

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477>

УДК 624.138; 004.42

Определение предельного сопротивления дилатирующего грунта сдвигу при помощи искусственных нейронных сетей

Кандидаты техн. наук, доценты О. В. Попов¹⁾, Ю. Б. Попова¹⁾, инж. С. В. Яцынович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Современные геотехнические технологии изготовления свай позволяют решать многие инженерные задачи в строительстве со значительным экономическим эффектом и сокращением сроков ведения работ. Однако теоретическое обоснование данных технологий значительно отстает от их практического использования. Фактор стесненной дилатансии является основным резервом несущей способности свай в несвязных грунтах. Его понимание открывает путь к совершенствованию геотехнических технологий изготовления свай, обеспечивающих активное воздействие на грунт основания и его предельное напряженное состояние, которое определяется соотношением сопротивления грунта сдвигу и нормальных напряжений, либо главных напряжений на площадке сдвига в момент разрушения. Определение общих нормальных напряжений в плоскости сдвига в зависимости от плотности несвязного грунта, его гранулометрического состава и условий стесненной дилатансии позволяет найти предельное сопротивление грунта сдвигу, а следовательно, и его прочность. На основании предложенной упругопластической модели дилатирующего грунта при сдвиге, реализованной согласно принятой методике в специально разработанном дилатометрическом сдвиговом приборе, получены экспериментальные данные о дополнительных дилатантных нормальных напряжениях и прочностных параметрах грунта в зависимости от его плотности, гранулометрического состава и условий стесненной дилатансии. Использование искусственных нейронных сетей при математической обработке экспериментальных данных позволило разработать аналитический метод определения предельного сопротивления несвязного грунта сдвигу в условиях стесненной дилатансии и произвести калибровку расчетных параметров принятой грунтовой модели. Доказано, что прочность грунта является функцией условий разрушения, которые определены трением и дилатансией, при этом традиционная теория прочности Кулона – Мора для несвязных грунтов справедлива как для условий свободного дилатирования, так и при стесненном сдвиге, но с учетом дополнительных нормальных дилатантных напряжений.

Ключевые слова: несвязный грунт, дилатансия, напряжения, деформации, коэффициент пористости грунта, действующий диаметр частиц грунта, коэффициент жесткости массива, сцепление, угол внутреннего трения

Для цитирования: Попов, О. В. Определение предельного сопротивления дилатирующего грунта сдвигу при помощи искусственных нейронных сетей / О. В. Попов, Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 471–477. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477>

Determination of Limiting Resistance for Dilatant Soil to Shearing While Using Artificial Neural Networks

O. V. Popov¹⁾, Yu. B. Popova¹⁾, S. V. Yatsynovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern geotechnical pile manufacturing technologies allow to solve many engineering problems in construction with significant economic effect and reduction of work schedule. However a theoretical justification for these technologies

Адрес для переписки

Попова Юлия Борисовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

Address for correspondence

Popova Yuliya B.
Belarusian National Technical University
9 B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

is significantly lagging behind from their practical application. A constrained dilatancy factor is considered as the main reserve of pile bearing capacity in loose soils. Understanding of such approach opens a way to improvement of geotechnical pile manufacturing technologies that provide an active impact on base soil and its ultimate stress state which is determined by the ratio of soil resistance to shearing and normal stresses, or main stresses on a shear site at the moment of failure. Determination of total normal stresses in the shearing plane according to density of loose soil, its granulometric composition and constrained dilatancy conditions makes it possible to determine an ultimate resistance of the soil to shear, and, consequently, its strength. The proposed elastic-plastic model of dilatant soil in shear state being realized according to the adopted technology which was developed while using a special dilatometric shearing device has made it possible to obtain additional data on dilatant normal stresses and strength parameters of the soil depending on its density, granulometric composition and constrained dilatancy conditions. The use of artificial neural networks in the mathematical processing of experimental data has permitted to develop an analytical method for determining an ultimate resistance of loose soil to shearing process under constrained dilatancy conditions and carry out calibration of the calculated parameters of the adopted soil model. It has been proved that soil strength is a function of fracture conditions, which are determined by friction and dilatancy. In this case a conventional Coulomb-Mora strength theory for loose soils is valid both for free dilatation conditions and constrained shear but with due account of additional normal dilatant stresses.

