

УДК 624.151.5

**Л.А. Игошева**

ООО «Сити-Строй», Пермь, Россия

**В.И. Клевеко**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСАДКИ ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАДАЧ**

Приведено сравнение результатов определения вертикальных осадок ленточных фундаментов двухэтажного здания аналитическим методом и методом конечных элементов в условиях плоской и пространственной задачи.

**Ключевые слова:** осадка фундамента, фундамент мелкого заложения, PLAXIS, аналитический метод, метод конечных элементов, пространственная задача.

**L.A. Igosheva**

Ltd "Siti-Stroi", Perm, Russian Federation

**V.I. Kleveko**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **COMPARISON OF THE RESULTS OF DETERMINATION OF VERTICAL SETTLEMENT OF A STRIP FOUNDATION OF A ANALYTICAL METHOD AND THE FINITE ELEMENT METHOD IN PLANE AND DIMENSIONAL TASKS**

The comparison of the results of determination of vertical settlement of strip foundations of a two-storey building by analytical method and finite element method, in a plane and dimensional tasks is presented in this paper.

**Keywords:** foundation settlement, shallow foundation, PLAXIS, analytical method, finite element method, the dimensional task.

Определение осадки фундамента является одной из основных задач, возникающих при проектировании фундаментов практически для всех зданий и сооружений. Рассчитать осадку фундамента можно раз-

личными методами, которые подразделяются на две большие группы: аналитические и численные. Аналитические методы расчета, составляющие основу нормативных документов, имеют множество недостатков, например, таких как: невозможность расчета пространственных фундаментов; большие погрешности расчета (реальные осадки могут быть в несколько раз меньше расчетных); высокая трудоемкость расчетных работ, особенно для фундаментов зданий со сложной схемой приложения нагрузок и т.д. Поэтому в последнее время широко применяются численные методы, которые значительно облегчают расчеты и позволяют моделировать более сложные задачи.

Одной из самых распространенных программ является сертифицированный комплекс PLAXIS 3D, предназначенный для комплексных расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости геотехнических объектов различного назначения методом конечных элементов в условиях пространственной задачи. Этот программный комплекс разработан для расчетного обоснования проектируемых сооружений на стадиях строительства, эксплуатации и реконструкции. В настоящее время имеется большой опыт применения программы PLAXIS в геотехническом строительстве [1–15].

Целью данной работы является сравнение результатов расчета вертикальных осадок фундамента аналитическим методом послойного суммирования, реализованного в СП 20.13330.2011, с результатами расчетов по методу конечных элементов в плоской (программа PLAXIS 2D) и пространственной постановке (программа PLAXIS 3D).

В качестве исходных данных для численного моделирования использовался фундамент двухэтажного здания, подробное описание которого представлено в работе [1]. На основании материалов инженерно-геологических изысканий в геолого-литологическом разрезе площадки строительства выделено два инженерно-геологических элемента (ИГЭ): ИГЭ-1 – суглинок, от тугопластичного до текучепластичного; ИГЭ-2 – суглинок текучепластичной консистенции. Характеристики этих элементов представлены в табл. 1.

Глубина промерзания грунтов в месте строительства составляет 1,93 м. Исходя из конструктивных соображений (наличие подвальных помещений) глубина заложения фундамента была принята равной 3,81 м [1]. План фундаментов здания приведен на рис. 1, вид разреза фундамента – на рис. 2.

Таблица 1

**Расчетные и нормативные физико-механические  
характеристики грунтов**

Характеристика	ИГЭ-1	ИГЭ-2
$\varphi_n$ , град	22	20
$\varphi_{II}$ , град	21	19
$\varphi_I$ , град	20	19
$c_n$ , кПа	28	10
$c_{II}$ , кПа	24	10
$c_I$ , кПа	21	9
$E$ , МПа	10,24	5,3
$\rho_n$ , г/см <sup>3</sup>	1,97	1,95
$\rho_{II}$ , г/см <sup>3</sup>	1,97	1,94
$\rho_I$ , г/см <sup>3</sup>	1,96	1,94
$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19,31	19,11
$\gamma_{II}$ , кН/м <sup>3</sup>	19,31	19,01
$\gamma_I$ , кН/м <sup>3</sup>	19,11	19,01

Фундамент здания имеет сложную схему приложения вертикальных нагрузок и сравнительно небольшую их интенсивность.

