

УДК 624.159.4:626.131

DOI 10.52928/2070-1683-2023-34-2-23-31

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОСНОВАНИЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА,  
АРМИРОВАННОГО ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЖЁСТКИМИ ГРУНТОБЕТОННЫМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

канд. техн. наук, доц. В.Н. КРАВЦОВ<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук С.М. ЭГБАЛНИК<sup>2)</sup>, Д.А. ХРАНЦКЕВИЧ<sup>3)</sup>  
(<sup>1)</sup> РУП «Институт БелНИИС», Минск,  
<sup>2), 3)</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск)

В статье приведены результаты численного моделирования предельных состояний основания плитного фундамента, армированного вертикальными (ВА) жёсткими грунтобетонными элементами (ВЭ) из набивных свай уплотнения, нагруженного распределённой нагрузкой с использованием реальных (фактических) геометрических и физико-механических параметров (материалов фундамента, ВЭ, грунта) и натуральных условий его работы. На основе разработанной численной модели геомассива исследовано напряжённо-деформированное состояние (НДС) ВА-основания в зависимости от его параметров: количества жёстких армирующих вертикальных элементов (шага, процента армирования), свойств материалов фундамента, ВЭ и вмещающего грунта; выполнен анализ результатов эксперимента. Полученные данные исследований использованы для разработки нормативно-технических документов (ТНПА) по проектированию и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов).

**Ключевые слова:** вертикально армированный грунт, жёсткие вертикальные элементы из свай, эквивалентные характеристики армированного основания, процент армирования, грунтобетон, численное моделирование эксперимента, НДС.

**Введение.** Метод армирования грунта, в частности, вертикального (далее ВА), является в настоящее время одним из наиболее прогрессивных, ресурсосберегающих и универсальных методов упрочнения оснований [1–4]. Для вертикального армирования применяются крупные жёсткие элементы (далее ВЭ) [4; 5]. Особенно эффективны в этом плане предложенные в РУП «Институт БелНИИС» конструкция и технология устройства геомассивов с ВЭ из свай уплотнения (стандартных забивных и набивных в пробитых скважинах, в т.ч. из грунтобетона)<sup>1</sup> [5], которые позволяют, по сравнению с традиционными методами упрочнения грунтов (трамбовка, виброуплотнение и др.), снизить стоимость и трудоёмкость работ не менее, чем на 30%.

Сущность вертикального армирования заключается в создании (конструктивными либо физико-химическими методами) в массиве основания пониженной прочности более прочных, жёстких по отношению к структурным свойствам природного грунта, не связанных конструктивно с фундаментом армирующих вертикальных жёстких элементов, которые работают совместно с вмещающей средой. Они воспринимают, в отличие от грунта, сжимающие и растягивающие напряжения, значительно повышая его прочность и деформативные свойства<sup>2</sup> [6].

Использование в качестве элементов армирования свай уплотнения (готовых или набивных в пробивных скважинах) позволяет дополнительно повысить эффективность упрочнения основания за счёт совмещения эффекта его уплотнения (от забивки готовой сваи или в результате пробивки скважины при изготовлении набивной сваи) и эффекта армирования грунта ВЭ<sup>3</sup> [4].

Эффективность способа ВА-основания ещё больше возрастает при использовании для устройства жестких армоэлементов в виде свай уплотнения по технологии института БелНИИС из грунтобетона на основе местного грунта и применения, вместо дорогостоящего импортного оборудования, традиционных импортозамещающих технических средств (кран, экскаватор, трактор), имеющихся в большинстве строительных организаций страны, что существенно удешевляет и способствует широкому применению данного метода упрочнения грунтов в строительстве<sup>4</sup> [5].

На сегодняшний день существуют различные технологии изготовления грунтобетонных свай: как непосредственно в массиве грунта (струйная, бурсмесительная), так и в пробуренных или пробитых (выштампованных, вытрамбованных) скважинах с их последующим заполнением грунтобетонной смесью по технологии РУП «Институт БелНИИС».

<sup>1</sup> Фундамент здания, возведённый на искусственно упрочнённом 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 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. соб. – 2011.

<sup>2</sup> Тер-Мартirosян З.Г. Эквивалентные характеристики деформируемости и прочности многокомпонентного грунта // Материалы Междунар. Совещания заведующих кафедрами МГр., Инж. Геологии, ОиФ и Подземного стр-ва строит. вузов и факультетов / МГСУ. – М., 2003. – С. 15–25.

<sup>3</sup> Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатин П.В. Экспериментально-теоретические исследования и проектирование оснований плитных фундаментов пониженной прочности, упрочнённых способом вертикального армирования грунта // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на Европейские стандарты», Минск, 26–27 мая 2015 г. / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 328–329.

<sup>4</sup> См. сноску 3.

Грунтобетон для армирующих элементов является наиболее дешёвым деловым материалом при устройстве ВА-оснований, так как он выполняется из местного грунта строительной площадки, поэтому его стоимость на порядок ниже стоимости традиционных материалов (бетона, раствора и др.) [7]. При этом, полости под грунтобетонные ВЭ (сваи) штампуются, уплотняя окружающий грунт, или бурятся без выемки грунта буросмесительным способом, посредством бура с полым стволом, через который под давлением нагнетается водоцементная суспензия. Разрыхлённый и измельчённый при бурении полости грунт, перемешиваясь с водоцементной суспензией, образует грунтобетонную смесь, из которой формируется жёсткий элемент ВЭ цилиндрической формы, дополнительно уплотняющий окружающий его грунт геомассива.

