

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРАМБОВКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УПЛОТНЯЕМОГО ГРУНТА

П. С. Пойта¹, Н. Н. Шалобыта², Т. П. Шалобыта³, А. А. Четырбок⁴

¹Д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

²К. т. н., проректор по научной работе Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

³К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

⁴Студентка Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: chebrtok@gmail.com

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.

INFLUENCE OF THE RAMMING CONTACT SURFACE SHAPE ON THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPACTED SOIL

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

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

Одним из современных путей получения экономически и технологически эффективных конструкций фундаментов, применяемых в сложных инженерно-геологических условиях, является усовершенствование формы их контактной поверхности с грунтом. К настоящему времени накоплен определенный опыт исследований напряженно-деформированного состояния оснований для разработки более экономичных конструкций фундаментов за счет рационального распределения реактивного давления грунта либо применения новых подходов к построению расчетной схемы. Наряду с широко применяемыми фундаментами с плоской подошвой разработаны их конструкции со ступенчатой, выпуклой, вогнутой и др. формами поверхностями передачи нагрузки на основания [1–6]. На основании результатов исследований установлены пределы применимости фундаментов со ступенчатым и криволинейным очертанием контактной поверхности, доказана возможность увеличения несущей способности основания до 100 % для различных по шероховатости поверхностей, контактирующих с грунтом. Определяющее значение имеют конструктивные особенности фундамента (стрела подъема кривизны, характер контактной поверхности), глубина его заложения, а также прочностные и деформативные характеристики грунта основания. Следовательно, вопрос влияния формы контактной поверхности фундаментов на напряженно-деформированное состояние грунтового основания значительно изучен.

Вместе с тем влияние формы контактной поверхности трамбовки на напряженно-деформированное состояние уплотненного грунта основания является вопросом открытым, требующим более детального изучения.

Особенностью проектирования и строительства фундаментов в инженерно-геологических условиях Республики Беларусь является наличие значительных территорий, представленных грунтами большой деформативности и незначительной прочности. Применение уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками позволяет в ряде случаев весьма эффективно решить указанные проблемы в практике производства земляных работ и, естественно, способствует улучшению качества грунтового основания, то есть позволяет снизить сжимаемость и повысить прочность грунтов.

Методика исследований

В строительной практике применяют в основном трамбовки, круглые или многоугольные в плане, диаметром от 0,7 м до 3 м с плоской подошвой (рисунок 1). Масса трамбовки колеблется, как правило, от 3 до 16 т. В отдельных случаях используются более тяжелые трамбовки $d = 5,0$ м с куполообразной формой днища малой кривизны [7, 8].

Исследования и производственный опыт показывают, что при поверхностном уплотнении грунтовых оснований тяжелыми трамбовками, снижению трудоемкости, повышению экономичности принимаемых решений способствует совершенствование не только технологических, но и конструктивных параметров [9]. Изменение плоской формы подошвы трамбовки на криволинейную позволяет обеспечить более однородную степень уплотнения по всей глубине и по всей площади уплотняемой толщине грунта [9].



Рисунок 1 – Формы трамбовок для уплотнения грунта

Учитывая сложность оценки параметров взаимодействия системы «фундамент–основание» при динамических воздействиях, нами выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния грунтового основания при различной форме подошвы

трамбовки (плоской, выпуклой, вогнутой) и различными вариантами эпюр вертикальных контактных давлений при статическом нагружении (рисунок 2). Такой подход возможен, так как исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при кратковременных динамических нагрузках показали, что распределение контактных напряжений по фундаментной плите согласуется с соответствующими данными статистических испытаний [10].

Расчеты напряжений выполнены для прямоугольной трамбовки шириной 1,2 м и массой 9 т. При назначении массы трамбовки исходили из того, чтобы статическое давление на грунты составляло не менее 15,0 кПа для песков, 20,0 кПа для глинистых грунтов [7]. При проведении анализа принят вариант, когда нагрузка на грунтовое основание передается равномерно по всей плоскости контакта с различной интенсивностью, что позволило идеализировать схему работы и решить задачу в плоской постановке. Оценка характера распределения вертикальных и горизонтальных напряжений произведена при различных вариантах эпюр контактных давлений при изменяющихся значениях вертикального нагружения по ширине трамбовки (рисунки 3, 4).

