

УДК 624.131

**Офрихтер В.Г.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: ofrikhter@mail.ru

**Офрихтер Я.В.** – студент

E-mail: ian.ofrikhter@gmail.com

**Пермский национальный исследовательский политехнический университет**

Адрес организации: 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

### Оценка механической ползучести фибропеска по результатам компрессионных испытаний

#### Аннотация

Осадка фибропеска при компрессионных испытаниях определяется двумя процессами – прямой компрессией и механической ползучестью. Традиционные методы оценки компрессии, основанными на теории фильтрационной консолидации нельзя применять для неводонасыщенных образцов псевдосвязного грунта. Результаты испытаний таких грунтов можно оценивать с помощью скоростных уравнений первого порядка.

**Ключевые слова:** фиброармированный неводонасыщенный несвязный грунт, механическая ползучесть, скоростное уравнение первого порядка.

#### 1. Введение

Песок, произвольно армированный короткими (6-12 мм) волокнами (в дальнейшем – фибропесок) является специфическим типом искусственного грунта, которому присущи свойства как сыпучих, так и связных грунтов. Механические характеристики фибропеска – угол внутреннего трения и удельное сцепление, но в тоже время, коэффициент фильтрации измеряется порядками 1м/сут. Осадка фибропеска обусловлена физическими механизмами и определяется двумя процессами: прямая компрессия и механическая ползучесть. Концептуальная модель осадки фибропеска приведена на рис 1.



Рис. 1. Концептуальная модель осадки фибропеска

Первоначальное быстрое развитие деформаций при увеличении нагрузки – прямая компрессия. Термин «прямая компрессия» предлагается применять для фибропесков в отличие от первичной, применяющейся в механике грунтов, в связи с тем, что материал фибропесков является, как правило, неводонасыщенным, а первичная компрессия в грунтах соответствует консолидации твердых частиц при рассеивании порового давления. Далее развитие осадок продолжается при постоянной нагрузке в связи с механической ползучестью. Механическая ползучесть – физический процесс уплотнения, при котором объем пустот уменьшается со временем, поскольку отдельные компоненты фибропеска смещаются под нагрузкой и на контакте частиц возникает скольжение.

На рис. 1. показаны переходный момент времени, указывающий время окончания прямой компрессии  $t_{ПК}$ , а также время окончания механической ползучести  $t_{кон}$ . Для

оценки прямой компрессии требуется определение деформации (коэффициента пористости), при которой она заканчивается и начинается длительная компрессия, изменяющаяся во времени – т.е. деформации (коэффициента пористости) в конце прямой компрессии ( $\varepsilon_{ПК}$ ). Методологии, использующиеся в механике грунтов для определения перехода от первичной к вторичной консолидации (например, методы Казагранде, Тейлора, основанные на теории одномерной фильтрационной консолидации Терцаги) неприменимы к фибропеску, поскольку материал является неводонасыщенным и поровое давление не рассеивается. В этой ситуации был применен метод оценки компрессии и определения коэффициента пористости к окончанию каждой из двух фаз компрессии (прямой компрессии и механической ползучести, основанный на скоростном уравнении первого порядка (далее – FORE) [1, 8]. Во всех поставленных экспериментах по изучению ползучести фибропеска, на каждой ступени приложения нагрузки вначале наблюдалось быстрое нарастание деформаций (прямая компрессия), за которой следовало снижение скорости деформаций (механическая ползучесть) [2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12].

## 2. Результаты компрессионных испытаний фибропеска

Для формирования образцов был использован песок природный со следующими характеристиками.

Грансостав по фракциям: 2-1 – 0,1 %; 1-0,5 – 8,2 %; 0,5-0,25 – 39,5 %; 0,25-0,1 – 49,4 %; менее 0,1 – 2,5 %.

Степень неоднородности:  $C_u = d_{60} / d_{10} = 0,28 / 0,14 = 2,0$

Плотность частиц:  $\rho_s = 2,64 \text{ г/см}^3$ .

В соответствии с ГОСТ 25100 грунт относится к классу природных дисперсных грунтов и является песком пылеватым однородным. Кривая гранулометрического состава песка представлена на рис. 2.

