

УДК 624.131

**О. А. Богомолова, А. И. Вайнгольц, С. А. Калиновский, Б. С. Бабаханов,
Р. С. Нестеров, Д. П. Торшин, А. С. Иванов**

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ОСНОВАНИЯ НЕЗАГЛУБЛЕННОГО ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА ОТ ДЕЙСТВИЯ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОЛОСОВОЙ НАГРУЗКИ

Приведены результаты конечно-элементного анализа распределения напряжений в грунтовом двухслойном основании незаглубленного ленточного фундамента. 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 модулей деформации перестает оказывать влияние на характер распределения напряжений. Это значение толщины зависит от величины интенсивности внешней нагрузки и ее ширины.

Ключевые слова: слоистые основания, распределение напряжений, равномерно распределенная полосовая нагрузка, соотношение значений модулей деформации слоев, толщина верхнего слоя.

In the article the results of final-elemental analysis of stress distribution in ground two-layered basis of unsunken banded foundation are given. It is determined that the degree of relations between deformation modules of contacting layers and the capacity of the latter influences type of stress distribution. It is shown that on the layer contact under condition of their perfect adhesion on contact “bounce” of numerical values of all three components of stress is observed. This “bounce” dies out as it removes from the contact. At some values of upper layer thickness the degree of their module deformation relations does not influence type of stress distribution. This value of thickness depends on value of outer loading intensity and length.

Key words: layered basis, stress distribution, equally distributed strip loading, correspondence between values of module deformation of layers, upper layer thickness.

В природе практически не встречаются однородные изотропные массивы грунта, которые могли бы служить основаниями сооружений. Зато слоистые основания с горизонтальным залеганием слоев, отличающихся прочностными и деформационными характеристиками, существуют. Поэтому задача изучения влияния деформационных характеристик слоев в зависимости от их толщины и взаимного расположения на напряженное состояние грунтового массива является актуальной.

Так как слоистое основание априори является неоднородным и для анализа его напряженно-деформированного состояния (НДС) аналитические методы не пригодны, то следует прибегать к численным методам, например методу конечных элементов (МКЭ) [1]. Поэтому в наших исследованиях используется компьютерная программа [2], разработанная в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете, имеющая государственную регистрацию, в которой для анализа НДС грунтового массива формализован МКЭ.

В среде этой программы создана конечноэлементная модель двухслойного грунтового основания. Расчетная схема, фрагмент которой приведен на рис. 1, состоит из 9600 треугольных конечных элементов, сопряженных в 4961 узле, при этом ширина матрицы жесткости системы составляет 86.

Размеры схемы в горизонтальном и вертикальном направлениях равны соответственно 30 и 10 м. В середине расчетной схемы к ее поверхности приложена равномерно распределенная нагрузка интенсивности $q = 2$ кгс/м и шириной $b = 5$ м.

Нами поставлена цель исследовать особенности распределения напряжений в грунтовом массиве от действия приложенной к его поверхности равномерно распределенной полосовой нагрузки в зависимости от соотношения численных значений модулей деформации E_0 слоев и их толщины при условии, что величина коэффициента бокового расширения грунта $\xi_0 = 0,75$, что соответствует среднему значению для глинистых грунтов. Для этого построены эпюры безразмерных (в долях γH , где γ — удельный вес грунта, H — величина заложения откоса при горизонтальном залегании слоев $H = 1$ м) вертикальных σ_z , горизонтальных σ_x и касательных τ_{zx} напряжений, действующих в точках вертикальных прямых, проходящих через центр фундамента, его край, а также через точки поверхности основания фундамента, отстоящие от его края на расстоянии $b/2$ и b (рис. 2—12). При этом величины отношения модулей деформации слоев приняты равными $E_{об}/E_{он} = 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000$, а мощность (толщина) верхнего слоя грунта принимает значения $H_в = 2; 4; 6; 8$ м.

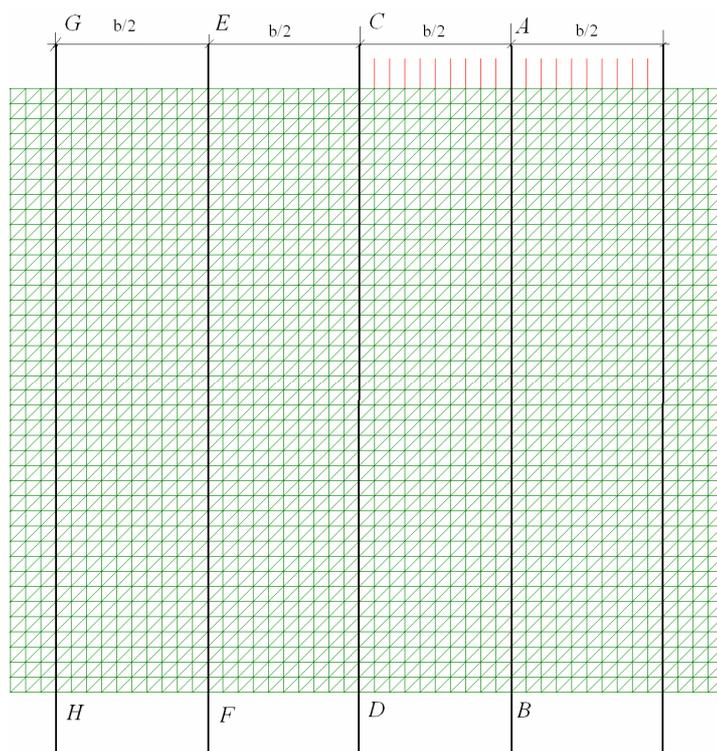


Рис. 1. Расчетная схема двухслойного грунтового основания

На рис. 2 приведены эпюры вертикальных напряжений, действующих в точках основания, расположенных на вертикальной прямой, проходящей через середину фундамента, при условии, что $H_в = 2$ м.