Напряжения в грунтовом массиве от действия вертикальной нагрузки определяли согласно решению Г. В. Колосова [11], представленному в декартовых координатах:

$$\sigma_z = \frac{P}{\pi} \left(\arctg \frac{b-x}{z} + \arctg \frac{b+x}{z} \right) - \frac{2bP}{\pi} \cdot \frac{z(x^2 - z^2 - b^2)}{\left[(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2 z^2 \right]} \quad (1)$$

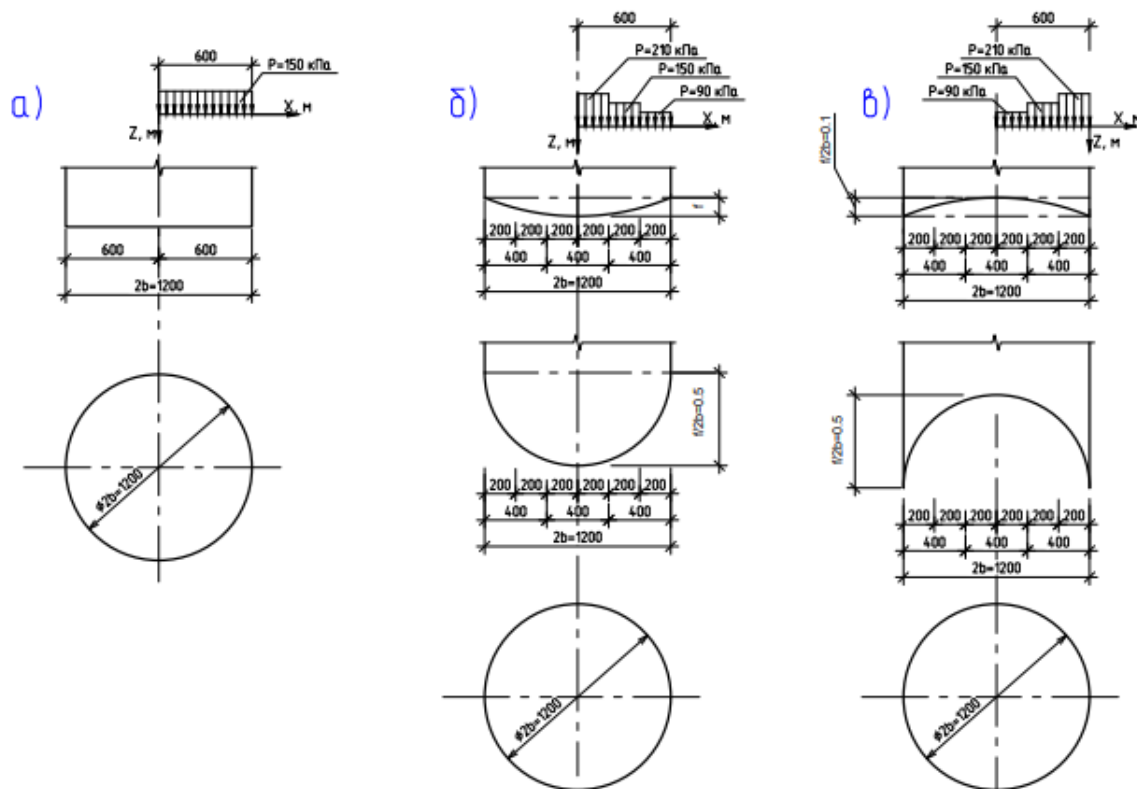
$$\sigma_x = \frac{P}{\pi} \left(\arctg \frac{b-x}{z} + \arctg \frac{b+x}{z} \right) + \frac{2bP}{\pi} \cdot \frac{z(x^2 - z^2 - b^2)}{\left[(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2 z^2 \right]} \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = \frac{4bP}{\pi} \cdot \frac{xz^2}{\left[(x^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2 z^2 \right]} \quad (3)$$

где P – интенсивность нагрузки;
 b – половина ширины трамбовки;
 x – расстояние по горизонтали от оси Z до рассматриваемой точки;
 z – расстояние по вертикали от оси X до рассматриваемой точки.

Величины напряжений определяли в узловых точках расчетной сетки. Для этого область под подошвой фундамента 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. Распределение нагрузки принимали из условия равенства суммарного нагружения основания. В качестве эталонной задачи рассматривалась схема с равномерно-распределенным давлением по плоской подошве контактной поверхности трамбовки (рисунок 2а).

Очертания давления принимали равномерного типа с максимальными значениями у края (рисунок 2в, схемы нагружения 4 и 5) и у центра полосы нагружения (рисунки 2б, схемы нагружения 2 и 3), что соответствует трамбовкам с различной формой контактной поверхности. Определение суммарного напряженного состояния для схем нагружения производили в несколько этапов путем суммирования полей напряжений от отдельных участков распределенной нагрузки.



