

УДК 624.131

**О. А. Богомолова, А. И. Вайнгольц, Б. С. Бабаханов, Р. С. Нестеров,
А. С. Иванов, А. Н. Ушаков**

ВЛИЯНИЕ ВИДА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА

Приведены результаты конечно-элементного анализа распределения напряжений в грунтовом двухслойном основании ленточного фундамента в зависимости от вида применяемой расчетной схемы. Установлено, что на характер распределения напряжений влияет величина отношения модулей деформации контактирующих слоев и мощность последних. Показано, что на контакте слоев при выполнении условия их полного прилипания по контакту наблюдается «скачок» численных значений всех трех компонент напряжения, который затухает по мере удаления от контакта. При некоторых значениях толщины верхнего слоя величина отношения их модулей деформации перестает оказывать влияние на характер распределения напряжений. Это значение толщины зависит от величины интенсивности внешней нагрузки и ее ширины. Учет заглубления фундамента любым из трех рассмотренных в работе способом существенно снижает уровень напряжений по сравнению с результатами расчета в случае, когда расчетная схема принимается в виде полуплоскости, к поверхности которой приложена равномерно распределенная нагрузка.

К л ю ч е в ы е с л о в а: двухслойное грунтовое основание, учет заглубления фундамента, распределение напряжений, равномерно распределенная полосовая нагрузка, соотношение значений модулей деформации слоев, коэффициент бокового давления, толщина верхнего слоя.

The results of the finite element analysis of stress distribution in the soil two-layer strip foundation, depending on the type of design scheme are presented. It was placed that on the distribution of stress character influences the ratio of the deformation modulus of contact layers and the power of the latter. It is shown that on the contact layers under the condition of their full adherence to the contact there is a «jump» of the numerical values of all three components of the stress, which decays as moving distance from the contact. For some thickness values of the upper layer, the ratio of their deformation module ceases to have effect on the distribution of stresses. This value thickness depends on the intensity of the external load and its width. Accounting of the foundation's depth to any of the three reviewed in the article methods greatly reduces the stress level in comparison with the calculation results in the case when the design scheme is accepted in the form of a half-plane, which is attached to the surface of a uniformly distributed load.

K e y w o r d s: two-layer ground foundation, consideration of foundation's depth, stress distribution, uniformly distributed strip load, ratio of the deformation modulus of layers value, coefficient of lateral pressure, thickness of the upper layer.

На напряженное состояние двухслойного основания ленточного фундамента оказывают влияние мощность слоев $H_{1,2}$, отношение их модулей деформации E_0 и коэффициентов бокового давления ξ_0 , параметров равномерно распределенной полосовой нагрузки и вид расчетной схемы, принятой при проведении расчетов.

Для анализа напряженного состояния на основании результатов вычисления напряжений в двухслойном основании при помощи компьютерной программы [1], разработанной в ВолгГАСУ, построены эпюры напряжений, аналогичные тем, что представлены в работе [2]. При этом принято, что слои имеют одинаковый объемный вес γ и величину коэффициента бокового давления $\xi_0=0,75$, что соответствует глинистым грунтам [3]. Однако, в отличие от работы [2], расчеты и соответствующие построения проведены для четырех видов расчетных схем (рис. 2—5), фрагменты которых приведены на рис. 1.

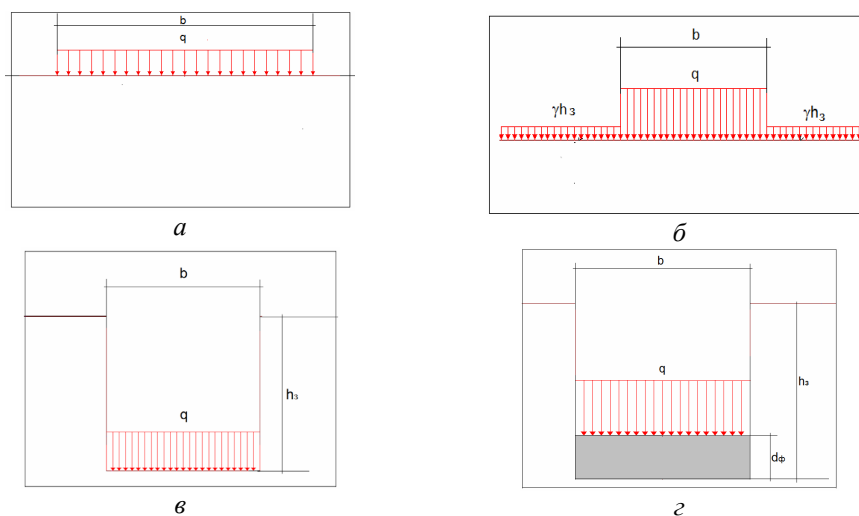


Рис. 1. Фрагменты расчетных схем основания ленточного фундамента

Величины отношений модулей деформации слоев приняты равными $E_1/E_2 = 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000$, а мощность (толщина) верхнего слоя грунта принимает значения $H_1 = 2; 4; 6; 8$ м. Модуль деформации материала фундамента (железобетона) при расчете принят на основе рекомендаций, сделанных в работе [4].

На рис. 2 приведены эпюры вертикальных напряжений, действующих в точках основания, расположенных на вертикальной прямой, проходящей через середину фундамента, при условии, что $H_1 = 2$ м (слева), 4 м (справа). На этом и последующих рисунках эпюры при соотношении $E_1/E_2 = 1$ изображены на рис. а, $E_1/E_2 = 10$ на рис. б, $E_1/E_2 = 100$ на рис. в, $E_1/E_2 = 1000$ на рис. г, $E_1/E_2 = 0,1$ на рис. д, $E_1/E_2 = 0,01$ на рис. е.

Анализ показывает: если отношение $E_1/E_2 < 1$, то численные значения напряжений практически не зависят от расчетной схемы а—в, а при использовании расчетной схемы г уменьшаются в верхней части основания по сравнению со схемой а на 17...25 %.

Если отношение модулей деформации $E_1/E_2 > 1$, то напряжения, определяемые по схеме с заглубленным фундаментом конечной жесткости, оказываются меньше, чем определенные по одной из трех других схем в верхней части, в 1,6 раз, а в нижней на 30 %. При этом при приближении к контакту слоев уровень напряжений при использовании расчетных схем а—в резко снижается, а ниже контакта снова резко, правда, не в той же степени, увеличивается.

Если верхний слой имеет толщину 4 м, то при всех прочих равных условиях характер изменения вертикальных напряжений не меняется по глубине основания, однако имеются некоторые количественные отличия от предыдущего случая.

Если отношение $E_1/E_2 < 1$, то численные значения вертикальных σ_z напряжений вне зависимости от величины этого отношения при подсчете по схеме г уменьшаются по всей толще основания на 30...60 % по сравнению с напряжениями, определенными для схем а—в.

Если величина отношения $E_1/E_2 > 1$, то картина иная: происходит значительное уменьшение уровня напряжений до границы раздела слоев при использовании расчетных схем a — $в$, в то время как при схеме $г$ значения вертикальных напряжений уменьшаются по глубине незначительно, а их значения в соответствующих точках оказываются меньше в 1,3...5 раз.

Ниже границы слоев распределение напряжений практически не зависит от применяемой расчетной схемы.

Все выше сказанное практически полностью соответствует характеру распределения напряжений σ_z по вертикальной прямой, проходящей через середину фундамента, и при $H_1=6,0; 8,0$ м.