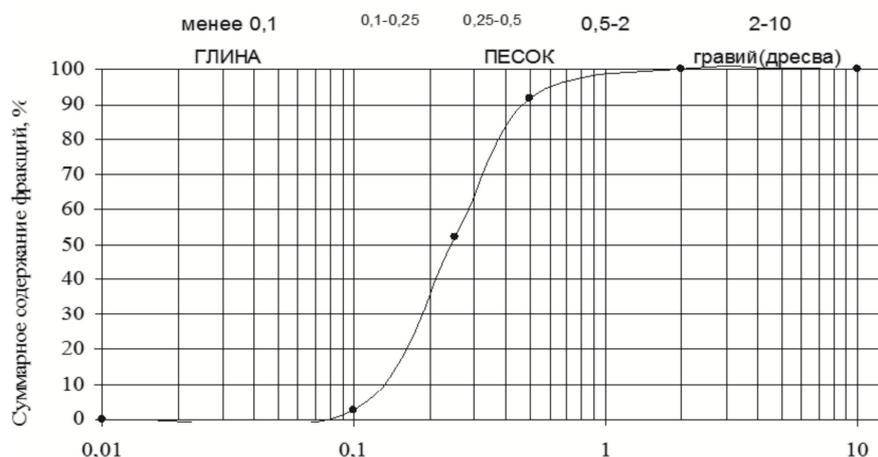


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава песка

Для испытаний был изготовлен фибропесок из смеси песка природного и фиброволокна полипропиленового по ТУ 2272 -001-86254023-2010 длиной 12 мм с характеристиками: плотность –  $0,91 \text{ г/см}^3$ ; диаметр волокон 20 мкм; прочность на растяжение 170-260 МПа; удлинение до разрыва 150-250 %; DTex (масса нити длиной 10000 м) – 28; температура воспламенения –  $320^\circ$ ; температура плавления –  $160^\circ$ . Расход фибры 0,93 %. Плотность частиц фибропеска  $\rho_s = 2,58 \text{ г/см}^3$ .

Развитие деформаций во времени при компрессионных испытаниях фибропеска на одной ступени нагрузки 400 КПа за 141 день (3384 час или 203040 мин) приведено на рис. 3.

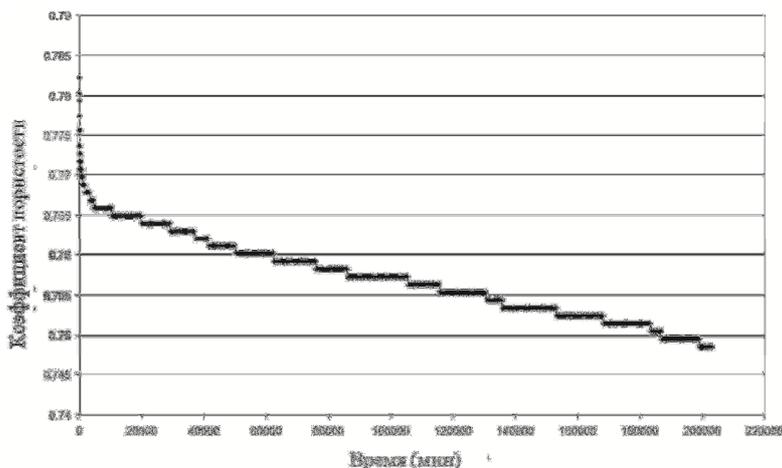


Рис. 3. Результаты компрессионных испытаний образца фибропесчаного грунта при нагрузке 400 кПа в течение 203040 мин (141 сут)

### 3. Оценка результатов компрессионных испытаний фибропеска

Образец из фибропеска был подвергнут компрессионному испытанию на ползучесть при постоянной нагрузке 400 кПа в течение 141 суток (203040 мин или 3384 час.).