а) – схема 1 (плоская),
 б) – схема 2 и 3 (выпуклой, с различной стрелой подъема),
 в) – схема 4 и 5 (вогнутой, с различной стрелой подъема)

Рисунок 2 – Схемы нагружения основания для различных форм подошвы трамбовки

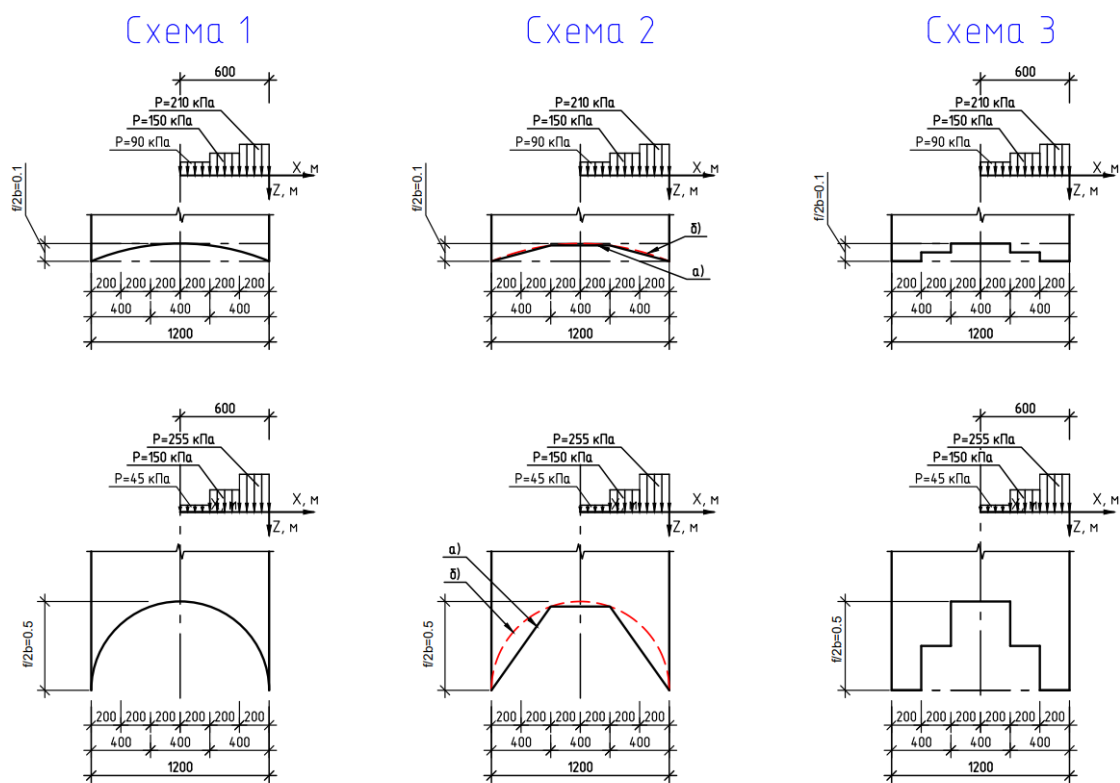


схема 1 – исходная схема;
схема 2 – приведение поверхности трамбовки к ломаной форме;
схема 3 – принятая к расчета упрощенная расчетная схема
а) – по окружности, б) – ломаная в форме трапеции

Рисунок 3 – Схемы нагружения основания трамбовками с вогнутой поверхностью и различной стрелой подъёма

