

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.04

УДК 624.131.4

М. Метс¹, В. Леппик²¹Geoengineering Ltd, Таллин, Эстония²Estonian University of Life Sciences, Тарту, Эстония**ВСЕ ЛИ НАМ ИЗВЕСТНО О ПЕСКЕ?**

Песок в геотехнической практике часто рассматривается как среда, состоящая из отдельных зерен. Свойства этой среды зависят от трения между зернами. В литературе и даже нормативных документах механические свойства крупных песков намного выше, чем пылеватых. Полевые испытания песков часто дают несоответствующие вышеприведенной практике результаты. В действительности песок, как любая среда, имеет свою геологическую историю. В ходе геологических процессов формируются гранулометрический состав, примеси и плотность песков, образуются связи между зернами. Все это в совокупности формирует несущую способность песков и их деформируемость. В статье приведены данные о полевых испытаниях песков различного генезиса, которые показывают, что геологическая история влияет на формирование несущей способности песков.

Существенно влияют на поведение песков примеси, природное органическое вещество, а также загрязнение нефтепродуктами, органическими веществами и особенно бактериальное загрязнение. Приведены зависимости между порогом польуемости и предельным состоянием и доказано, что эти величины не имеют постоянного соотношения и, соответственно, постоянного коэффициента запаса.

Ключевые слова: песок, плотность, несущая способность, органическое вещество, геологическая история, загрязнение, бактериальное загрязнение.

M. Mets¹, V. Leppik²¹Geoengineering Ltd, Tallinn, Estonia²Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia**DO WE KNOW ALL ABOUT THE SAND?**

Sand in geotechnical practice is often regarded as a medium consisting of individual grains. The properties of this medium depends on the friction between grains. In the literature, and even regulatory documents, mechanical properties of Sands on large lot above than silty Sands. Field tests of Sands often give inappropriate practice the above results. In fact the sand as any environment has its geological history. The entrance is formed by geological processes granular composition, impurities and density of Sands. During geological processes formed the connection between the grains. All this together forms the bearing capacity of the Sands and their deformability. In this paper, the data on field tests of Sands of different Genesis that show that the geological history affects the formation of the bearing capacity of Sands.

Greatly influences the behavior of admixtures of sand, natural organic substance. Strongly affects the behavior of sand contaminated with oil products, organic chemicals and especially strongly influenced by bacterial contamination. In the work the dependences between the threshold and limit polzuemoy condition and it is demonstrated that these quantities have a constant ratio, respectively, constant and permanent factor.

Keywords: sand, density, bearing capacity, organic matter, geologic history, pollution, bacterial contamination.

Песок состоит из отдельных зерен, и его свойства зависят от гранулометрического состава и плотности сложения. Чем крупнее зерна и плотнее сложение, тем выше несущая способность песков. Это связано с результатами лабораторных опытов, показывающих, что коэффициент пористости крупных песков меньше, чем пылеватых, – значит, они плотнее. Но в действительности они могут иметь одинаковую степень плотности (по Терцаги или по Проктору).

При оценке прочности плотных песков часто используют плоскостной срез, при котором угол внутреннего трения крупных песков выше, чем пылевых. При стабилметрических испытаниях природных песков результаты противоположны – прочность пылеватых песков часто бывает выше, чем крупных.

Исследования прочности и плотности показали, что приведенные предположения часто являются ошибочными, и пылевые пески часто бывают прочнее, чем крупные.

