DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.02

УДК 624.154.1

А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПЕСЧАНИКОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В PLAXIS

Данная работа является продолжением исследований строительных свойств грунтов пермского возраста. Исследование показало, что пермские песчаники и аргиллитоподобные глины обладают схожими физическими свойствами и состоят из пелитовых и псаммитовых частиц, сцементированных глинистым и карбонатным цементом. Цель работы – экспериментально исследовать анизотропную деформируемость песчаника и выполнить численное моделирование напряженно-деформированного состояния песчаников с применением Plaxis. Деформационная анизотропия в геотехнике представляет интерес при расчете осадок и несущей способности грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений. Авторы выполнили анализ результатов прессиометрических испытаний и статических испытаний штампом площадью 600 см². Серия полевых экспериментов позволила изучить деформируемость песчаников в горизонтальном и вертикальном направлении. Было выявлено, что деформируемость песчаника в вертикальной плоскости более чем в 2 раза превышает горизонтальную деформируемость. Это означает, что под нагрузкой от зданий и сооружений в песчанике будет наблюдаться анизотропное напряженное состояние. Авторами были получены значения параметров для модели трещиноватой анизотропной скалы (Jointed Rock model), реализованной в Plaxis. Большое внимание уделено численному моделированию указанных тестов. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с тестами, подтверждая численные методы, реализованные в модели Jointed Rock model. Данная модель может быть использована в качестве практического инструмента анализа напряженно-деформированного поведения анизотропной пермского песчаника. Данную работу можно оценивать как предварительную верификацию полученных значений параметров для модели Jointed Rock model, реализованной в Plaxis. В ходе дальнейших исследований авторами планируется моделирование работы фундаментов, основанием которых являются пермские песчаники и аргиллитоподобные глины, для решения различных геотехнических задач.

Ключевые слова: песчаник, фундамент, анизотропия, метод конечных элементов, Plaxis, Jointed Rock model, прессиометрическое испытание, штамповое испытание, модуль деформации, напряженно-деформированное состояние.

A.B. Ponomarev, E.N. Sychkina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE APPLICATION OF RESEARCH RESULTS ANISOTROPIC DEFORMABILITY SANDSTONES FOR NUMERICAL MODELING IN PLAXIS

This paper is a continuation of the research construction properties of soils Permian age. The study showed that the Permian sandstones and claystones have similar physical properties and are composed of pelitic and psammitic particles cemented with clay and carbonate cement. Purpose – to experimentally investigate the anisotropic deformability sandstone and to perform numerical modeling stress-strain state of sandstones using Plaxis. Strain anisotropy in geotechnics is of interest when calculating settlements and the ground base bearing capacity of a building foundation. The authors carried out an analysis of the results pressuremeter tests and static stamp tests area of 600 cm². The number of field experiments allowed to study the deformability of sandstone in horizontal and vertical direction. It was found that the deformability of the sandstone in the vertical plane more in 2 times than the horizontal deformability. This means that under the load of buildings and constructions in the sandstone will be observed anisotropic stress state. Authors have obtained values of the parameters for the anisotropic model of fractured rock (Jointed Rock model), realized in Plaxis. Much attention is given to numerical modeling of these tests. The results of numerical modeling are in good agreement with the tests, confirming the numerical methods implemented in Jointed Rock model. This model can be used as a practical tool for the analysis of the stress-strain behavior of anisotropic Permian sandstone. This work can be viewed as a preliminary verification of the parameters for the Jointed Rock model, realized in Plaxis. In further studies, the authors plan to modeling of foundations, basis of which is Permian sandstone and claystone for solve various geotechnical problems.

Keywords: sandstone, foundation, anisotropy, finite element method, Plaxis, Jointed Rock model, pressuremeter tests static stamp test, modulus of deformation, stress-strain state.