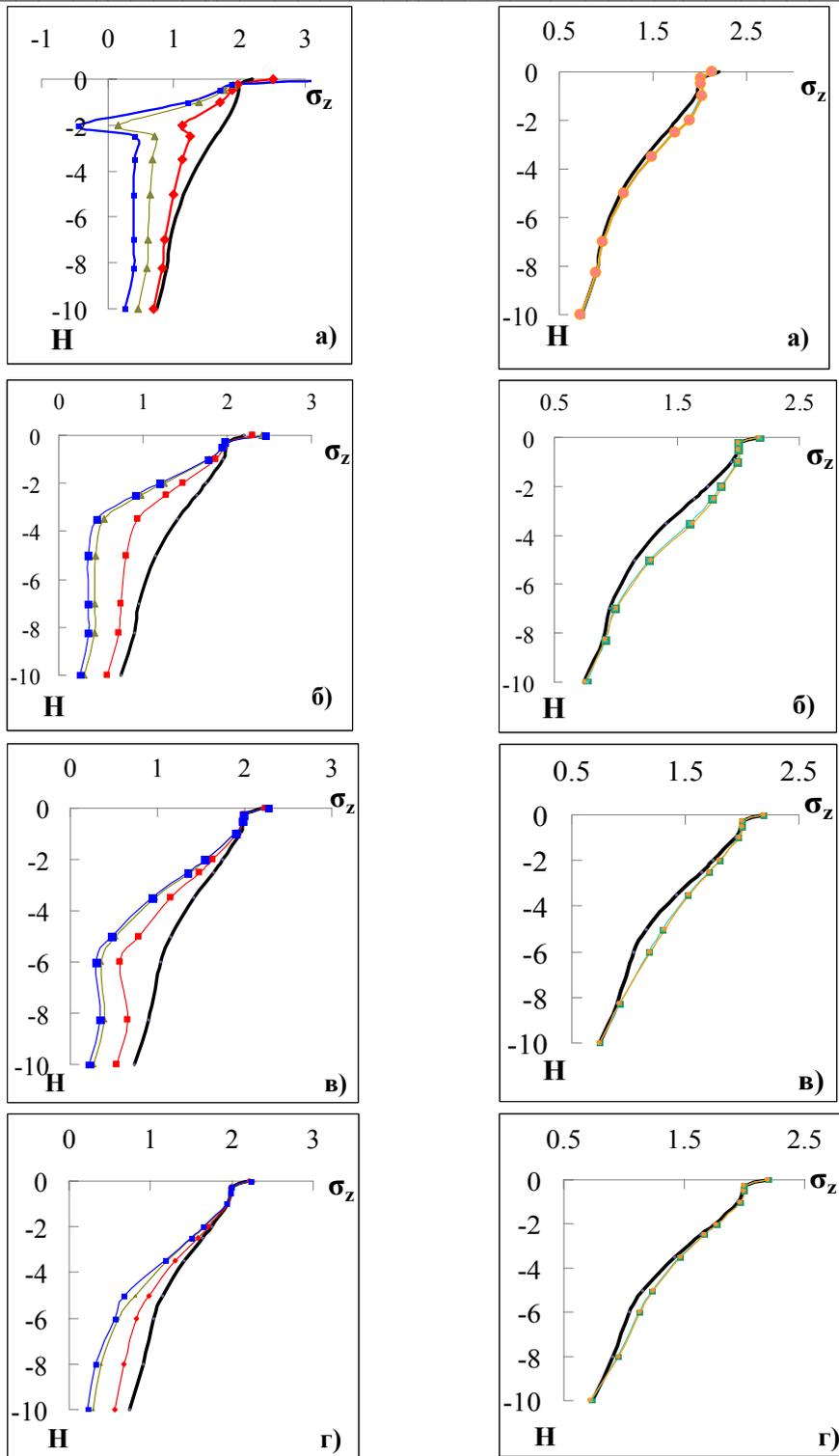


Рис. 2. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей через середину фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