Исследование плотности природных песков показало, что в природе пылеватые пески имеют степень плотности выше, чем крупные. На рис. 1 приведена зависимость между коэффициентом пористости e и степенью плотности J_0 по Терцаги и выделены три группы: I группа – крупнозернистые пески, которые имеют самые маленькие величины коэффициента пористости e , но при этом по степени плотности

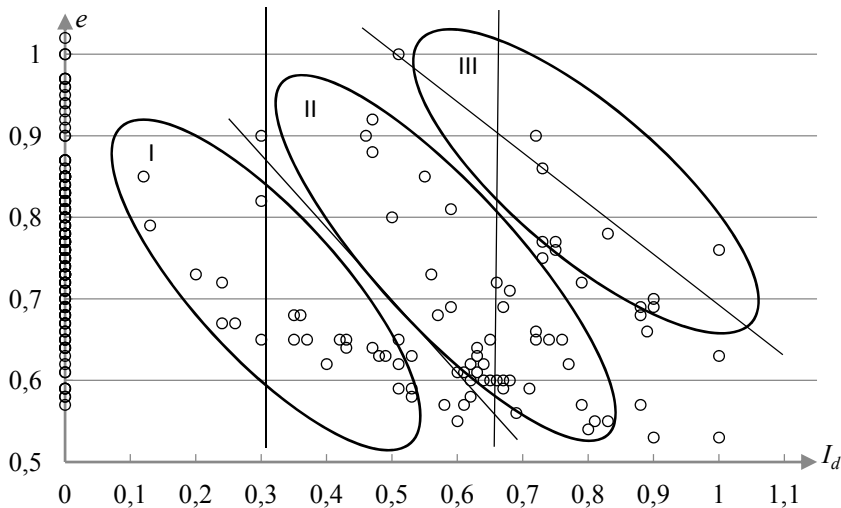


Рис. 1. Зависимость между коэффициентом пористости и степенью плотности (по Терцаги) для природных песков: I – крупные, II – среднезернистые и мелкие, III – пылеватые пески

в природе они часто рыхлые и среднеплотные; II группа – средние и мелкие пески; III группа – пылеватые, которые по степени плотности плотные и редко среднеплотные.

Эти результаты получены при исследовании монолитов, отобранных из шурфов, и подтверждены данными пенетрационных испытаний.

Одно из возможных объяснений вышеприведенных данных можно получить из рис. 2, где представлены данные, полученные по методу Проктора – зависимость между объемным весом сухого грунта (скелета) ρ_d и влажностью w .

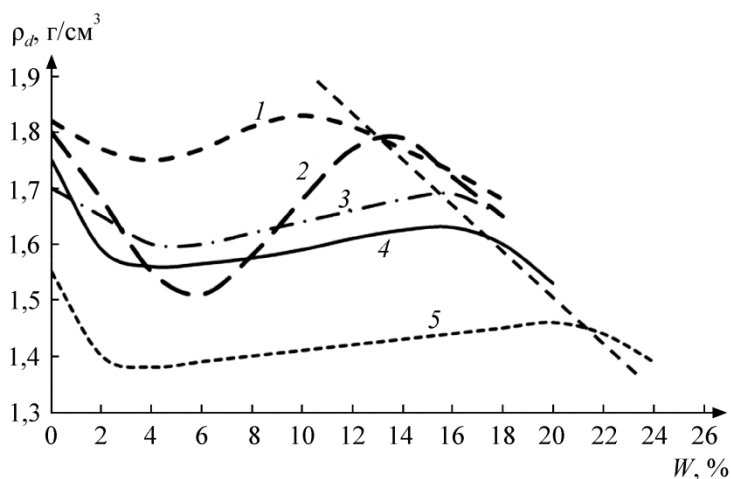


Рис. 2. Зависимость между влажностью и объемным весом скелета (методика Проктора): 1 – крупный песок; 2 – пылеватый песок с органикой; 3 – среднезернистый песок; 4 – мелкозернистый песок; 5 – пылеватый песок

Из графика видно, что чем крупнее песок, тем меньше его оптимальная влажность. При увеличении влажности объемный вес скелета уменьшается и крупные пески, которые оседают в водной среде, не могут достигать таких величин степени плотности, как пылеватые пески. Морские пылеватые пески, которые уплотняются при волновой деятельности, обычно являются плотными [1]. Исключения здесь составляют пылеватые пески с органикой. Максимальная плотность этих песков достигается при влажности 14 %, и в природе они представлены обычно среднеплотными и рыхлыми разновидностями.