Сравнение эпюр вертикальных напряжений, построенных на вертикали, проходящей через край фундамента, представлено на рис. 3.

Если $E_1/E_2 < 1$ и $H_1 = 2$ м, значения вертикальных напряжений практически не зависят от выбора расчетной схемы, за исключением небольшого участка, прилегающего к подошве фундамента.

Если отношение $E_1/E_2 > 1$, то при расчете по схемам a ; $в$ значения напряжений практически не отличаются, при использовании схемы $б$ уровень напряжений снижается примерно на 20 %, а при использовании схемы $г$ — еще на 12 %. Однако если величину E_1/E_2 уменьшить на несколько порядков, то это повлечет за собой сближение кривых ниже границы слоя и практически полное совпадение значений напряжений, определенных по всем схемам.

Аналогичная картина наблюдается при $H_1=4,0; 6,0; 8,0$ м.

Несколько иной вид имеют эпюры вертикальных напряжений σ_z , построенные вдоль вертикальной прямой, отстоящей от края фундамента на расстоянии, равном половине его ширины.

При $H_1=2$ м и отношении модулей деформации $E_1/E_2 < 1$ вертикальные напряжения в точках двухслойного основания при подсчете по схеме $г$ оказываются несколько больше по сравнению с величинами напряжений в соответствующих точках при использовании схем a — $в$.

Если $E_1/E_2 > 1$, то при увеличении этого отношения значения вертикальных напряжений все меньше зависят от выбранной расчетной схемы. Максимальное отличие наблюдается при $E_1/E_2 = 1$ — в 2,5 раза, а при $E_1/E_2 = 1000$ оно составляет 5...10 %. Аналогичная картина наблюдается при толщине верхнего слоя 4 м.

При $H_1=6,0$ и $8,0$ м и $E_1/E_2 \in [0,01...1000]$ при использовании 4-й расчетной схемы наблюдается увеличение значений напряжений σ_z по сравнению со схемами a и $в$ в 1,5...2,3 раза.

Распределение вертикальных напряжений по прямой, проходящей от края фундамента на расстоянии, равном его ширине, при $H_1=2$ м характеризуется следующими особенностями: при приближении к контакту слоев уровень напряжений при подсчете по схемам a — $в$ резко увеличивается, а ниже контакта снова резко, правда, не в той же степени, увеличивается и уже практически не зависит от выбранной расчетной схемы.

При $H_1=4$ м численные значения напряжений при использовании схем a ; $в$ практически одинаковы вне зависимости от величины отношения E_1/E_2 .

Применение расчетной схемы $б$ дает увеличение напряжений в 2 раза, а схемы $г$ — еще в 1,5 раза. Практически то же самое можно сказать о результатах расчетов при $H_1=6$ и 8 м.

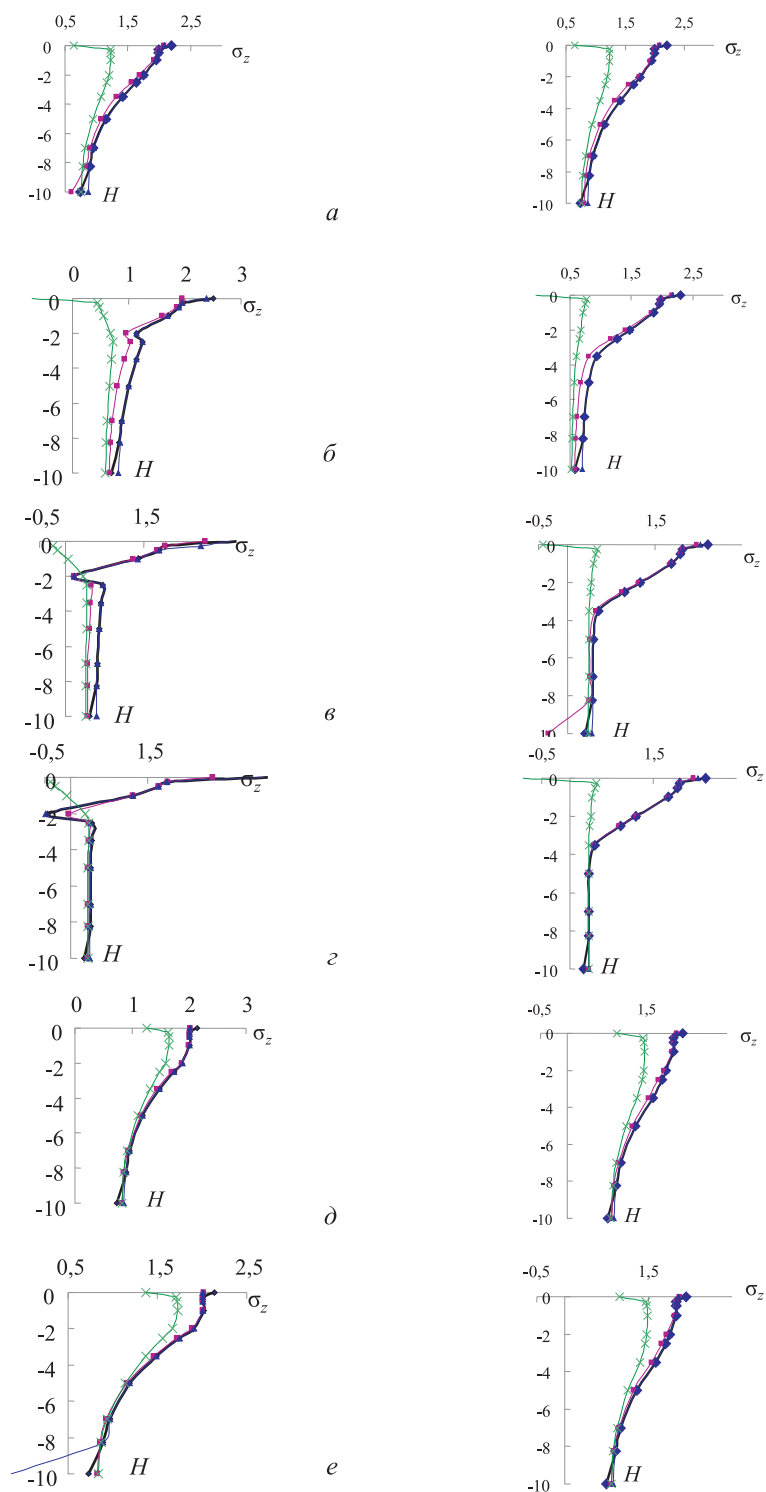


Рис. 2. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей через центр фундамента, при $H_1=2$ м (слева), 4 м (справа)