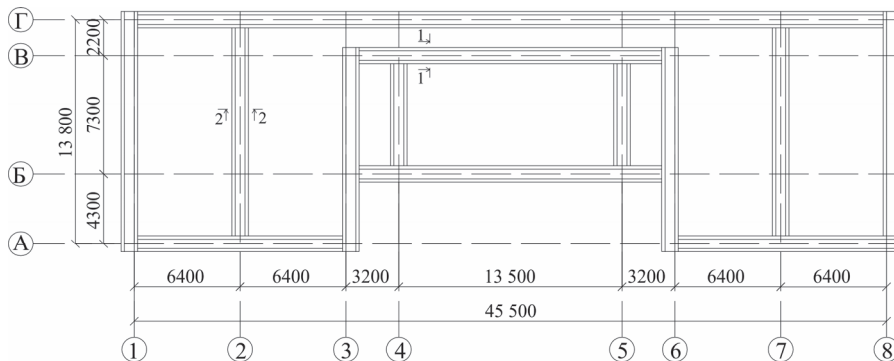


Рис. 1. План фундамента здания

Для расчета фундамента здания был выполнен сбор действующих нагрузок. Значения нормативных и расчетных нагрузок приведены в табл. 2.

Важной частью начального этапа расчета в программе PLAXIS 3D является создание геометрической модели. Модель представляет собой реальную трехмерную задачу. Основные элементы – рабочие

плоскости и геологические колонки. В условиях нашей задачи были назначены четыре рабочие плоскости на условных отметках: 0,000 м – отметка уровня земли; -1,1 м – отметка пола подвала; -2,71 м – отметка подошвы фундамента; -6,1 м – отметка верха ИГЭ-2.