Существенная неопределённость работы таких анизотропных ВА-оснований под нагрузкой накладывает значительные ограничения на их изучение традиционными экспериментальными и теоретическими методами, которые не позволяют учитывать все компоненты реальной системы ВА-основания в различных диапазонах напряжения (в т.ч. трение и сцепление между крупными жёсткими элементами и включающей их средой, эквивалентные свойства армированного основания и др.). В связи с этим в нормах (ТНПА) и теоретической литературе отсутствуют достаточно обоснованные методы проектирования ВА-оснований. Для решения таких задач наиболее эффективны численные методы на базе программных комплексов (ПК), реализующих метод конечных элементов (МКЭ), верифицированных для задач механики деформируемого твёрдого тела, позволяющих разработать метод расчёта ВА-оснований, не имеющих в настоящее время точных аналитических решений традиционными способами, часто опирающихся на эмпирические данные и использующих упрощённые (неточные) расчётные схемы (модели) основания.

Однако, несмотря на большой потенциал численных методов (МКЭ) и наличие программных комплексов, количество работ по моделированию многокомпонентных сред разной жёсткости, применительно к ВА-основаниям, незначительно. В связи с этим цель работы – повышение точности расчётов ВА-оснований, при выполнении которой решались следующие задачи:

1) разработка метода численного моделирования эксперимента и проведение на его основе исследований по оценке влияния на напряжённо-деформированное состояние (НДС) комбинированного основания (геомассива), свойств реальных армирующих вертикальных элементов с учётом их параметров (размеров, шага, процента армирования, материала ВА-грунта и др.) в зависимости от величины нагрузки и технологии изготовления;

2) верификация полученных данных численного эксперимента в натуральных производственных условиях и разработка на их основе более точного и надёжного, по сравнению с существующими, метода проектирования и устройства ВА-оснований (геомассивов).

**Основная часть. 1. Характеристика объекта исследований.** По итогам ранее выполненных исследований ВА-оснований традиционными натурными лабораторными и полевыми методами установлено следующее<sup>5</sup> [1–6].

1. ВА-геомассив работает не как свайное, а как упрочнённое армоэлементами комбинированное грунтовое основание, имеющее эквивалентные свойства ( $\rho_s$ ,  $\varphi_s$ ,  $c_s$ ,  $E_s$ ), превышающие характеристики исходного неармированного грунта (например, для модуля деформации  $E_0$ , как правило, не менее, чем в 2–3 раза); обладает по отношению к нему ярко выраженной прочностной деформационной анизотропией и наличием арочного эффекта, что также повышает эквивалентные характеристики ВА-основания (геомассива).

2. Разрушение геомассива ВА при предельной нагрузке происходит по следующим схемам:

а) от выпора из-под фундамента грунта буферной подушки, если её мощность больше предельной толщины  $h_{ib} \geq 0,75b$  (где  $b$  – ширина фундамента) или  $E_0 \leq 25$  МПа;

б) от проскальзывания (задавливания) армоэлементов относительно естественного вмещающего грунта при нагрузках на основание более критических  $p_0 \geq 0,8R$  и отсутствии или недостаточной толщине буферного слоя ( $R$  – расчётное сопротивление вмещающего грунта,  $p_0$  – дополнительное давление на геомассив);

в) от потери устойчивости геомассива по явно выраженным условно прямолинейным (аппроксимированным) плоскостям скольжения под углом  $\alpha^{6,7}$ .

Анализ собственных результатов и данных литературных источников экспериментальных натуральных исследований показывает<sup>8</sup> [2–6], что оценка механических характеристик неоднородного анизотропного основания, армированного ВЭ, связана с решением комплексной задачи, требующей учёта как соотношения жесткостей, свойств материалов армоэлементов и вмещающего исходного грунта, так и условий контакта между ними (сил трения, сцепления). Исходя из цели и задач настоящей работы (см. введение), разработан метод моделирования эксперимента и проведено исследование влияния на НДС комбинированного ВА-основания (геомассива) реальных свойств и количества армирующих вертикальных элементов (ВЭ) в нём с учётом их реальных параметров (шага, процента армирования), нагруженного распределённой вертикальной нагрузкой от плитного фундамента. При этом геомассив в разработанном методе рассматривается как единое комбинированное основание, где вмещающий исходный грунт и армирующие элементы работают совместно, что позволяет не рассматривать жёсткие включения отдельно (как сваи).

<sup>5</sup> См. сноски 2, 3.

<sup>6</sup> Р 1.02.133-2014. 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.

<sup>7</sup> См. сноску 3.

<sup>8</sup> См. сноски 2, 3.

В качестве основных, варьируемых при планировании эксперимента факторов модели приняты (по данным натурных опытов) следующие (таблица 1).

Таблица 1. – Факторы планирования эксперимента

| Параметры функций отклика   | Уровни выравнивания параметра |            |           | Интервал $\Delta Z$ |
|---|-------------------------------|------------|-----------|---------------------|
|   | -1                            | 1          | +1        |                     |
| $Z_1$ – модуль деформации исходного вмещающего грунта $E_0$ , Мпа | 5                             | (7,5...10) | (10...15) | 2,5...5             |
| $Z_2$ – процент армирования исходного вмещающего грунта $\mu$ , % | (1...5)                       | 20         | 40        | 20                  |

Поставленная задача реализуется посредством численного моделирования испытаний эквивалента реального натурального ВА-основания и аппарата механики грунтов для их анализа.

Сущность разработанного метода численного моделирования эксперимента заключается в создании математической модели типового объёма основания-солида, повторяющего все фактические параметры реального объёма (конструкцию фундамента, ВЭ, процент армирования  $\mu$ , характеристики их материалов и вмещающего грунта:  $\gamma_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $c_0$ ,  $E_0$ ) в объёмной постановке условных координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Рассмотрены наиболее распространённые в Республике Беларусь типы оснований из песчаных (песок: мелкий, средний) и глинистых (супесь, суглинок) реальных грунтов [8], нагруженных плитой фундамента через разделительную гравийно-песчаную подушку армированных абсолютно жёсткими элементами из набивных грунтобетонных свай уплотнения с  $\mu = (0, 5, 10, 20, 30, 45)\%$ .