Деформационная анизотропия природных грунтов активно исследуется во многих странах с начала прошлого века. В работах А.К. Бугрова [1], Л.В. Нуждина [2], В.И. Осипова [3], L. Barden [4], W. Lam [5], S. Salager [6], F. Zhang [7], G. Zhiwei [8] было доказано, что большинство грунтов обладают поперечной анизотропией в результате процесса осадконакопления. Эксперименты показали, что свойства грунтов обычно зависят от направления, в котором они измерены. Эта особенность механического поведения (а также других аспектов, таких как фильтрация воды, теплопроводность и другие) происходит в результате микро- и макроструктурных факторов. Особые направления определены на микроуровне в процессе формирования глины через структуру, текстуру, кристаллографию или размеры зерна; а на макроуровне – через слоистость и трещины.

Ранее в работах А.Б. Пономарева и Е.Н. Сычкиной [9–12] уже рассматривались особенности деформирования пермских аргиллито-

подобных глин, а также определялись параметры, необходимые для численного моделирования напряженно-деформированного состояния аргиллитоподобных глин в Plaxis. По простиранию и глубине пермские аргиллитоподобные глины и песчаники переслаиваются между собой слоями различной мощности. В связи с этим вся толща грунтов пермского возраста рассматривается при инженерно-геологических и геотехнических исследованиях как единый инженерно-геологический элемент, внутри которого выделяются литологические слои со своими механическими свойствами. Указанная особенность геологического строения массива пермских отложений приводит к необходимости исследования механических свойств песчаников, в отличие от аргиллитоподобных глин, пока недостаточно изученных у нас в стране. Среди зарубежных геотехников, занимающихся проблемой анизотропных свойств песчаников нечетвертичного возраста, можно отметить N. Farrell [13], L. Louis [14] и др. Большое внимание при исследовании анизотропных свойств песчаников уделяется слоистости и основному направлению трещиноватости.

Цель работы – выполнить численное моделирование напряженно-деформированного состояния песчаников с применением полученных в исследовании деформационных параметров.

Для достижения указанной цели авторами были поставлены следующие задачи:

- 1) изучить особенности физических свойств и строения песчаника, сравнить с аргиллитоподобной глиной;
- 2) привести методику исследования анизотропии механических свойств песчаников, полученные результаты сравнить с результатами исследования анизотропии аргиллитоподобных глин;
- 3) выполнить моделирование в программном комплексе Plaxis с помощью модели Jointed Rock model с применением полученных в исследовании значений механических и физических параметров песчаника, выполнить верификацию расчетов.

1. Физические свойства и особенности строения песчаника и аргиллитоподобной глины

Песчаники и аргиллитоподобные глины пермского возраста отличаются от современных песков и глин. Строение аргиллитоподобных глин характеризуется наличием пелитовых и мелкоалевритовых

кластических частиц, покрытых пленками и сцементированных в однородную массу. Макроскопически аргиллитоподобная глина представляет собой плотную, массивную породу коричневого цвета и состоит из глинистого материала с примесями карбонатов, пропитанного оксидами железа (рис. 1).

Термографическая характеристика аргиллитоподобной глины свидетельствует о присутствии в них монтмориллонита, хлорита, гипса, доломита, кальцита. Пленочные и цементирующие вещества (монтмориллонит, хлорит, гидроксиды железа) в сумме составляют до 70 % от массы породы [9]. Особенности физических свойств аргиллитоподобной глины определяются значительным содержанием монтмориллонита в состоянии застаревшего коллоида. С потерей естественной влажности монтмориллонит сжимается, что приводит к появлению в породе микротрещин. Погружение в воду в таком состоянии вызывает расклинивание водой породы на мелкие кусочки по неправильным криволинейным поверхностям.