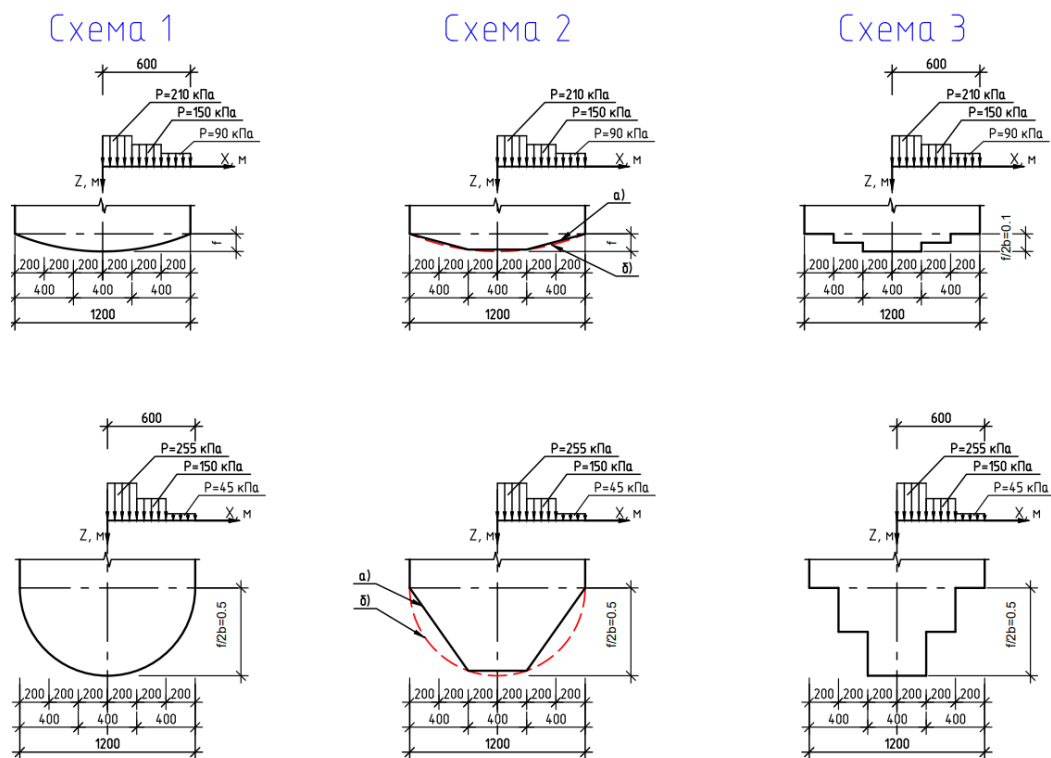


схема 1 – исходная схема;
схема 2 – приведение поверхности трамбовки к ломаной форме;
схема 3 – принятая к расчета упрощенная расчетная схема
а) – по окружности, б) – ломаная в форме трапеции

Рисунок 4 – Схемы нагружения основания трамбовками с выпуклой поверхностью и различной стрелой подъёма

Результаты расчета и их анализ

Эпюры распределения вертикальных напряжений σ_z по глубине грунтовой толщи на различном удалении от оси симметрии представлены на рисунках 5 и 6. Их анализ показывает, что основное различие в величине и характере изменения вертикальных напряжений σ_z происходит в поверхностном слое мощностью, равной 1,3 ширины трамбовки. Наибольшие различия имеют напряжения по оси симметрии нагружения ($x = 0$). Для разных схем нагружения это различие у поверхности достигает более чем в 3,5 раза. При увеличении глубины вертикальные напряжения σ_z быстро уменьшаются и на расстоянии около 1,6 м от поверхности при различных схемах нагружения почти совпадают. Следует отметить, на данном участке вертикальные напряжения при схемах нагружения 4 и 5 меньше напряжений от действия равномерно-распределенной нагрузки (схема 1, рисунок 2а, при этом напряжение от действия нагрузки по схемам 2 и 3 значительно больше, чем при схеме 1.

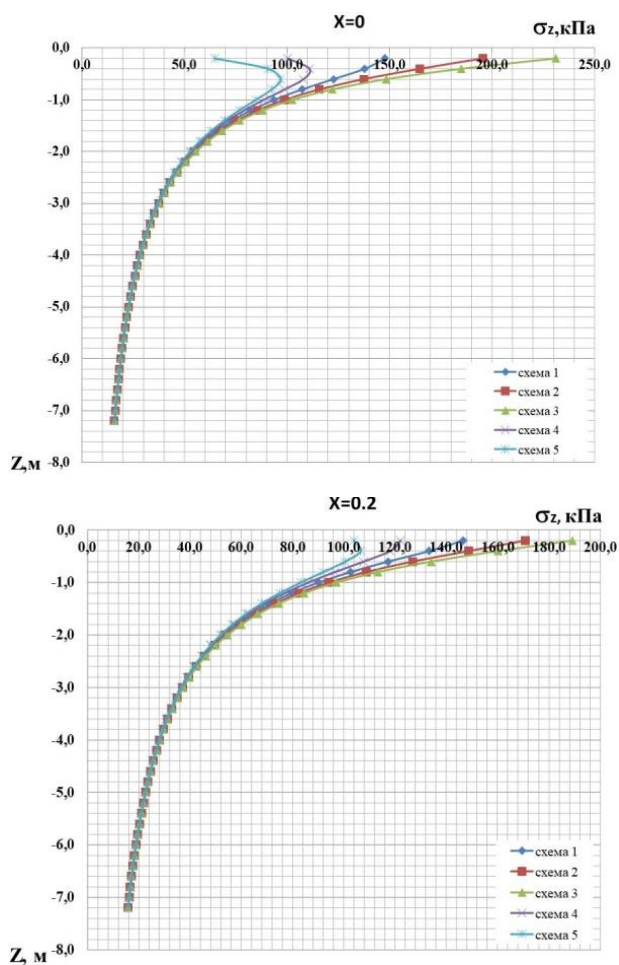


Рисунок 5 – Распределение вертикальных напряжений σ_z по глубине основания

Аналогичная картина распределения вертикальных напряжений σ_z наблюдается и при $x = 0,2$ м, хотя диапазон их изменения значительно меньше. Таким образом, максимальные вертикальные напряжения при $x = 0$ м имеем при действии нагрузки, приложенной к контактной поверхности по схемам 2 и 3. При удалении от оси симметрии действующей нагрузки на расстояние, равном b , картина распределений напряжений σ_z кардинально меняется. Напряжения σ_z по схемам 4 и 5 на уровне контакта поверхности трамбовки с грунтом превышают соответствующие напряжения от действия равномерно распределенной нагрузки больше в 1,3...1,5 раза. И это превышение, в меньших пределах, сохраняется до глубины 1,0 м. При увеличении расстояния от оси приложения нагрузки до 0,8...1,0 м, напряжения σ_z , определенные от действия нагрузки по схемам 4 и 5