Численное моделирование эксперимента для каждого варианта типовой модели-солида с соответствующим процентом армирования  $\mu$  производится при постоянных напряжениях  $\sigma_3$  на боковых гранях заданной расчётной области (см. ниже допущения и предпосылки) и возрастающими главными напряжениями  $\sigma_1$  при вертикальной нагрузке на основание фундамента  $P$  от 0 до 0,6 МПа. По результатам испытаний для каждого варианта типового геомассива определяется его НДС, прочность, осадки, по которым расчётом с использованием соответствующих формул механики грунтов находятся эквивалентные характеристики  $\varphi_3$ ,  $c_3$ ,  $E_3$ .

Численное (математическое) моделирование НДС проведено для условного типового фрагмента плитного фундамента на ВА-основании с использованием реальных грунтов белорусского региона и характеристик материалов (бетона, ВЭ, фундамента), принятых по нормам<sup>9, 10, 11</sup> и согласно [8], с использованием программного комплекса для персонального компьютера MIDAS GTS NX, реализующего метод конечных элементов (МКЭ) в объёмной постановке, и с учётом следующих допущений и предпосылок:

- расчётная область (геотехническая модель) основания принята по ширине, равной  $5b$ , по глубине, от низа подошвы плиты, равной  $H_c$  (рисунок 1), где  $b$  – ширина фрагмента плиты,  $H_c$  – глубина сжимаемой зоны, определяемой по нормам<sup>12</sup>.
- исходный вмещающий грунт основания моделируется объёмными элементами с применением упругой идеально пластической модели грунта по критерию текучести Кулона-Мора с сеткой конечных элементов (КЭ), разряженной к краям расчётной области;
- жёсткие элементы (набивные сваи уплотнения) приняты по технологии<sup>13, 14</sup> круглого сечения, диаметром 200–600 мм, длиной 5–6 м, и моделируются стержневыми элементами;
- интенсивность давления на ВА-основание от плитного фундамента принята в соответствии с рекомендациями таблицы 4 ТКП 45-5.01-254-2012 «Основания и фундаменты зданий и сооружений» –  $P = (0,1-0,6)$  МПа;
- характеристики материалов (грунт, армоэлементы, фрагмент плиты) в геотехнической модели приняты реальные для белорусского региона по данным норм<sup>15</sup>;
- контакт грунта с армоэлементами: трение сцепления, оценивается коэффициентом трения  $\text{tg } \varphi_3$ , где  $\varphi_3$  – эквивалентный угол внутреннего трения грунта, град;
- граничные условия: отсутствие перемещения по боковым и нижней граням принятой расчётной области  $5b \times 5l \times H_c$ , где  $b$  и  $l$  – ширина и длина фрагмента плиты,  $H_c$  – глубина сжимаемой зоны (см. рисунок 1);
- конечно-элементная сетка разряжена к краям расчётной области и в глобальной системе координат имеет три степени свободы в виде перемещений вдоль декартовых осей ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), что позволяет получить напряжения и деформации в конечных элементах фактического грунтового основания (геомассива);

<sup>9</sup> П19-04 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство фундаментов из свай набивных с уплотнённым основанием. – Минск: РУП «Минсктипроект», 2006. – 88 с.

<sup>10</sup> СП 5.03.01-2022. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2022. – 244 с.

<sup>11</sup> ТКП 45-5.01-67-2007. Фундаменты плитные. Правила проектирования. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2007. – 144 с.

<sup>12</sup> См. сноску 11.

<sup>13</sup> См. сноски 9, 11.

<sup>14</sup> См. сноску 3.

<sup>15</sup> См. сноски 9–11.

– грунтовое основание, вмещающее жёсткие ВЭ, моделируется объёмными трёхмерными конечными элементами (КЭ) в виде тетраэдров, пентаэдров и гексаэдров, позволяющими в расчётах учесть геометрическую нелинейность и нелинейность свойств материалов.

Численные исследования выполнены для условного типового геомассива с обобщёнными реальными свойствами грунтовой вмещающей среды, материала фрагмента плиты фундамента и ВЭ, принятых по результатам их расчётов согласно нормам<sup>16</sup>:

– для ВЭ из грунтобетона: удельный вес  $\gamma_m = 20 \text{ кН/м}^3$ ; модуль упругости  $E_y = (15\text{--}23) \cdot 10^6 \text{ кПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ;

– для фрагмента железобетонной плиты фундамента  $\gamma_{m,\phi} = 20 \text{ кН/м}^3$ ;  $E_y = 32\,500\,000 \text{ МПа}$ ;  $\nu = 0,3$ ;

– для вмещающей среды – исследованы наиболее распространённые в белорусском регионе [8] пески (мелкие, средние) и глинистые грунты (супесь, суглинок) со следующими характеристиками, принятыми по нормам<sup>17</sup> (приложение Б): удельный вес  $\gamma_o$ ,  $\text{кН/м}^3$ ; общий модуль деформации  $E_o$ ,  $\text{кПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu$ ; удельное сцепление  $c$ ,  $\text{кПа}$ ; угол внутреннего трения  $\phi$ , град.