Пермские песчаники бывают мелко-, крупно- и среднезернистыми. Структура песчаника псаммитовая, текстура – массивная, обломки угловатые и угловато-окатанные размером от 0,1 до 0,6 мм с преобладанием 0,1–0,3 мм. Содержание обломочного материала в среднем 50–85 %. Минералогический состав обломочного материала: кварц – 10–15 %, альбит – 3–5 %, полевые шпаты 5–8 %, биотит и эпидот – менее 1 %, обломки эффузивных пород – 15–28 %, глинистые обломки – 5–8 %, известняк – 2 %. Цемент карбонатный мелкозернистый, глинисто-карбонатный – пелитоморфный, кальцитовый – средне- и мелкозернистый. Тип цемента – покровный, базальный. Масса цемента буровато-серая из-за присутствия гидроксидов железа (рис. 2). Содержание меди в песчаниках 0,003–0,007 %. До глубины 20,0–25,0 м песчаники сильновыветрелые, часто до состояния рухляков. Слоистость горизонтальная. В замоченном состоянии песчаник распадается на куски при незначительном усилии.

На основании результатов лабораторных и полевых работ, представленных в архивных отчетах ОАО «ВерхнекамТИСИЗ», а также исследований автора [9], были определены физические характеристики песчаника и аргиллитоподобной глины (табл. 1).

В табл. 1 показано, что плотность песчаника превышает плотность аргиллитоподобной глины, а коэффициент пористости меньше. Согласно ГОСТ 25100–2011 пермские песчаники и аргиллитоподобные

Рис. 1. Аргиллитоподобная глина

Рис. 2. Песчаник

Таблица 1

Физические характеристики аргиллитоподобной
глины и песчаника

Грунт	Плотность, г/см ³	Влажность, д.е.	Коэффициент пористости, д.е.	Степень водона- сыщения, д.е.
Аргиллитоподобная глина	2,01	0,20	0,65	0,83
Песчаник	2,20	0,12	0,45	0,96

глины по пределу прочности на одноосное сжатие можно отнести к полускальным грунтам очень низкой прочности ($R_c < 0,5$ МПа). Подземные воды в песчаниках и аргиллитоподобных глинах циркулируют по трещинам. Среднее значение коэффициента фильтрации составляет 2–3 м/сут.

Указанные в данном разделе физические характеристики и характеристики фильтрации были использованы при моделировании напряженно-деформированного состояния песчаника в программном комплексе Plaxis. Помимо физических характеристик в работе рассмотрены механические параметры песчаника в горизонтальном и вертикальном направлениях.

2. Методика исследований деформационной анизотропии

Целью экспериментального исследования было изучение деформируемости песчаника в горизонтальной плоскости и нормальной к ней (в вертикальной плоскости) в сравнении с деформируемостью аргиллитоподобной глины. В процессе изучения были определены следующие деформационные свойства песчаников: прессиометрический модуль деформации E_x , штамповый модуль деформации E_z , модуль сдвига G_z . Расчет указанных параметров был выполнен согласно ГОСТ 20276–2012 и ГОСТ 12248–2010.

Полевые испытания использовались для расчета коэффициента анизотропии:

$$a = \frac{S_x}{S_z},$$

где S_x – среднее значение абсолютных горизонтальных деформаций песчаника, мм; S_z – среднее значение абсолютной вертикальной деформации песчаника, мм.

Полевые исследования деформационной анизотропии песчаника состояли из испытаний статической нагрузкой плоским штампом площадью 600 см² и прессиометрических испытаний в скважинах, схемы которых представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Полевые эксперименты позволили изучить деформационную анизотропию песчаников: статические испытания штампом в скважинах позволили оценить деформацию грунта в вертикальной плоскости, а испытания радиальным прессиометром в скважинах позволили определить деформационные свойства песчаника в горизонтальной плоскости.

Испытания статическими нагрузками жестким круглым штампом с плоской подошвой площадью 600 см² производились в скважинах диаметром 325 мм (см. рис. 3). В работе проанализированы результаты двух штамповых испытаний, выполненных на одной из строительных площадок г. Перми. Глубина испытаний составляла 8,4 и 8,8 м. Нагружение штампов осуществлялось гидравлическим домкратом, замеры осадок выполнялись прогибомерами с ценой деления 0,01 мм. Нагрузка на грунт передавалась ступенями по 0,05 МПа. Максимальная нагрузка на штамп составила 0,5 МПа.

