

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ФОРМЫ ПОДОШВЫ ТЯЖЁЛЫХ ТРАМБОВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ИХ УПЛОТНЕНИИ

Д. Н. Клебанюк¹, П. С. Пойта², П. В. Шведовский³

¹ Старший преподаватель кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «БрГТУ», Брест, Беларусь, klebanyuk_dmitri@mail.ru

² Д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

³ К. т. н., заведующий кафедрой геотехники и транспортных коммуникаций УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

Реферат

В статье дан анализ влияния конструктивно-технологических параметров тяжелых трамбовок на уплотнение грунтовых оснований с целью минимизации энергоматериальных затрат.

Приведены также возможные подходы к разработке конечно-элементной модели для компьютерного моделирования процесса динамического уплотнения.

Получены аналитические зависимости взаимодействия тяжелых трамбовок со сферической формой подошвы с грунтовыми основаниями. Численное решение полученных зависимостей в комплексе с имеющимися экспериментальными данными позволяет актуализировать модель Друкера – Прагера при использовании для компьютерного моделирования процесса уплотнения, программных комплексов AQBAGUS и PLAXIS и тем самым оптимизировать технологические процессы уплотнения грунтовых оснований в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: тяжелые трамбовки, уплотнение грунтовых оснований, модель Друкера-Прагера.

INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS AND SHAPE OF HEAVY TRUMBIES SOLE ON FORMATION OF SOIL PROPERTIES AT THEIR COMPACTION

D. N. Klebanyuk, P. S. Poita, P. V. Schwedovskiy

Abstract

The article provides an analysis of the effect of structural and technological parameters of heavy trawls on soil base compaction in order to minimize energy and material costs.

Possible approaches to development of finite-element model for computer simulation of dynamic compaction process are also presented.

Analytical dependencies of interaction of heavy trawls with spherical shape of sole with soil bases are obtained. The numerical solution of the obtained dependencies in combination with the available experimental data allows to update the Drucker-Prager model when using, for computer modeling of the compaction process, software complexes AQBAGUS and PLAXIS, and thus optimize the technological processes of compaction of soil bases in complex engineering and geological conditions.

Keywords: heavy trawls, soil base compaction, the Drucker-Prager model.

Введение

Опыт проектирования искусственных оснований методами интенсивного ударного уплотнения показывает, что повышение эффективности принятых решений, снижение трудоёмкости при их устройстве могут быть достигнуты за счёт совершенствования как конструктивных, так и технологических параметров. Обоснованно принятые параметры тяжелых трамбовок позволяют получить качественное основание при минимальных энергоматериальных затратах [1].

Экспериментальные данные [2, 3, 4] свидетельствуют о целесообразности увеличения массы трамбовок, что позволяет получить не только требуемую осадку поверхности грунта, с меньшими энергетическими затратами, но и более равномерное распределение плотности по глубине уплотняемой толщи. Однако трамбовка одной и той же массы может иметь не только различные размеры подошвы, но и различные ее формы, что обуславливает совершенно разное статическое давление на грунт. Как показывает практика [5], чем меньше статическое давление на грунт, тем больше ударов в одной точке необходимо выполнять для достижения грунтом требуемой плотности. Малые размеры подошвы трамбовки не только затрудняют производство работ, но, и при достижении определённого предела по диаметру, делают эти работы практически невозможными из-за выпора грунта, т. е. оптимальная площадь основания трамбовки будет лишь в том случае, когда работа ($N_{фак}$), затрачиваемая на уплотнение грунта, будет минимальной ($N_{мин}$):