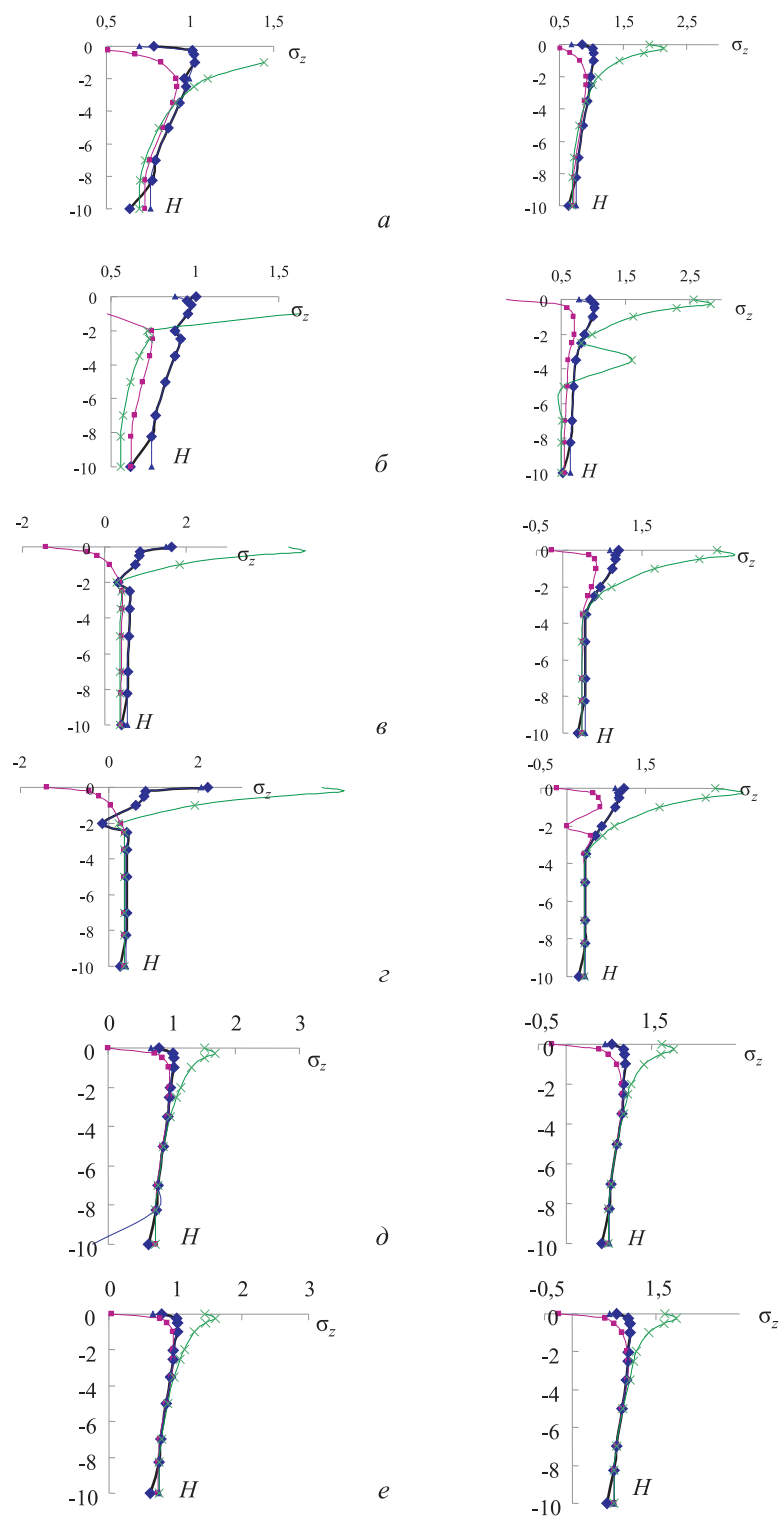


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей через край фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

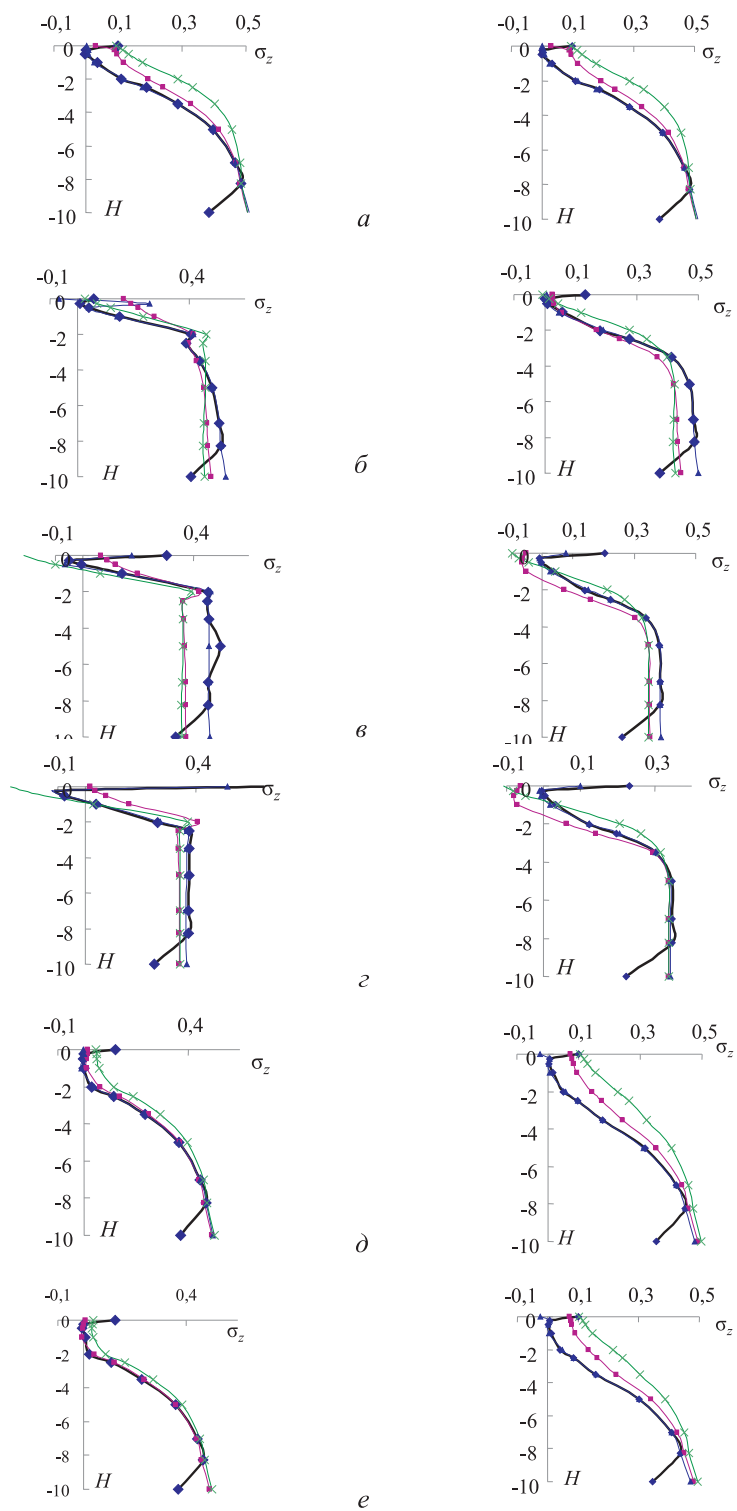


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии $b/2$ от края фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