Рис. 3. Схема испытания плоским штампом в скважине

Рис. 4. Схема прессиометрического опыта

Прессиометрические испытания грунта являются аналогом штамповых испытаний, при которых нагрузка передается через гибкую поверхность зонда прессиометра на стенки скважины (см. рис. 4). В работе использованы данные восьми прессиометрических испытаний песчаников. Глубина испытаний составляла 14,0–22,0 м. Испытания были выполнены прессиометром Д-76.

Все экспериментальные площадки имели геологическое строение, соответствующее типичной геологической структуре г. Перми. На площадках песчаники были перекрыты слоями аллювиальных современных глин и песков. Штамповые и прессиометрические испытания производились при природной влажности песчаников.

3. Результаты исследований деформационной анизотропии

В результате выполненных экспериментов были получены деформации песчаника в горизонтальном (S_x) и вертикальном (S_z) направлении для каждой ступени нагружения, рассчитаны коэффициенты анизотропии (табл. 2).

Таким образом, средние значения коэффициентов анизотропии песчаника и аргиллитоподобной глины достаточно близки и составля-

ют соответственно 0,41 и 0,39. Это означает, что пермские песчаники обладают анизотропной деформируемостью: деформируемость песчаника в вертикальной плоскости более чем в 2 раза превышает горизонтальную деформируемость.

Таблица 2

Значения деформаций аргиллитоподобной глины и песчаника по результатам штамповых и прессиометрических испытаний

Нагрузка, МПа	Аргиллитоподобная глина			Песчаник		
	S_z , мм	S_x , мм	S_x/S_z	S_z , мм	S_x , мм	S_x/S_z
0,1	1,23	0,60	0,49	0,10	0,07	0,68
0,2	1,90	0,70	0,37	0,31	0,15	0,50
0,3	2,38	0,88	0,37	0,70	0,24	0,35
0,4	2,74	1,00	0,36	1,14	0,31	0,27
0,5	2,96	1,09	0,37	1,63	0,41	0,25

Расчеты модуля штампового модуля деформации (E_z), модуля сдвига (G_z) и прессиометрического модуля деформации (E_x) были выполнены для нагрузок в диапазоне от 0 до 0,5 МПа и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Нормативные значения деформационных параметров песчаника по результатам штамповых и прессиометрических испытаний

Интервал нагружения от p_i до p_{i+1} , МПа	E_z , МПа	E_x , МПа	G_z , МПа
0,0–0,1	202,9	80,3	79,87
0,1–0,2	96,6	62,8	38,03
0,2–0,3	52,7	62,6	20,75
0,3–0,4	45,6	84,8	17,95
0,4–0,5	41,8	54,7	16,47

В табл. 3 показано, что значения модулей деформации в различном направлении для песчаника отличаются. Это означает, что под нагрузкой от зданий и сооружений в песчанике будет наблюдаться анизотропное напряженное состояние. Для наглядного отображения получаемых эпюр для песчаников при испытаниях прессиометром и плоским штампом в скважинах был использован программный комплекс Plaxis.

4. Параметры, принятые при моделировании в Plaxis

В табл. 4 и 5 приводятся усредненные геологические условия площадок штамповых и прессиометрических испытаний, принятые при моделировании испытаний в программном комплексе Plaxis, где γ_{dry} – удельный вес грунта природной влажности; γ_{wet} – удельный вес грунта в полностью водонасыщенном состоянии; E – модуль общей деформации; ν – коэффициент Пуассона; c – удельное сцепление грунта; ϕ – угол внутреннего трения; Ψ – угол дилатансии. Средняя глубина штамповых и прессиометрических испытаний составила 8,6 м и 18,0 м соответственно.

В табл. 4 даны параметры для ИГЭ, перекрывающих песчаник, при моделировании штампового испытания. Параметры аргиллитоподобной глины приводятся согласно данным, представленным ранее в работах авторов [9, 10]. Уровень грунтовых вод при штамповом опыте составлял 2,9 м. Природное давление на глубине моделируемого штампового испытания составило 180 кПа.