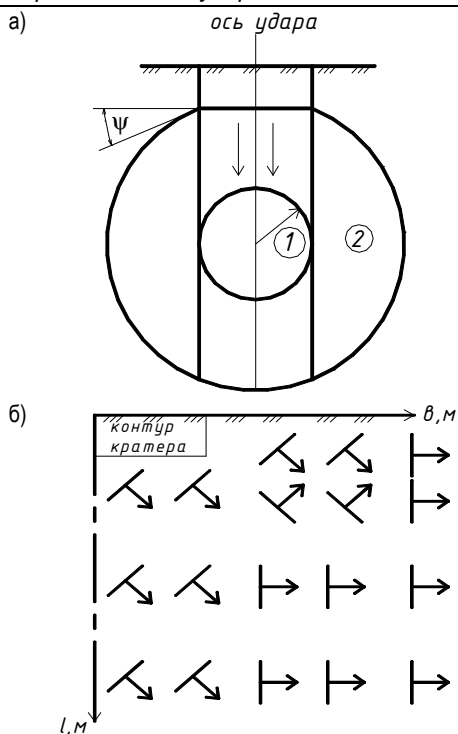
$$N_{фак} = M \cdot H \cdot \frac{b}{A} \cdot n_j \in N_{мин}, \quad (1)$$

где M – масса трамбовки, принимаемая с учётом грузоподъёмности механизма, тс; H – высота сбрасывания трамбовки, м; b – площадь участка в пределах которого требуется уплотнение грунтов, м²; A – площадь основания трамбовки, м²; n_j – число ударов трамбовки в одной точке.

Не менее существенно и значение угла наклона секущей прямой (ψ) к горизонту, так как чем больше его величина, тем более качественное уплотнение грунта и по глубине, и по площади (рис. 1).

Кроме того, увеличение угла (ψ) позволяет увеличить и расстояние между точками трамбования, минимизирующие трудозатраты работ по уплотнению, что связано с особенностями формирования центральной зоны уплотнения грунта, развития периферийной зоны уплотнения и их взаимодействием.

Нужно отметить, что в зоне уплотнения (рис. 1) наблюдается в основном радиальное направление нормалей к площадкам главных деформаций сжатия, а это указывает на преобладание радиальных деформаций над вертикальными, т. е. интенсивные удары тяжелых трамбовок с круглой плоской подошвой обуславливают на начальном этапе уплотнения сжатие центральной зоны (столба) грунта в области подошвы трамбовки, с последовательным радиальным его боковым расширением, которое и вызывает радиальное сжатие грунта в периферийной зоне. При этом если плотность грунта периферийной зоны относительно высокая, то радиальное сжатие может сопровождаться выпором грунта. При низкой же естественной плотности грунта влияние радиального распора на деформации периферийной зоны будет существенно менее значимо.



1 – центральная зона; 2 – периферийная зона уплотнения
Рисунок 1 – Схема формирования зон уплотнения (а) и направление нормалей к площадкам главных максимальных деформаций сжатия (б)

Все это определяет одно из перспективных направлений в области оптимизации процесса уплотнения грунтов – изменение формы поверхности подошвы трамбовок, т. е. переход от плоских к сферическим или сфероидным [6] (рис. 2).

Применяемые на практике трамбовки в виде усеченных конусов с основанием в форме правильной шестигранной призмы в некоторой мере являются прообразом трамбовок со сферической формой подошвы большого радиуса [7, 8, 9].

Анализ процесса формирования контуров зон уплотнения и изменений углов наклона (ψ) секущей прямой к горизонту позволяет отметить, что как для центральной, так и периферических зон характерны специфические особенности их пластического деформирования, усложняемые существенной неоднородностью напряженно-деформированного состояния при контактом взаимодействии трамбовок и грунта [10, 11, 12].