Для определения момента перехода от прямой компрессии к механической ползучести был использован метод FORE [8] в ассоциации с полулогарифмической зависимостью. Скоростное уравнение первого порядка, предложенное в статье [8] описывает скорость приближения переменной функции к ее конечному значению. В нашем случае рассматривается скорость приближения коэффициента пористости к значению этого коэффициента к окончанию процесса механической ползучести. В случае, если этот показатель нельзя однозначно определить точно, по предложению [8] он задается методом подбора.

Скоростное уравнение первого порядка, описывающее процесс механической ползучести, имеет вид:

$$d(e_t - e_{\text{кон}}) / dt = -k(e_t - e_{\text{кон}}). \quad (1)$$

Решение уравнения имеет вид:

$$\ln(e_t - e_{\text{кон}}) = -kt + C \quad (2)$$

или может быть записано в десятичных логарифмах:

$$\lg(e_t - e_{\text{кон}}) = -k_{10}t + C_t. \quad (3)$$

Из этого решения можно записать «скоростное» выражение зависимости коэффициента пористости от времени:

$$e_t = 10^{(C_t - k_{10}t)} + e_{\text{кон}}. \quad (4)$$

Предложение [8] заключается в том, что решение (3) представляет собой уравнение прямой линии  $y = ax + b$  в полулогарифмических координатах. Поскольку конечное значение коэффициента пористости неизвестно, подставляются пробные значения этого коэффициента для того, чтобы полученная прямая линия максимально совпадала с экспериментальной кривой. Иными словами, скоростное уравнение первого порядка составляется методом подбора.

Как FORE, так и экспериментальная зависимость пригодны для представления процесса физической компрессии. FORE моделирует физический процесс (механическую ползучесть) и момент расхождения с конкретным процессом, поскольку экспериментальная зависимость воспроизводит непрерывный физический процесс осадки под постоянной нагрузкой по отношению ко времени (логарифму времени) (постоянный коэффициент механической ползучести  $C'_\alpha$ ). Таким образом, перекрытие данных FORE и экспериментальной кривой предполагает представление механической ползучести.

На основании допущения о том, что механическая ползучесть может быть представлена одиночным коэффициентом  $c'_\alpha$  [6, 7] расхождение между скоростным уравнением и экспериментальной кривой совпадает с моментом времени, при котором прямая компрессия переходит в механическую ползучесть.

На основании данных, полученных в ходе проведения испытаний были подобраны скоростные уравнения первого порядка для стадий прямой компрессии и механической ползучести. Подбор скоростных уравнений первого порядка выполнялся в программе MS Excel по методике [8] путем составления электронной таблицы, построения графика скоростного уравнения и подбора линейной аппроксимации, максимально совпадающей с построенным графиком скоростного уравнения. Совпадение скоростного уравнения и линейной аппроксимации оценивалось по коэффициенту детерминации  $R^2$  (все эти операции доступны в стандартном пакете Microsoft Excel).

Для составления скоростного уравнения прямой компрессии были взяты данные испытания в промежутке 0 – 20 мин. Электронная таблица составляется из 5 колонок (1 – время, 2 – коэффициент пористости, 3 – разность между конечным и текущим значениями коэффициента пористости, 4 – абсолютная величина этой разности, 5 – логарифм этой абсолютной величины) (рис. 4). Подбирается конечное значение коэффициента пористости к окончанию первичной компрессии таким образом, чтобы построенный график (абсцисса – время; ордината – логарифм абсолютной величины разности) максимально совпадал с линейной аппроксимацией (оценивается по коэффициенту детерминации  $R^2$ ). Устанавливается уравнение линейной аппроксимирующей прямой и из этого уравнения составляется «скоростная» зависимость коэффициента пористости от времени (рис. 4).