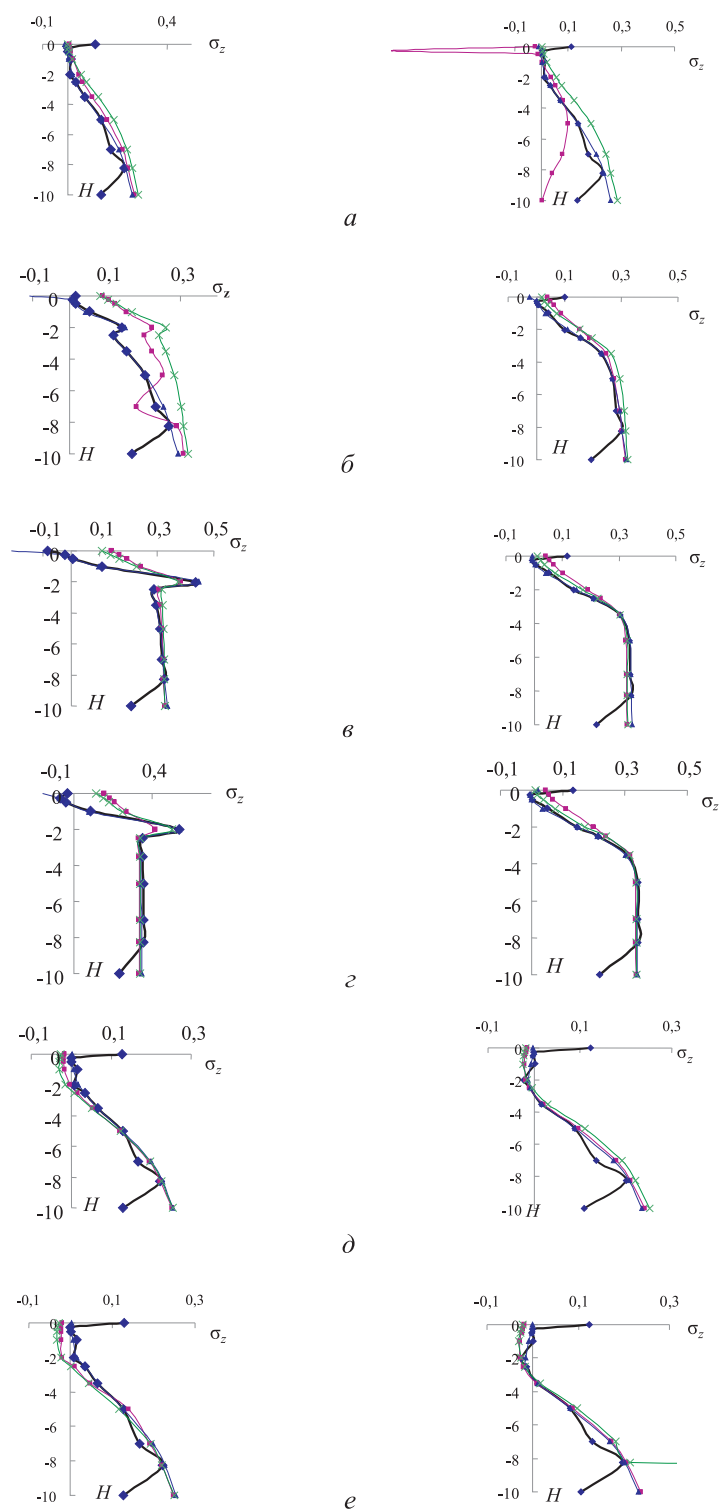


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии b от края фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

Перейдем к анализу распределения *горизонтальных напряжений* (рис. 6). При анализе горизонтальных напряжений по прямой, проходящей через центр фундамента, не представляет труда заметить, что характер распределения напряжений не зависит от H_1 .

При $H_1=2$ м и отношении $E_1/E_2 < 1$ численные значения напряжений практически не зависят от выбранной расчетной схемы.

При $E_1/E_2 > 1$ горизонтальные напряжения σ_x в зоне контакта слоев при изменении отношения E_1/E_2 на порядок меняют знак на противоположный при использовании расчетных схем *а—в*, а при подсчете по схеме *г* напряжения оказываются противоположного знака выше зоны контакта. Ниже зоны контакта значения напряжений не зависят от расчетной схемы.

Аналогичная картина наблюдается при толщинах верхнего слоя 4...8 м.

Распределение горизонтальных напряжений по прямой, проходящей через край фундамента (рис. 7), можно охарактеризовать так. При $H_1=2$ м и отношении $E_1/E_2 > 1$ при подсчете по схемам *а; в* значения напряжений практически не отличаются, а при использовании схем *б; г* уровень напряжений выше контакта снижается примерно в 2 раза. Примечательно, что ниже границы слоя значения напряжений практически полностью совпадают вне зависимости от отношения E_1/E_2 . При отношении $E_1/E_2 < 1$ выбор расчетной схемы не оказывает влияния на величину напряжений.

Распределение горизонтальных напряжений при $H_1=4; 6; 8$ м и $E_1/E_2 < 1$ мало отличается от картины, соответствующей $H_1=2$ м.

На рис. 8 изображены эпюры горизонтальных напряжений по прямой, проходящей от края фундамента на расстоянии, равном половине его ширины, при толщине верхнего слоя 2 м.

При $H_1=2$ м и отношении $E_1/E_2 < 1$ численные значения напряжений практически не зависят от выбранной расчетной схемы.

При использовании схем *а—в* при $H_1=2$ м и величине отношения $E_1/E_2 > 1$ горизонтальные напряжения σ_x в верхнем слое при изменении соотношения на порядок и более сначала увеличиваются на 140 %, затем уменьшаются и даже меняют свой знак на противоположный. В нижнем слое горизонтальные напряжения с увеличением отношения модулей деформации практически не изменяются. Напряжения, определенные по расчетной схеме *б*, выше границы слоя при приближении к подошве фундамента меняют знак на противоположный. Применение схемы *г* дает большие по модулю значения напряжений в зоне контакта по сравнению со схемами *а—в*.

При $E_1/E_2 < 1$ картина такова: по сравнению с однородным основанием в верхнем слое напряжения σ_x уменьшаются в 2 раза, а в нижнем слое практически не изменяются.

Распределение горизонтальных напряжений при $H_1=4$ м и слабом подстилающем слое значительно зависит от выбранной расчетной схемы лишь выше зоны контакта, значения различаются вблизи подошвы фундамента в 2...4 раза. Аналогичная картина наблюдается при $H_1=6$ и 8 м.

Анализ зависимости горизонтальных напряжений по прямой, проходящей от края фундамента на расстоянии, равном его ширине (рис. 9), позволяет сказать, что от выбора расчетной схемы они практически не зависят.