в пределах глубины 3,7 м (2.2b) больше σ_z , определенных по другим схемам загрузки основания. И чем больше удаление от оси симметрии нагрузки до вертикали определения напряжений σ_z , тем различие напряжений уменьшается с увеличением глубины. При удалении от оси симметрии на $x = 0,8$ м выравнивание напряжений σ_z происходит на глубине 1,4 м от поверхности, а при удалении от оси 0-z на 1,0 м выравнивание происходит на глубине 1,7 м. При этом напряжения, определенные от действия нагрузки по схемам 4 и 5 больше напряжений, определенных по остальным схемам, а это в свою очередь свидетельствует о более эффективном воздействии нагрузки по схемам 4 и 5 на грунты основания, т. к. вертикальные напряжения большей величины действуют на большей глубине.

Распределение горизонтальных напряжений при сравнении рассматриваемых схем нагружения (рисунки 7 и 8) имеет существенные различия до глубины, равной 1,3b. Разброс значений в активной зоне основания лежит в диапазоне от 5,0 до 60 %. Ближе к поверхности нагруженного слоя грунта имеют место более значительные расхождения. При этом величины σ_x при удалении от оси симметрии нагружения до 0,6 м для различных схем претерпевают значительные изменения. При $x = 0$ меньшие значения σ_x характерны для схем 2 и 3. Однако при $x = 0,6$ м, т. е. $x = b$, меньшие значения σ_x характерны для схем 4 и 5. Данная тенденция сохраняется и при большем удалении от оси симметрии нагружения.