Таблица 4

Геологические условия и параметры грунтов, принятые
для моделирования штампового опыта

Описание	Глубина залегания подошвы слоя, м	Модель грунта	γ_{dry} , кН/м ³	γ_{wet} , кН/м ³	E , кН/м ²	ν	c , кПа	ϕ , град	Ψ , град
Насыпной грунт	2,6	Mohr-Coulomb	19,0	20,0	5000	0,3	6,0	20	0
Песок	3,5	Mohr-Coulomb	19,0	21,0	10 000	0,3	7,0	33	0
Аргиллитоподобная глина	6,8	Jointed Rock model	21,0	22,0	48 240 (E_1) 24 000 (E_2)	0,28	25,0	26	0

В табл. 5 приводятся параметры для ИГЭ, перекрывающих песчаник, при прессиометрическом испытании. Природное давление на глубине моделируемого прессиометрического испытания составило 300 кПа. Уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 1,0 м.

Штамповые и прессиометрические испытания моделировались непосредственно в песчанике с применением модели Jointed Rock model. Параметры для Jointed Rock model: удельный вес в ненасыщен-

ном водой состоянии $\gamma_{\text{dry}} = 22,0 \text{ кН/м}^3$; в насыщенном водой состоянии $\gamma_{\text{wet}} = 23,0 \text{ кН/м}^3$; удельное сцепление $c = 12,2 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения $\varphi = 32^\circ$; угол дилатансии $\Psi = 0^\circ$. Деформационные параметры для штампового испытания принимались по табл. 3 в интервале 0,3–0,4 МПа: модуль деформации $E_1 = 84\,800 \text{ кПа}$; коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,27$; модуль деформации $E_2 = 45\,600 \text{ кПа}$; коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0,27$; модуль сдвига $G_2 = 17\,950 \text{ кПа}$. Деформационные параметры для прессиометрического испытания принимались по табл. 3 в интервале 0,4–0,5 МПа: модуль деформации $E_1 = 54\,700 \text{ кПа}$; коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,27$; модуль деформации $E_2 = 41\,800 \text{ кПа}$; коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0,27$; модуль сдвига $G_2 = 16\,470 \text{ кПа}$.

Таблица 5

Геологические условия и параметры грунтов,
принятые для моделирования прессиометрического опыта

Описание	Глубина залегания подошвы слоя, м	Модель грунта	γ_{dry} , кН/м ³	γ_{wet} , кН/м ³	E , кН/м ²	ν	c , кПа	φ , град	Ψ , град
Насыпной грунт	0,5	Mohr-Coulomb	18	19	7500	0,3	6,0	32	0
Песок	1,5	Mohr-Coulomb	19	20	9000	0,3	7,0	33	0
Супесь	4,5	Mohr-Coulomb	21	22	15 200	0,3	10,0	29	0
Песок средней крупности	11,0	Mohr-Coulomb	21	22	13 000	0,3	6,0	30	0
Песок гравелистый	13,5	Mohr-Coulomb	20	21	10 500	0,3	4,0	33	0
Гравийный грунт	15,5	Mohr-Coulomb	21	22	20 000	0,3	6,0	35	0

5. Результаты численного моделирования в Plaxis и их верификация

Результаты расчета максимальных вертикальных перемещений песчаника при моделировании штампового и прессиометрического опытов представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Приведенные изолинии перемещений позволяют наглядно показать развитие деформаций при различных условиях нагружения.

Из рис. 5 видно, что максимальные перемещения наблюдаются под центром штампа. В результате численного моделирования полевых

Рис. 5. Изолинии вертикальных перемещений песчаника при штамповом опыте

Рис. 6. Изолинии горизонтальных перемещений песчаника при прессиометрическом опыте

испытаний штампом песчаника было получено максимальное перемещение поверхности грунта, равное 1,28 мм. По данным полевых опытов среднее значение вертикального перемещения при этой же нагрузке составило 1,14 мм.