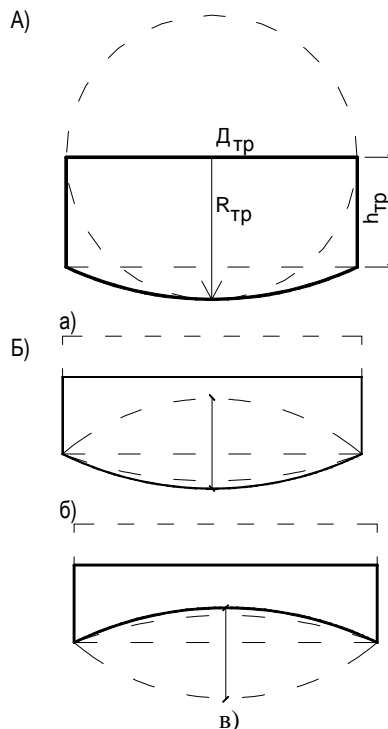
Аналитическое решение задачи взаимодействия поверхности тяжелых трамбовок с грунтовыми основаниями

Сложность взаимосвязей и взаимодействия множества вышеприведенных факторов и параметров и обуславливает необходимость компьютерного моделирования процесса динамического уплотнения. Для разработки конечно-элементной модели с 10-узловыми конечными элементами и её реализации с использованием известных программных комплексов была предпринята попытка поиска аналитического решения задачи о соударении сферического тела с упруго-пластичным полупространством с выделением трех стадий: упругое, упругое ограниченно-пластическое и ограниченно-упругое пластическое деформирование.

На стадии упругого деформирования зависимость радиуса круговой области контакта (r) от значения вертикальной силы (P) может быть описана классической теорией Герца [13]:

$$P = \frac{4 \cdot E}{3 \cdot R \cdot (1 - \nu^2)} \cdot r^3, \tag{2}$$

при этом связь радиуса круговой области контакта (r) с глубиной отпечатка (u) определяется соотношением $r^2 = u \cdot R$, где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, R – сферический радиус трамбовки.



А – с выпуклой подошвой (сферическая (а) и сфероидная (б)); Б – с выгнутой сфероидной подошвой (в)

Рисунок 2 – Принципиальные схемы трамбовок

Критическое значение вертикальной силы (F), соответствующей началу пластического течения, соответствует максимальному контактному давлению (P_{max}):

$$P_{max} = \left[\frac{6 \cdot F \cdot E^2}{\pi^3 \cdot R^2 \cdot (1 - \nu^2)^2} \right]^{1/3} \tag{3}$$

и соответственно

$$r_{кр} = \frac{\sigma_y \cdot \pi \cdot R \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot f_{max} \cdot E}, \tag{4}$$

где σ_y – константа и

$$\sigma_y = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \varphi)}, \tag{5}$$

где c и φ – соответственно удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта;

$$\left. \begin{aligned} f_{max} &= \left(-2 \cdot \beta - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \cdot (1 + \nu) \\ \beta &= \frac{2 \cdot \sin \varphi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \varphi)} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

Для стадии упругого ограниченно-пластического деформирования соответственно зависимость $r = f(P)$ принимает вид:

$$P = \pi \cdot H \cdot \frac{a^{m_0}}{R^{m_0-2}}, \tag{7}$$

где H – давление текучести, определяемое средним контактным давлением при начале пластического течения и

$$H = C_0 \cdot \frac{P_{кр}}{\pi \cdot r_{кр}^2}, \tag{8}$$

где C_0 – коэффициент, ограничиваемый условием $2 < m_0 < 3$, и тогда, соответственно –

$$r^2 = 2 \cdot R \cdot u \cdot k_y - u^2 k_y^2, \quad (9)$$

где k_y – коэффициент, характеризующий изменение формы краёв отпечатка в области ограниченной пластичности.

Стадия ограниченно-упругого пластического деформирования характерна для периода выхода области пластичности на поверхность [14] и

$$P = 2 \cdot H \cdot a^2 \cdot \arctg\left(\frac{r}{r_L}\right), \quad (10)$$

где r_L – радиус, определяемый из условия неразрывности вертикальной силы при переходе стадий

$$r_L = 2^{2-m_0} \cdot R \quad (11)$$

и соответственно

$$\left. \begin{aligned} r^2 &= 2 \cdot R \cdot u \cdot k(u) - u^2 k(u) \\ k(u) &= 0.5 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{u}{u_L} - 1\right)^{1.5} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

u_L – максимальная глубина отпечатка на стадии упруго ограниченно-пластического деформирования.

