch. konf. «Sovremennye aspekty razvitiya seysmostoykogo stroitel'stva i seysmologii»* [Proc. of the Int. sci. conf. "Modern aspects of the development of earthquake engineering and seismology"]. Dushanbe, 2005, pp. 169–172.

8. Il'ichev V. K., Kurdyuk A. K., Likhovtsev V. M. *Metodika otsenki vliyaniya iskusstvennogo osnovaniya na intensivnost' i spektral'nyy sostav seysmicheskikh kolebaniy* [Methods of assessing the impact of artificial foundations on the intensity and spectral composition of seismic vibrations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 1992, no. 6, pp. 28–30.

9. Medvedev S. V. *Otsenka seysmicheskoy bezopasnosti pri vzryvakh* [Assessment of seismic safety at explosion works]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 1967, no. 5, pp. 24–26.

10. Mangushev R. A., Karlov V. D., Sakharov I. I. *Mekhanika gruntov* [Mechanics of soil]. Moscow, ASV Publ., 2009, 264 p.

11. Usmanov R. A. *Slabye vodonasyshchennyye grunty, obrazovannyye obvodneniem lessov, kak osnovaniya sooruzheniy v usloviyakh Respubliki Tadjikistan. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Weak water-saturated soils formed by flooding of loess as the basis of structures in the Republic of Tajikistan. Dr. Sci. Tech. diss.]. Aстана, 2009, 252 p.