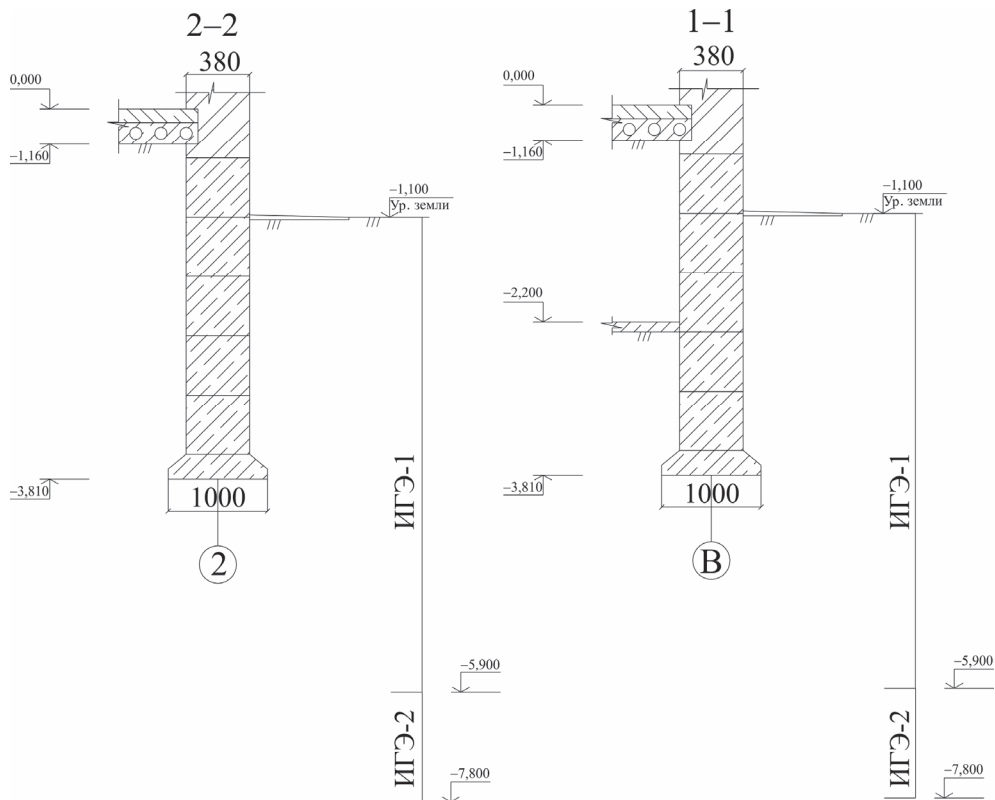


Рис. 2. Поперечный разрез фундамента здания

Таблица 2

**Значения нормативных и расчетных вертикальных нагрузок на 1 метр погонной длины фундамента по различным осям здания**

Ось	Нормативная нагрузка, кН	Расчетная нагрузка, кН
«1», «8»	105,95	119,31
«2», «7»	129,33	149,61
«3», «6»	91,02	103,81
«4», «5»	61,79	68,99
«А»	86,42	88,21
«Б»	95,01	108,75
«В»	124,51	142,78
«Г»	141,37	160,98

Рабочие плоскости позволяют задать расчетную область и содержат всю информацию о геометрической модели в вертикальном направлении.

Геологические колонки содержат информацию о напластовании грунтов и горизонте грунтовых вод. Несколько геологических колонок задают характер напластования грунтов, так как при построении трехмерной сетки положение слоев грунта определяется интерполяцией между геологическими колонками.

Ленточный фундамент мелкого заложения в геометрической модели представлен стенами с шириной, по низу равной 1,0 м, и глубиной заложения 2,71 м, характеристики материала фундамента представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

### Характеристика бетона фундамента и стен подвала

Параметр	Обозначение	Фундамент	Ед. измерения
Тип поведения	Type	–	–
Толщина	$d$	1	м
Объемный вес	$\gamma$	20	кН/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	$E$	20 500 000	кН/м <sup>2</sup>
Модуль сдвига	$G$	8 200 000	кН/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	$\nu$	0,25	–

Расчетная пространственная модель фундамента и окружающего грунта представлена на рис. 3.

На начальном этапе расчета необходимо задать фазы расчета. На начальной фазе расчетов задаются начальные условия – конфигурация модели и начальное напряженное состояние. Геологическая колонка уже содержит уровень грунтовых вод, т.е. гидростатическое давление воды. На первой фазе задается выемка грунта (глубина выемки 1,1 м) в той части, где предусмотрены подвальные помещения. И наконец, на второй фазе задаются нагрузки на фундамент. Для наглядности процесса моделирования результаты расчета могут быть визуализированы на любой стадии расчета. Так, на рис. 4 представлена деформированная схема области моделирования, а на рис. 5 – эффективные средние напряжения.

Значения величин осадок фундамента, полученные в результате пространственного моделирования с использованием программного комплекса PLAXIS 3D, представлены в табл. 4. За величины осадок фундаментов принимались вертикальные перемещения точек подошвы фундамента на середине соответствующих осей.