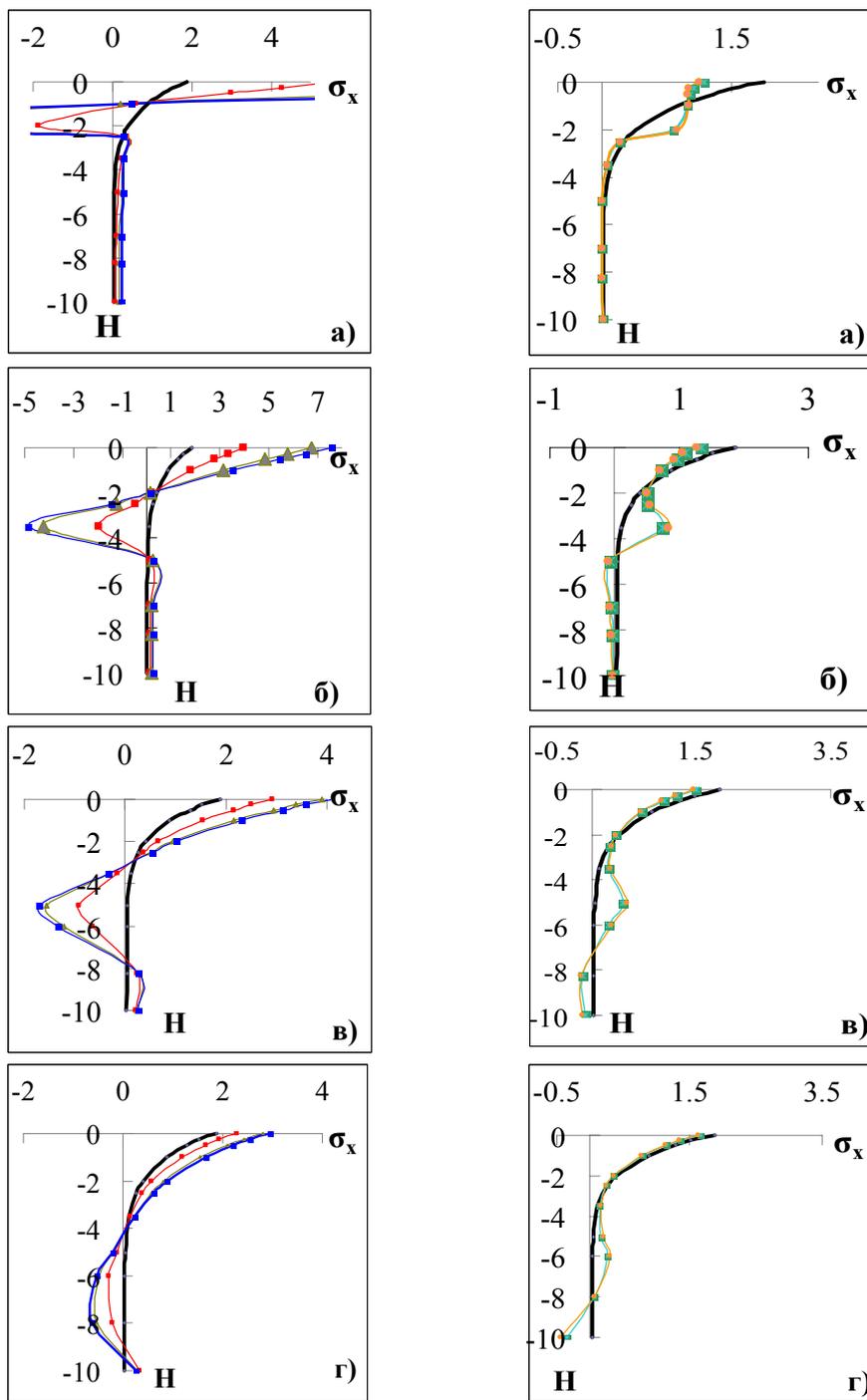


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей через середину фундамента при $H_g=2\text{м}$ (а); 4м (б); 6м (в); 8м (г)

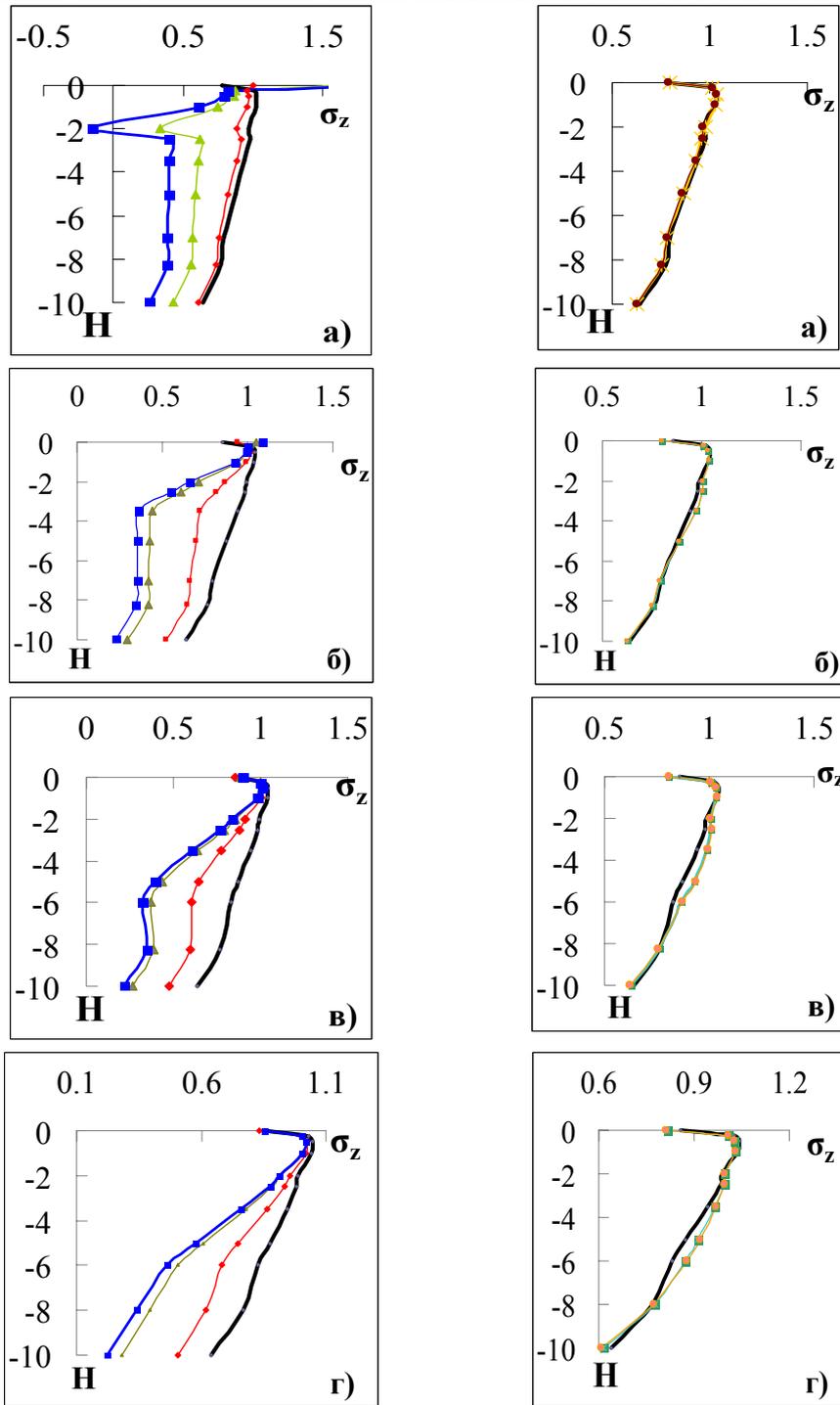


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей через край фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