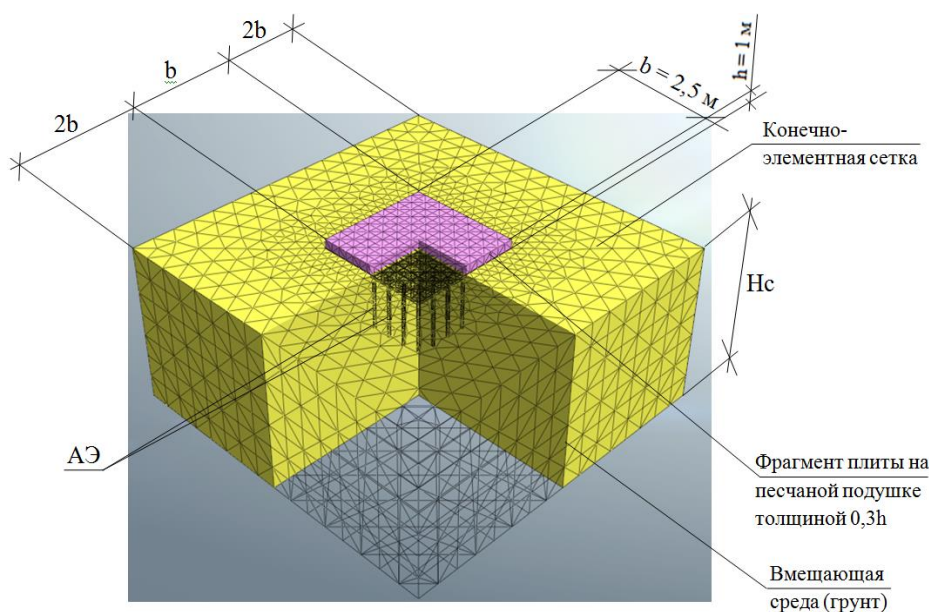


Рисунок 1. – Расчётная область (модель) объекта исследований с сеткой конечных элементов (КЭ)

**2. Результаты численного эксперимента (исследований) и их анализ.** Итоговые результаты работы на примере одной из тестовых задач численного моделирования ВА-геомассива из наиболее распространённого в белорусском регионе песка среднего  $\gamma_{m,n} = 17,2 \text{ кН/м}^3$  (остальные исходные характеристики – в таблице 2), к поверхности которого приложена равномерно распределённая нагрузка от фрагмента массивного плитного фундамента интенсивностью  $0,15 \text{ МПа}$  в уровне его подошвы, даны в таблице 2 и на рисунках 2–4.

Таблица 2. – Итоговые результаты численного эксперимента. ВА-основание из песка среднего с исходным модулем  $E_o = (7,5\text{--}10) \text{ МПа}$ , тесты 7–12 при  $\mu = (0\text{--}40)\%$

| Номер теста | Процент армирования ВА-основания грунтобетонными ВЭ с $\mu_a$ , % | Количество вертикальных армоэлементов ВЭ, шт., в пределах контура фрагмента плиты | Среднее давление под подошвой фрагмента плиты $p_m$ , МПа | Конечная осадка фрагмента плиты $S_{max}$ , мм, согласно данным моделирования | Напряжения в плите $\sigma_{max}$ , МПа | Эквивалентный модуль деформации $E_{экв}$ , МПа, при исходном $E_o = 10 \text{ МПа}$ песка с учётом его уплотнения ВЭ* |
|-------------|---|---|---|---|---|--|
| 7           | 0   | 0   | 0,15  | 92  | 0,624                                   | 10,00  |
| 8           | 5   | 8   | 0,15  | 81  | 0,658                                   | 16,67  |
| 9           | 10  | 16  | 0,15  | 77  | 0,659                                   | 17,53  |
| 10          | 20  | 31  | 0,15  | 76  | 0,661                                   | 17,76  |
| 11          | 30  | 45  | 0,15  | 78  | 0,669                                   | 17,31  |
| 12          | 40  | 60  | 0,15  | 80  | 0,679                                   | 16,88  |

*Примечание.* \*Исходный модуль деформации вмещающего песка среднего –  $E_{o,sp} \leq 7,5 \text{ МПа}$  до уплотнения грунта ВЭ (сваями) и  $\approx (10\text{--}12) \text{ МПа}$  после уплотнения (ВЭ); модуль упругости грунтобетона  $E_y = 15 \cdot 10^3 \text{ МПа}$  для его оптимальной смеси и  $10 \cdot 10^3$  – для неоптимальной по нормам<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> См. сноски 6, 9–11.

<sup>17</sup> См. сноску 11.

<sup>18</sup> См. сноску 11.

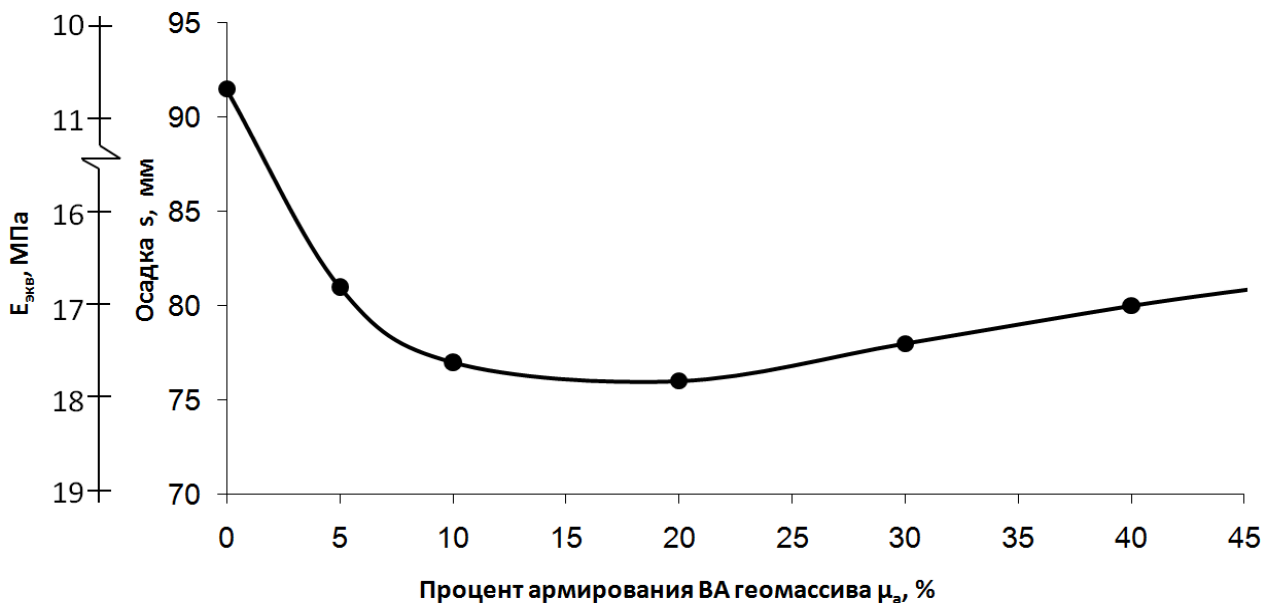


Рисунок 2. – Изменение величин осадки  $s$  и эквивалентного модуля деформации  $E_{экв.min}$  ВА-геомассива из песка среднего в зависимости от процента его армирования  $\mu_a$ , тесты 7–12

