

УДК 624.138.26

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНО АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЙ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ГРУНТОБЕТОННЫМИ МИКРОСВЯЯМИ И АПРОБАЦИЯ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

*канд. техн. наук, доц. В.Н. КРАВЦОВ; С.А. ЯКУНЕНКО; П.В. ЛАПАТИН*  
(Институт БелНИИС, Минск)

*Представлены итоговые результаты исследований и практического применения метода вертикального армирования для упрочнения оснований плитных фундаментов пониженной прочности. Установлены оптимальный процент армирования малопрочных грунтов, конструктивные характеристики геомассивов (шаг, диаметр армозащитных элементов); разработаны принципы их расчета. На примере конкретного объекта показано, что разработанные РУП «Институт БелНИИС» технологические схемы устройства геомассивов позволяют снизить деформативность слабых оснований в 2...3 раза и более.*

**Введение.** В настоящее время в практике фундаментостроения Республики Беларусь широкое распространение получила технология упрочнения грунтовых оснований пониженной прочности способом вертикального армирования грунта (ВА) с последующим устройством на них плитных фундаментов меньших размеров. Технология ВА значительно экономичнее виброударных технологий упрочнения грунта (трамбовка, виброукатка), а плитные фундаменты на вертикально армированных основаниях экономичнее фундаментов глубокого заложения [1–3]. Метод вертикального армирования грунта позволяет достаточно просто упрочнять основания плитных фундаментов до наперед заданных требуемых свойств грунтов ( $E$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ) с использованием недорогих местных материалов (щебень, крупный песок, грунтобетон), укладываемых в предварительно разбуриваемые, раскатываемые или проколотые скважины, в том числе в условиях стесненной городской застройки, не оказывая на нее динамических воздействий. Между тем до настоящего времени отсутствуют достоверные методы расчета и конструирования вертикально армированных оснований, учитывающих все особенности их изготовления и работы (шаг, диаметр армозащитных элементов, степень упрочнения и др.), что приводит к завышению стоимости геомассивов. Исходя из этого в РУП «Институт БелНИИС» выполнены исследования по изучению особенностей упрочнения малопрочных грунтов усовершенствованным в РУП «Институт БелНИИС» методом их вертикального армирования набивными и забивными сваями уплотнения [4]. Целью данных исследований явилась разработка эффективных технологий устройства ВА, методов их расчета и конструирования, обеспечивающих по сравнению с традиционными методами упрочнения грунта (укатка, трамбовка, в том числе армирование грунта) снижение себестоимости до 30%.

**Методика исследований и их результаты.** Исследования выполнены в лабораторных и натуральных условиях с использованием стандартных методов испытания грунта для определения его характеристик ( $E$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ) до и после его армирования. Оценка прочностных и деформационных характеристик армированных грунтов с различным процентным соотношением армозащитных элементов в их объеме выполнена посредством анализа результатов серии лабораторных компрессионных и сдвиговых испытаний.

В процессе планирования эксперимента [5 и др.] определены основные факторы, влияющие на прочностные и деформативные свойства грунта, проведен анализ полученных результатов с использованием методов математической статистики и программного комплекса STATISTIKA 10.0.

Первый этап исследований выполнен на образцах предварительно высушенного однородного песчаного (глинистого) грунта, результаты которых принимались за контрольные.

На втором этапе образцы формировались из смеси с заданным массовым содержанием и свойствами исходного грунта и армозащитных элементов (включений) с процентным соотношением грунт : крупные включения (армозащитные элементы), равным 90 : 10, 70 : 30 и 50 : 50 (рис. 1).

