

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОСНОВАНИИ ШТАМПОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НА ГРУНТ РАВНОМЕРНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

П. С. Пойта<sup>1</sup>, Н. Н. Шалобыта<sup>2</sup>, Т. П. Шалобыта<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

<sup>2</sup>К. т. н., доцент кафедры строительных конструкций, проректор по научной работе

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

<sup>3</sup>К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: t\_shalobyta@mail.ru

### Реферат

Проведены численные исследования и анализ напряженно-деформированного состояния грунтового основания для различных форм подошв трамбовки: плоской, выпуклой и вогнутой при статическом действии нагрузки.

**Ключевые слова:** основание фундаментов, несущая способность грунта, напряженно-деформированное состояние, уплотнение грунтов, трамбовка.

### STRESS-STRAIN STATE IN THE BASE OF DAMPS WHEN TRANSFER TO THE GROUND OF A UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD OF DIFFERENT INTENSITY

P. S. Poyta, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta

### Abstract

There have been carried out numerical studies and analysis of the stress-strain state of soil foundation for various ramming base shapes: flat, convex and concave under static load.

**Keywords:** foundation base, soil bearing capacity, stress-strain state, soil compaction, ramming.

### Введение

Уплотнение насыпных, рыхлых песчаных грунтов, глинистых отложений, в том числе и просадочных, тяжелыми трамбовками является одним из наиболее экономичных и распространенных методов подготовки оснований зданий и сооружений [1...4].

Важнейшим показателем эффективности уплотнения является размер зоны, в пределах которой плотность сухого грунта  $\rho_d$  изменяется от максимальной до величины, превышающей на 0,02...0,03  $T/M^3$  природную плотность [1]. В каждом конкретном случае размеры зоны уплотнения будут различны. В одних случаях требуется выполнить уплотнение на максимально возможную глубину, в других – экономически целесообразно получить её максимальную ширину. Изменяя форму контактной поверхности, можно регулировать эти параметры.

Следует отметить, что вопросам влияния формы подошвы фундамента на его совместную работу с грунтом основания посвящено много работ [5, 9, 11, 12 и др.] и во всех случаях авторами доказана целесообразность их применения с точки зрения надёжности и экономичности.

В частности, изучение взаимодействия монолитного железобетонного опорного кольца объединенного тонкостенной оболочкой, вогнутой по отношению к грунту с основанием естественного сложения, выполнены Я. А. Пронозиним и Р. В. Мельниковым [10]. По результатам проведенных полевых испытаний установлено, что фундамент в виде выпуклой вверх пологой оболочки, нагруженный периметрально, имеет ряд преимуществ в сравнении с жесткими плоскими фундаментом как по несущей способности, так и по деформациям. М. С. Гризук [12] утверждает, что плиты с выпуклой криволинейной или пирамидальной контактной поверхностью являются более экономичными в сравнении с плоской подошвой. Учитывая это, можно предположить, что контактная поверхность трамбовки также влияет на напряженно-деформированное состояние уплотняемого грунта, а следовательно, на размеры зоны уплотнения.

Принимая во внимание вышесказанное, нами в результате проведенных теоретических исследований были выявлены параметры, влияющие на деформируемость уплотненных оснований, установлены особенности напряженно-деформированного состояния грунтового массива, отличающегося распределением напряжений и деформаций под выпуклой, плоской и вогнутой контактными поверхностями трамбовки.

### Методика и результаты исследований

Влияние формы контактной поверхности трамбовки на распределение вертикальных и горизонтальных напряжений показано в работах [5, 6]. Однако не менее важное значение имеет оценка деформирования уплотняемого массива. Определение деформаций мы выполнили по формулам, полученным после преобразования обобщенного уравнения Генки [7].