Используя динамическое уравнение движения трамбовки [2, 12]

$$M \frac{d^2 \cdot u}{dt^2} = -P(u), \quad (13)$$

где M – масса, u – глубина отпечатка, $P(u)$ – сопротивление грунта, можно установить зависимость скорости падения трамбовки (ϑ) и глубины отпечатка (u)

$$\frac{\vartheta^2 - \vartheta_0^2}{2} = -\frac{1}{M} \int_0^u P(\xi) \cdot d\xi, \quad (14)$$

где ξ – переменная интегрирования.

В момент достижения максимального значения глубины отпечатка (u_{\max}) из уравнения (14) следует

$$\vartheta_0^2 = \frac{2 \cdot b}{M} \int_0^{u_{\max}} \xi^n d\xi = \frac{2 \cdot b}{M \cdot (n-1)} \cdot u_{\max}^{n+1} \quad (15)$$

и тогда соответственно

$$\left. \begin{aligned} u_{\max} &= \left[\frac{M \cdot \vartheta_0^2}{2 \cdot b} \cdot (n+1) \right]^{1/(n+1)} \\ P_{\max} &= b \cdot u_{\max}^n \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

где n – параметрический степенной показатель.

Из уравнения (14) определим текущую скорость трамбовки

$$\begin{aligned} \vartheta &= \frac{\partial u}{\partial t} = \sqrt{\vartheta_0^2 - \frac{2}{M} \cdot \int_0^u P(\xi) \cdot d\xi} = \\ &= \vartheta_0 \sqrt{1 - \frac{2}{M \cdot \vartheta_0^2} \cdot \int_0^u P(\xi) \cdot d\xi}. \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом уравнения (15) имеем

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \vartheta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{u_{\max}}\right)^{n+1}}. \quad (18)$$

Разделяя переменные и интегрируя от $t = 0$ до $t = t_a$, имеем:

$$\int_0^{t_a} dt = \int_0^{u_{\max}} \frac{du}{\vartheta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{u_{\max}}\right)^{n+1}}}, \quad (19)$$

где t_a – время активной стадии удара, в течение которого глубина отпечатка изменяется от 0 до u_{\max} , а скорость от ϑ_0 до 0.

Тогда

$$t_a = J(n) \cdot \frac{u_{\max}}{\vartheta_0}, \quad (20)$$

где

$$J(n) = \int_0^1 \frac{d\vartheta}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{u_{\max}}\right)^{n+1}}} = \frac{\sqrt{n}}{n+1} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n+1}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{n+1} + \frac{1}{2}\right)} \quad (21)$$

$\Gamma(x)$ – гамма-функция.

При достижении u_{\max} начинается упругая разгрузка грунта и соответственно глубина восстанавливаемого отпечатка будет определяться соотношением:

$$u_{e_{\max}} = \left(\frac{P_{\max}}{b_e}\right)^{2/3}, \quad (22)$$

где b_e – параметр функции для стадии линейно упруго деформирования и

$$b_e = \frac{4 \cdot E \cdot \sqrt{R}}{3 \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (23)$$

Общее время удара может быть определено зависимостью

$$t_y = \frac{1}{\vartheta_0} \cdot [J(n) \cdot u_{\max} + 1.47 \cdot u_{e_{\max}}], \quad (24)$$

тогда временная зависимость силы сопротивления на активной стадии удара:

$$P_t = P_{\max} \cdot \sin^n\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot t_a}\right) \quad (25)$$

и соответственно:

$$P(u) = b_e \cdot (u - h)^{1.5}. \quad (26)$$

Заключение

Аналитические исследования контактного взаимодействия сферических трамбовок с грунтовыми основаниями подтверждают, что учет упруго-пластических деформаций по модели Друкера-Прагера, при больших нагрузках обуславливает значительные изменения расчетных параметров области контакта и соответственно существенные изменения напряженно-деформированного состояния уплотняемого основания. Численное решение полученных аналитических зависимостей в комплексе с имеющимися экспериментальными данными позволяет актуализировать, для процесса уплотнения грунтовых оснований тяжелыми трамбовками со сферическими формами поверхностей подошвы, модель Друкера-Прагера с использованием программных комплексов ABAQUS и PLAXIS.