Для сопоставимости результатов испытаний образцы грунта однородного состава и с крупными включениями (армозащитными элементами) формировались по следующей схеме. Согласно матрице плана эксперимента готовилась серия образцов исследуемого грунта (песок глинистый) объемом  $V = A \cdot h$  (где  $A$  – площадь образца,  $\text{см}^2$ ;  $h$  – высота,  $\text{см}$ ) с заданными исходными характеристиками (плотностью  $\rho_0$ , влажностью  $\omega_0$ , модулем деформации  $E_0$ ), которые испытывались на сдвиг и сжатие. Следующие серии образцов готовились из исследуемого грунта с характеристиками, аналогичными контрольным образцам, но с различным процентом содержания в них армозащитных элементов (от 5 до 50% по массе). Эквивалентная плотность таких образцов устанавливалась из условия:

$$(V - nV_{ар})\rho_0 + nV_{ар}\rho_{ар} = \rho_{экс}V, \quad (1)$$

где  $n$  – количество армирующих включений, шт.;  $V_{ар}$  и  $\rho_{ар}$  – объем и плотность,  $\text{г/см}^3$ , армирующих включений;  $\rho_{экс}$  – эквивалентная плотность армированного грунта,  $\text{г/см}^3$ .



Рисунок 1 – Общий вид образцов из мелкого песка для сдвиговых испытаний с разным процентом армирования от 10 до 30%

Выразив в формуле (1) объемы  $V$  и  $V_{ap}$  через их площадь и высоту и разделив все слагаемые на высоту образца  $h$ , получаем выражение:

$$h(A - nV_{ap})\rho_0 + nA_{ap}h\rho_{ap} = \rho_{эке} Ah, \quad (2)$$

из которого определяем требуемую эквивалентную плотность, необходимую для формирования образцов и конструирования геомассивов:

$$\rho_{эке} = \frac{(A - nV_{ap})\rho_0 + nA_{ap}\rho_{ap}}{A}. \quad (3)$$

Аналогичным аналитическим методом получено также решение для эквивалентного модуля деформации грунта  $E_{эке}$ :

$$E_{эке} = kE_{ap} \left( 1 + \frac{E_0 A}{kE_{ap} A_{ap}} \right) \frac{A_{ap}}{A}, \quad (4)$$

где  $E_{ap}$ ,  $E_0$  – модуль упругости армоэлемента и модуль деформации грунта, МПа;  $k$  – коэффициент, учитывающий изменчивость свойств материала.

Сформированные таким образом смеси подвергались сдвиговым и компрессионным испытаниям по стандартной методике ГОСТ 12248 [6], физические характеристики армоэлементов определялись по ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

По результатам этих испытаний получены компрессионный и общий модули деформации  $E_{эке}$  в диапазоне давлений от 0 до 600 кПа и значения угла внутреннего трения  $\varphi$  (рис. 2 и 3).

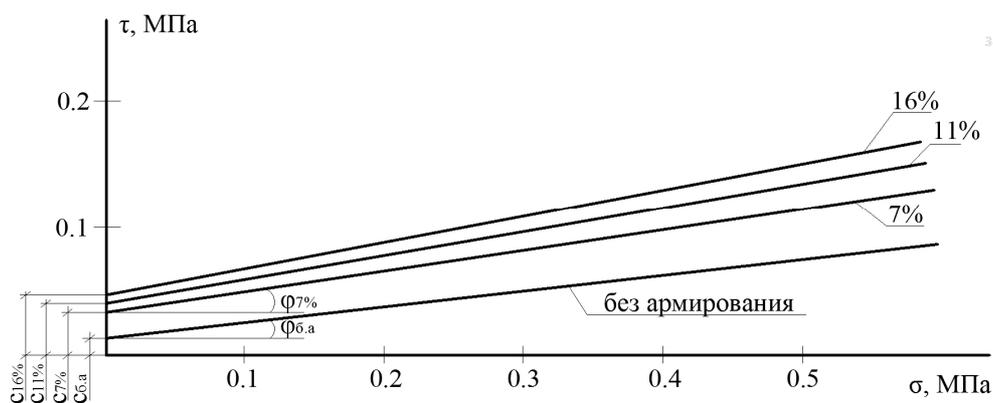
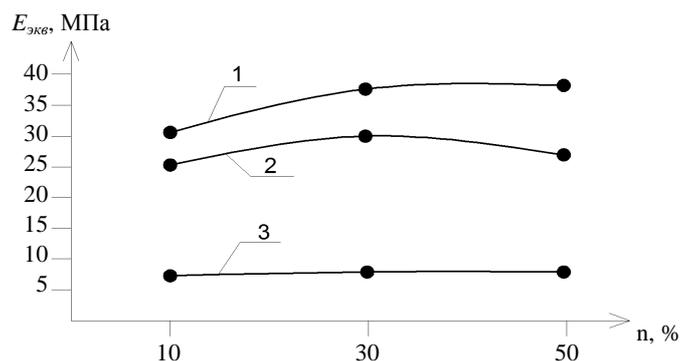