Среднезернистые эоловые пески, которые образуются при влажности 8–12 %, несмотря на минимальные уплотняющие усилия, обычно формируют среднеплотные отложения.

После образования песков они уплотняются только под влиянием динамических нагрузок. Статическое нагружение даже большими давлениями не превращает рыхлые пески в плотные, не говоря о среднеплотных и плотных песках (рис. 3), где дана зависимость между коэффициентом пористости e и уплотняющим компрессионным давлением σ [2].

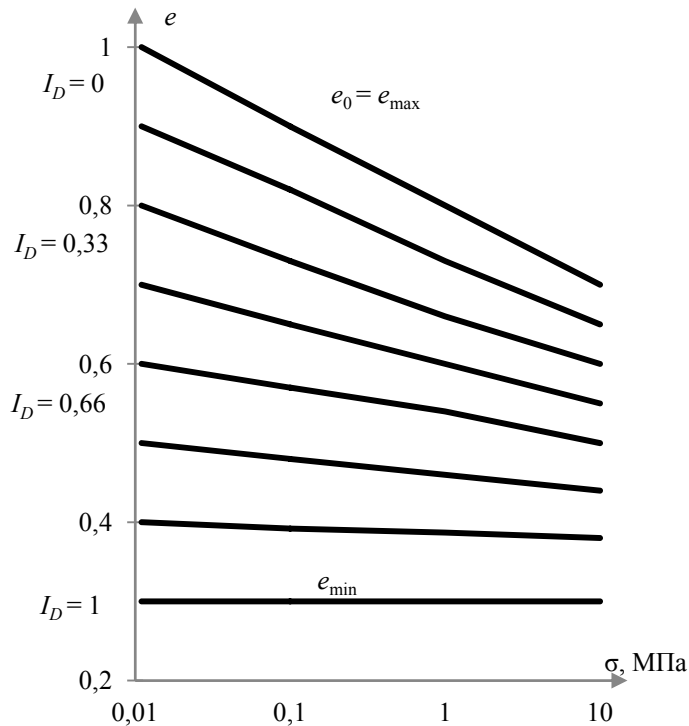


Рис. 3. Зависимость между коэффициентом пористости и давлением для песков различной плотности

Динамические усилия могут вызвать довольно существенное уплотнение песков. Забивка свай в песках с органикой вызывает осадку существующих зданий 8–12 см, и постоянное движение трамвая вызывает дополнительную осадку здания 3–7 см.

Для характеристики поведения песка под штампом используем методику характерных точек. На кривой осадка – давление, $s = f(g)$, выделяем точки, где происходит изменение физического поведения грунта под давлением (рис. 4).

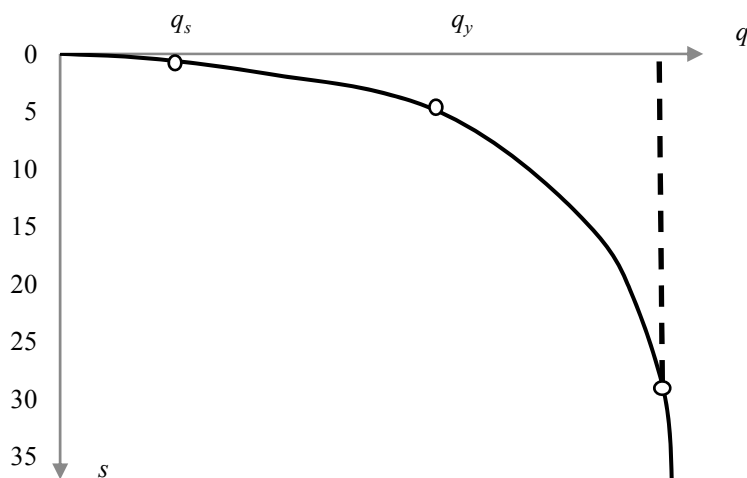


Рис. 4. Зависимость между осадкой и давлением при штамповых испытаниях методом характерных точек:
 q_s – структурная прочность; q_y – порог ползучести;
 q_f – предельное состояние

До давления q_s (структурная прочность) осадка штампа практически отсутствует. Участок $q_s - q_y$ – линейный, и на этом участке происходит уплотнение песка. При превышении давления q_y (порог ползучести) начинается выдавливание грунта, но до предельного состояния – q_f . Зависимость осадки от времени $s = f(t)$ штампа имеет затухающий характер и скорость осадки уменьшается в ходе ступени. При давлении выше q_f происходит разрушение основания [3].