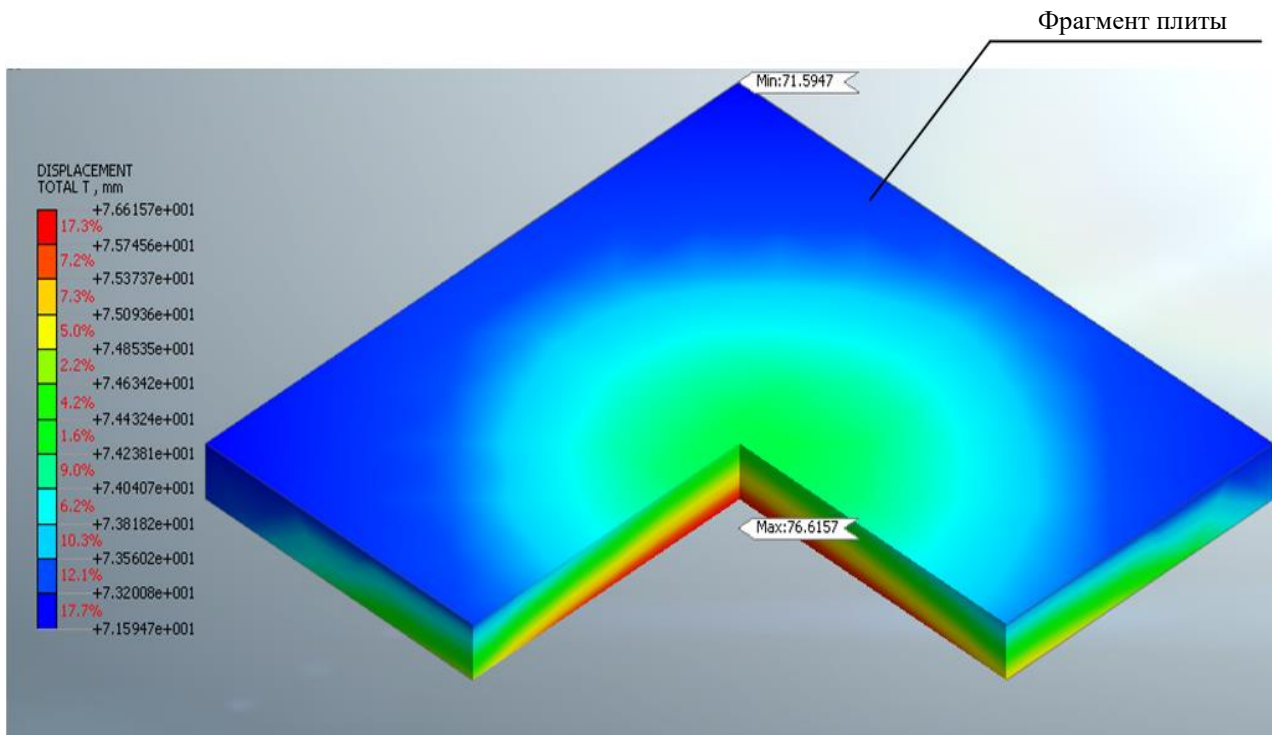


Рисунок 3. – Результаты КЭ расчётов. Эпюра осадок под фрагментом плиты, максимальное смещение  $s = 76,62$  мм (тест 9 (размеры модели  $(13 \times 13 \times 8 H_c)$  м, размеры фрагмента плиты  $(2,5 \times 2,5 \times 1h)$  м, вертикальное армирование 10% от объёма вмещающего грунта из песка среднего; распределённая нагрузка на ВА-основание  $p_0 = 0,15$  МПа)