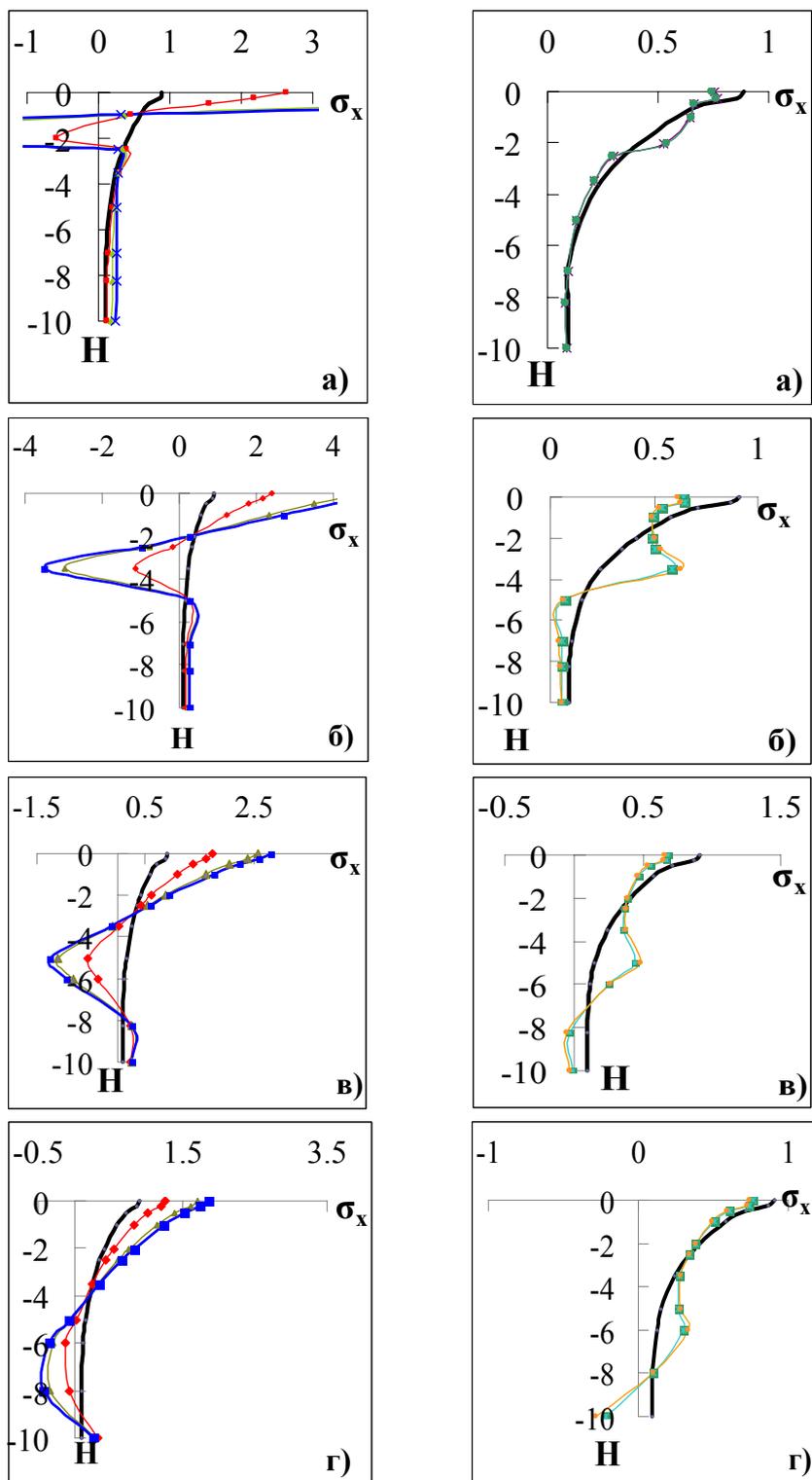


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей через край фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

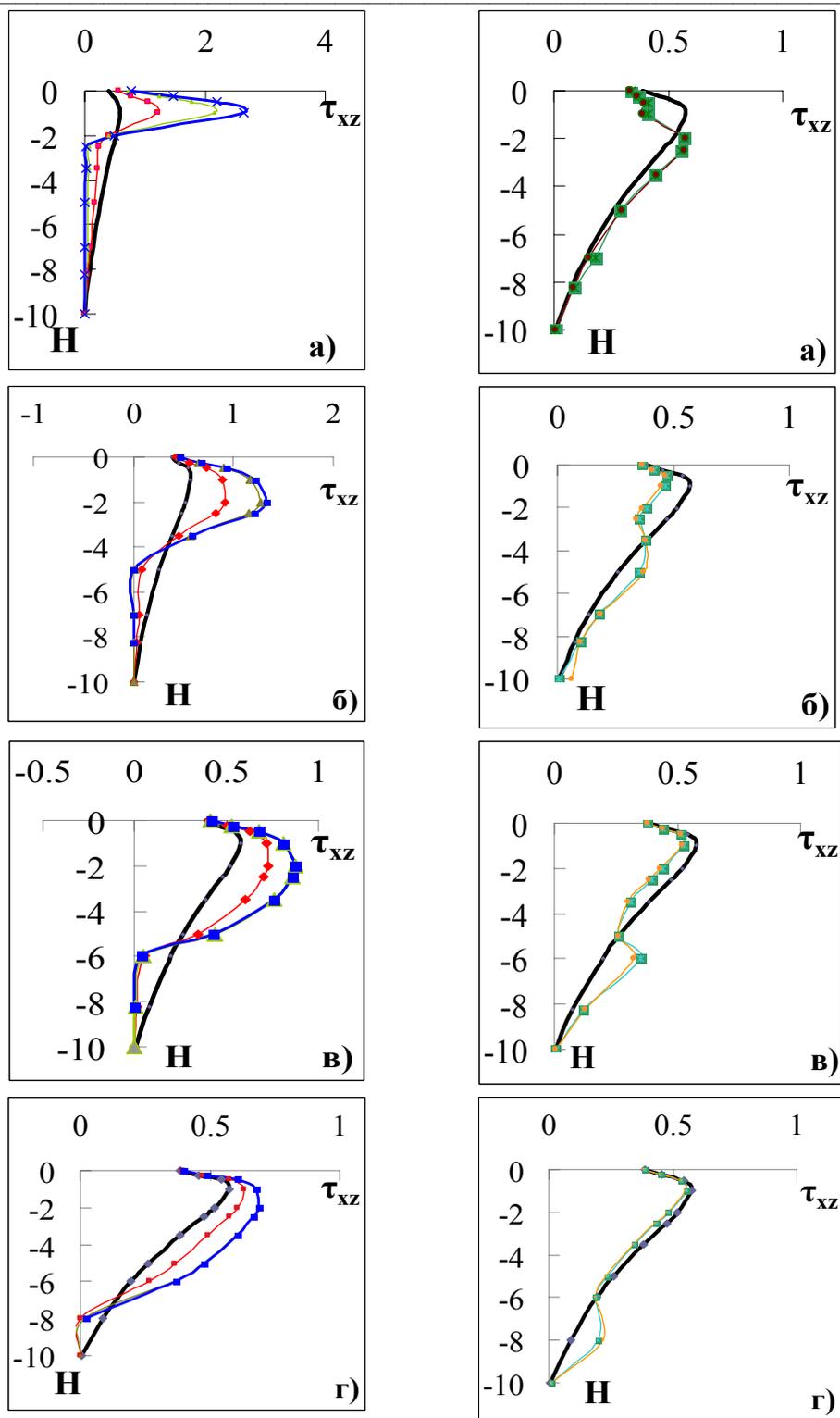


Рис. 6. Эпюры напряжений τ_{xz} , построенные на вертикали, проходящей через край фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