Keywords: loose soil, dilatancy, stresses, deformations, soil porosity coefficient, effective size of soil particles, massif rigidity stiffness coefficient, grip, angle of internal friction

For citation: Popov O. V., Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2018) Determination of Limiting Resistance for Dilatant Soil to Shearing While Using Artificial Neural Networks. *Science and Technique*. 17 (6), 471–477. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477> (in Russian)

Введение

Особенностью деформируемости несвязных грунтов является их способность к существенным объемным деформациям в результате развития только деформаций формоизменения при сдвиге. Для описания данного состояния грунта используют термин «дилатансия», который впервые был введен Рейнольдсом в 1885 г. В своих опытах Рейнольдс обнаружил, что плотные зернистые среды при пластическом деформировании увеличивают объем (дилатируют), в то время как рыхлосложенные, напротив, его уменьшают, т. е. контрактируют.

Современные испытания образцов грунта, проводимые в приборах прямого среза в соответствии с существующей методикой [1], направлены на определение характеристик прочности (угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c) в условиях свободного дилатирования. Данные характеристики находят методом сдвига одной части образца относительно другой горизонтальной нагрузкой, нормальной к плоскости среза, при предварительном нагружении образца. В результате испытаний определяется предельное сопротивление грунта сдвигу τ_u , возникающее в момент разрушения образца грунта от максимальной сдвигающей нагрузки и соответствующее начальному нормальному давлению σ_0 . После проведения испытаний с несколькими образцами грунта строятся графические зависимости $\tau_u = c + \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi$, по которым

вычисляются искомые прочностные характеристики.

При решении ряда геотехнических задач, например в случаях расчета несущей способности свай в несвязных грунтах, следует учитывать условия ограничения дилатансии грунта на его предельное сопротивление сдвигу, что и являлось объектом исследований.

Исследование предельного сопротивления дилатирующего грунта

Для изучения явления дилатансии и его влияния на прочность грунтов был изготовлен и запатентован dilatometric прибор прямого сдвига [2], позволяющий моделировать напряженно-деформированное состояние грунта при разрушении в условиях стесненной дилатансии и определять предельные значения сопротивления грунта сдвигу как по обычной [1], так и по предлагаемой методике ограничения дилатансии зоны сдвига с использованием динамометрического приспособления регулируемой жесткости [3].

При проведении испытаний плотный несвязный грунт (коэффициент пористости e_0 меньше критического значения e_{kp}) по мере развития горизонтальных смещений каретки начинает дилатировать: вначале происходит небольшое уплотнение грунта, а затем по мере увеличения горизонтального смещения наблюдается интенсивное разрыхление. При этом

происходит подъем штампа, достигающий своего максимума при предельном сдвиге. Величина вертикальных дилатантных перемещений ограничена жесткостью динамометрического приспособления, которое моделирует отпор со стороны массива, не участвующего в процессе сдвига, на дилатансию зоны разрушения. В результате дилатансии зоны разрушения в плоскости сдвига возникают дополнительные нормальные дилатантные напряжения σ_d , которые, накладываясь на начальное нормальное давление σ_0 , определяют предельное сопротивление грунта сдвигу τ'_u [4].