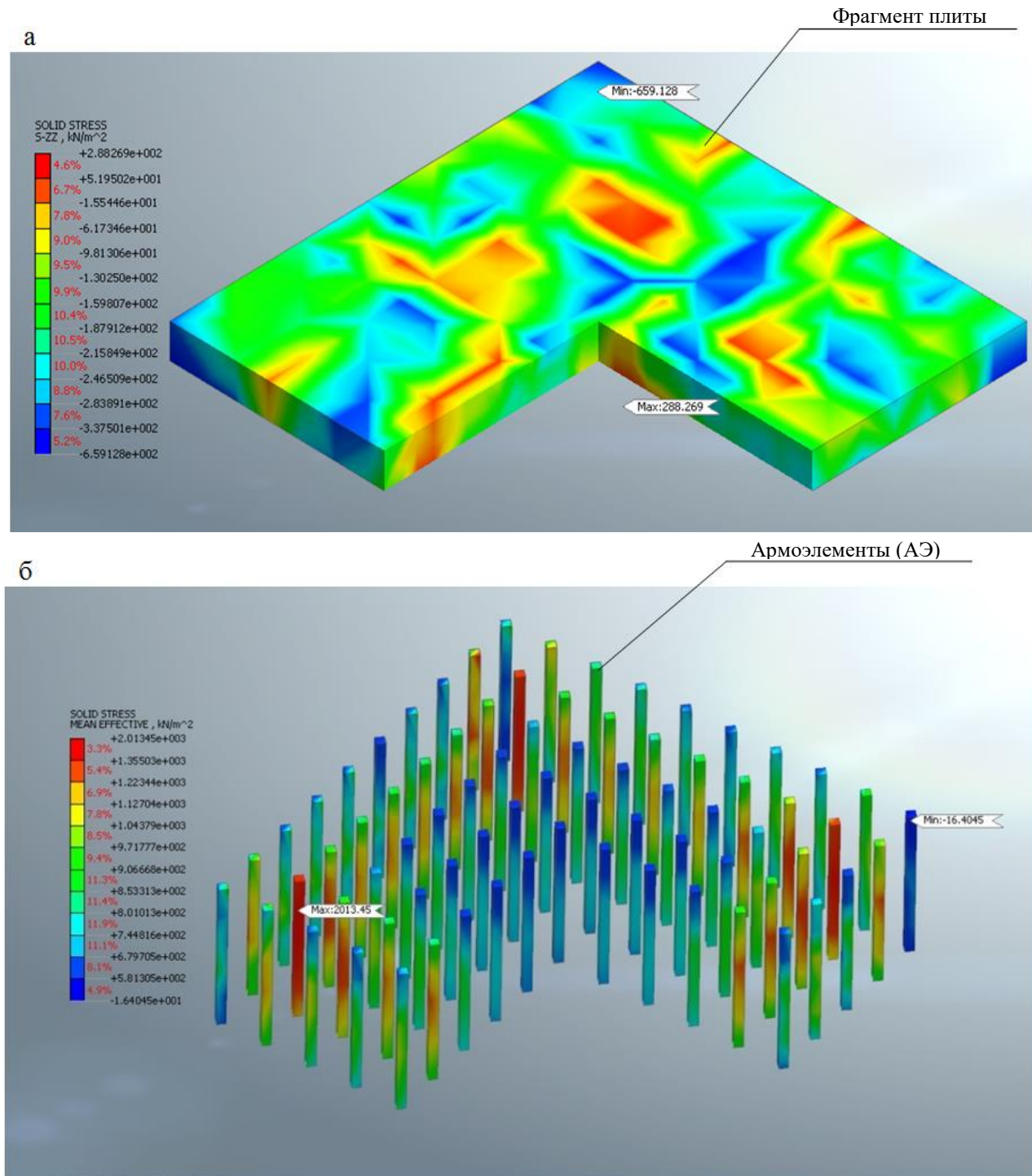


Рисунок 4. – Результаты КЭ расчётов: а – эпюра напряжений в плите ( $\sigma_{\text{max}} = 659$  МПа); б – эпюра напряжений в жёстких армоэлементах ВЭ (тест 9 (размеры модели  $13 \times 13 \times 8$  Hc) м, размеры фрагмента плиты  $(2,5 \times 2,5 \times 1h)$  м, вертикальное армирование 10% от объёма вмещающего грунта из песка среднего; распределённая нагрузка на ВА-основание  $p_0 = 0,15$  МПа)

2.1. Анализ результатов численного эксперимента. Анализ данных выполненных исследований показал следующее.

1. Армогрунтовый массив (геомассив) является сложной механической структурой, состоящей из двух основных компонентов: исходного вмещающего грунта пониженной прочности и внедрённых в него крупных жёстких линейных вертикальных (в т.ч. горизонтальных или дисперсных) армирующих элементов с эквивалентными характеристиками прочности ( $\varphi_s$ ,  $c_s$ ) и деформативности ( $E_s$ ), которое имеет следующие виды контактного взаимодействия друг с другом:

а) бесконтактное, если исходные деформативные и прочностные характеристики вмещающего грунта находятся в пределах:  $E_o \leq (5-7,5)$  МПа,  $\varphi_o \leq 17^\circ$ . Армирование таких грунтов **нецелесообразно**, т.к. не приведёт к их упрочнению без дополнительного уплотнения;

б) сдвиговой контакт, как правило в песках, если  $E_o \geq (7,5-10)$  МПа,  $\varphi_o > 17^\circ$ ;  $e_o \leq (0,7-0,8)$ , взаимодействие ВЭ с грунтом только за счёт трения ( $\operatorname{tg} \varphi_s$ );

в) вязкий контакт, как правило в глинистых грунтах, при  $E_o \geq 7,5$  МПа,  $\varphi_o \geq 17^\circ$ ,  $e_o \leq 0,75$ , взаимодействие ВЭ с грунтом за счёт как трения ( $\operatorname{tg} \varphi_s$ ), так и сцепления ( $c_s$ ).

2. Интегральным критерием эффективности ВА-геомассива является объём (процент) армирования  $\mu$ , %, который определяет такие производные его параметры, как количество ( $n$ ), диаметр ( $\varnothing$ ) и шаг ( $a$ ) ВЭ.

3. В зависимости от величины  $\mu$  геомассив может находиться в трёх фазовых состояниях:

Фаза 1 соответствует первому виду контактов между ВЭ и грунтом по перечислению «а») в п.1, случай  $\mu \leq \mu_{min}$ , когда  $E_o \leq (5-7,5)$  МПа или концентрация критической массы ВЭ меньше минимальной, при которой эквивалентные характеристики геомассива не отличаются от свойств вмещающего грунта.

Фаза 2 при  $\mu_{min} < \mu \leq \mu_{opt}$  и контактах по перечислениям «б), в») п.1, когда параметры ( $\mu$ ,  $\varnothing$ ,  $n$ ,  $a$ ) имеют свой экстремум (оптимальные значения). Так, при  $\mu = (20-50)\%$  прочностные и деформационные характеристики геомассива повышаются на 25 (30)% (значение в скобках – для глинистых грунтов).

Фаза 3 при  $\mu > \mu_{opt}$ , когда параметры ( $\mu$ ,  $\varnothing$ ,  $n$ ,  $a$ ) **снижаются**, пройдя свой экстремум, несмотря на увеличение объёма (процента) армирования ВЭ.