Взятая за основу система физических уравнений Генки позволяет учитывать как линейное, так и нелинейное поведение грунтов, описывая общие деформации как сумму сдвиговых и объемных деформаций. Помимо вертикальных деформаций рассматриваемая модель позволяет определять и горизонтальные деформации

$$e_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2 \cdot G_0} + \frac{\sigma_m}{k_0};$$

$$e_x = \frac{\sigma_x - \sigma_m}{2 \cdot G_0} + \frac{\sigma_m}{k_0},$$

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$  – соответственно вертикальные и горизонтальные напряжения в заданной точке;

$\sigma_m$  – среднее напряжение, определяемое по формулам:

– для случая плоской задачи

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_z + \sigma_y) \cdot (1 + \mu)}{3};$$

– для случая пространственной задачи

$$\sigma_m = \frac{\sigma_z + \sigma_x + \sigma_y}{3};$$

$G_0 = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \mu_0)}$  – модуль сдвиговой деформации;

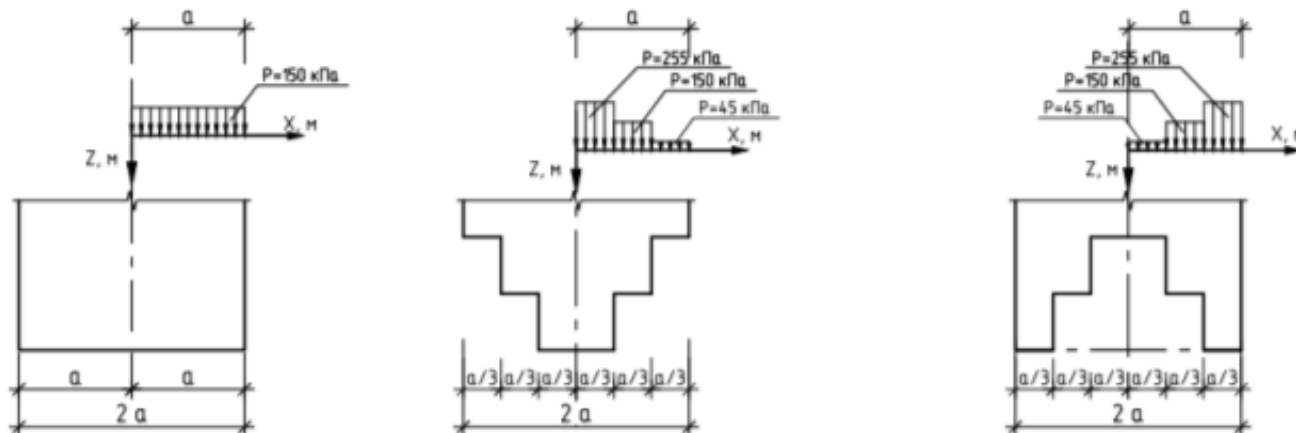
$k_0 = \frac{E_0}{3 \cdot (1 - 2 \mu_0)}$  – модуль объемной деформации;

$E_0$  – модуль деформаций;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Решение, базирующееся на основе системы уравнений Генки [7], позволяет прогнозировать осадку как в пределах условия  $p < R$ , так и при  $p > R$ , в которых  $p$  – давление по подошве фундамента от действующей нагрузки;  $R$  – расчётное сопротивление грунта основания.

С целью выявления особенностей деформирования массива грунта были выбраны трамбовки с различной формой контактной поверхности (рисунок 1).



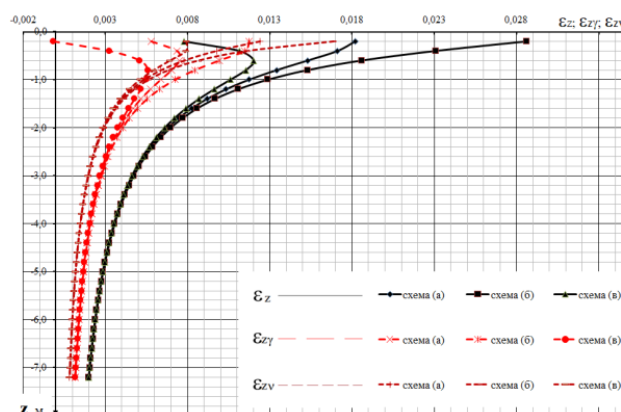
а) – плоская, б) – выпуклая, в) – вогнутая  
**Рисунок 1** – Варианты контактной поверхности трамбовки и схемы нагружения статической нагрузкой