В случае проведения испытаний по традиционной методике [1] (условия свободной дилатансии) предельное сопротивление несвязного грунта сдвигу, согласно закону Кулона, представлено прямой 1 на рис. 1 и определяется зависимостью

$$\tau_u = \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

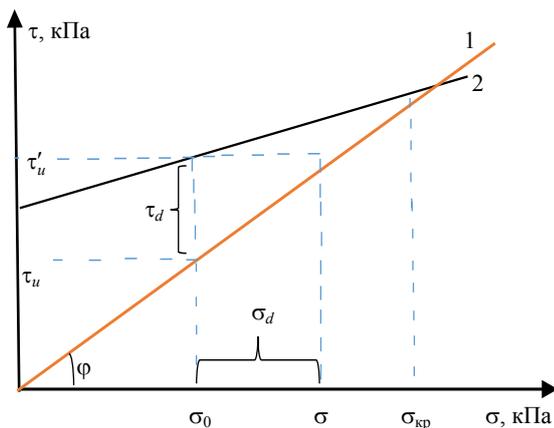


Рис. 1. Схематичные зависимости $\tau_u = f(\sigma_0)$ и $\tau'_u = f(\sigma)$

Fig. 1. Schematic dependencies $\tau_u = f(\sigma_0)$ and $\tau'_u = f(\sigma)$

Испытания в этом случае соответствуют условию действия постоянной вертикальной нагрузки на штамп прибора. При ограничении дилатансии возникает тенденция стремления начального коэффициента пористости e_0 к критическому значению $e_{кр}$ [5]. Подъем штампа вызовет увеличение вертикального давления на образец грунта за счет проявления дилатантных напряжений, величина которых определяется жесткостью дилатометрического приспособления, моделирующего упругий отпор со стороны массива. Фактическое нормальное давление в

сдвиговом приборе на момент разрушения составит

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_d, \quad (2)$$

а сопротивление грунта сдвигу определяется как

$$\tau'_u = (\sigma_0 + \sigma_d) \operatorname{tg} \varphi = \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi + \tau_d. \quad (3)$$

На рис. 1 данная зависимость схематично представлена прямой 2.

Программа испытаний несвязных грунтов в дилатометрических приборах прямого среза включала в себя испытания песков разного гранулометрического состава и плотности при различных жесткостях динамометрического приспособления, т. е. при разных моделируемых коэффициентах жесткости массива грунта. При обработке результатов сдвиговых испытаний плотных песков установлено, что в случае ограниченной дилатансии величина предельного сопротивления сдвигу должна определяться с учетом проявления дилатантных нормальных напряжений, зависящих от уровня начального нормального давления σ_0 , гранулометрического состава несвязного грунта (его действующего диаметра частиц) d_{50} , его коэффициента пористости e_0 , коэффициента жесткости массива грунта K . Пересечение прямых 1 и 2 на рис. 1 определяет величину критического начального давления $\sigma_{кр}$ на образец грунта, при котором дилатансия не проявляется, и величины дилатантных напряжений и соответствующих деформаций близки к нулю.

По результатам испытаний данное критическое нормальное давление, при котором дилатансия не наблюдается (порядка 0,7 МПа), соответствует состоянию, когда грунт до и после сдвига составляет один и тот же объем, т. е. выполняется условие критической пористости. Это свидетельствует о необходимости увязывать понятие критической пористости с напряженным состоянием грунта. Исходя из вышеизложенного, каждому начальному нормальному напряженному состоянию σ_0 соответствует определенная величина дилатантных напряжений σ_d , определяющая прирост предельного сопротивления грунта сдвигу τ_d , называемая дилатантной составляющей сдвигу (рис. 1). При увеличении начального нормального дав-

ления σ_0 до критического нормального давления $\sigma_{кр}$ величины дилатантных нормальных напряжений σ_d , а следовательно, и соответствующие дилатантные составляющие τ_d , уменьшаются от своих максимальных значений до нуля. При этом угол внутреннего трения, согласно нашим экспериментам, рассматриваемый как $\varphi = \arctg(\tau'_{u}/(\sigma_0 + \sigma_d))$, остается практически неизменной величиной в пределах погрешности измерений.