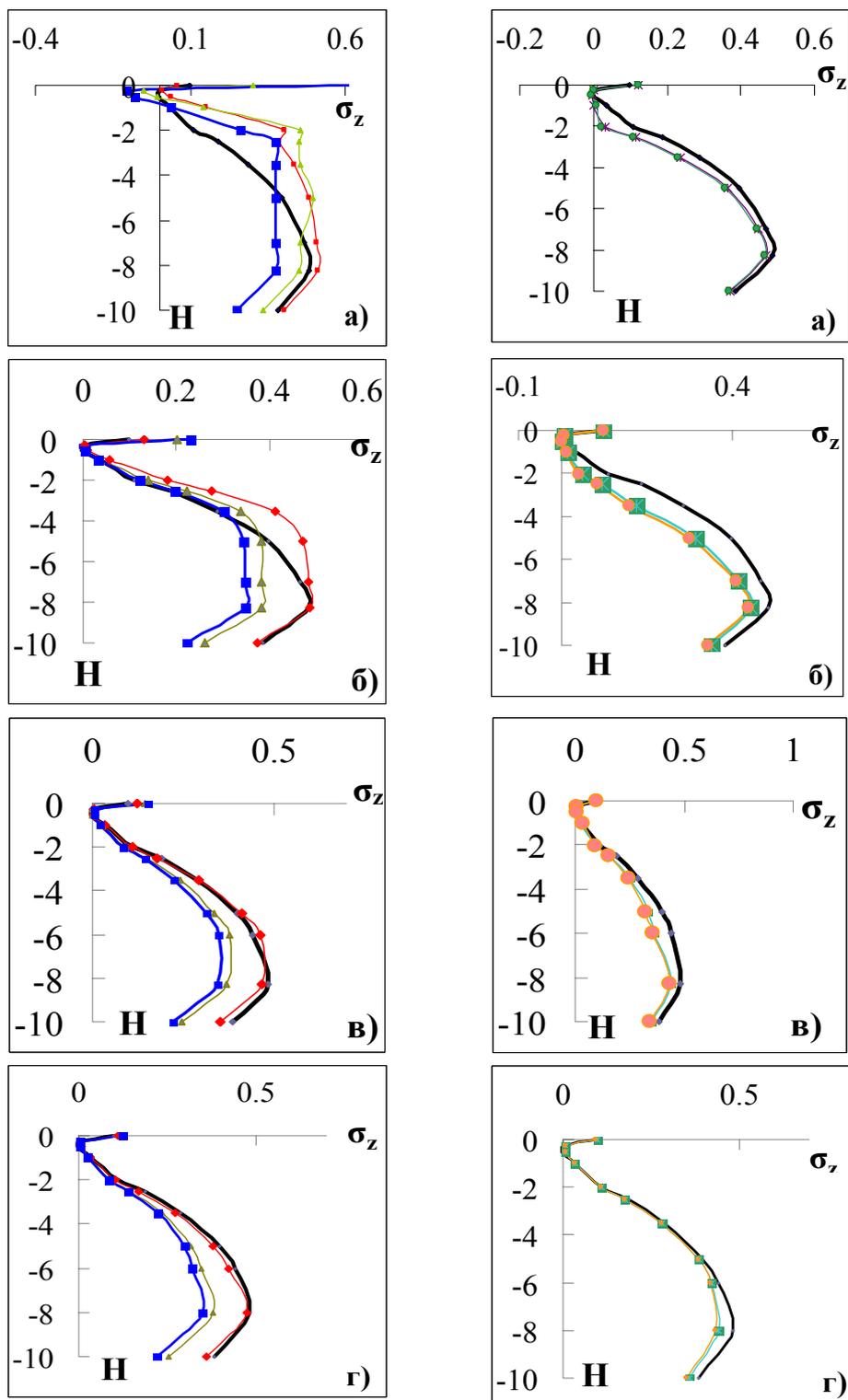


Рис. 7. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии $b/2$ от края фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