Суммарная нагрузка на трамбовки при рассмотренных схемах нагружения принималась одинаковой. Учитывая сложность оценки параметров взаимодействия системы «основание-фундамент» при динамических нагрузках, расчёты выполнены при статическом нагружении основания. Такой подход основан на результатах исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при действии кратковременных динамических нагрузок, показавших, что распределение напряжений по контактной поверхности плиты при статическом нагружении согласуется с данными динамических испытаний [8]. В расчетах рассмотрено однородное основание при отсутствии подземных вод.

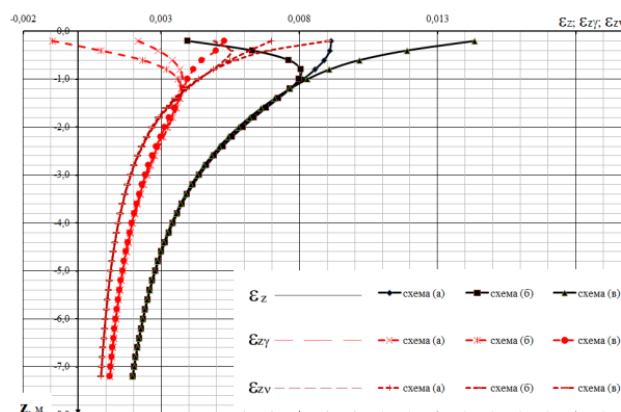
Величины деформаций определяли в узловых точках расчётной сетки. Для этого область грунта под подошвой трамбовки была разбита сеткой с горизонтальным шагом 10 см от оси симметрии нагрузки и вертикальным шагом 10 см от оси X, совмещенной с плоскостью подошвы трамбовки. В качестве эталонной задачи рассматривалась схема с равномерно распределенным давлением по плоской подошве контактной поверхности.

При оценке влияния принятых вариантов контактной поверхности трамбовки на глубину активной толщи наблюдается некоторое различие в ее величине, определенной по методике, изложенной в [10]. В частности, оно не превышает 8,5 %. Однако при столь незначительном расхождении результатов определения мощности сжимаемой толщи, расчёты деформаций слоев грунта показывают на существенные изменения вертикальных и горизонтальных напряжений, особенно в верхней ее зоне (рисунки 2 и 3). Характер изменения деформации  $e_z$  по схемам (а) и (б) одинаков в точках, расположенных на оси симметрии нагрузки ( $x = 0$ ), общие деформации ближе к поверхности максимальны в случае нагружения основания по схеме (б) (рисунок 1). При этом имеются различия, составляющие для глубин: 0,25 м – 1,42 раза; 0,5 м – 1,24 раза; а ниже 2 м – деформации практически совпадают.

Для схемы нагружения (в) характер развития общих деформаций резко отличается от рассмотренных выше. Непосредственно у контактной поверхности деформаций  $e_z$  меньше в 2,2 раза, чем для плоской подошвы трамбовки и в 3.5 раза – для выпуклой поверхности. Вместе с тем с ростом глубины, деформации  $e_z$  увеличиваются для варианта (в) контактной поверхности. На глубине 1,0 м эти деформации максимальны, а затем до глубины 2,0 м они уменьшаются. Ниже 2,0 м вид контактной поверхности в аспекте рассмотренных схем не имеет значения. Деформации  $e_z$  при любой схеме практически равны. Очевидно, что общие деформации зависят от объемных и сдвиговых, причем последние в значительной степени зависят от вариантов контактной поверхности.