Согласно рис. 2, при известном значении критического нормального давления $\sigma_{кр}$ величину дилатантных напряжений σ_d при заданном значении начального нормального давления σ_0 можно определить по формуле

$$\sigma_d = \sigma_{d\max} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{кр}} \right), \quad (4)$$

а величину предельного сопротивления грунта как

$$\tau_u = \left(\sigma_0 + \sigma_{d\max} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{кр}} \right) \right) \operatorname{tg}\varphi, \quad (5)$$

где $\sigma_{d\max}$ – максимальные дилатантные напряжения, определяемые эмпирическим путем по данным испытаний.

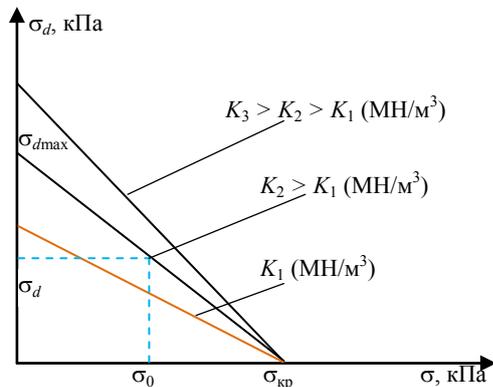


Рис. 2. Схематичная зависимость $\sigma_d = f(K, \sigma)$

Fig. 2. Schematic dependence $\sigma_d = f(K, \sigma)$

Проведенные эксперименты позволили получить таблицы значений максимальных дилатантных напряжений $\sigma_{d\max}$ для фиксированных значений действующего диаметра частиц несвязного грунта d_{50} , его коэффициента пористости e_0 и коэффициента жесткости массива грунта K . Данные таблицы предлагается использо-

вать в качестве обучающей выборки для обучения искусственной нейронной сети (ИНС). Результаты работы ИНС могут быть применены для расчета максимальных дилатантных напряжений в зависимости от указанных выше параметров.

Описание работы искусственной нейронной сети

Искусственный нейрон (ИН) имитирует в первом приближении свойства биологического нейрона [6]. На вход ИН поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона. Модель, реализующая эту идею, представлена на рис. 3. Здесь множество входных сигналов, обозначенных x_1, x_2, \dots, x_n , поступает на искусственный нейрон и имеет соответствующие веса w_1, w_2, \dots, w_n . Каждый вес отвечает «силе» одной синаптической связи. Суммирующий блок алгебраически объединяет взвешенные входы, создавая выход NET [6].

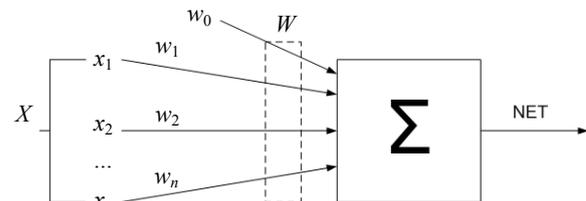


Рис. 3. Графическое представление искусственного нейрона

Fig. 3. Graphical representation of artificial neuron

Данное описание можно представить следующей формулой:

$$\text{NET} = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0,$$

где w_i – вес i -го нейрона; x_i – выход i -го нейрона; n – количество нейронов, которые входят в обрабатываемый нейрон; w_0 – bias-нейрон, или нейрон смещения.

Существует достаточно большое количество методов обучения искусственных нейронных сетей, однако для многослойных ИНС

наиболее популярным является метод обратного распространения ошибки, включающий в себя три фазы [7]:

- проведение через сеть обучающего примера (фаза прямого распространения);
- вычисление значения ошибки между полученным выходом сети и ожидаемым, на основе которого затем рассчитываются ошибки для каждого предыдущего слоя вплоть до входного (фаза обратного распространения ошибки);
- единовременная корректировка всех весов, основываясь на их текущем значении, величине ошибки, соответствующей рассматриваемому нейрону и активационному значению нейрона.

Графическое представление метода обратного распространения ошибки приведено на рис. 4 [8] для K нейронов первого слоя, M нейронов скрытого слоя и N нейронов выходного слоя.