4. Результаты численного моделирования ВА-геомассива подтвердили результаты лабораторных и полевых исследований<sup>19</sup> [5–6] и теоретического решения автора [9], в частности: механизм работы контактов по п.1 меняется в зависимости от степени уплотнения исходного вмещающего грунта внедряемыми в него ВЭ и в процессе его загрузки внешней нагрузкой;

5. Максимальная эквивалентная прочность ВА-геомассива ( $\varphi_s$ ) и жёсткость ( $E_s$ ) зависят от свойств исходного вмещающего грунта, процента его армирования ( $\mu$ ,  $n$ ), жёсткости ВЭ ( $E_{ap}$ ).

Увеличение эквивалентных параметров ВА-геомассива происходит только при  $\mu_{min} < \mu \leq \mu_{max}$ : свойства упрочнения ( $\varphi_s$ ,  $E_s$ ) ВА-геомассива (в зависимости от свойств исходного грунта) имеют максимальный экстремум при  $\mu_{opt} = (30-50)\%$  ВЭ, а жёсткости ( $E_s$ ) и деформативности ( $s_s$ ) – при  $\mu_{max} = (20-40)\%$  ВЭ, после чего **снижаются, независимо от увеличения  $\mu$**  (см., например, таблицу 2 и рисунок 2).

При этом следует отметить, что повышение прочности грунта не зависит от формы и расположения ВЭ в основании, а только от расстояния (шага) между ними, оптимальная величина которого прямо пропорциональна диаметру ( $d$ ) и в зависимости от свойств вмещающего грунта составляет  $\alpha_{opt} = (3-5) d$  на  $1 \text{ м}^2$ , ( $100 \text{ м}^2$ ) ВА-геомассива.

Увеличение жёсткости материала армоэлементов ВЭ ( $E_{ap}$ ) влияет на жёсткость ВА-геомассива, только если величина жёсткости ВЭ не менее, чем в 100 раз, выше жёсткости вмещающего грунта  $E_o$ , т.е.  $E_{ap \min} \geq (500-1000)$  МПа. В то же время дальнейшее увеличение жёсткости  $E_{ap}$  не приводит к увеличению  $E_s$  геомассива. В связи с этим в расчётах геомассивов следует использовать минимальное значение  $E_{ap \min} \approx 1000$  МПа.

6. При предельной нагрузке на ВА-геомассив от фундамента максимальные напряжения, как правило, имеют место в верхней трети ВЭ, а для расположенных в центральной части фрагмента плиты и в угловых ВЭ, как правило, по всей их длине. Например, для тестового испытания 9 (см. рисунок 4) при нагрузке 0,15 МПа напряжения достигают 2,397 МПа.

**Заключение.** По итогам моделирования численного эксперимента НДС вертикально армированного основания (ВА-геомассива) для фрагмента плитного фундамента с использованием реальных нагрузок, свойств материалов и грунтов, наиболее распространённых на территории белорусского региона, можно сделать следующие выводы и предложения.

1. Разработан метод численного моделирования основания плитного фундамента из ВА-геомассива, армированного крупными жёсткими элементами (ВЭ) в виде свай уплотнения, на основе которого выполнены экспериментальные исследования его НДС с использованием реальных нагрузок, свойств материала фундамента, ВЭ и вмещающих грунтов, наиболее распространённых на территории белорусского региона.

2. В процессе исследования получены и проанализированы данные о НДС плиты, армоэлементов ВЭ и ВА-основания (геомассива) в зависимости от процента его армирования  $\mu_a = (0, 5, 10, 20, 30 \text{ и } 40)\%$  (см. раздел 2 статьи).

Установлено, что на свойства ВА-оснований наибольшее влияние оказывают  $\mu_a$  и производные от него параметры: диаметр ВЭ ( $d$ ) и расстояние (шаг –  $a$ ) между ними, которые имеют свой минимальный и максимальный экстремумы (см. таблицу 2, рисунок 2). Оптимальный процент (экстремум)  $\mu_{opt}$  возникает, когда взаимодействие вмещающего грунта с ВЭ имеет контакты типа 1 б) и 1 в) (см. подраздел 2.1), составляет  $\mu_{min} \leq \mu_{opt} \leq \mu_{max}$ , и его параметры – диаметр ВЭ ( $d$ ) и шаг ( $a$ ) – оказывают наибольшее влияние на свойства ВА-основания. Вертикальное армирование (ВА) целесообразно за пределами значений  $\mu_{min}$  и  $\mu_{max}$ . Максимальные прочностные и деформативные показатели ВА-основания находятся в пределах  $\alpha_{opt} = (3-5) d$ .  $\mu_{opt} \approx (25-35)\%$ . В случае их превышения эквивалентные характеристики геомассива снижаются, несмотря на увеличение объёма армирования (см. рисунок 2).

3. Результаты моделирования верифицированы посредством сравнения с инженерно-практическим (аналитическим) методом расчёта<sup>20</sup> и опытными данными<sup>21</sup> [5]. Отклонение по величине осадки  $s$ , рассчитанной по указанным методам, составляет не более 20%, что не превышает погрешности указанных методов.

<sup>19</sup> См. сноски 2, 3.

<sup>20</sup> См. сноски 9–13.

<sup>21</sup> См. сноску 3.