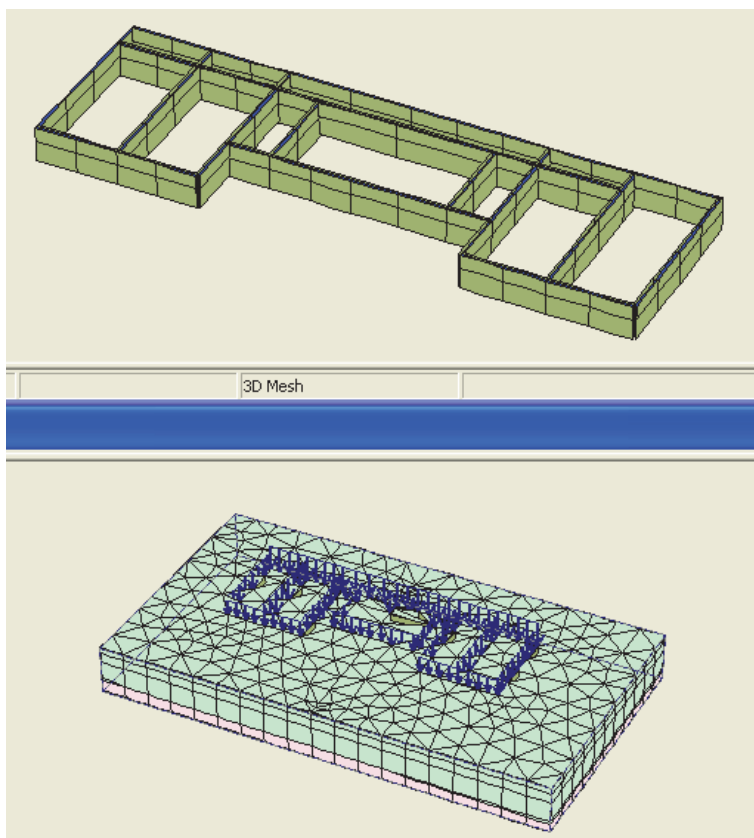


Рис. 3. Трехмерная модель фундамента и расчетной области

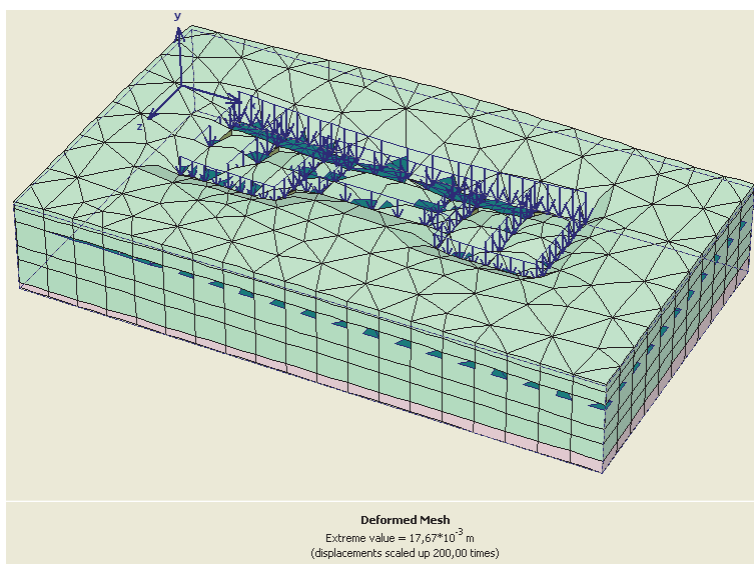


Рис. 4. Деформированная пространственная схема

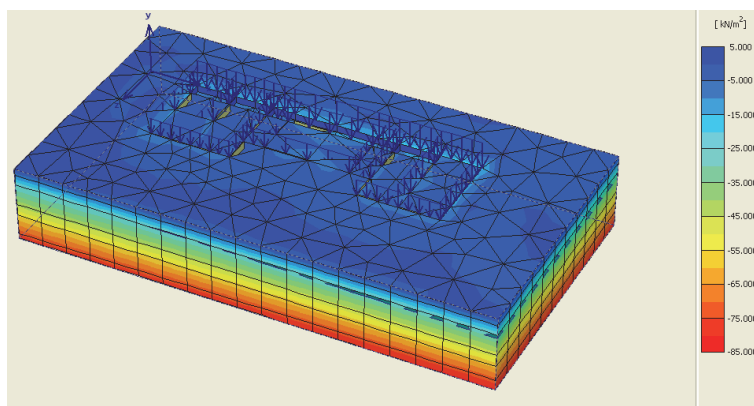


Рис. 5. Эффективные средние напряжения

Таблица 4

**Значение величины осадки и относительной разницы осадок, полученные в условиях пространственной задачи по программе PLAXIS 3D**

Ось	Осадка фундамента, м	Значение относительной разницы осадок
«1», «8»	0,012	–
«2», «7»	0,013	0,00012
«3», «6»	0,013	0,00003
«4», «5»	0,014	0,00028
«А»	0,011	–
«Б»	0,011	0,00003
«В»	0,016	0,00064
«Г»	0,018	0,00077

Согласно действующему нормативному документу СП 22.13330.2011 максимальная осадка фундамента для такого типа здания не должна превышать 0,18 м, а предельная относительная разность осадок равна 0,0024. Максимальная осадка фундамента, полученная в ходе расчета, составляет 0,018 мм, а относительная разность осадок смежных фундаментам – 0,00077, что намного меньше предельных значений.