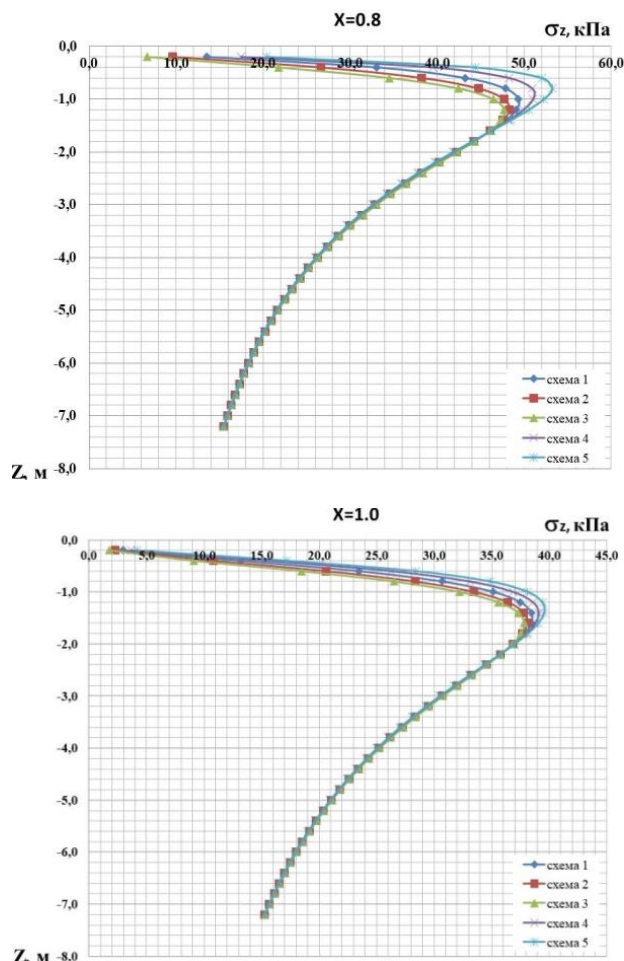


Рисунок 6 – Распределение вертикальных напряжений σ_z по глубине основания

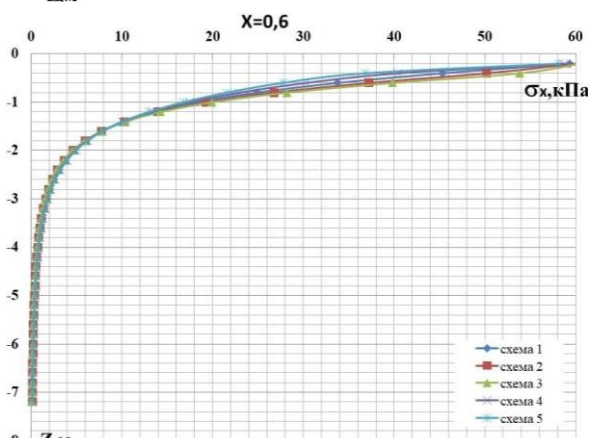
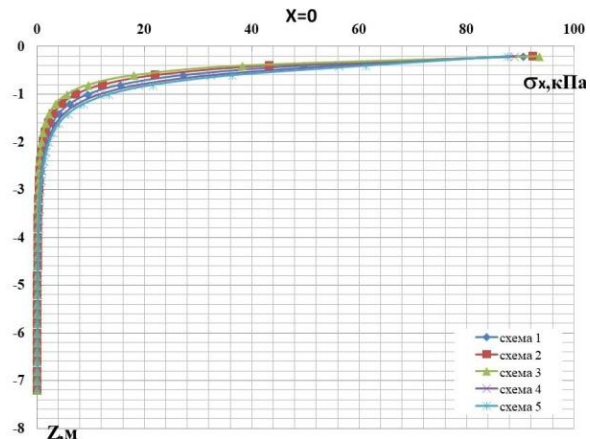


Рисунок 7 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x по глубине основания

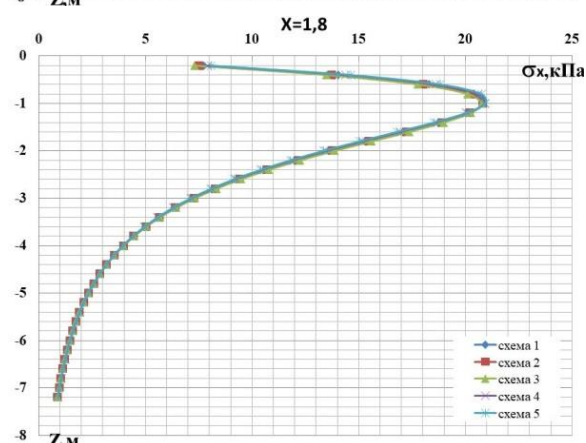
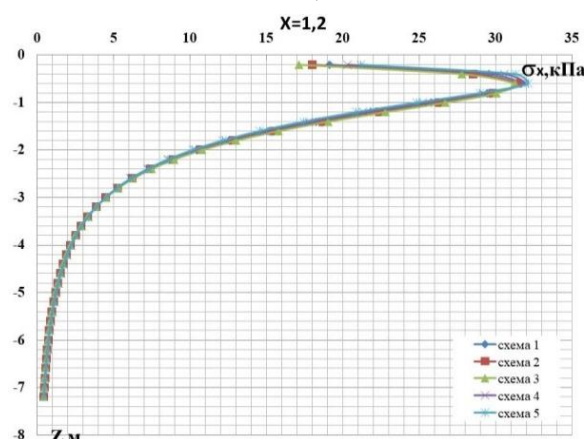


Рисунок 8 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x по глубине основания

Такой характер распределения напряжений подтверждается эпюрами изменения σ_x , показанными на рисунке 9. На всех рассмотренных глубинах напряжения σ_x , определенные по схемам 4 и 5, по оси симметрии нагружения всегда больше, чем по схемам 1...3. И чем больше глубина, на которой определены напряжения σ_x , тем дальше от оси симметрии нагружения точка, в которой σ_x одинаковы. На глубине $z = b$ напряжения σ_x равны в точке по вертикали, отстоящей от оси симметрии нагружения на 0,36 м, что равно $0,6b$. На глубине $z = 2b = 1,2$ м – на 0,48 м ($0,8b$), на глубине $4b = 2,4$ м – 0,9 м ($1,5b$). Все это подтверждает более эффективное действие нагрузки по схемам 4 и 5 практически на всех рассматриваемых глубинах в области грунтового массива, расположенного в пределах $(0,6 \dots 1,0)b$ от оси симметрии нагружения. При большем удалении от оси $0-z$ в большей степени проявляется действие нагрузки по схемам 2 и 3. Такой характер распределения напряжений σ_z и σ_x при рассмотренных схемах нагружения грунтового основания позволяет сделать вывод о формировании различных зон уплотнения грунта, образованных при использовании трамбовок с различной контактной поверхностью (рисунок 10).