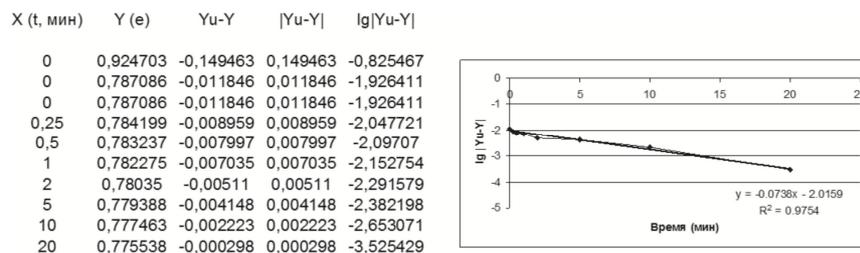


Рис. 4. Подбор скоростного уравнения первого порядка для первичной компрессии образца из фибропеска в интервале 0-20 мин.  $P = 400$  КПа ;  $e_{pez} = 0,77524$

В результате подбора значение коэффициента пористости к окончанию первичной компрессии составило 0,77524, для которого скоростное уравнение первого порядка имеет вид ( $R^2 = 0,9754$ ):

$$y = -0,0738x - 2,0159.$$

В соответствии с выражением (3) скоростное уравнение записывается в виде:

$$\lg(e - 0,77524) = -0,0738t - 2,0159.$$

«Скоростная» зависимость коэффициента пористости от времени выражается зависимостью:

$$e = 10^{(-2,0159 - 0,0738t)} + 0,77524. \quad (5)$$

Подбор выполняется очень быстро, как правило за 8-10 попыток, что занимает не более 1 минуты.

Таким же образом выполняется подбор скоростного уравнения и получение «скоростной» зависимости коэффициента пористости от времени для вторичной компрессии (механической ползучести) (рис. 5).

Для составления скоростного уравнения вторичной компрессии были взяты данные испытания в промежутке 120-203040 мин. В результате подбора значение коэффициента пористости к окончанию вторичной компрессии составило 0,737, для которого скоростное уравнение первого порядка имеет вид ( $R^2 = 0,9815$ ):

$$y = -0,000002x - 1,522.$$

В соответствии с выражением (3) скоростное уравнение записывается в виде:

$$\lg(e - 0,737) = -0,000002t - 1,5122.$$

«Скоростное» выражение для коэффициента пористости:

$$e = 10^{(-1,522 - 0,000002t)} + 0,737. \tag{6}$$

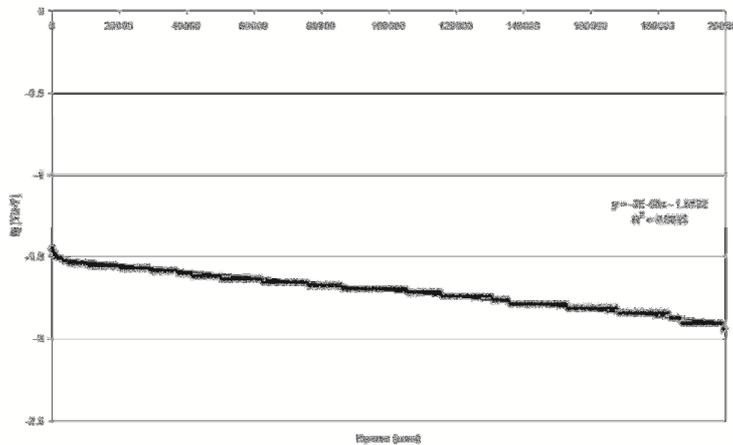


Рис. 5. Подбор скоростного уравнения первого порядка для вторичной компрессии образца из фибропеска в интервале 120-203040 мин.  $P = 400 \text{ КПа}$  ;  $e_{рез} = 0,737$

С помощью полученных скоростных уравнений можно определить начало механической ползучести фибропеска. Для этого полученная «скоростная» зависимость коэффициента пористости от времени для механической ползучести фибропеска (6) накладывается на график результатов испытаний. Точка расхождения графиков – начало процесса вторичной компрессии (рис. 6).

В соответствии с выполненными построениями механическая ползучесть фибропеска начинается между 2880 и 3600 мин. Коэффициент пористости к началу вторичной компрессии составляет 0,767358.