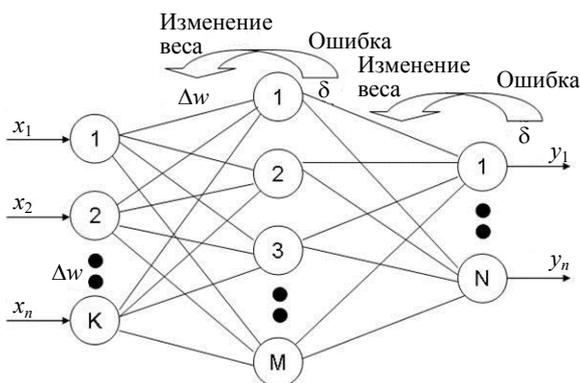


Рис. 4. Графическое представление метода обратного распространения ошибки

Fig. 4. Graphical representation of method for of back error propagation

Для решения данной задачи были выбраны: ИНС с тремя входами (диаметр частиц несвязного грунта d_{50} , коэффициент пористости несвязного грунта e_0 , коэффициент жесткости массива грунта K), два нейрона на скрытом слое и один на выходе (максимальное дилатантное напряжение σ_{dmax}). Обобщенная схема алгоритма расчета искусственного нейрона представлена на рис. 5.

Вначале алгоритм проходит по входным нейронам и вычисляет выходные значения для каждого из них. Далее алгоритм циклически переходит на расчет выходов для скрытого слоя на основе весов и ранее определенных выходов первого слоя. При вычислении выходов нейронов используется сигмоидальная функция активации.

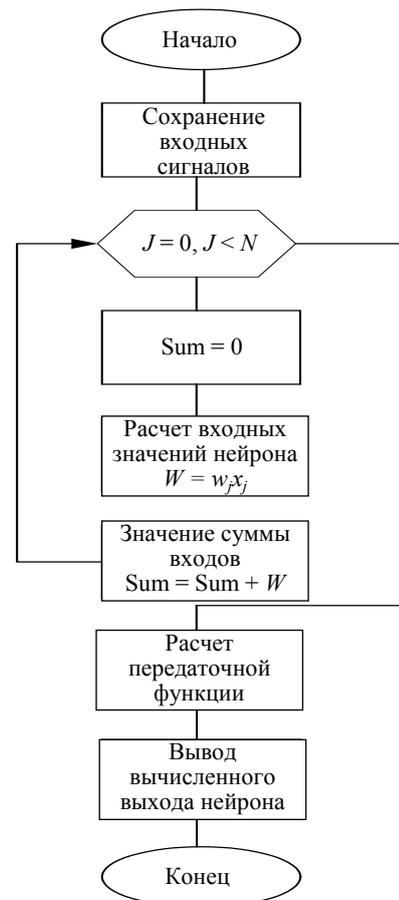


Рис. 5. Схема алгоритма расчета искусственного нейрона

Fig. 5. Scheme of algorithm for calculating artificial neuron

После работы алгоритма на выходе последнего слоя получается результат работы искусственной нейронной сети. Алгоритм обучения ИНС, реализующий описанный выше метод обратного распространения ошибки, приведен в [9, 10].

Анализ полученных результатов

Программная реализация искусственной нейронной сети была выполнена на языке JavaScript с использованием библиотек Node.js и Underscore.js. Копия экрана работы программы расчета максимального дилатантного напряжения несвязного грунта для вводимых с клавиатуры значений коэффициента жесткости массива грунта, коэффициента пористости грунта и среднего диаметра частиц грунта представлена на рис. 6. Ограничения на диапазон входных параметров получены эмпирическим путем и определены как: коэффициент жесткости массива грунта $K \in [0; 5000]$ МН/м³; коэффициент пористости несвязного грунта $e_0 \in [0; 1,3]$; диаметр частиц несвязного грунта $d_{50} \in [0,0001; 0,01]$ м.