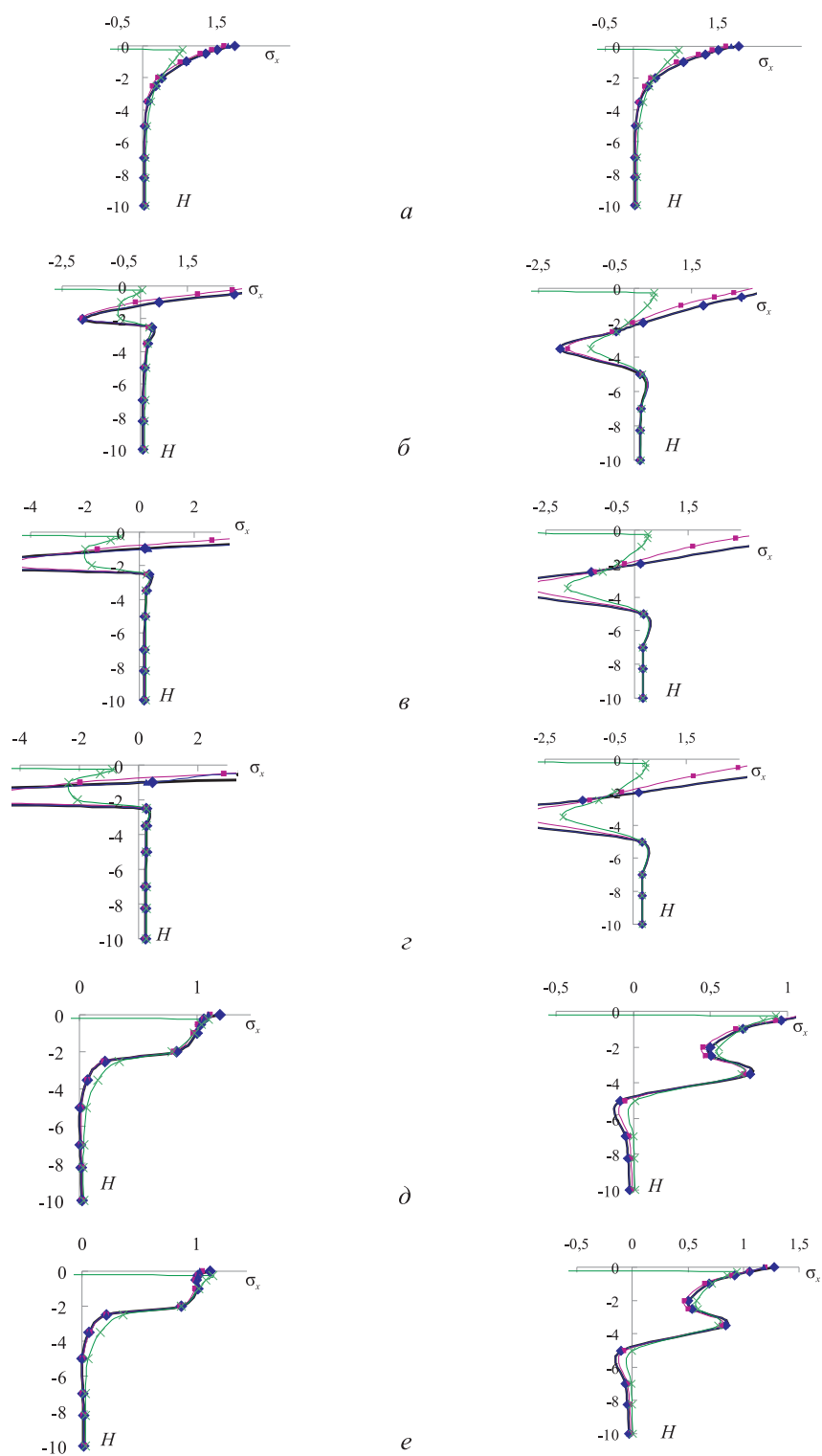


Рис. 6. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей через центр фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

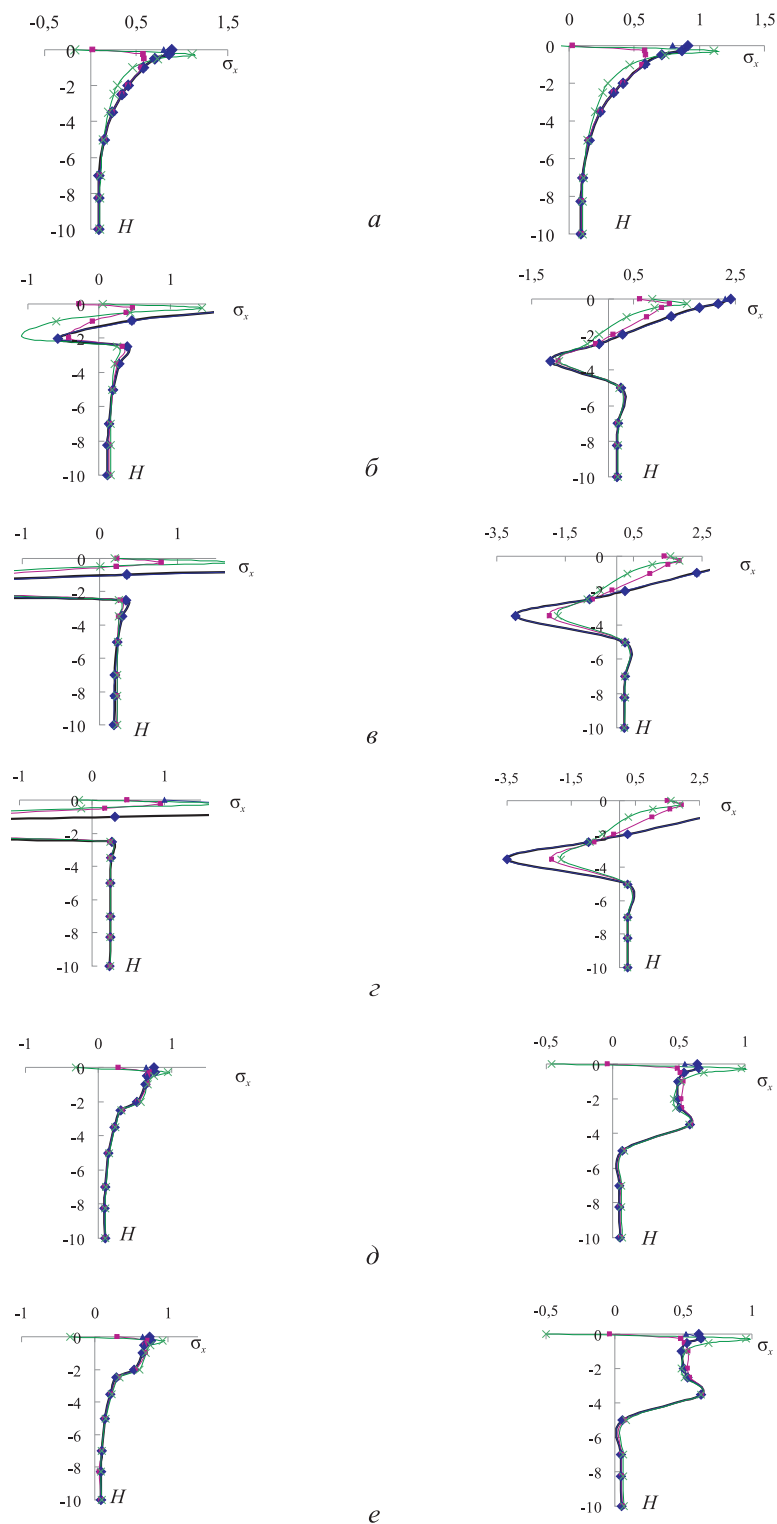


Рис. 7. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей через край фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