Рисунок 2 – Характерные зависимости изменения угла внутреннего трения ( $\varphi$ ) для образцов песка мелкого с различным процентом армирования

Для оценки достоверности опытных данных, установленных по результатам испытаний, значения  $E$  и  $\varphi$  сравнивались с их деформационными и прочностными характеристиками, полученными методом конечно-элементного моделирования.



1 – для диапазона нормального напряжения  $\sigma$  от 400 до 600 кПа;  
2 – то же, от 200 до 400 кПа; 3 – то же, от 0 до 200 кПа

Рисунок 3 – Характерные зависимости модуля деформации от процентного содержания крупных включений (армоэлементов) для песка

После определения оптимального процента армирования исследуемых грунтов выполнялись маломасштабные модельные лотковые испытания вертикально армированных оснований. Методика и результаты лотковых испытаний отражены в литературе [2; 9 и др.].

Результаты лабораторных исследований свойств упрочненного армоэлементами грунта и лотковых испытаний маломасштабных моделей геомассивов показали следующее:

а) геомассив ВА работает не как свайное, а упрочненное армоэлементами (уплотненное) грунтовое основание с эквивалентными характеристиками ( $\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $E_s$ ), не менее чем в 2...3 раза превышающими их значения в неармированном грунте, и обладает по отношению к природному грунту ярко выраженной прочностной и деформационной анизотропией и наличием арочного эффекта;

б) разрушение геомассива ВА от предельной нагрузки происходит по следующим схемам:

- от выпора из под фундамента грунта буферной подушки, если ее мощность больше предельной толщины ( $h_{ub} > 0,75b$ , где  $b$  – ширина фундамента, или  $E \leq 20$  МПа);
- от проскальзывания (задавливания) армоэлементов относительно естественного грунта при нагрузках на основание больше критических ( $p_0 \geq 0,8R$ ) или при отсутствии буферного слоя;
- от потери устойчивости геомассива по явно выраженным условно прямолинейным поверхностям скольжения.

Таким образом, для оценки степени устойчивости и исследования условий возникновения сдвигов в основании плитного фундамента вполне очевидна возможность применения общей теории механики грунтов, в частности равновесия горных пород, рассмотренных в работах К. Терцаги, Б.В. Бахолдина, В.Г. Березанцева, В.А. Флорина и других:

- эквивалентные модули деформации  $E_s$  и сцепления  $c_s$  с ростом процента армирования грунта до 30% увеличиваются в несколько раз, при незначительном изменении угла внутреннего трения  $\phi$ , после чего дальнейшее увеличение процента армирования практически не приводит к увеличению прочности грунта;
- в пределах армированного сваями массива грунта до критической нагрузки происходят преимущественно вертикальные деформации уплотнения.

Для проверки результатов лабораторных исследований, а также разработанного оборудования и различных способов устройства ВА выполнен комплекс экспериментальных натурных (полевых) исследований геомассивов на 9 опытных площадках.

Натурные испытания геомассива на опытных площадках проводились как до, так и после упрочнения грунта сваями уплотнения с определением его характеристик лабораторными и полевыми стандартными методами. В полевых условиях геомассивы испытывались динамическим, статическим зондированием по ГОСТ 19912-2001 [7] и штампом по ГОСТ 20276-99 [8].