Список цитированных источников

1. Пойта, П. С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / П. С. Пойта // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1. – С. 109–110.
2. Швец, В. Б. Уплотнение грунтов оснований тяжелыми трамбовками / В. Б. Швец. – М.: Росстройиздат, 1958 – 162 с.

3. Вуцель, В. И. Интенсивное динамическое уплотнение грунтов / В. И. Вуцель, Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов // Энергетическое строительство за рубежом. – 1983. – № 3. – С. 39–43.
 4. Зарецкий, Ю. К. Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками / Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
 5. Пойта, П. С. Особенности формирования зоны уплотнения грунтов при уплотнении грунтового основания тяжелыми трамбовками / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара. – Новополоцк, 2012. – Т. II. – С. 189–196.
 6. Клебанюк, Д. Н. Пути совершенствования конструктивно – технологических параметров процесса уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч.-технич. конференции. – Минск. – 2013. – Ч. II. – С. 109–120.
 7. Пойта, П. С. Влияние конструктивных параметров и особенностей формы подошвы тяжелых трамбовок на формирование свойств грунтов в зоне уплотнения / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк // Вес. Брестского гос. техн. ун-та. – Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 72–77.
 8. Клебанюк, Д. Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Вес. Брестского гос. техн. ун-та. – Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 77–81.
 9. Пойта, П. С. Особенности выбора оптимальной схемы размещения точек уплотнения грунтов оснований тяжелыми трамбовками / П. С. Пойта, Д. Н. Клебанюк, П. В. Шведовский // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч.-технич. конференции. – Минск. – 2013. – Ч. II. – С. 241–249.
 10. Пойта, П. С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки / П. С. Пойта // Строительство. – Минск. – 2003. – № 1–2. – С. 243–247.
 11. Пойта, П. С. Определение оптимального расстояния между точками уплотнения грунта тяжелыми трамбовками / П. С. Пойта, А. Н. Тарасевич // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1(19). – С. 111–113.
 12. Клебанюк, Д. Н. Особенности процесса распределения давлений и напряжений при уплотнении неоднородных грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, А. Ю. Дроневиц, П. В. Шведовский, П. С. Пойта // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара. – Новополоцк, 2012. – Т. II. – С. 239–244.
 13. Goshtasb, A. K. Circular Disc Blade Considerations in Force Prediction Modelling / A. K. Goshtasb, J. Desbiolles, J. Fielke // Journal of Agricultural Science and Technology. – 2014. – № 4. – P. 371–383.
 14. Шимановский, А. О. Аналитический расчет вдавливания полусферы в материал, описываемый модель Друкера-Прагера / А. О. Шимановский, Д. А. Черноус, М. Х. Абдулкадер // Механика : исследования и инновации. – БелГут – Гомель, 2017. – Вып. 10. – С. 219–224.
- References**
1. Pojta, P. S. Optimizaciya tekhnologicheskikh parametrov uplotneniya gruntov tyazhelymi trambovkami / P. S. Pojta // Vestnik BGTU. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2003. – № 1. – S. 109–110.
 2. SHvec, V. B. Uplotnenie gruntov osnovanij tyazhelymi trambovkami / V. B. Shvec. – M. : Rosstrojizdat, 1958 – 162 s.