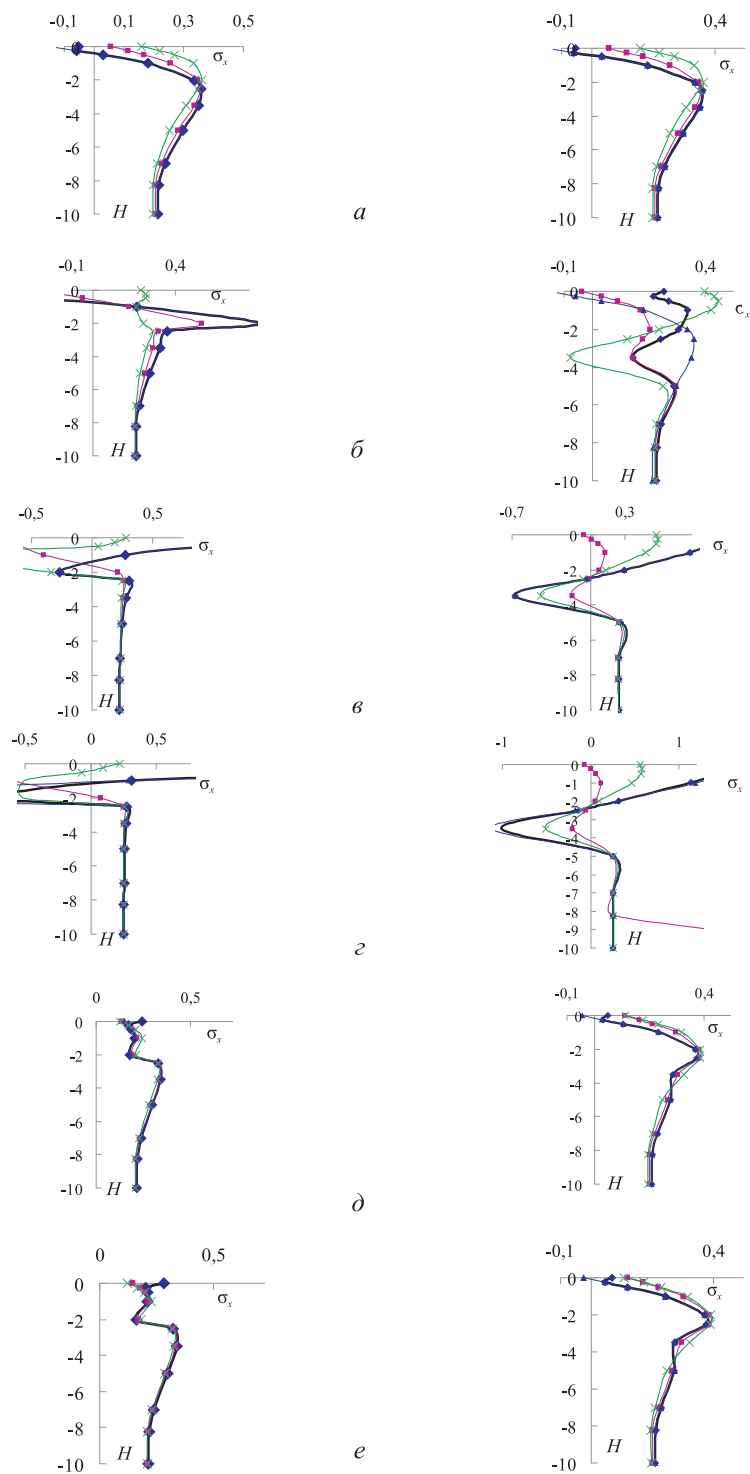


Рис. 8. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии $b/2$ от края фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

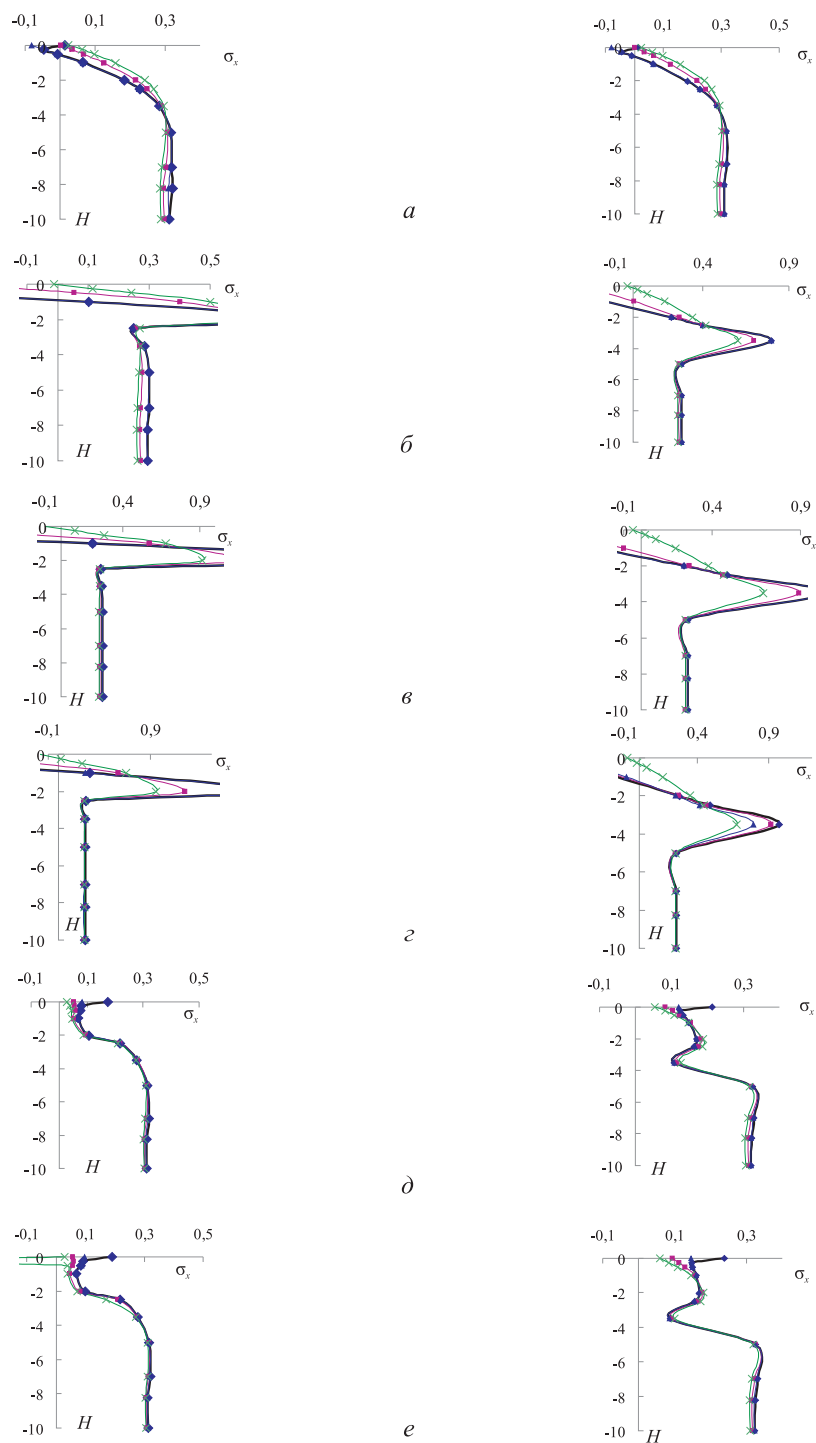


Рис. 9. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии b от края фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