Были испытаны геомассивы из песчаных и глинистых грунтов, упрочненных по технологии ВА, где в качестве армоэлементов применялись мелкозаглубленные набивные грунтобетонные сваи (в буровых, бурораздвижных, проколотых и выштампованных скважинах) диаметром 100...200 мм, длиной 1,5...3 м и готовые забивные микросваи с размерами сторон квадратного поперечного сечения 150...200 мм, длиной 1,5...5,0 м. Основные результаты полевых исследований отражены в работах авторов [1; 2; 9 и др.].

Результаты полевых натурных испытаний подтвердили данные, полученные в лабораторных условиях, и эффективность заявленного решения по упрочнению оснований плитных фундаментов методом вертикального армирования сваями уплотнения и послужили исходным материалом для разработки метода их расчета и рекомендаций по проектированию (расчету) и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов) плитных фундаментов [10]. Ниже представлен пример апробации результатов исследований и разработанных рекомендаций на одном из объектов.

**Апробация результатов исследований в производственных условиях.** Практическое применение результатов исследований нашло отражение в разработке методов расчета ВА, рекомендаций по их проектированию и устройству и во внедрении на строительных объектах Республики Беларусь [1; 2; 9–11 и др.].

Ниже описаны результаты апробации предложенных методов проектирования и возведения оснований и фундаментов административно-бытового корпуса (АБК) на объекте «Реконструкция АЗС под производственную базу ООО «Геоплюс» в агрогородке «Колодищи» Минского района».

**Исходные данные и характеристика геомассива фундамента по методу вертикального армирования.** Здание объекта крупноблочной системы одноэтажное со стенами из керамзитобетонных блоков с перспективой надстройки 2-х дополнительных этажей, фундаменты ленточные из стандартных бетонных блоков шириной 400 мм, распределенная нагрузка от 1-го этажа на основание фундамента составляет 0,158 МПа.

Анализ строительной площадки объекта (рис. 4, табл. 1) показал, что она относительно благоприятная для возведения плитных ленточных фундаментов. Осложняющим фактором является наличие в активной зоне фундаментов насыпного неоднородно сжимаемого по глубине и простираению насыпного грунта с включениями строительного мусора и растительных остатков. Это обусловило необходимость разработки проекта и технологии упрочнения верхней зоны их основания.