4. Полученные результаты исследований позволили уточнить существующие инженерные методы определения эквивалентных свойств армированных грунтов и разработать более точный метод расчёта ВА-геомассивов по сравнению с инженерными и эмпирическими подходами. Предлагаемые методы включены в нормативно-технические документы (ТНПА)<sup>22, 23</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Джоунс К.Д. Сооружения из армированного грунта. – М.: Стройиздат, 1989. – 280 с.
2. Мирсояпов И.Т., Мустакимов В.Р. Исследование прочности и деформируемости просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами // Тр. междунар. конф. по геотехнике «Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчёта и инженерная практика». – 2005. – Т. 2. – С. 40–45.
3. Армирование грунтового основания 16-ти этажного жилого дома жесткими вертикальными стержнями / Л.В. Нуждин, В.П. Писаненко, А.А. Гензе и др. // Известия «Строительство». – 2002. – № 3. – С. 141–146.
4. Перов В.П., Перов С.В. Из практики использования укрепления оснований жёсткими элементами из набивных свай в раскатанных скважинах // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений: сб. тр. / Под ред. Р.А. Мангушева. – СПб., 2018. – С. 85–92.
5. Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатин П.В. Исследование вертикально-армированных оснований плитных фундаментов грунтобетонными микросваями и апробации их результатов в производственных условиях // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 40–47.
6. К вопросу определения приведенных деформационных характеристик армированных жёсткими вертикальными элементами грунтовых оснований / В.А. Легенченко, В.Г. Шаповал, А.В. Шаповал и др. // Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. праць / Полтавський нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка; редкол.: С.Ф. Пічугін (гл. ред.) и др. – Полтава, 2013. – С. 232–236.
7. Токин А.Н. Фундаменты из цементогрунта. – М.: Стройиздат, 1984. – 184 с.
8. Колпашников Г.А. Инженерная геология: учеб. пособие. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 134 с.
9. Кравцов В.Н. Аналитическая оценка эквивалентных свойств грунтов, упрочнённых крупными включениями (армоэлементами) // Будівельні конструкції. – 2016. – № 83 (1). – С. 284–291.

## REFERENCES

1. Dzhouns, K.D. (1989). *Sooruzheniya iz armirovannogo grunta [Earth Reinforcement and Soil Structures]*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
2. Mirsoypov, I.T. & Mustakimov, V.R. (2005). Issledovanie prochnosti i deformiruемости prosadochnykh gruntovykh osnovanii, armirovannykh vertikal'nymi elementami. *Tr. mezhdunar. konf. po geotekhnike «Vzaimodeistvie sooruzhenii i osnovanii: metody rascheta i inzhenernaya praktika»*, 2, 40–45. (In Russ.).
3. Nuzhdin, L.V., Pisanenko, V.P., Genze, P.A., Kuznetsov, A.A., Karaulov, A.M., Nuzhdin, M.L. & Stupnikov, V.A. (2002). Armirovanie gruntovogo osnovaniya 16-ti etazhnogo zhilogo doma zhestkimi vertikal'nymi sterzhnyami. *Izvestiya vuzov «Stroitel'stvo»*, (3), 141–146. (In Russ.).
4. Perov, V.P. & Perov, S.V. (2018). Iz praktiki ispol'zovaniya ukrepleniya osnovanii zhestkimi elementami iz nabivnykh svai v raskatannykh skvazhinakh [Practical experience of using the method of strengthening foundations with rigid elements made of in situ piles in rolled wells]. In R.A. Mangushev (Eds.) *Voprosy proektirovaniya i ustroystva nadzemnykh i podzemnykh konstruksii zdaniy i sooruzhenii*: sb. tr. (85–92). S.-Petersburg: SPbGASU. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kravtsov, V.N., Yakunenko, S.A. & Lapatin, P.V. (2015). Issledovanie vertikal'no-armirovannykh osnovanii plitnykh fundamentov gruntobetonnymi mikrosvayami i aprobatsii 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. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (16), 40–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Legenchenko, V.A., Shapoval, V.G., Shapoval, A.V., Shokarev, E.A. & Andreev, V.S. (2013). K voprosu opredeleniya privedennykh deformatsionnykh kharakteristik armirovannykh zhestkimi vertikal'nymi elementami gruntovykh osnovanii [To the question of definition of the provided deformation characteristics of the soil foundation reinforces by rigid vertical elements]. In S.F. Pichugin (Eds.) *Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo: zb. nauk. prats' [Academic journal. Industrial machine building, civil engineering]* (232–236). Poltava: PolNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Tokin, A.N. (1984). *Fundamenty iz tsementogrunta*. Moscow: Stroizdat, 1984. (In Russ.).
8. Kolpashnikov, G.A. (2004). *Inzhenernaya geologiya: ucheb. posobie*. Minsk: UP «Tekhnoprint».
9. Kravtsov, V.N. (2016). Analiticheskaya otsenka ekvivalentnykh svoistv gruntov, uprochnennykh krupnymi vklucheniymi (armo-elementami). *Budivel'ni konstruksii*, 83(1), 284–291. (In Russ.).

Поступила 10.05.2023

<sup>22</sup> См. сноски 6, 9–11.

<sup>23</sup> СП 5.01.01-2022. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2022. – 147 с.



**RESEARCH OF PROPERTIES OF SLAB FOUNDATION BASIS  
REINFORCED BY VERTICAL RIGID SOIL-CONCRETE ELEMENTS  
WITH THE METHOD OF NUMERICAL SIMULATION OF THE EXPERIMENT**

**V. KRAVTSOV<sup>1)</sup>, S. EGBALNIK<sup>2)</sup>, D. HRANTSKEVICH<sup>3)</sup>**

*(<sup>1)</sup>Institute BelNIIS RUE, Minsk, <sup>2), 3)</sup>Belarusian National Technical University, Minsk)*

*This article presents results of numerical simulation of limiting conditions of the basic slab foundation, reinforced by vertical rigid soil-concrete elements (VE) from stuffed piles consolidation (geomassive) loaded with distributed loading and with the use of real (actual) geometrical and physical and mechanical parameters (materials of the base foundation, VE, soil) and natural conditions of its work. On the basis of the developed numerical settlement of geomassive is investigated the stressed and deformed stat (SDS) VR-basis, depending on their parameters: quantity of rigid reinforcing vertical elements (a step, percent of reinforcing), properties of materials, foundation, VE, containing ground); the analysis of experiment results is made. The obtained data of researches are used for working out of normative and technical documents (NTDA) on designing and constructing of vertically reinforced bases (geomassives).*

**Keywords:** *vertically reinforced ground, rigid vertical elements from the piles, equivalent characteristics of the reinforced basis, reinforcing percent, soil-concrete, numerical simulation of experiment, SDS.*