Нейронная сеть обучена и готова к использованию

Расчет Gdmax Расчет всех Gdmax обучающей выборки

Рассчитать

К - коэффициент жесткости массива грунта, МН/м³ Gdmax - 0.19919951863101196

 e - коэффициент пористости грунта

 d50 - средний диаметр частиц грунта, м

Рис. 6. Расчет максимального дилатантного напряжения несвязного грунта

Fig. 6. Calculation of ultimate dilatant stress in loose soil

Нейронная сеть обучена и готова к использованию

Расчет Gdmax Расчет всех Gdmax обучающей выборки

№	К - коэффициент жесткости массива грунта, МН/м ³	e - коэффициент пористости грунта	d50 - средний диаметр частиц грунта, м	Gdmax - максимальное дилатантное напряжение, МН/м ²	Результат расчета	Среднеквадратичное отклонение
1	0	0.43	0.0015	0	0.016	0.00800
2	0	0.5	0.0015	0	0.014	0.00700
3	0	0.6	0.0015	0	0.012	0.00600
4	0	1	0.0015	0	0.000	0.00000
5	44	0.43	0.0015	0.047	0.028	0.00950
6	44	0.5	0.0015	0.031	0.024	0.00350
7	44	0.6	0.0015	0.022	0.020	0.00100
8	44	1	0.0015	0	0.000	0.00000
9	385	0.43	0.0015	0.14	0.147	0.00350

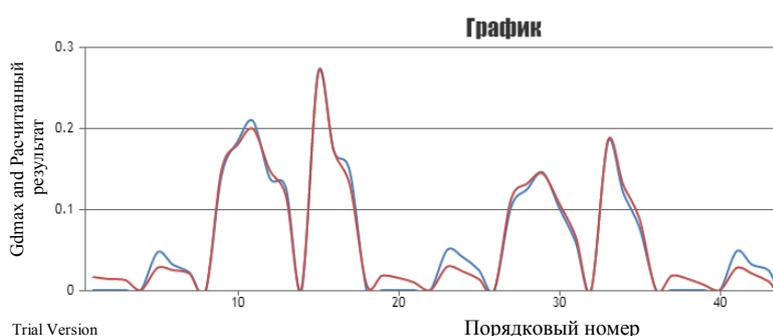


Рис. 7. Расчет напряженности грунта для обучающей выборки

Fig. 7. Calculation of soil strength for training sample

Для подтверждения работоспособности разработанной искусственной нейронной сети в предлагаемом программном продукте имеется возможность расчета ИНС на всем диапазоне обучающей выборки с расчетом среднеквадратичного отклонения и составлением графика для визуального сравнения (рис. 7). На рис. 7 синим цветом показаны эмпирические значе-

ния σ_{dmax} , а коричневым – результаты расчета искусственной нейронной сети.

ВЫВОДЫ

1. Прочность несвязного грунта со значением коэффициента пористости, меньше критической величины, является функцией усло-

вий разрушения грунта и определяется его внутренним трением и дилатансией.

2. При определении предельного сопротивления несвязного грунта сдвигу следует учитывать изменение нормального давления в плоскости разрушения вследствие дилатансии. Новое напряженное состояние определяется соотношением предельного сопротивления грунта сдвигу к суммарным нормальным напряжениям в момент разрушения.

3. Статистическая обработка результатов сдвиговых испытаний несвязных грунтов в условиях стесненной дилатансии с использованием искусственных нейронных сетей позволяет с достаточно высокой точностью определять дополнительные нормальные дилатантные напряжения в плоскости разрушения в зависимости от действующего диаметра частиц несвязного грунта, его начального коэффициента пористости, упругого отпора со стороны массива грунта на дилатансию зоны сдвига, начального нормального давления и геометрических размеров плоскости сдвига.