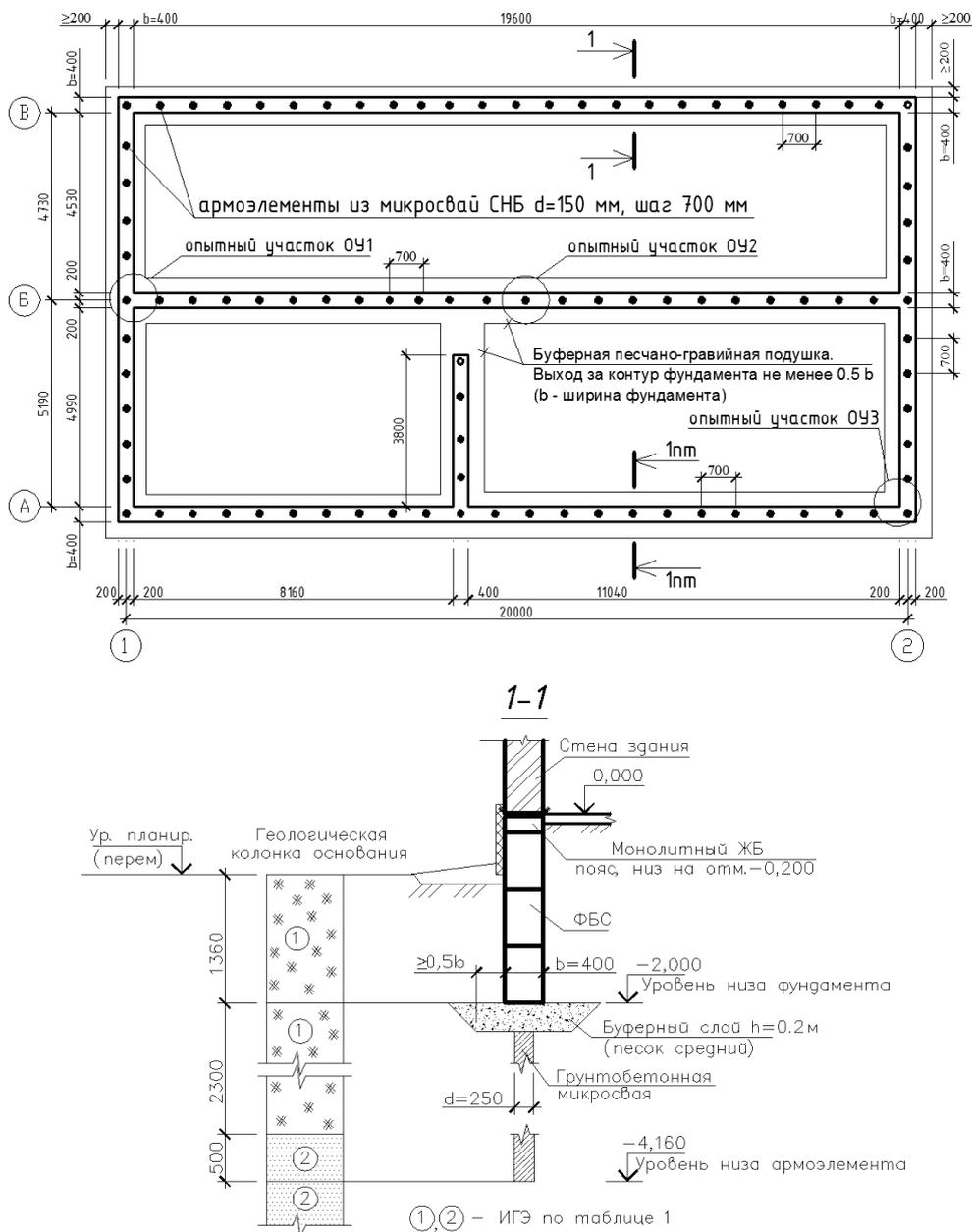


Рисунок 4 – Схема-план фундаментов и геомассива здания (с расположением армоэлементов)

Таблица 1 – Состав основания фундаментов объекта сверху вниз и физико-механические характеристики его грунтов

№ ИГЭ	Вид грунта	Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	Удельное сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль деформации, МПа
		$\gamma_{II}$	$c_{II}$	$\varphi_{II}$	$E$
Техногенные отложения (t IV)					
1	Насыпной грунт мощностью до 3,5 м	16,4	–	–	11
Конечно-моренные отложения (gt II sz)					
2	Песок средний средней прочности	17,3	0,001	36	34
3	Песок крупный средней прочности	16,9	0,000	36	23

Геомассив запроектирован только в пределах расположения ленточных фундаментов согласно разработанным рекомендациям [10]. В качестве армозащитных элементов, исходя из возможностей местной строительной организации, приняты набивные грунтобетонные сваи в бурораздвижных скважинах без выемки грунта (рис. 5). Проходка скважин производилась металлическим лидером  $\varnothing 250$  мм, изготовленным по чертежам РУП «Институт «БелНИИС»», который устанавливался вместо бурового шнека на буровой установке УГБ-1ВС (без дополнительной переделки узла сопряжения). Скважины заполнялись грунтобетоном по [11] с соотношением смеси местный грунт : цемент М150, равным 5 : 1.