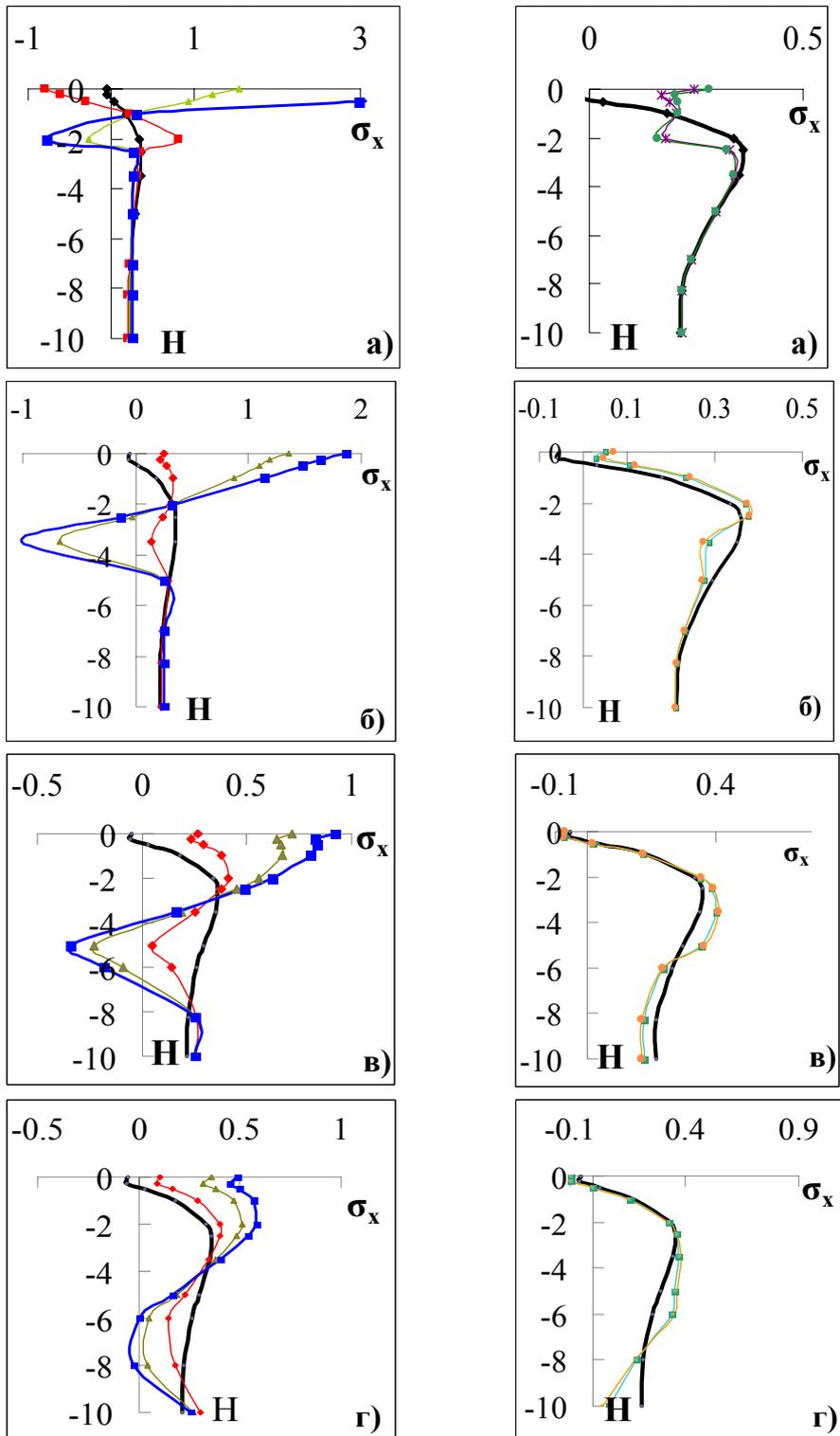


Рис. 8. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии $b/2$ от края фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

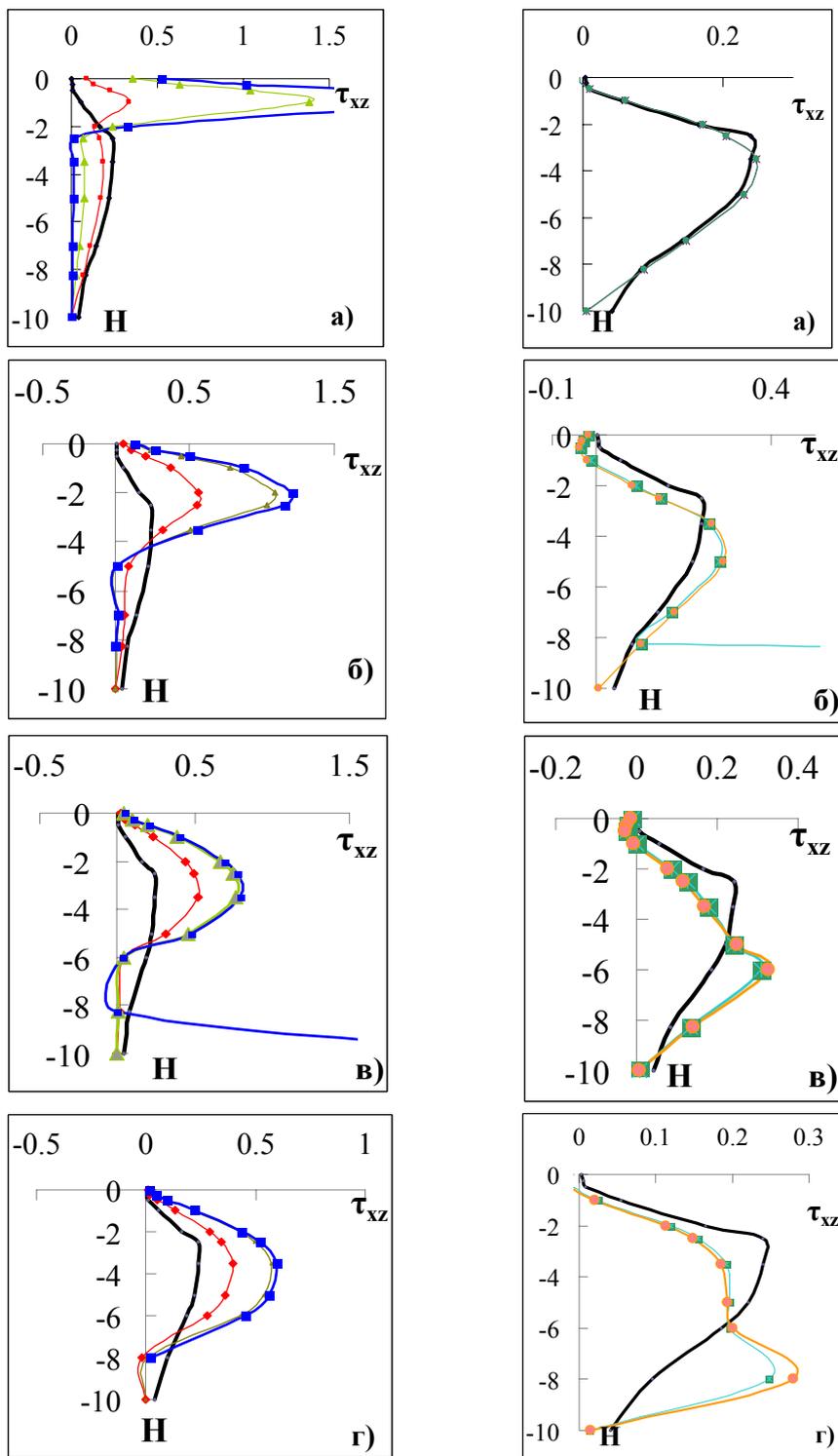


Рис. 9. Эпюры напряжений τ_{xz} , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии $b/2$ от края фундамента, при $H_B = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