На рис. 6, 7. для сравнения приведен также график кинетического уравнения, с помощью которого определяется коэффициент пористости в зависимости от начального значения  $e_0$  в интервале 120-203040 мин. Кинетическое уравнение изменения коэффициента пористости при вторичной компрессии имеет вид:

$$-de / dt = ke. \tag{7}$$

Решение этого уравнения записывается выражением:

$$e = e_0 \exp^{-kt}. \tag{8}$$

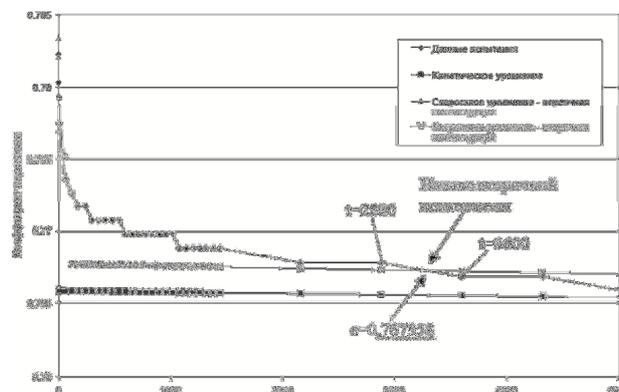


Рис. 6. Определение начала вторичной компрессии для образца из фибропеска  $P = 400 \text{ КПа}$  с помощью скоростного уравнения первого порядка

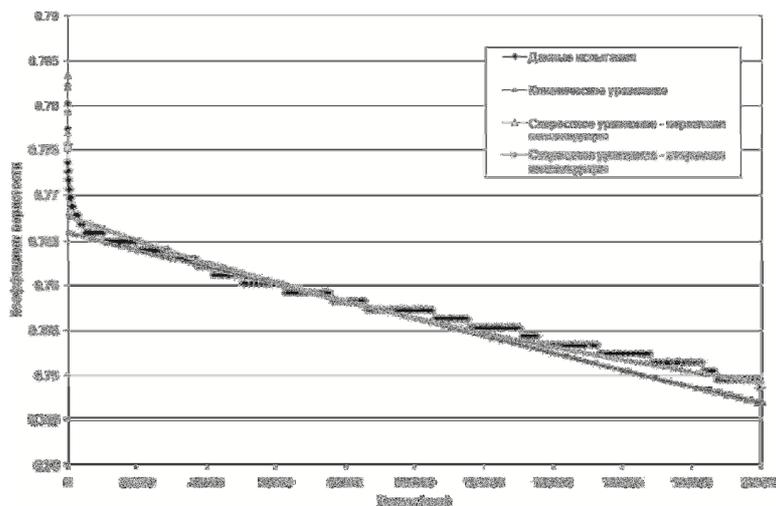


Рис. 7. Сравнение скоростного и кинетического уравнений вторичной компрессии для образца из фибропеска  $P = 400$  КПа

Кинетическое уравнение, в отличие от скоростного, указывает на бесконечность процесса консолидации, что не соответствует действительности. С помощью скоростного уравнения можно прогнозировать величину коэффициента пористости к окончанию вторичной компрессии. Выявленные закономерности позволяют уточнить механизм поведения под нагрузкой неводонасыщенных несвязных фиброармированных грунтов и грунтоподобных материалов, к которым кроме фибропесков относятся твердые бытовые отходы.

### Заключение

Компрессия неводонасыщенных песчаных образцов, армированных произвольно ориентированными волокнами состоит из двух фаз – прямой компрессии и механической ползучести. Компрессионные испытания фиброармированных песчаных образцов позволяют понять механизм механической ползучести несвязных фиброармированных грунтов и грунтоподобных материалов. К таким материалам относятся, например, твердые бытовые отходы. Применение скоростных уравнений первого порядка позволяет оценить реологические процессы в неводонасыщенных фиброармированных несвязных грунтах и грунтоподобных материалах при длительном приложении нагрузки.