**Рисунок 2** – Графики развития общих ( $e_z$ ), сдвиговых ( $e_{z\gamma}$ ) и объемных ( $e_{z\nu}$ ) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при  $X = 0$  м



**Рисунок 3** – Графики развития общих ( $e_z$ ), сдвиговых ( $e_{z\gamma}$ ) и объемных ( $e_{z\nu}$ ) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при  $X = a$ , м

Изменение деформаций  $e_{z\gamma}$  для вариантов контактной поверхности (а) и (в) примерно одинаковы, но для варианта (в) их различие по глубине более существенно. Непосредственно у контактной поверхности деформации  $e_{z\gamma}$  имеют отрицательные значения. Это означает, что движение частиц при нагружении основания возможно в различных и даже противоположных направлениях. И основной влияющий здесь параметр – это форма контактной поверхности. Выравнивание сдвиговых деформаций при различных вариантах контактной поверхности происходит на глубине 2,0 м. Величина изменения

объёмных деформаций примерно одинакова, при этом деформации  $e_{zV}$ , при схеме нагружения (а), занимают среднее положение в сравнении со схемами (б) – эпюра справа от графика  $e_{zV} = f(h)$ , схема (а) и эпюра слева – схема (в). Выравнивание деформаций  $e_{zV}$  происходит на глубине 1,5 м, далее сдвиговые и объёмные деформации для разных вариантов контактной поверхности трамбовки и схем нагружения асимптотически уменьшаются с глубиной, при этом  $e_{zV} > e_{zV}$ .

В точках по вертикали, проходящей по грани контактной поверхности ( $X = a$ ), изменение деформаций  $e_z$  по глубине имеет другой характер. В целом деформации  $e_z$  непосредственно по контактной поверхности максимальны для вариантов (а) и (в). Различие вертикальных деформаций составляет 1.6 раза. Для схем (б) и (в) меняется их положение относительно эпюры эталонной схемы (а). В данном случае эпюра  $e_z$  расположены: слева (схема б) и справа от эталонной – схема (а). Таким образом, очевидно резкое увеличение деформаций  $e_z$  в схеме (в) по сравнению с предыдущими случаем при схеме (а) – в 1,75 раза на уровне контактной поверхности и уменьшение в 7.1 раза при передаче нагрузки по схеме (б). Выравнивание деформаций при различных схемах нагружения происходит на глубине 1,0 м. Таким образом, при удалении от оси симметрии характер изменения вертикальных деформаций для схем нагружения (б) и (в) меняется на противоположное. Для обоих схем очевидно и значительное изменение величины деформаций  $e_z$  на глубинах от 1.0 до 2.0 м от уровня контактной поверхности: для схемы (б) – уменьшение более чем в 7.0 раз, а для схемы (в) – увеличение в 1.75 раза. Глубина, на которой происходит выравнивание деформаций, уменьшается в 2.0 раза. В сравнении с эталоном, сдвиговые и объёмные деформации при нагружении основания по схеме (б) стали меньше, а по схеме (в) наоборот – стали больше. Именно этот факт свидетельствует, что по схеме (в) мы получаем более развитую зону уплотнения грунта на стороны.

Изменение горизонтальных деформаций при различных схемах нагружения показаны на рисунка 4, 5, 6. Общие деформации  $e_x$  при  $X = 0$  практически идентичны по всей глубине для различных схем нагружения.

При незначительном различии величины деформаций для всех схем нагружения до глубин 2.0 м от контактной поверхности, ниже они практически одинаковы в пределах активных зон.

Сдвиговые деформации  $e_{xy}$  для всех схем нагружения полностью меняют свое направление на противоположное в пределах сжимаемой толщи, за исключением участка глубиной 0.25 м, где эпюра  $e_{xy}$  (схема (в)) является положительной (рисунок 4). На глубине 1.8 м от контактной поверхности значение  $e_{xy}$  для всех схем нагружения практически одинаковы и сохраняют тенденцию к уменьшению с возрастанием глубины.