Для оценки влияния пространственной расчетной схемы (PLAXIS 3D) на полученные результаты было выполнено их сравнение с величинами осадок, полученными аналитическим методом по СП 22.13330.2011 и МКЭ по программе PLAXIS 2D в условиях плоской задачи. В табл. 5 приведены результаты сравнения этих величин осадок фундамента. На рис. 6 представлена диаграмма сравнения величин осадок фундамента по

различным осям здания, полученных аналитическим методом по СП 22.13330.2011 и методом конечных элементов в условиях плоской (PLAXIS 2D) и пространственной (PLAXIS 3D) задач.

Таблица 5

**Результаты сравнения величин вертикальных осадок, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов**

Ось	Величина осадки, рассчитанная по СП 22.13330.2011, м [1]	Величина осадки, рассчитанная по PLAXIS 2D, м [1]	Величина осадки, рассчитанная по PLAXIS 3D, м
«1», «8»	0,019	0,021	0,012
«2», «7»	0,028	0,029	0,013
«3», «6»	0,016	0,021	0,013
«4», «5»	0,007	0,014	0,014
«А»	0,011	0,020	0,011
«Б»	0,016	0,023	0,011
«В»	0,026	0,030	0,016
«Г»	0,031	0,034	0,018

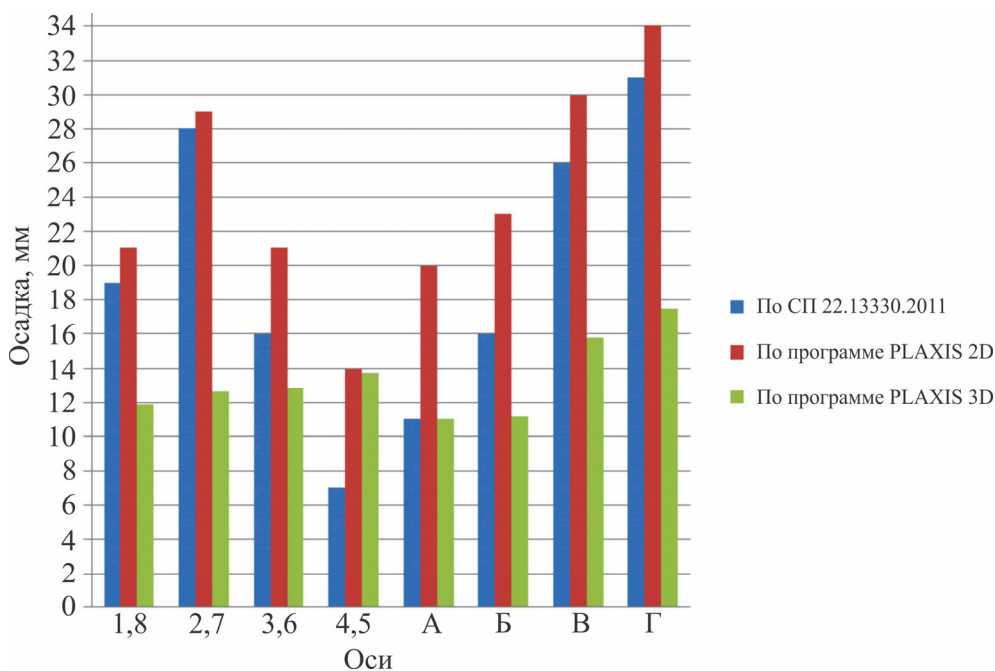


Рис. 6. Сравнение величин осадок фундамента по различным осям здания, полученных аналитическим методом по СП 22.13330.2011 и методом конечных элементов в условиях плоской и пространственной задач



Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Выполненные расчеты осадок фундаментов показали, что расчетные величины осадок и относительной разницы осадок не превышают максимальных величин, регламентированных нормативными документами.