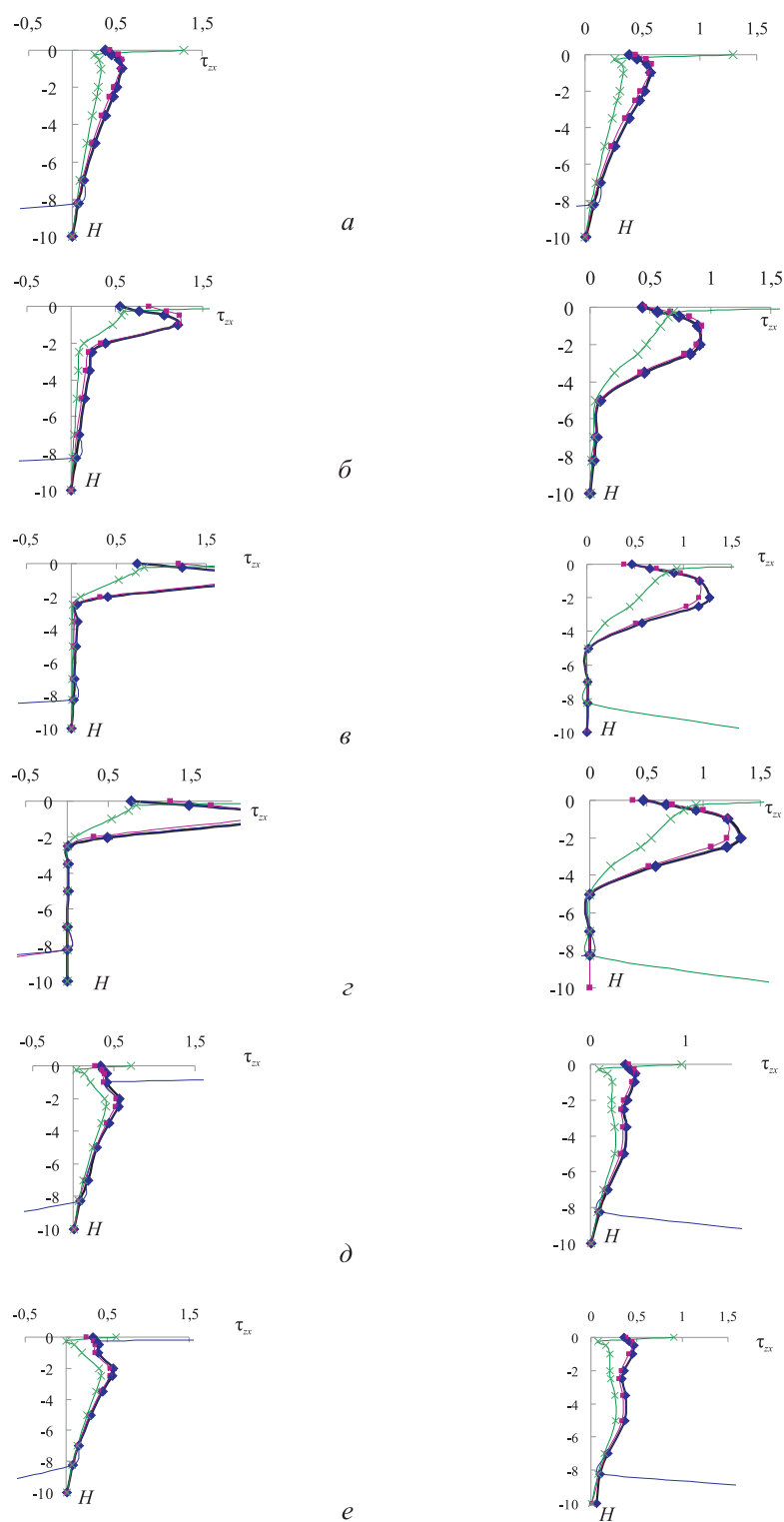


Рис. 10. Эпюры напряжений τ_{zx} , построенные на вертикали, проходящей через край фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

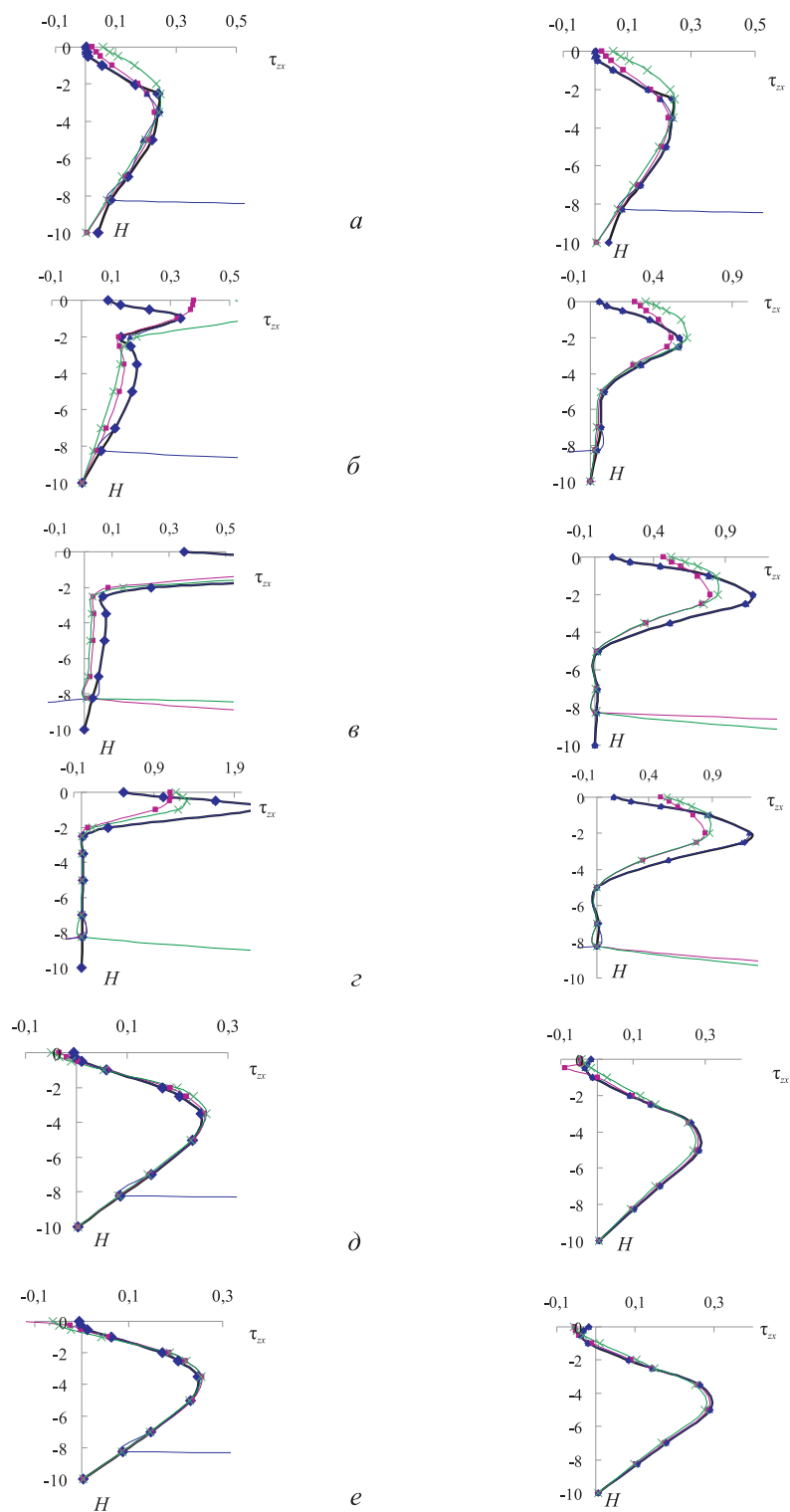


Рис. 11. Эпюры напряжений τ_{zx} , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии $b/2$ от края фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