Объёмные деформаций  $e_{xV}$  по всей глубине активной зоны изменяются идентично, за исключением участка от контактной поверхности до глубины 1.8 м ниже. На этом участке  $e_{xV}$  для схемы (б) – максимальные, а для схемы (в) (рисунок 4) – минимальные.

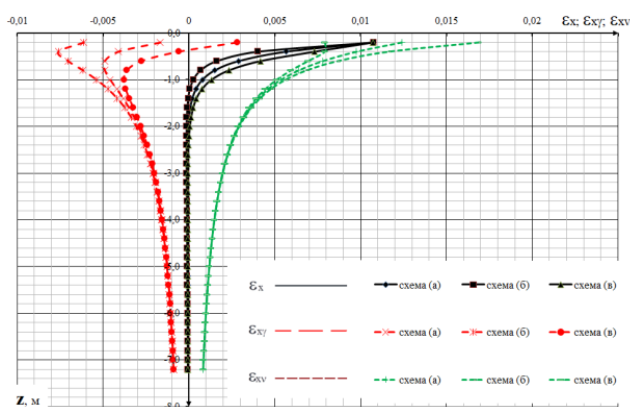


Рисунок 4 – Графики развития общих ( $e_x$ ), сдвиговых ( $e_{xy}$ ) и объёмных ( $e_{xV}$ ) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при  $X = 0$  м

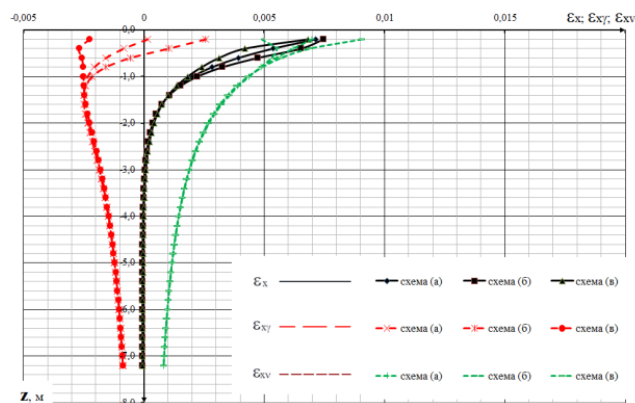


Рисунок 5 – Графики развития общих ( $e_x$ ), сдвиговых ( $e_{xy}$ ) и объёмных ( $e_{xV}$ ) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения при  $X = a$ , м

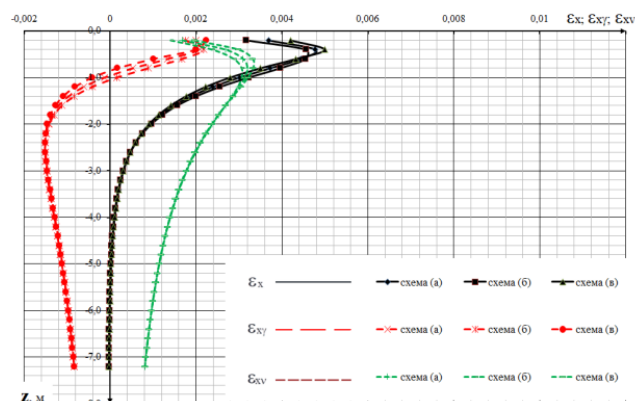


Рисунок 6 – Графики развития общих ( $e_x$ ), сдвиговых ( $e_{xy}$ ) и объёмных ( $e_{xV}$ ) деформаций грунта по глубине при различных схемах нагружения для  $X = 1.33$  а, м