Максимальные перемещения поверхности песчаника были зафиксированы вблизи камеры прессиометра. Максимальное перемещение поверхности песчаника составило 0,42 мм. По данным полевых опытов, среднее значение горизонтального перемещения при этой же нагрузке составило 0,41 мм.

В целом расчет с применением численных методов позволил получить максимальные перемещения поверхности песчаника, достаточно близкие к результатам полевых испытаний. Можно говорить о возможности использования расчетов численными методами, реализованными в Plaxis, для оценки напряженно-деформированного состояния песчаника в полевых условиях с применением модели Jointed Rock model и параметров деформируемости, полученных в данном исследовании.

Выводы

1. Исследование показало, что пермские песчаники и аргиллитоподобные глины обладают схожими физическими свойствами и состоят из пелитовых и псаммитовых частиц, сцементированных глинистым и карбонатным цементом. Песчаники разрушены выветриванием до состояния рухляков и в замоченном состоянии распадаются на куски при незначительном усилии. Указанные особенности отличают песчаники пермского возраста от современных песков.

2. Экспериментально в лабораторных и полевых условиях установлено, что для пермских песчаников и аргиллитоподобных глин характерны анизотропные деформационные свойства. Средние значения коэффициентов анизотропии песчаника и аргиллитоподобной глины составили 0,41 и 0,39 соответственно. Это означает, что деформируемость песчаника в вертикальной плоскости более чем в 2 раза превышает горизонтальную деформируемость, и под нагрузкой от зданий и сооружений в песчанике будет наблюдаться анизотропное напряженное состояние.

3. Выполненное численное моделирование наглядно показало развитие деформаций в песчанике в горизонтальной и вертикальной плоскости. Результаты расчета деформаций песчаника в Plaxis с при-

менением модели Jointed Rock model хорошо согласуются с результатами полевых испытаний. Можно говорить о возможности применения на практике расчетов численными методами, реализованными в Plaxis, для моделирования напряженно-деформированного состояния песчанников при штамповых и прессиометрических испытаниях. Данную работу можно оценивать как предварительную верификацию полученных значений параметров для модели Jointed Rock model, реализованной в Plaxis. В ходе дальнейших исследований авторы планируют моделирование работы фундаментов, основанием которых являются пермские песчанки и аргиллитоподобные глины, для решения различных геотехнических задач.

Библиографический список

1. Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. – СПб.: Недра, 1993. – 245 с.
2. Нуждин Л.В., Коробова О.А., Нуждин М.Л. Практический метод расчета осадок фундаментов с учетом деформационной анизотропии грунтов основания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 246–264. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.4.20>
3. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. – М.: ГЕОС, 2013. – 576 с.
4. Barden L. Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil // Geotechnique. – 1963. – Vol. 13, № 3. – P. 798–210.
5. Lam W., Tatsuoka F. Effects of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics of sand // Soils and Foundations. – 1988. – Vol. 28 (1). – P. 89–106.
6. Constitutive analysis of the mechanical anisotropy of Opalinus Clay / S. Salager [et al.] // Acta Geotechnica. – 2013. – Vol. 8, iss. 2. – P. 137–154.
7. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone / F. Zhang [et al.] // Applied Clay Science. – 2012. – No. 69. – P. 79–86.
8. Zhiwei G., Jidong Z. Efficient approach to characterize strength anisotropy in soils // Journal of Engineering Mechanics. – 2012. – Vol. 138, no. 12. – P. 1447–1456.

9. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Некоторые результаты применения анизотропной модели грунта для численного моделирования напряженно-деформированного состояния аргиллитоподобной глины // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2014. – № 38 (57). – С. 49–64.

10. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. К вопросу прогноза осадки свайных фундаментов, опирающихся на аргиллитоподобные глины (на примере г. Перми) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 91–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.2.05>

11. Ponomarev A., Sychkina E. Settlement Prediction of Foundations on Argillite-Like Soils (as Exemplified by the Perm Region) // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2014. – Vol. 51 (3). – P. 111–116. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11204-014-9263-y>

12. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Сопоставление механических свойств аргиллитов раннепермского возраста по результатам полевых и лабораторных испытаний // Вестник МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 55–63.