Рисунок 5 – Процесс изготовления армозащитных элементов на строительной площадке здания

Требуемая эквивалентная плотность геомассива, толщина прослойки и шаг армозащитных элементов рассчитаны согласно рекомендациям [10]:

- требуемый минимальный эквивалентный модуль деформации  $E_{экв. min}$  при давлении на основании  $p_{max} = 0,158$  МПа и глубине сжимаемой зоны  $H_c$ :

$$H_c = \beta \frac{p_{max}}{\gamma_0} = 1 \cdot \frac{0,158}{0,0164} = 9,63 \text{ (м)};$$

$$E_{экв} = \beta \frac{p_{max} H_c}{s_u} = 1 \cdot \frac{0,158 \cdot 9,63}{0,08} \approx 19 \text{ (МПа)};$$

- требуемый эквивалентный удельный вес  $\gamma_{\text{экв.расч}}$  армированного основания по (3), равен:

$$\gamma_{\text{экв.расч}} = \frac{(A - nA_a)\gamma_0 + nA_a\gamma_a}{A} = \frac{(1 - 2 \cdot 0,05) \cdot 16,4 + 2 \cdot 0,05 \cdot 23}{1} = 17,06 \text{ (кН/м}^3\text{)};$$

- требуемое количество  $n$  и максимальный шаг  $a_{\text{max}}$  армоэлементов на  $1 \text{ м}^2$  геомассива при требуемой эквивалентной пористости грунта  $e_{\text{экв.расч}}$ , принимаемой по графику компрессионных испытаний для  $E_{\text{экв.мин}} = 19 \text{ МПа}$ , но не менее

$$e_{\text{экв.расч}} = e_0 - m_v \cdot p_{\text{max}} = 0,7 - 1 \cdot 0,158 = 0,54,$$

равно

$$n = \frac{A \left( \frac{e_0 - e_{\text{экв.расч}}}{1 + e_0} \right)}{A_a} = \frac{1}{0,05} \left( \frac{0,7 - 0,54}{1 + 0,7} \right) \approx 2 \text{ (шт./м}^2\text{)},$$

$$a_{\text{max}} = d_a \sqrt{\frac{\pi\gamma_0}{3,5(\gamma_{\text{экв.расч}} - \gamma_0)}} = 0,25 \sqrt{\frac{3,14 \cdot 16,4}{3,5(17,06 - 16,4)}} = 1,17 \text{ (м)},$$

по конструктивным требованиям принимаем шаг  $a = 0,7 \text{ м}$ ;

- требуемая толщина песчаной прослойки на  $1 \text{ м}^2$  основания

$$h_{\text{тб.мин}} = \frac{s_u \cdot E_{\text{б.н}} \cdot \sum A_a}{p_{\text{max}}} = \frac{0,015 \cdot 20 \cdot 0,1}{0,158} \approx 20 \text{ (см)}.$$

**Исследование вертикально армированного основания фундаментов объекта.** Для оценки эффективности заложенных в проект решений по упрочнению основания фундаментов здания выполнены его испытания штампом площадью  $2500 \text{ см}^2$  по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 20276-99 [8]. Испытания проводились до и после устройства геомассива.

Нагружение осуществлялось гидравлическим домкратом грузоподъемностью  $500 \text{ кН}$ . Реактивные усилия воспринимались стальной балкой, закрепленной с помощью винтовых анкеров.