При оценке деформируемости грунтового массива по оси, проходящей через край контактной поверхности (рисунок 5), установлено, что общие горизонтальные деформации меньше при  $X = 0$  в среднем в 1.38 раза. Однако их затухание с глубиной происходит медленнее. Деформации  $e_x$  практически равны нулю на глубине 3.0 м, что в 1.5 раза больше, чем при  $X = 0$  м. Изменилось также распределение сдвиговых деформаций. Практически по всей глубине грунтовой толщи деформации  $e_{xy}$  имеют отрицательное значение, кроме варианта контактной поверхности по схеме (а), где у поверхности деформации  $e_{xy}$  положительны. Сдвиговые деформации, определенные по схемам (б) и (в), практически одинаковы на глубине 2.0 м. Но до этой глубины сдвиговые деформации  $e_{xy}$ , полученные при загрузке по схеме (в) имеют большие отрицательные значения, чем при схеме нагружения (б). Этот факт свидетельствует о том, что при загрузке основания по схеме (в), грунт обжат в большей мере, чем при других схемах. Объёмные деформации до глубины 1,0 м имеют большие значения при загрузке массива по схеме (в), меньшие – при схеме (б), при этом у поверхности данное различие достигает 1,3 раза.

Для всех видов деформаций установлено, что при удалении от оси симметрии нагрузки их характер и величина изменяется в незначительной степени (рисунок 6). Горизонтальные деформации  $e_x$  при всех схемах нагружения имеют одинаковую тенденцию изменения с увеличением глубины. От контактной поверхности до глубины 0.5 м они увеличиваются, а затем уменьшаются и почти равны нулю на глубине 4.5 м. Сдвиговые деформации  $e_{xy}$  от контактной поверхности примерно до глубины 1.0 м положительны, а далее во всем диапазоне рассмотренных глубин имеют отрицательное значение, уменьшаясь с глубиной. Глубина 0.5...0.6 м от контактной поверхности является переломной также и для деформаций  $e_{xV}$  при всех схемах нагружения. До данной глубины объёмные деформации возрастают, а ниже этой отметки – уменьшаются, при этом после глубины 1.2 м они практически одинаковы.

**Заключение**

Выполненный анализ развития вертикальных и горизонтальных деформаций при различных схемах нагружения показал, что зона деформирования грунта при равной суммарной вертикальной нагрузке зависит от формы контактной поверхности. Максимальная ширина зоны уплотнения грунта может быть достигнута при передаче нагрузки на основание по схеме (в), а максимальная ее глубина – при передаче нагрузки по схеме (б). Таким образом, предположение о влиянии формы контактной поверхности на формирование зоны уплотнения грунта, высказанное в работе [6], подтверждается характером и величиной развития вертикальных и горизонтальных деформаций и их составляющих.

Форма контактной поверхности оказывает существенное влияние на размеры зоны уплотнения грунта. Меняя форму контактной поверхности трамбовки, можно повысить эффективность работ по устройству искусственных оснований.

**Список цитированных источников**

1. Зарецкий, Ю. К. Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками / Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов. – Ц. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
2. Уплотнение просадочных грунтов сверхтяжелой трамбовкой на строительстве больничного комплекса / И. Г. Рабинович [и др.] // Основание, фундаменты и механика грунтов. – 1991. – № 1. – С. 2–4.
3. Пойта, П. С. Строительные свойства искусственных оснований / П. С. Пойта. – Брест : БрГТУ, 2004. – 174 с.
4. Клебанюк, Д. Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтов оснований тяжелыми трамбовками / Д. Н. Клебанюк, П. С. Пойта, П. В. Шведовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2013. – № 1.: Строительство и архитектура. – С. 77–81.
5. Прозозин, Я. А. Теоритические обоснования повышения жесткости грунтового основания, нагруженного по выпуклой вверх криволинейной поверхности / Я. А. Прозозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Геотехника. International journal geotechnics. – 2015. – № 2. – С. 4–9.
6. Влияние формы контактной поверхности трамбовки на напряженно-деформированное состояние уплотняемого грунта / П. С. Пойта [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2. – С. 41–46.
7. Hencky H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen / H. Hencky. – Zamm. – 1924. – Vol. 4, Is. 4. – p. 323–334.
8. Рыков, Г. В. Экспериментальные исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при кратковременных динамических нагрузках / Г. В. Рыков, В. П. Кузнецов // Основание, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 3. – С. 10–12.
9. Степанов, М. А. Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно спрессованным грунтовым основанием : дис.... канд. техн. наук : 05.23.02 / Степанов М. А. – Тюмень, 2015. – 189 с.
10. Прозозин, Я. А. Расчёт взаимодействия асимметричных фундаментов-оболочек с глинистым основанием / Я. А. Прозозин, Р. В. Мельников // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 577–584.
11. Тетиор, А. Н. Об устойчивости основания под фундаментами с криволинейной формой подошвы / А. Н. Тетиор // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – № 5. – С. 14–17.
12. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М. С. Грицук. – Брест : Брестский политехнический институт, 1997. – 218 с.