 3. Vucel', V. I. Intensivnoe dinamicheskoe uplotnenie gruntov / V. I. Vucel', Yu. K. Zareckij, M. Yu. Garicelov // Energeticheskoe stroitel'stvo za rubezhom, 1983. – № 3. – S. 39–43.
 4. Zareckij, Yu. K. Glubinnoe uplotnenie gruntov udarnymi nagruzkami / Yu. K. Zareckij, M. Yu. Garicelov. – M. : Energoatomizdat, 1989. – 192 s.
 5. Pojta, P. S. Osobennosti formirovaniya zony uplotneniya gruntov pri uplotnenii gruntovogo osnovaniya tyazhelymi trambovkami / P. S. Pojta, P. V. Shvedovskij, D. N. Klebanyuk // Perspektivy razvitiya novyh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke inzhenernyh kadrov Respubliki Belarus' : sb. tr. XVIII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar. – Novopolock, 2012. – Т. II. – S. 189–196.
 6. Klebanyuk, D. N. Puti sovershenstvovaniya konstruktivno – tekhnologicheskikh parametrov processa uplotneniya gruntov tyazhelymi trambovkami / D. N. Klebanyuk, P. S. Pojta, P. V. Shvedovskij // Geotekhnika Belarusi : nauka i praktika : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferencii. – Minsk, 2013. – Ч. II. – S. 109–120.
 7. Pojta, P. S. Vliyanie konstruktivnyh parametrov i osobennostej formy podoshvy tyazhelyh trambovok na formirovanie svoystv gruntov v zone uplotneniya / P. S. Pojta, P. V. SHvedovskij, D. N. Klebanyuk // Ves. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. – Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 1. – S. 72–77.
 8. Klebanyuk, D. N. Osobennosti metodiki vybora tekhnologicheskikh parametrov pri uplotnenii gruntovyh osnovanij tyazhyolymi trambovkami / D. N. Klebanyuk, P. S. Pojta, P. V. Shvedovskij // Ves. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. – Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 1. – S. 77–81.
 9. Pojta, P. S. Osobennosti vybora optimal'noj skhemy razmeshcheniya tochek uplotneniya gruntovyh osnovanij tyazhelymi trambovkami / P. S. Pojta, D. N. Klebanyuk, P. V. SHvedovskij // Geotekhnika Belarusi : nauka i praktika : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferencii. – Minsk, 2013. – Ч. II. – S. 241–249.
 10. Pojta, P. S. Vliyanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv uplotnyaemogo grunta na optimal'nyj diametr trambovki / P. S. Pojta // Stroitel'stvo. – Minsk, 2003. – № 1–2. – S. 243–247.
 11. Pojta, P. S. Opredelenie optimal'nogo rasstoyaniya mezhdru tochkami uplotneniya grunta tyazhelymi trambovkami / P. S. Pojta, A. N. Tarasevich // Vestnik BGTU. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2003. – № 1(19). – S. 111–113.
 12. Klebanyuk, D. N. Osobennosti processa raspredeleniya davlenij i napryazhenij pri uplotnenii neodnorodnyh gruntovyh osnovanij tyazhelymi trambovkami / D. N. Klebanyuk, A. Yu. Dronevich, P. V. Shvedovskij, P. S. Pojta // Perspektivy razvitiya novyh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke inzhenernyh kadrov Respubliki Belarus' : sb. tr. XVIII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar. – Novopolock, 2012. – Т. II. – S. 239–244.
 13. Goshtasb, A. K. Circular Disc Blade Considerations in Force Prediction Modelling // A. K. Goshtasb, J. Desbiolles, J. Fielke // Journal of Agricultural Science and Technology. – 2014. – № 4. – P. 371–383.
 14. Shimanovskij, A. O. Analiticheskij raschet vdavlivaniya polusfery v material, opisivaemyj model' Drukera-Pragera / A. O. SHimanovskij, D. A. Chernous, M. H. Abdulkader // Mekhanika : issledovaniya i innovacii. – BelGut – Gomeľ, 2017. – Vyp. 10. – S. 219–224.

Материал поступил в редакцию 06.11.2019