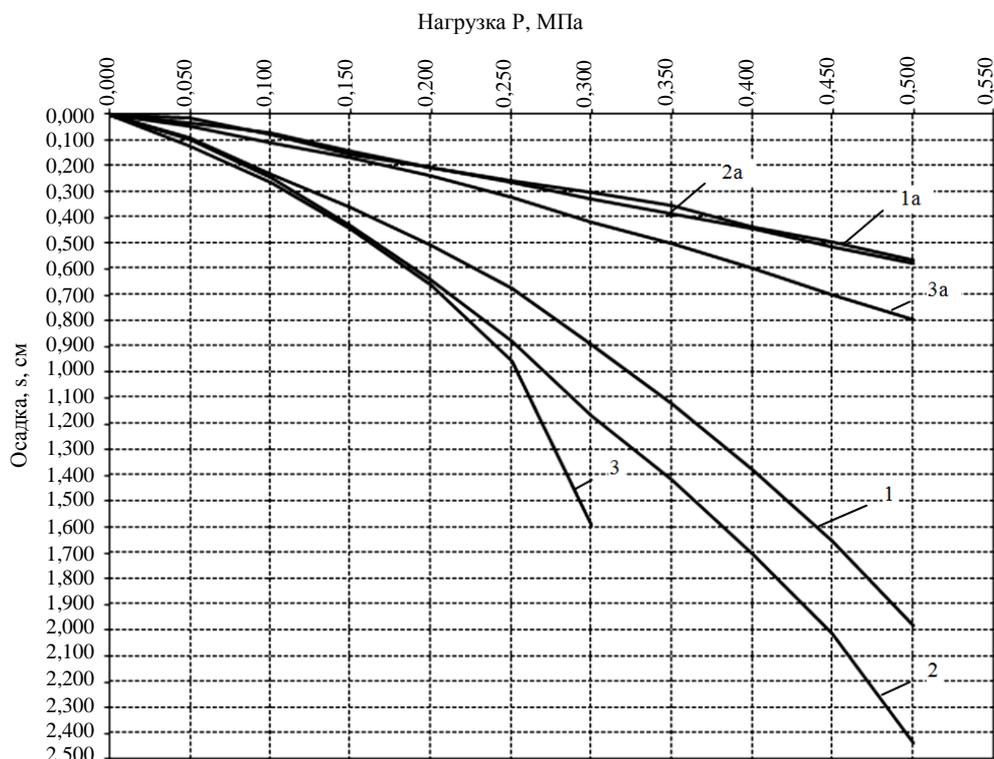
Результаты испытания штампом приведены в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2 – Результаты испытания насыпного грунта и геомассива штампом

Номер опытного участка по рисунку 4	Вид грунта	Площадь штампа $s$ , $\text{см}^2$	Расчетный интервал давлений $p_n \dots p_0$ , МПа	Осадка в расчетном интервале $s_n \dots s_0$ , см	Модуль деформации насыпного грунта до $E_0$ и после упрочнения по методике ВА $E_{\text{ва}}$ , МПа	$\frac{E_{\text{ва}}}{E_0}$
ОУ1	Насыпной грунт	2500	0,3...0,5	0,895...0,091	12,6	3
	Геомассив по методике ВА	2500	0,3...0,5	0,301...0,036	38,3	
ОУ2	Насыпной грунт	2500	0,3...0,5	1,166...0,095	9,5	3,4
	Геомассив по методике ВА	2500	0,3...0,5	0,330...0,017	32,4	
ОУ3	Насыпной грунт	2500	0,25...0,5	0,957...0,121	9,7	2,9
	Геомассив по методике ВА	2500	0,3...0,5	0,415...0,047	27,6	

Результаты полевых натуральных испытаний, запроектированных по рекомендациям [10] геомассива, подтверждают достоверность разработанного метода расчета и эффективность принятого решения по упрочнению оснований плитных ленточных фундаментов на объекте методом вертикального армирования грунтобетонными сваями уплотнения в пробитых скважинах. Среднее значение модуля деформатив-

ности насыпных грунтов после их упрочнения по методике ВА составляет  $E_{ва} = 33$  МПа, при исходном  $E_0 = 11$  МПа, то есть он увеличился в 3 раза.



графики 1, 2, 3 – до армирования; 1a, 2a, 3a – после армирования грунта

Рисунок 6 – Зависимость осадки штампа от нагрузки  $s = f(p)$  на опытных участках ОУ1, ОУ 2, ОУ3 строительной площадки согласно рисунку 4

Предел пропорциональности в зависимости «нагрузка – осадка»  $s = f(p)$  при нагрузке  $p = 0,5$  МПа не достигнут, то есть несущая способность геомассива составляет не менее 0,5 МПа, при исходной предельной нагрузке на основание от одноэтажного здания  $p_{np} = 0,16$  МПа, и в случае надстройки 2-х этажей  $p_{np} = 0,46 < 0,5$  МПа. При этом деформации упрочненного основания от проектных нагрузок по сравнению с неупрочненным насыпным грунтом уменьшаются в 4 раза.