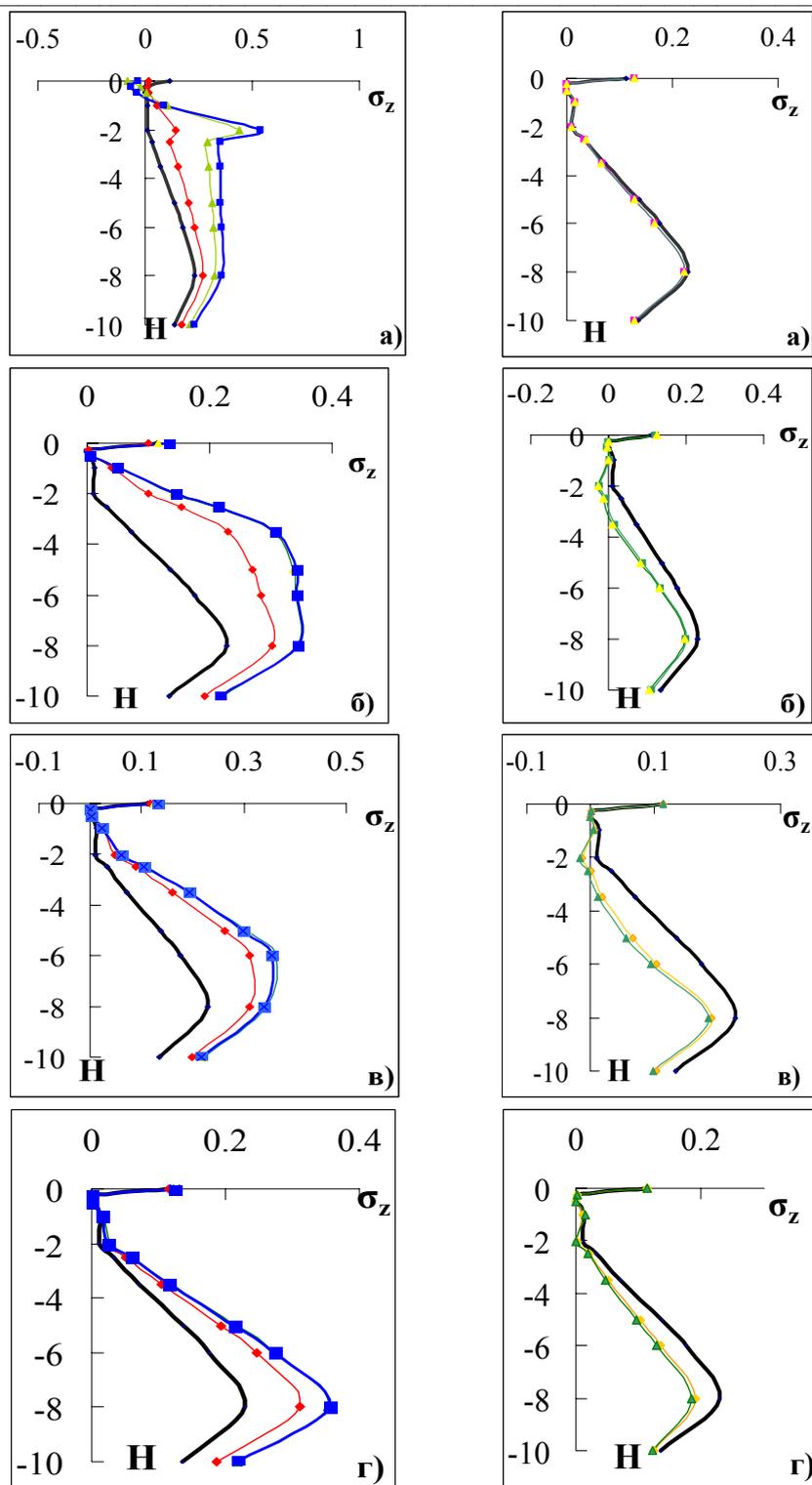


Рис. 10. Эпюры напряжений σ_z , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии b от края фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