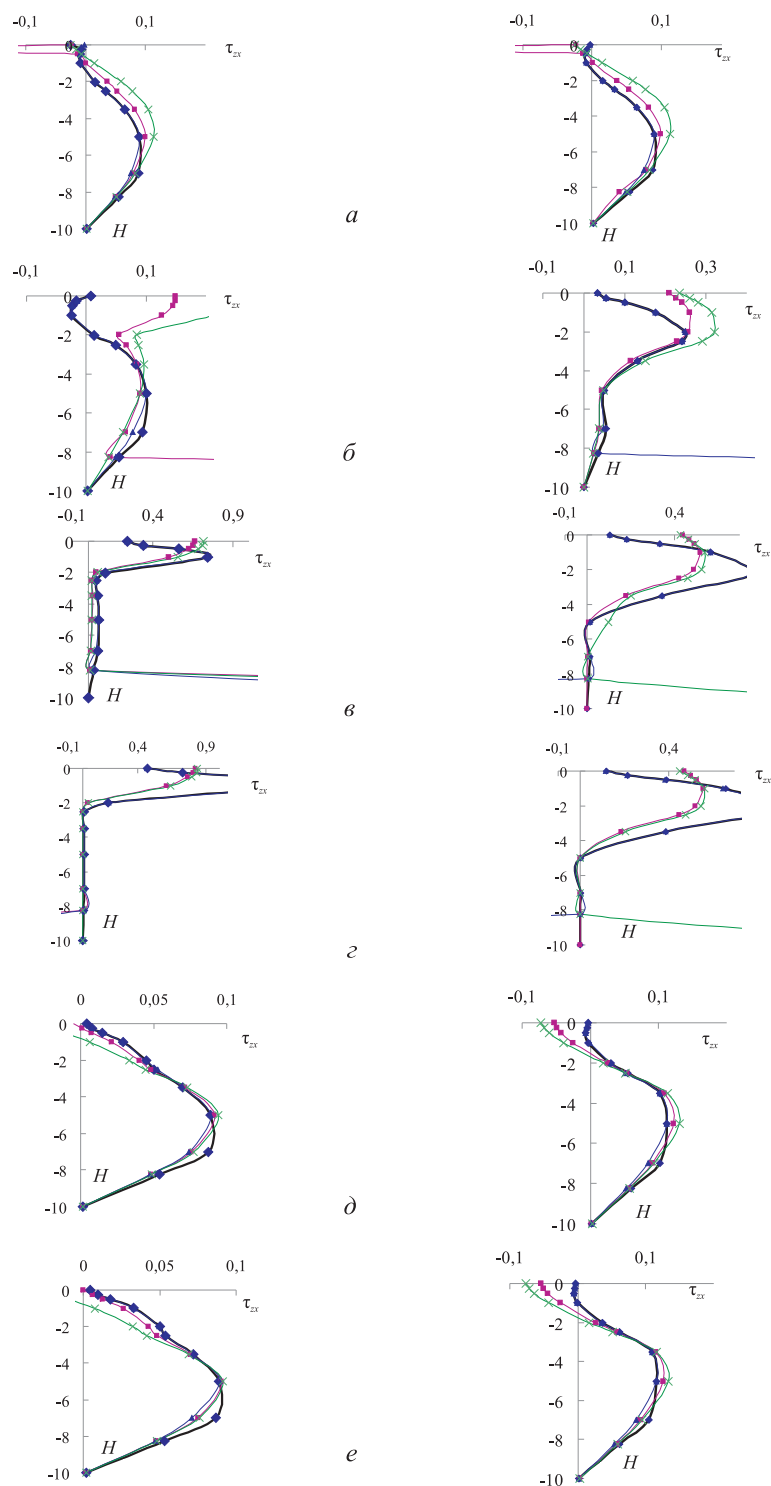


Рис. 12. Эпюры напряжений τ_{zx} , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии b от края фундамента, при $H_1=2$ м (слева); 4 м (справа)

Эпюры касательных напряжений τ_{zx} , построенных на прямой, проходящей через край фундамента, при $H_1=2$ м изображены на рис. 10.

При значениях E_1/E_2 из диапазона (0,01; 1000) касательные напряжения при использовании расчетных схем *a—в* практически не отличаются друг от друга. Применение схемы *г* дает меньшие на 50...70 % величины напряжений по всей толщине, причем характерного скачка в зоне контакта нет. При $H_b=4$, 6 и 8 м картина аналогичная.

Анализ касательных напряжений по прямым линиям, проходящим на расстоянии, равном половине ширины и ширине фундамента (рис. 11, 12), приводит к выводу, что влияние расчетной схемы на величину напряжений пренебрежительно мало.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие *выводы*:

1. Значения напряжений, определенных по разным расчетным схемам, значительно отличаются выше границы слоев, а ниже ее практически не зависят от применяемой схемы. 2. Чем дальше от оси фундамента находится рассматриваемая точка грунтового массива, тем больше ослабевает влияние расчетной схемы на напряженное состояние. 3. Чем толще верхний слой, тем меньше влияние выбранной расчетной схемы на картину напряжений. 4. Существует предел значений величины отношения E_{ov}/E_{on} , после достижения которого эта величина перестает оказывать сколько-нибудь существенное влияние на процесс перераспределения напряжений в грунтовом массиве. Для рассмотренного в настоящей статье примера предельные значения этого отношения определяются границами интервала $E_1/E_2 \in [0,01; 100]$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолов А. Н. Устойчивость (Напряженно-деформированное состояние) / А. Н. Богомолов и др. // Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.
2. Анализ напряженно-деформированного состояния двухслойного основания незаглубленного ленточного фундамента от действия равномерно распределенной полосовой нагрузки / О. А. Богомолова, А. И. Вайнгольц, С. А. Калиновский, Б. С. Бабаханов, Р. С. Нестеров, Д. П. Торшин, А. С. Иванов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 1(20).
3. Вязлов С. С. Реологические основы механики грунтов. М. : Высш. шк., 1978. 447 с.
4. Богомолов А. Н., Вихарева О. А., Шиян С. И. Исследование напряженно-деформированного состояния и устойчивости высокой насыпи, армированной тонкими монолитными бетонными плитами // Світ геотехніки. 2007. № 2. С. 16—19.
1. Bogomolov A. N. Ustoychivost' (Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie) / A. N. Bogomolov i dr. // Svid. o gos. reg. programmy dlya EVM № 2009613499 ot 30 iyunya 2009 g.
2. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvukhsloynogo osnovaniya nezaglublennogo lentochnogo fundamenta ot deystviya ravnomerno raspredelennoy polosovoy nagruzki / O. A. Bogomolova, A. I. Vayngol'ts, S. A. Kalinovskiy, B. S. Babakhanov, R. S. Nesterov, D. P. Torshin, A. S. Ivanov // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2012. Vyp. 1(20).
3. Vyalov S. S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov. M. : Vyssh. shk., 1978. 447 s.
4. Bogomolov A. N., Vikhareva O. A., Shiyani S. I. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ustoychivosti vysokoy nasypy, armirovannoy tonkimi monolitnymi betonnymi plitami // Svit geotekhniki. 2007. № 2. S. 16—19.

© Богомолова О. А., Вайнгольц А. И., Бабаханов Б. С., Нестеров Р. С., Иванов А. С., Ушаков А. Н., 2012

Поступила в редакцию в октябре 2012 г.

Ссылка для цитирования:

Влияние вида расчетной схемы на результаты численного расчета напряженного состояния двухслойного основания ленточного фундамента / О. А. Богомолова, А. И. Вайнгольц, Б. С. Бабаханов, Р. С. Нестеров, А. С. Иванов, А. Н. Ушаков // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 2 (22).