Для упрощения определения давления q_y можно использовать зависимость между осадкой и временем в виде

$$s = a_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^b t_0, \quad (1)$$

где a_0 – характеризует мгновенную осадку в момент времени t_0 ; b – характеризует затухание скорости осадки во времени.

В интервале давления от q_c до q_y на всех ступенях давления b – постоянная величина. После q_y – она скачкообразно нарастает (в 2–4 раза), и это позволяет определить величину давления q_y . Оценка предельного состояния q_f намного сложнее, так как разрушение основания может иметь различный характер.

Анализируя штамповые испытания по методике характерных точек на различных песках, можно прийти к некоторым интересным результатам.

Ниже приведены результаты штамповых и пенетрационных испытаний на среднеплотных среднезернистых песках различного генезиса: эоловые, морские и водно-ледниковые пески.

По гранулометрическому составу эти пески близки. Практически одинаковыми являются их коэффициенты пористости и степени плотности по Терцаги и очень близки величины угла внутреннего трения φ_f и c_f сцепления. При этом сильно отличается их прочность по полевым опытам. Самые слабые – эоловые пески: $q_y = 0,4$ МПа; $q_f = 0,95$ МПа и $q_c = 6,5$ МПа. Средние морские пески $q_y = 0,8$ МПа; $q_f = 1,6$ МПа и $q_c = 13,5$ МПа. Для водно-ледниковых песков $q_y = 1,8$ МПа; $q_f = 2,1$ МПа и $q_c = 28$ МПа.

По полевым опытам большая прочность водно-ледниковых песков объясняется присутствием тонкого железистого цемента. Этот цемент легко разрушается при отборе монолитов и на величину сдвиговых параметров практически не влияет.

Разница между величинами q_y для морских и эоловых песков объясняется тем, что морские пески получают при формировании большие сдвиговые деформации, чем эоловые.

Сильно влияет [4] на величины q_y и q_f содержание органического материала в песках (таблица).

Значения коэффициентов в зависимости от содержания в песке органического материала

Пылеватый песок	q_y , МПа	q_f , МПа	q_c , МПа
Чистый пылеватый песок	0,7...0,8	1,5	13
С органикой 0,5 %	0,35	1,2	5,6
С органикой 3 %	0,2	0,7	3,4
С органикой 5 %	0,15	0,5	2,3
С коллоидной органикой – 0,5	0,15	0,8	2,2
С коллоидной органикой – 1,0	0,1	0,5	1,4
С коллоидной органикой – 2,0	0,5	0,15	0,7

Из таблицы следует, что даже минимальное содержание органического вещества сильно уменьшает несущую способность песков (q_y , q_f и q_c), но это можно выявить только штамповыми опытами или статической пенетрацией. Сдвиговые исследования монолитов, отобранных из шурфов (сохранена естественная структура), дали высокие значения сопро-

тивления сдвигу – для песков с органикой $\phi = 31...34^\circ$, $c = 10...20$ кПа и для песков с коллоидной органикой $\phi = 33...38^\circ$ и $c = 7...20$ кПа. Если по этим величинам согласно теории предельного равновесия оценить предельное состояние песков, то получается, что оно намного выше, чем у величины q_f , определенной по штамповым испытаниям.

Наверное, повышение прочности при сдвиговых испытаниях связано с изменением температурного режима в лаборатории, и возможно, что отталкивающее влияние между зернами, связанное с органикой, превращается в лаборатории в «цемент».