2. Результаты сравнения расчетов осадок фундамента, выполненных по плоской деформированной схеме аналитическим методом по СП 22.13330.2011 и методом конечных элементов по программе PLAXIS 2D, показали, что их величины отличаются всего на 9–15 % для наиболее нагруженных осей [1].

3. Величины осадок фундамента, рассчитанные методом конечных элементов, в условиях пространственной задачи (PLAXIS 3D) в среднем на 41 % меньше величин осадок, полученных в условиях плоской задачи (PLAXIS 2D), что хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений.

4. Относительная разница осадок, полученная методом конечных элементов в условиях пространственной задачи, имеет значительно меньшие значения (0,00077), чем при использовании плоской задачи (0,0022) [1]. Это свидетельствует о том, что программа PLAXIS 3D принимает в расчет реальное перераспределение вертикальных напряжений, учитывая пространственную жесткость фундамента.

5. Для зданий сложной конфигурации в плане и имеющих значительную разность приложенных на фундаменты нагрузок использование программы PLAXIS 3D предпочтительнее, чем PLAXIS 2D, так как позволяет получить более точные результаты величин осадок.

### Список литературы

1. Игошева Л.А., Клевеко В.И. Сравнение результатов определения вертикальной осадки ленточного фундамента аналитическим методом и методом конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 3 (15). – С. 30–38.

2. Новодзинский А.Л., Клевеко В.И. Учет влияния толщины гофрированного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – С. 81–94.

3. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. Bartolomey, A. Bogomolov, V. Kleveko, A. Ponomaryov, V. Ofrikhter // Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Amsterdam. Netherlands, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.

4. Клевеко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2002. – 152 с.

5. Результаты исследований армогрунтовых оснований / Д.Г. Золотозубов, В.И. Клевеко, А.Б. Пономарев, Р.С. Нестеров Некоторые // Актуальные проблемы геотехники: сб. ст., посвященный 60-летию профессора А.Н. Богомолова / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2014. – С. 165–171.

6. Клевеко В.И., Татьянников Д.А., Драчева Е.О. Сравнение модельных штамповых испытаний и расчетов по методу конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 170–179.

7. Клевеко В.И. Исследование работы армированных глинистых оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 101–110.

8. Татьянников Д.А., Клевеко В.И. Влияние сжимаемости армирующего материала на осадку фундамента при штамповых модельных испытаниях на примере геокомпозита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 124–132.

9. Клевеко В.И. Оценка величины осадки фундамента на глинистых основаниях, армированных горизонтальными прослойками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 89–98.

10. Ponomaryov A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas // Geotextiles and Geomembranes. – 2014. – Vol. 42. – P. 48–51.

11. Бургутдинов А.М., Клевеко В.И. Образование морозобойных трещин на автомобильных дорогах // Сборник научных трудов Sworld. – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 32–39.

12. Клевекко В.И. Определение расчетного сопротивления грунтового основания, армированного горизонтальной прослойкой // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – 2002. – № 1. – С. 53–56.

13. Клевекко В.И. Осадка фундамента на армированном грунтовом основании // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – 2002. – № 1. – С. 46–49.

14. Клевекко В.И. Влияние глубины заделки и модуля деформации армирующей прослойки на несущую способность армированных грунтовых оснований // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – 2001. – № 1. – С. 71–76.

15. Татьянников Д.А., Клевекко В.И. Исследование характера зависимости «деформация – линейная жесткость» для разных типов геосинтетических материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 165–172.

### References

1. Igosheva L.A., Kleveko V.I. Sravnenie rezul'tatov opredeleniia vertikal'noi osadki lentochnogo fundamenta analiticheskim metodom i metodom konechnykh elementov [The comparison of calculations vertical deformations of strip foundation by the analytical method and the method of finite elements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2014, no. 3 (15), pp. 30-38.

2. Novodzinskii A.L., Kleveko V.I. Uchet vliianiia tolshchiny gofrirovannogo elementa na prochnost' i ustoichivost' metallicheskoj vodopropusknoi truby [The influence of the thickness of the bellows unit to the strength and stability of the metal culvert account]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, pp. 81-94.