### Список библиографических ссылок

1. Офрихтер В.Г., Лихачева Н.Н. Уточненная модель биоразложения твердых бытовых отходов // Вестник гражданских инженеров. – СПб.: СПбГАСУ, 2014, Вып. 4 (45). – С. 73-78.
2. Bareither C.A., Hryciw R.D., Athanasopoulos-Zekkos A., Yesiller N., Benson C.H., Edil T.B. Recent findings in compressibility of municipal solid waste // GeoCongress 2012 «State of the art and practice in Geotechnical engineering» ASCE GSP № 225. – New York: ASCE, 2012. – P. 4212-4221.
3. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Compression behavior of municipal solid waste in bioreactor landfills: mechanical creep and biocompression // Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – New York: ASCE, 2013, Vol. 139, Iss. 7. – P. 1007-1021.
4. Chen Y., Ke H., Fredlund D., Zhan L., Xie Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills // Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – New York: ASCE, 2010, Vol. 136, Iss. 5. – P. 706-717.

5. Durmusoglu E., Sanchez I.M., Corapcioglu M.Y. Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples // *Environmental Geology*. – Dusseldorf, Germany: Springer-Verlag, 2006, Vol. 50, Iss. 6. – P. 773-786.
6. El-Fadel M., Khoury R. Modeling settlement in MSW landfills: A critical review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technologies*. – Abingdon, Oxfordshire, UK: Taylor & Francis, 2000, Vol. 30, Iss. 3. – P. 327-361.
7. Gourc J.P., Staub M.J., Conte M. Decoupling MSW settlement into mechanical and biochemical processes – modeling and validation on large-scale setups // *Waste Management Journal*. – Amsterdam: Elsevier, 2010, Vol. 30, Iss. 8-9. – P. 1556-1568.
8. Handy R.L. First-order rate equations in geotechnical engineering // *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – New York: ASCE, 2002, Vol. 128, Iss. 5. – P. 416-425.
9. Jessberger H.L., Kockel R., Sarsby R.W. (eds.) Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials // *Proceedings of International Symposium «Green'93»* (Bolton, UK). – Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. – P. 181-188.
10. Landva A.O., Valsangkar A.J., Pelkey S.G. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste // *Canadian Geotechnical Journal*. – Ottawa: NRC Research Press, 2000, Vol. 37, Iss. 6. – P. 1157-1165.
11. Rao S.K., Moulton L.K., Seals R.K. Settlement of refuse landfills // *Proceedings of ASCE Specialty Conference «Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials»*, Ann Arbor, MI. – New York, USA: ASCE, 1977. – P. 574-598.
12. Vilar O.M., Carvalho M.F. Mechanical properties of municipal solid waste // *Testing and Evaluation*. Philadelphia, USA: ASTM, 2004, Vol. 32, Iss. 6. – P. 438-449.

**Ofrikhter V.G.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: ofrikhter@mail.ru

**Ofrikhter I.V.** – student

E-mail: ian.ofrikhter@gmail.com

**Perm National Research Polytechnical University**

The organization address: 614990, Russia, Perm, Komsomolsky av., 29

## **Estimation of the mechanical creep of fibrosand by the results of compression testing**

### **Resume**

Settlement of fibrosand in consolidation testing is determined by two processes – direct compression and mechanical creep. Traditional approaches for compression estimation, based on filtration consolidation theory are unsuitable for unsaturated specimens of pseudo-cohesive soil. Testing results for such soils could be estimated by first order rate equations.

Sand reinforced by randomly oriented short (6-12 mm) fibers (further – fibrosand) is a specific type of artificial soil for which the properties of as cohesive as non-cohesive soils are intrinsic. Mechanical characteristics of fibrosand are angle of internal friction and cohesion, but at the same time the permeability coefficient is measured in order of 1 m/day. Settlement of fibrosand is caused by the physical mechanisms and determined by two processes – direct compression and mechanical creep.

Initial rapid development of settlements is direct compression. The term «direct compression» is proposed to use for fibrosand in contrast to the primary consolidation, used in soil mechanics because of the fact that material of fibrosand is generally unsaturated, while the primary consolidation in soils conforms to the compression of cohesive soils at pore pressure dissipation. Further settlement increase continues at constant load as a result of mechanical creep. Mechanical creep is a physical process of compression at which the volume of voids decreases with time because of separate components of fibrosand are shifted under the load and slipping appears on the contact of the particles.