**References**

1. Zareckij, Yu. K. Glubinnoe uplotnenie gruntov udarnymi nagruzkami / Yu. K. Zareckij, M. YU. Garicelov. – C. : Energo-atomizdat, 1989. – 192 s.
2. Uplotnenie prosadochnyh gruntov sverhtyazhelej trambovkoj na stroitel'stve bol'nichnogo kompleksa / I. G. Rabinovich [i dr.] // Osnovanie, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1991. – № 1. – S. 2–4.
3. Pojta, P. S. Stroitel'nye svojstva iskusstvennyh osnovanij / P. S. Pojta. – Brest : BrGTU, 2004. – 174 s.
4. Klebanyuk, D. N. Osobennosti metodiki vybora tekhnologicheskih parametrov pri uplotnenii gruntov osnovanij tyazhelymi trambovkami / D. N. Klebanyuk, P. S. Pojta, P. V. SHvedovskij // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – № 1.: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 77–81.
5. Pronozin, Ya. A. Teoriticheskie obosnovaniya povysheniya zhestkosti gruntovogo osnovaniya, nagruzhennogo po vypukloj vverh krivolinejnoy poverhnosti / Ya. A. Pronozin, Yu. V. Naumkina, D. V. Rachkov // Geotekhnika. International journal geotechnics. – 2015. – № 2. – S. 4–9.
6. Vliyanie formy kontaktnoj poverhnosti trambovki na naprya-zhenno-deformirovannoe sostoyanie uplotnyaemogo grunta / P. S. Pojta [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2. – S. 41–46.
7. Hencky H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen / H. Hencky. – Zamm. – 1924. – Vol. 4, Is. 4. – P. 323–334.
8. Rykov, G. V. Eksperimental'nye issledovaniya reaktivnogo soprotivleniya grunta v osnovanii kruglogo shtampa pri kratkovremennyh dinamicheskikh nagruzkah / G. V. Rykov, V. P. Kuznecov // Osnovanie, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1990. – № 3. – S. 10–12.
9. Stepanov, M. A. Vzaimodejstvie kombinirovannyh lentochnyh svajnyh fundamentov s predvaritel'no spressovannym gruntovym osnovaniem : dis.... kand. tekhn. nauk : 05.23.02 / Stepanov M. A. – Tyumen', 2015. – 189 s.
10. Pronozin, Ya. A. Raschyot vzaimodejstviya asimetrichnyh fundamentov-obolochek s glinistym osnovaniem / Ya. A. Pronozin, R. V. Mel'nikov // Vestnik MGSU. – 2011. – № 7. – S. 577–584.
11. Tetior, A. N. Ob ustojchivosti osnovaniya pod fundamentami s krivolinejnoy formoj podoshvy / A. N. Tetior // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1969. – № 5. – S. 14–17.
12. Gričuk, M. S. Racional'nye konstrukcii plitnyh fundamentov / M. S. Gričuk. – Brest : Brestskij politekhnicheskij institut, 1997. – 218 s.

*Материал поступил 19.01.2023, одобрен 26.01.2023, принят к публикации 06.02.2023*