При изучении песков с органикой обычно определяется весовое содержание органического материала: удельный вес органики в 2,5–2,65 раза меньше, чем удельный вес зерен песка. Отсюда следует, что объемное содержание органики в песках в 2,5 раза выше, и 3%-ные содержание весового органического материала в объеме соответствует 7–8%-ному содержанию, между контактами минеральных зерен располагается органическое вещество.

Сильно влияет на несущую способность песков бактериальное загрязнение фекалиями. Специально исследовали на полигоне загрязненные морские пески. Незагрязненные пески имели $q_y = 0,7$ МПа и $q_f = 1,4$ МПа. Результаты исследований загрязненных песков фекалиями приведены на рис. 5, где представлены два графика: на первом дана зависимость величины осадки s от площади F штампа при давлениях 0,05–0,2 МПа; и на втором графике – зависимость $s = f(\sigma)$ (остатки от давления) для штампа с площадью 9 600 см².

Из графика видно, что величина q_y (загрязненных песков) по полевым испытаниям примерно в 7 раз меньше, чем чистых песков, и интервалы площадей 1 000 до 19 000 см² не зависят от площади штампа.

Лабораторные испытания загрязненных песков дали невероятные результаты: $\phi = 41^\circ$ и $c = 20$ кПа. В то же время испытания крыльчаткой помогли реально оценить прочность песков $c_u = 30$ кПа. Эта величина совпадает с величинами штамповых испытаний: $q_y = 3,14 \cdot c_u + \rho \cdot h = 100$ кПа.

Подобные результаты были получены при изучении влияния загрязнения песков рыбной мукой и машинным маслом. Под влиянием рыбной муки (в течение 12 лет) значение q_y морских песков уменьшилось с 0,8 до 0,15–0,2 МПа, а под влиянием машинных масел – с 0,7 до 0,3–0,4 МПа.

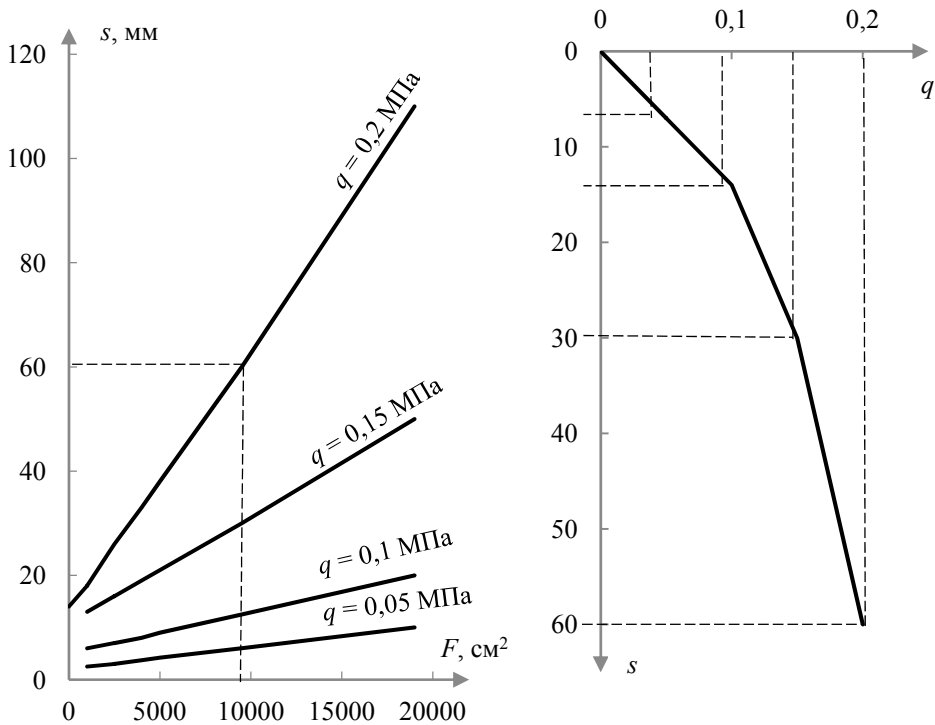


Рис. 5. Зависимость: a – осадки от давления q и площади штампа;
 b – осадки от давления

Интересные изменения происходят с песками в зонах жаркого климата, где под влиянием сложных химических процессов происходит образование между зернами песка железистых цементов и прочность песков сильно возрастает. Но в дальнейшем под воздействием жизнедеятельности червей и корней образуется макропористый грунт. В сухом виде этот грунт имеет высокую прочность.