Methodologies applied in soil mechanics for determination of the transition from the primary to secondary consolidation (for example methods of Taylor and Casagrande, founded on one – dimensional theory of filtration consolidation are inapplicable to the fibrosand as the material is unsaturated and pore pressure is not dissipated.

In this situation the method of compression evaluation and determination of void ratio to the ending of each of two phases of compression (direct compression and mechanical creep), based on the first order rate equation was applied. In all performed experiments on the study of fibrosand creep at each step of load application the rapid increase of settlement was observed initially (direct compression), followed by the reduction of the speed of deformations (mechanical creep).

Using the first order rate equation anyone can prognosticate the value of void ratio to the ending of secondary compression. Established rules allow verifying the mechanism of behavior of unsaturated non-cohesive fibro-reinforced soils and soil-like materials to which, except fibrosand, municipal solid waste is related.

Compression of unsaturated sand specimens, reinforced by randomly oriented fibers consists of two phases – direct compression and mechanical creep. Compression testing of fibro-reinforced sand specimens allows understanding the mechanism of mechanical creep of non-cohesive fibro-reinforced soils and soil-like materials. Application of first order rate equation allows estimating the rheological processes in unsaturated fibro-reinforced soils and soil-like materials under continuous loading.

**Keywords:** fibro-reinforced unsaturated non-cohesive soil, mechanical creep, first order rate equation.

### Reference list

1. Ofrikhter V.G., Likhacheva N.N. Improved model of biodegradation for municipal solid waste // *Bulletin of civil engineers.* – SPb.: SPbGASU, 2014, Iss. 4 (45). – P. 73-78.
2. Bareither C.A., Hryciw R.D., Athanasopoulos-Zekkos A., Yesiller N., Benson C.H., Edil T.B. Recent findings in compressibility of municipal solid waste // *GeoCongress 2012 «State of the art and practice in Geotechnical engineering» ASCE GSP № 225.* – New York: ASCE, 2012. – P. 4212-4221.
3. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Compression behavior of municipal solid waste in bioreactor landfills: mechanical creep and biocompression // *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* – New York: ASCE, 2013, Vol. 139, Iss. 7. – P. 1007-1021.
4. Chen Y., Ke H., Fredlund D., Zhan L., Xie Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills // *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* – New York: ASCE, 2010, Vol. 136, Iss. 5. – P. 706-717.
5. Durmusoglu E., Sanchez I.M., Corapcioglu M.Y. Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples // *Environmental Geology.* – Dusseldorf, Germany: Springer-Verlag, 2006, Vol. 50, Iss. 6. – P. 773-786.
6. El-Fadel M., Houry R. Modeling settlement in MSW landfills: A critical review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technologies.* – Abingdon, Oxfordshire, UK: Taylor & Francis, 2000, Vol. 30, Iss. 3. – P. 327-361.
7. Gourc J.P., Staub M.J., Conte M. Decoupling MSW settlement into mechanical and biochemical processes – modeling and validation on large-scale setups // *Waste Management Journal.* – Amsterdam: Elsevier, 2010, Vol. 30, Iss. 8-9. – P. 1556-1568.
8. Handy R.L. First-order rate equations in geotechnical engineering // *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* – New York: ASCE, 2002, Vol. 128, Iss. 5. – P. 416-425.
9. Jessberger H.L., Kockel R., Sarsby R.W. (eds.) Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials // *Proceedings of International Symposium «Green'93» (Bolton, UK).* – Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. – P. 181-188.
10. Landva A.O., Valsangkar A.J., Pelkey S.G. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste // *Canadian Geotechnical Journal.* – Ottawa: NRC Research Press, 2000, Vol. 37, Iss. 6. – P. 1157-1165.
11. Rao S.K., Moulton L.K., Seals R.K. Settlement of refuse landfills // *Proceedings of ASCE Specialty Conference «Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials», Ann Arbor, MI.* – New York, USA: ASCE, 1977. – P. 574-598.
12. Vilar O.M., Carvalho M.F. Mechanical properties of municipal solid waste // *Testing and Evaluation.* Philadelphia, USA: ASTM, 2004, Vol. 32, Iss. 6. – P. 438-449.