4. Фактор стесненной дилатансии является главным резервом повышения несущей способности свай, его понимание открывает путь к совершенствованию современных геотехнических технологий изготовления свай, обеспечивающих активное и целенаправленное воздействие на грунт околосвайного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформированности: ГОСТ 12248–2010. М.: Стандартинформ, 2012. 78 с.
2. Устройство для определения контактного сопротивления сдвигу сыпучих материалов: а. с. 1491143 СССР / Д. Ю. Соболевский, О. В. Попов. 1989.
3. Соболевский, Д. Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д. Ю. Соболевский. Минск: Наука і тэхніка, 1994. 232 с.
4. Соболевский, Д. Ю. О сдвиговой осадке и боковом трении по стволам свай в песках / Д. Ю. Соболевский, О. В. Попов // Механизир. безотход. технол. возведения свайных фундаментов из свай завод. готовности. Владивосток, 1988. С. 97–99.
5. Герсеванов, Н. М. Основы механики грунтов и их практические приложения / Н. М. Герсеванов, Д. Е. Польшин. М.: Стройиздат, 1948. 248 с.
6. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика / Ф. Уоссермен. М.: Мир, 1992. 184 с.
7. Парадигмы обучения нейронных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://apsheronk.bozo.ru/Neural/Lec3.htm>. Дата доступа: 10.05.2017.

8. Попова, Ю. Б. Обучение искусственных нейронных сетей методом обратного распространения ошибки [Электронный ресурс] / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович. Режим доступа: <http://www.bntu.by/news/67-conference-mido/4860-2016-11-18-15-47-40.html>. Дата доступа: 01.08.2017.
9. Попова, Ю. Б. Реализация искусственной нейронной сети для управления виртуальными объектами / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 4. С. 72–78.
10. Попова, Ю. Б. Моделирование и программная реализация искусственной нейронной сети / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 12. Ч. 1. С. 168–171.

Поступила 11.07.2018

Подписана в печать 18.09.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. *Soils. Laboratory Methods for Determining the Strength and Strain Characteristics*: GOST [All-Union State Standard] 12248–2010. Moscow, Standartinform, 2012. 78 (in Russian).
2. Sobolevsky D. Yu., Popov O. V. (1989) *Device for Determination the Contact of Resistance to Bulk Material Displacement*. Inventor's Certificate No 1491143 USSR (in Russian).
3. Sobolevsky D. Yu. (1994) *Strength and Bearing Capacity of Dilatant Soil*. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
4. Sobolevsky D. Yu., Popov O. V. (1988) On Contact Settlement and Lateral Friction Along Pile Shafts in Sand Soil. *Mechanized Non-Waste Technology for Creation of Pile Foundation*. Vladivostok, 97–99 (in Russian).
5. Gersevanov N. M., Polshin D. E. (1948) *Fundamentals of Soil Mechanics and its Practical Application*. Moscow, Publishing House Stroyizdat. 248 (in Russian).
6. Wasserman F. (1989) *Neural Computing: Theory and Practice*. Coriolis Group. 230.
7. Training Paradigms for Neural Networks. Available at: <http://apsheronk.bozo.ru/Neural/Lec3.htm>. (Accessed 10 May 2017) (in Russian).
8. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Training for Artificial Neural Networks While Using Back-Prop Method. Available at: <http://www.bntu.by/news/67-conference-mido/4860-2016-11-18-15-47-40.html>. (Accessed 1 August 2017) (in Russian).
9. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Software Implementation of the Artificial Neural Network for Virtual Objects Control. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Informatics*, (4), 72–78 (in Russian).
10. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Simulation and Programming Realization of Artificial Neural Network. *Matematicheskiye Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh. Sb. tr. Mezhdunar. Nauch. Konf. T. 12, Ch. 1* [Mathematical Methods for Equipment and Technologies. Collected Papers of International Scientific Conference. Vol. 12. Part. 1]. Saint-Petersburg, Publishing House of Polytechnical University, 168–171 (in Russian).

Received: 11.07.2018

Accepted: 18.09.2018

Published online: 30.11.2018