13. Farrell N., Healy D., Taylor C. Anisotropy of permeability in faulted porous sandstones // Journal of Structural Geology. – 2014. – No. 63. – P. 50–67. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2014.02.008>

14. Louis L., Baud P., Wong T. Microstructural Inhomogeneity and Mechanical Anisotropy Associated with Bedding in Rothbach Sandstone // Pure appl. geophys. – 2009. – No. 166. – P. 1063–1087. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-009-0486-1>

References

1. Bugrov A.K. Golubev A.I. Anizotropnye grunty i osnovaniia sooruzhenii [Anisotropic soils and foundation structures]. Saint-Petersburg: Nedra, 1993. 245 p.

2. Nuzhdin L.V., Korobova O.A., Nuzhdin M.L. Prakticheskii metod rascheta osadok fundamentov s uchetom deformatsionnoi anizotropii grunтов osnovaniia [The practical calculation method of foundation settlements with regard strain anisotropy of the soil basement]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2014, no. 4. pp. 246–264. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.4.20>

3. Osipov V.I., Sokolov V.N. Gliny i ikh svoistva. Sostav, stroenie i formirovanie svoistv [Clays and their properties. The composition, structure and formation properties]. Moscow: GEOS, 2013. 576 p.
4. Barden L. Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil. *Geotechnique*, 1963, vol. 13, no. 3, pp. 798-210.
5. Lam W., Tatsuoka F. Effects of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics of sand. *Soils and Foundations*. 1988, no. 28 (1), pp. 89-106.
6. Salager S. [et al.]. Constitutive analysis of the mechanical anisotropy of Opalinus Clay. *Acta Geotechnica*, 2013, vol. 8, iss. 2, pp. 137-154.
7. Zhang F. [et al.] Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone. *Applied Clay Science*, 2012, no. 69, pp. 79-86.
8. Zhiwei G., Jidong Z. Efficient approach to characterize strength anisotropy in soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, vol. 138, no. 12, pp. 1447-1456.
9. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Nekotorye rezul'taty primeneniia anizotropnoi modeli grunta dlia chislennogo modelirovaniia napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia argillitopodobnoi gliny [Some results of using anisotropic soil model for the numerical modeling of the stress-strain state of claystone]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya "Stroitelstvo i arkhitektura"*, 2014, no. 38, (57). pp. 49-64.
10. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. K voprosu prognoza osadki svainykh fundamentov, opiraiushchikhsia na argillitopodobnye gliny (na primere goroda Permi) [To question of forecast settlement of piles foundations, based on claystone (for example, city Perm)]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 2, pp. 91-105. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.2.05>
11. Ponomarev A., Sychkina E. Settlement Prediction of Foundations on Argillite-Like Soils (as Exemplified by the Perm Region). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, no. 51 (3), pp. 111-116. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11204-014-9263-y>
12. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Sopostavlenie mekhanicheskikh svoistv argillitov rannepermskogo vozrasta po rezul'tatam polevykh i laboratornykh ispytanii [Comparison of mechanical properties of mudstones early Permian age on the results of field and laboratory tests]. *Vestnik*

Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta, 2013, no. 2, pp. 55-63.

13. Farrell N., Healy D., Taylor C. Anisotropy of permeability in faulted porous sandstones. *Journal of Structural Geology*, 2014, no. 63, pp. 50-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2014.02.008>

14. Louis L., Baud P., Wong T. Microstructural Inhomogeneity and Mechanical Anisotropy Associated with Bedding in Rothbach Sandstone. *Pure appl. Geophys*, 2009, no. 166, pp. 1063-1087. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-009-0486-1>

Получено 16.01.2015

Сведения об авторах

Пономарев Андрей Будимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: spstf@pstu.ru).

Сычкина Евгения Николаевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aspirant123@mail.ru).

About the authors

Andrei B. Ponomarev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komso-molsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: spstf@pstu.ru).

Evgeniia N. Sychkina (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komso-molsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aspirant123@mail.ru).