**Заключение.** В результате проведенных исследований предложены и апробированы в производственных условиях конструкции и технология вертикального армирования грунтов сваями уплотнения. Достоверность и эффективность результатов исследований, разработанных методов расчета предложенных геомассивов подтверждены экспериментально.

Эффект от внедрения указанной технологии для объекта, где производилась ее производственная апробация, по сравнению с традиционным свайным способом возведения фундаментов с прорезкой малопрочного насыпного слоя составил 90%; по сравнению с вибродинамическими способами упрочнения грунтов – не менее 30%. Это достигнуто благодаря использованию более легкой и менее энергоемкой стандартной техники, имеющейся в строительных организациях Республики Беларусь, и снижению материалоемкости работ нулевого цикла за счет использования местного самого недорогого материала – грунта. При этом несущая способность оснований, подготовленных указанным способом, увеличилась в 3 раза, а их деформативность снизилась в 4 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сеськов, В.Е. Упрочнение оснований методом вертикального армирования грунтобетонными микросваями в пробитых скважинах / В.Е. Сеськов, В.Н. Кравцов, С.А. Якуненко // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сб. тр. междунар. конф.; редкол.: Р.А. Мангушев (отв. ред.) [и др.]. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С. 295–300.

2. Кравцов, В.Н. Проектирование вертикально армированных оснований плитных фундаментов / В.Н. Кравцов // Геотехника Беларуси: Наука и практика: тр. междунар. конф. по геотехнике. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 9.
3. Мирсояпов, И.Т. Исследование прочности и деформируемости просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами / И.Т. Мирсояпов, В.Р. Мустакимов // Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика: тр. междунар. конф. по геотехнике Т. 2. – СПб.: ПГУПС, 2005. – С. 40–45.
4. Фундамент здания, возведенный на искусственно упрочненном слабом или малопрочном грунте, и способ его возведения: пат. 18688 Респ. Беларусь, МПК E02D27/12 / В.Е. Сеськов, В.Н. Кравцов, Н.С. Лобастов, В.П. Лебедик; заявитель РУП «Институт «БелНИИС». – № а 20111166; заявл. 02.09.2011; опубл. 02.09.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011.
5. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. – М: Metallurgia, 1969. – 155 с.
6. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: ГОСТ 12248-2010. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2013. – 83 с.
7. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием: ГОСТ 19912-2001. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2004. – 25 с.
8. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости: ГОСТ 20276-99. Грунты. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2000. – 25 с.
9. Якуненко, С.А. Экспериментальные исследования армированных грунтобетонными микросваями оснований плитных фундаментов / С.А. Якуненко // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2013. – С. 379–387.
10. Рекомендации по проектированию и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов) для плитных фундаментов зданий и сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь: Р1.02.133-2014. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2014. – 28 с.
11. Рекомендации по проектированию и устройству грунтобетонных свай в бурораздвижных скважинах. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2005. – 51 с.

Поступила 21.08.2015

**RESEARCH OF VERTICAL REINFORCED  
BY SOIL-CONCRETE MICROPILES SLAB FOUNDATIONS' GROUND BASES  
AND TESTING RESULTS IN INDUSTRIAL PRACTICE**

**V. KRAVTSOV, S. JAKUNENKO, P. LAPATSIN**

*Final results and practical application of the method of vertical ground reinforcement for hardening low-strength slab foundations' bases are considered. The optimal percentage of reinforcement, constructive characteristics of geomassif (increment, length, diameter) are presented and principles of calculation are developed. The example of specific object shows that technological schemes of geomassif implementation, developed in RUE "Institute BelNIIS", allow to reduce deformability of low-strength bases in 2...3 times.*