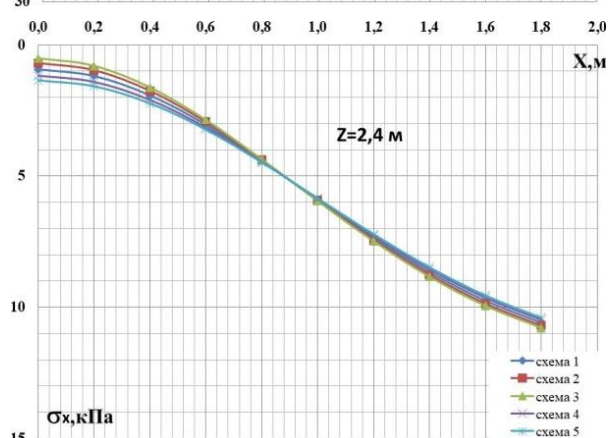
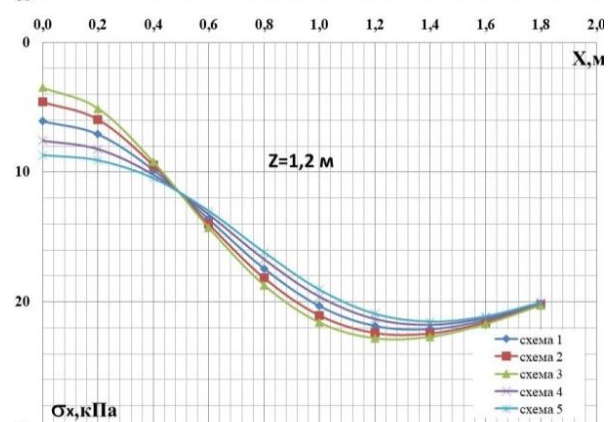
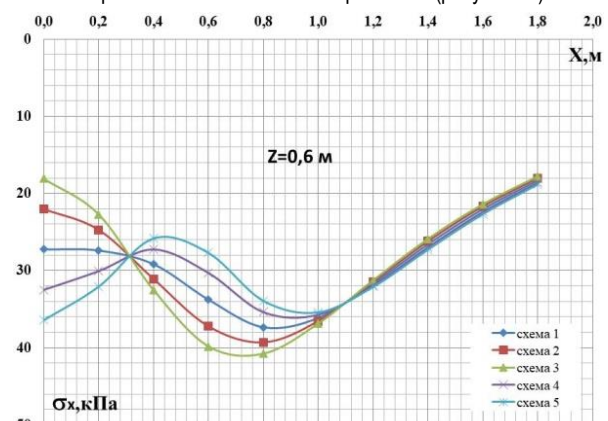
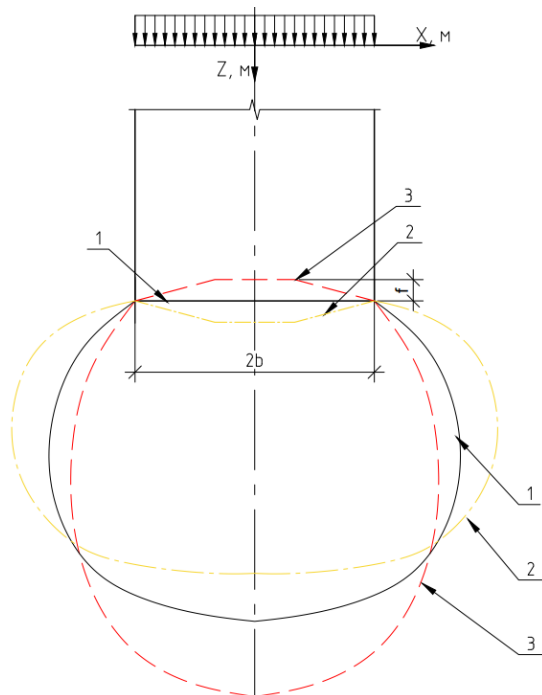


Рисунок 9 – Распределение горизонтальных напряжений σ_x в зависимости от расстояния от оси загрузки по глубине основания

Следовательно, изменяя форму контактной поверхности трамбовки, можно регулировать глубину и ширину зоны уплотнения грунта. Если требуется произвести уплотнение толщи грунта с достижением максимальной глубины уплотнения, то здесь более эффективны трамбовки с вогнутой формой подошвы (рисунок 3). Следует отметить, что трапецевидная форма подошвы более проста при ее изготовлении, чем куполообразная. Вместе с тем глубину уплотнения грунта можно регулировать и углом наклона боковых граней. Такой тип трамбовки особенно эффективен при уплотнении грунтов под ленточные фундаменты. Использование такой трамбовки позволяет получить сплошной массив уплотненного грунта по всей длине проектируемого фундамента.

Если требуется уплотнить толщу грунта мощностью до 2,0 м, однако значительной площади в плане, то в данном случае более эффективно применение трамбовки с выпуклой подошвой (рисунок 4). В данном случае, регулируя наклон боковых граней подошвы трамбовки, можно получить уплотненную зону значительной ширины при меньшей ее глубине (рисунок 10).