Испытания, проведенные в Анкоре [5]: при испытании штампом сухого грунта осадки штампа при нагрузке 0,6 МПа составляли 5 мм и q_y не была достигнута. При замачивании происходило разрушение основания.

Если для глинистых грунтов соотношение q_f/q_y изменяется в пределах от 1,5 до 2, то для песков это соотношение изменяется от 1 до 4 и нарастает с падением прочности песков (рис. 6).

Из графика на рис. 6 следует, что для менее прочных разностей превышение q_y по фундаментам вызывает нелинейные долговременные деформации, но не вызывает разрушение основания.

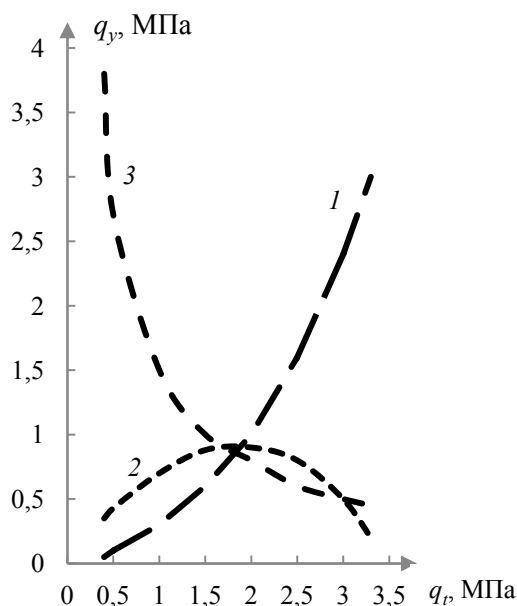


Рис. 6. Зависимость между порогом ползучести q_y и предельным состоянием для природных песков по штамповым испытаниям:

$$1 - q_t = f(q_y); \quad 2 - \Delta q = q_t - q_y; \quad 3 - n = \frac{q_t}{q_y}$$

Для оценки осадок фундаментов на песках используется формула

$$s = \frac{q}{q_y} \cdot 1,5 \cdot \sqrt{B}, \quad \frac{q}{q_y} \leq 1, \quad (2)$$

где s – осадка; q – давление под фундаментом; q_y – давление при порогом ползучести; B – ширина фундамента.

Эта формула проверена наблюдениями за осадками сооружений. На рис. 7 приведены осадки плиточных фундаментов на песках.

На 1-м и 2-м сооружениях давление под фундаментом меньше q_y и рассчитанные осадки совпадают с измеренными осадками. Давление под подошвой третьего фундамента выше q_y , измеренные осадки выше расчетных и имеют длительный нелинейный характер.

Анализ большого количества штамповых (около 1 000 опытов) испытаний позволяет выявить следующие корреляционные зависимости:

$$q_y = \frac{q_c}{16...20}, \quad (3)$$

$$E_y = (3...4) \cdot q_c, \quad (4)$$

$$q_f = 6 \cdot \sqrt{q_y}. \quad (5)$$

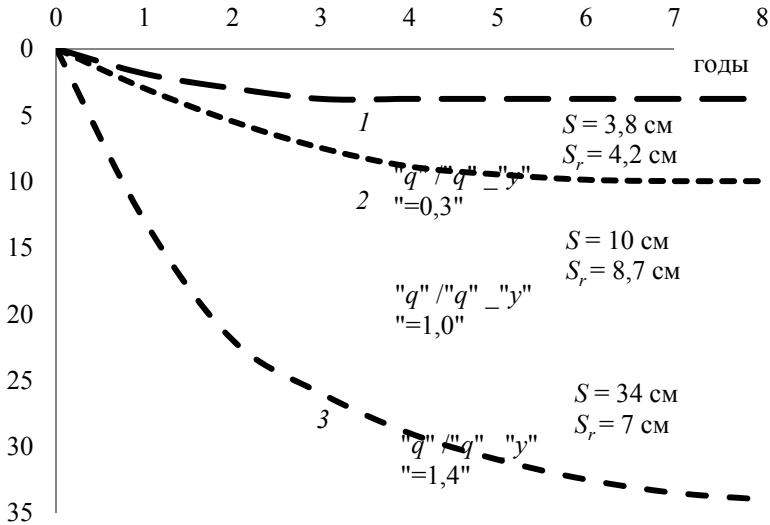


Рис. 7. Осадки плиточных фундаментов на песках от времени:

S – измеренная осадка, S_r – максимальная осадка по расчету:

1 – сооружение построено на морских песках, $q_y = 0,7$ МПа;

2 и 3 – сооружения на песках с органикой, $q_y = 0,1$ МПа

Применяя приведенные формулы, можно оценить несущую способность песка: участок линейного деформирования от 0 до q_y и участок нелинейного деформирования от q_y до q_f . Используя обратный расчет, можно оценить величину ϕ при q_f .

Из вышеизложенного следует, что поведение природных песков зависит не только от гранулометрического состава и плотности сложения. Каждый природный песок имеет свою геологическую историю, в течение которой он формировался в ходе генетических и дигенетических процессов. Формировались гранулометрический состав, плотность, включения в состав песка. Все это в совокупности составляет поведение природного песка в дальнейшем.

Библиографический список

1. Mets M. Liivpinnaste koostis ja tihedus // *Ehitusgeoloogia kogumik II*. – Tallinn, 1967. – P. 14–18.
2. Сергеев Е.М. Инженерная геология. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. – 248 с.
3. Mets M. Iseloomulike punktide meetod // *Ehitusgeoloogia kogumik V*. – Tallinn, 1991. – P. 42–63.
4. Mets M. Veel kord liivade geotehnikast // XII Eesti Geotehnika konverents. – Tallinn, 2002. – P. 42–45.
5. Iwasaki Y. Workshop for Bayon. Study Stabilizing Work of Central Tower. – Bayon, 2014.

References

1. Mets M. The composition and density of sand. *Ehitusgeoloogia kogumik II*. Tallinn, 1967, pp. 14-18.
2. Sergeev E.M. Inzhenernaia geologiiia [Engineering geology]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitrt. 1982. 248 p.
3. Mets M. Feature point method. *Ehitusgeoloogia kogumik V*. Tallinn, 1991, pp. 42-63.
4. Mets M. Once again on the sands geotechnologies. *XII Eesti Geotehnika konverents*. Tallinn, 2002, pp. 42-45.
5. Iwasaki Y. Workshop for Bayon. Study Stabilizing Work of Central Tower. Bayon, 2014.

Получено 24.08.2015

Об авторах

Майт Метс (Таллин, Эстония) – геотехнический консультант Geoengineering Ltd., вице-президент Эстонского геотехнического общества (19086, Таллин, Эхитаяте теэ, 5, e-mail: mait.mets@gmail.com).

Виллу Ленник (Тарту, Эстония) – бакалавр, инженер-строитель, преподаватель Эстонского университета наук о жизни (51014, Тарту, ул. Крейцвальди, 1, e-mail: villu.leppik@emu.ee).

About the authors

Mait Mets (Tallinn, Estonia) – Geotechnical Consultant, Geoengineering Ltd., Vice President of Estonian Geotechnical Society (5, Ehitajate tee, Tallinn, 19086, Estonia, e-mail: mait.mets@gmail.com).

Villu Leppik (Tartu, Estonia) – B.Sc., Civil Engineer, Lecturer, Estonian University of Life Sciences (1, Fr.R. Kreutzwaldi, Tartu, 51014, Estonia, e-mail: villu.leppik@emu.e).