3. Bartolomey A., Bogomolov A. Kleveko V., Ponomaryov A., Ofrikhter V. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals. *Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Amsterdam. Netherlands, 1999, vol. 2, pp. 1197-1202.

4. Kleveko V.I. Otsenka napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia armirovannykh osnovanii v pylevato-glinistykh gruntakh [The stress-strain state of reinforced bases in silty clay soils is estimated]. Thesis of Ph.D. degree dissertation, Perm', 2002, 152 p.

5. Zolotozubov D.G., Kleveko V.I., Ponomarev A.B., Nesterov R.S. Nekotorye rezul'taty issledovaniia armogruntovykh osnovanii [Some results of investigations of reinforced soil bases]. *Sbornik statei, posviashchennyi 60-letiiu professora A.N. Bogomolova "Aktual'nye problemy geotekhniki"*. Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014, pp. 165-171.

6. Kleveko V.I., Tat'iannikov D.A., Dracheva E.O. Sravnenie model'nykh shtampovykh ispytaniia i raschetov po metodu konechnykh elementov [Comparison of model tests and calculations finite element method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 170-179.

7. Kleveko V.I. Issledovanie raboty armirovannykh glinistykh osnovanii [Research of the work of reinforced clay soils]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 101-110.

8. Tat'iannikov D.A., Kleveko V.I. Vliianie szhimaemosti armiruiushchego materiala na osadku fundamenta pri shtampovykh model'nykh ispytaniiax na primere geokompozita [The compressibility reinforcements on precipitation fundament die model tests, the example of geocomposite]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 2, pp. 124-132.

9. Kleveko V.I. Otsenka velichiny osadki fundamenta na glinistykh osnovaniiax, armirovannykh gorizontальnymi prosloikami [The settlement of foundation on clay base reinforced with horizontal layers is estimated]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2012, no. 1, pp. 89-98.

10. Ponomaryov A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, vol. 42, pp. 48-51.

11. Burgonutdinov A.M., Kleveko V.I. Obrazovanie morozoboinykh treshchin na avtomobil'nykh dorogakh [Occurrence of frost cracks on roads]. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld*, 2011, vol. 3, no. 4, pp. 32-39.

12. Kleveko V.I. Opredelenie raschetnogo soprotivleniia gruntovogo osnovaniia, armirovannogo gorizontālnoi prosloikoii [Determination of the design resistance of soil foundation reinforced with horizontal layer]. *Osnovaniia i fundamenti v geologicheskikh usloviiax Urala*, 2002, no. 1, pp. 53-56.

13. Kleveko V.I. Osadka fundamenta na armirovannom gruntovom osnovanii [Foundation settlement on reinforced ground base]. *Osnovaniia i fundamenti v geologicheskikh usloviakh Urala*, 2002, no. 1, pp. 46-49.

14. Kleveko V.I. Vliianie glubiny zadelki i modul'ia deformatsii armiruiushchei prosloiki na nesushchuiu sposobnost' armirovannykh gruntovykh osnovanii [Influence of depth location and of the deformation modulus of the reinforcing layer on the bearing capacity of reinforced soil foundations]. *Osnovaniia i fundamenti v geologicheskikh usloviakh Urala*, 2001, no. 1, pp. 71-76.

15. Tat'ianikov D.A., Kleveko V.I. Issledovanie kharaktera zavisimosti "deformatsiia – lineinaia zhestkost'" dlia raznykh tipov geosinteticheskikh materialov [Study of the nature of dependence "strain – linear stiffness" for different types geosynthetics]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznediel'nosti*, 2013, no. 1, pp. 165-172.

Получено 14.11.2014

#### Сведения об авторах

**Игошева Любовь Александровна** (Пермь, Россия) – инженер производственно-технического отдела ООО «Сити-Строй» (614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 62, e-mail: 13lubashka@mail.ru).

**Клевеко Владимир Иванович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vlivkl@pochta.ru).

#### About the authors

**Igosheva Lubov Aleksandrovna** (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Production and Technical, Ltd “Siti-Stroi” (62, Komsomolsky av., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: 13lubashka@mail.ru).

**Kleveko Vladimir Ivanovich** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vlivkl@pochta.ru).