1 – плоская подошва трамбовки; 2, 3 – соответственно, выпуклая и вогнутая контактные поверхности трамбовки

Рисунок 10 – Формы зон уплотнения грунта при использовании трамбовок с различным очертанием контактной поверхности трамбовки с грунтом

Заключение

Форма контактной поверхности трамбовки существенным образом влияет на напряженно-деформированное состояние уплотненного грунта, следовательно и на эффективность работ по устройству искусственных оснований. Изменяя форму контактной поверхности трамбовки с грунтом, получаем возможность регулировать глубину и ширину уплотняемой зоны. В комплексе подобные эффекты имеют большое значение при подготовке слабых оснований или отсыпанных слоев грунта различной мощности под разнообразие типы фундаментов.

Список цитированных источников

1. Сорочан, Е. А. Исследование работы железобетонных фундаментных блоков / Е. А. Сорочан // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 2. – С. 8–11.
2. Сорочан, Е. А. Фундаменты промышленных зданий / Е. А. Сорочан. – М. : Стройиздат, 1986. – 304 с.
3. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М. С. Грицук. – Брест : Брестский политехнический институт, 1997. – 218 с.

4. Пронозин, Я. А. Теоретические обоснования повышения жесткости грунтового основания, нагруженного по выпуклой вверх криволинейной поверхности / Я. А. Пронозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Геотехника. International Journal Geotechnics. – 2015. – № 2. – С. 4–9.
5. Пронозин, Я. А. Цилиндрические фундаменты-оболочки / Я. А. Пронозин. – М. : АСВ, 2010. – 168 с.
6. Тетиор, А. Н. Железобетонные фундаменты в форме плит и оболочек : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / А. Н. Тетиор. – Симферополь, 1984. – 376 с.
7. Справочник геотехника. Основание, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Менчужева. – М. : АСВ, 2014. – 728 с.
8. Зарецкий, Ю. К. Глубинное уплотнение грунтов ударным нагружением / Ю. К. Зарецкий, М. Ю. Гарицелов. – И. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
9. 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.
10. Рыков, Г. В. Экспериментальные исследования реактивного сопротивления грунта в основании круглого штампа при кратковременных динамических нагрузках / Г. В. Рыков, В. П. Кузнецов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – №3. – С. 10–12.
11. Пилягин, А. В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений : учеб. пособие / А. В. Пилягин. – М. : АСВ, 2006. – 248 с.

References

1. Sorochan, E. A. Issledovanie raboty zhelezobetonnykh fundamentnykh blokov / E. A. Sorochan // Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1981. – № 2. – S. 8–11.
2. Sorochan, E. A. Fundamentey promyshlennykh zdaniy / E. A. Sorochan. – M. : Strojizdat, 1986. – 304 s.
3. Gricuk, M. S. Racional'nye konstrukcii plitnykh fundamentov / M. S. Gricuk. – Brest : Brestskij politekhnicheskij institut, 1997. – 218 s.
4. Pronozin, Ya. A. Teoreticheskie obosnovaniya povysheniya zhestkosti gruntovogo osnovaniya, nagruzhennogo po vypukloj vverh krivolineynoj poverhnosti / Ya. A. Pronozin, Yu. V. Naumkina, D. V. Rachkov // Geotekhnika. International Journal Geotechnics. – 2015. – № 2. – S. 4–9.
5. Pronozin, Ya. A. Cilindricheskie fundamentey-obolochki / Ya. A. Pronozin. – M. : ASV, 2010. – 168 s.
6. Tetior, A. N. Zhelezobetonnye fundamentey v forme plit i obolochek : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01 / A. N. Tetior. – Simferopol', 1984. – 376 s.
7. Spravochnik geotekhnika. Osnovanie, fundamentey i podzemnye sooruzheniya / pod obshch. red. V. A. Il'icheva, R. A. Menchuzheva. – M. : ASV, 2014. – 728 s.
8. Zareckij, Yu. K. Glubinnoe uplotnenie gruntov udarnym nagruzheniem / Yu. K. Zareckij, M. Yu. Garicelov. – I. : Energoatomizdat, 1989. – 192 s.
9. Klebanyuk, D. N. Osobennosti metodiki vybora tekhnologicheskikh 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.
10. Rykov, G. V. Eksperimental'nye issledovaniya reaktivnogo soprotivleniya grunta v osnovanii kruglogo shtampa pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzkah / G. V. Rykov, V. P. Kuznecov // Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov. – 1990. – №3. – S. 10–12.
11. Pilyagin, A. V. Proektirovanie osnovanij i fundamentov zdaniy i sooruzhenij : ucheb. posobie / A. V. Pilyagin. – M. : ASV, 2006. – 248 s.

Материал поступил в редакцию 29.06.2022