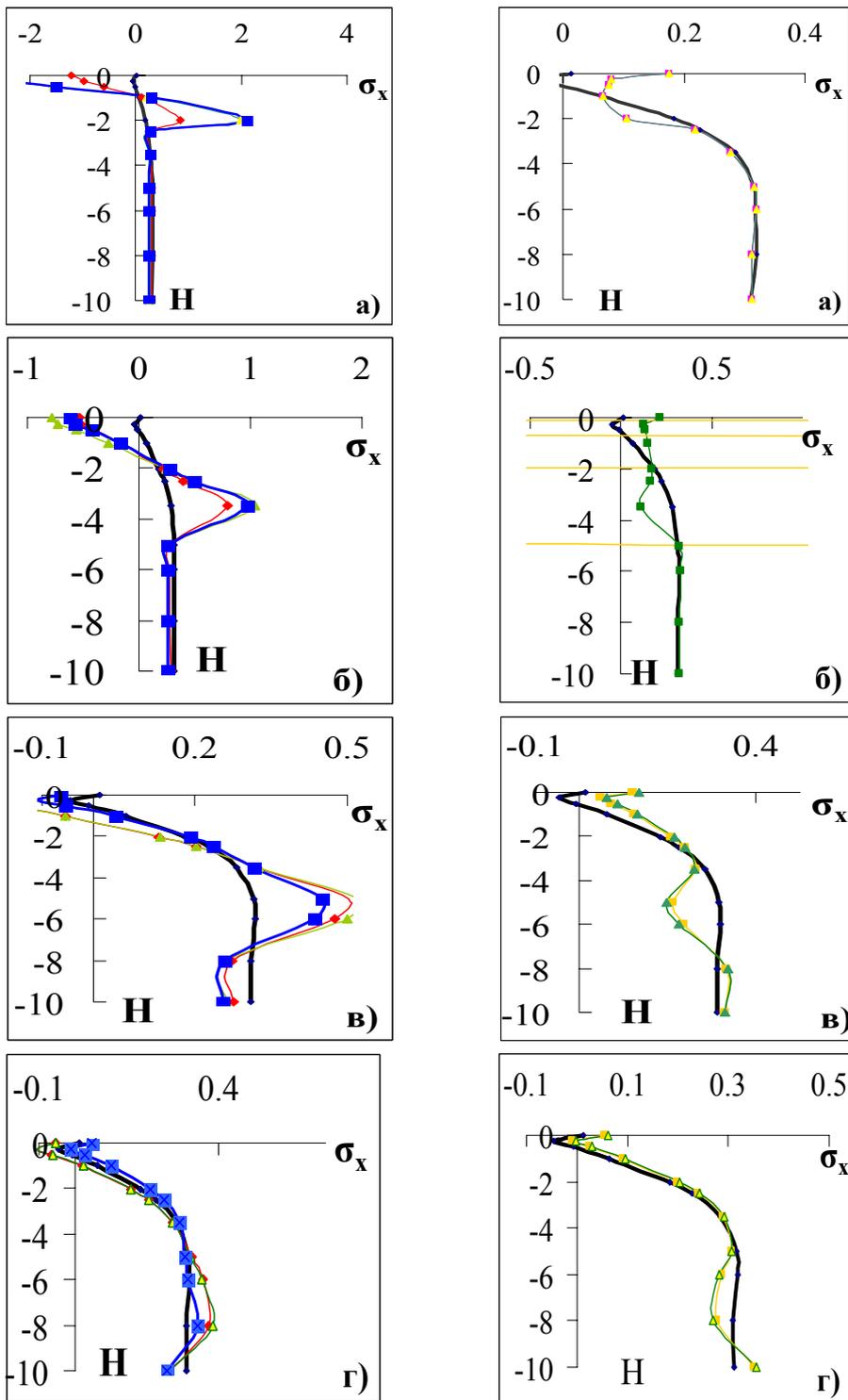


Рис. 11. Эпюры напряжений σ_x , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии b от края фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

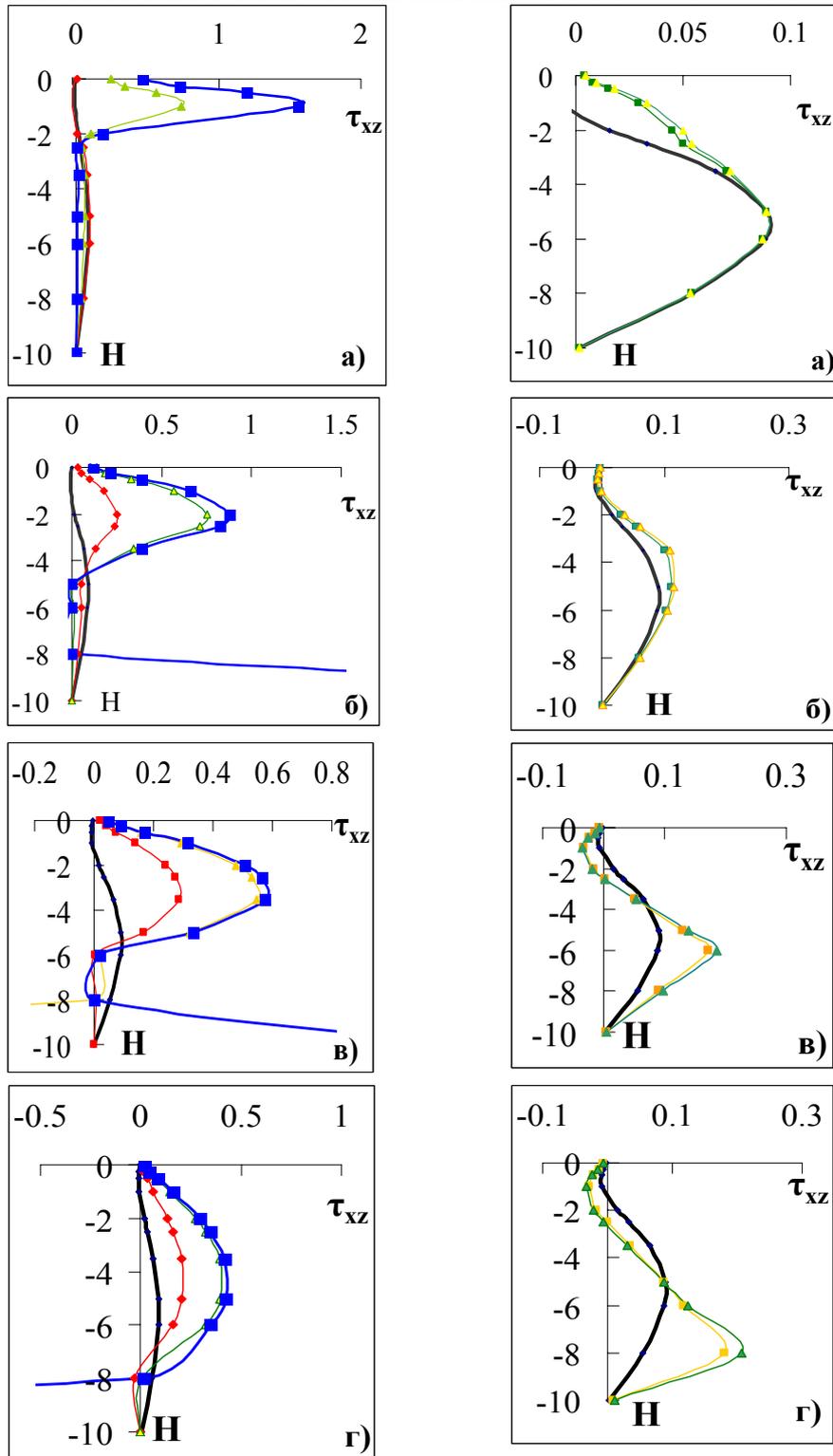


Рис. 12. Эпюры напряжений τ_{xz} , построенные на вертикали, проходящей на расстоянии b от края фундамента, при $H_b = 2$ м (а); 4 м (б); 6 м (в); 8 м (г)

Анализ показывает: если отношение $E_{об}/E_{он} < 1$, то численные значения напряжений практически не зависят от величины этого отношения и остаются по всей глубине основания равными их значениям при $E_{об}/E_{он} = 1$, т. е. как в случае однородного грунтового массива.

Если отношение модулей деформации $E_{об}/E_{он} > 1$, то напряжения в соответствующих точках этой прямой уменьшаются на 35...150 % и более в зависимости от величины этого отношения. При этом при приближении к контакту слоев уровень напряжений резко снижается, а ниже контакта снова резко, правда не в той же степени, увеличивается.

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

Если отношение $E_{об}/E_{он} < 1$, то численные значения вертикальных σ_z напряжений вне зависимости от величины этого отношения уменьшаются по всей толще основания приблизительно на 8 % по сравнению с напряжениями, соответствующими условию $E_{об}/E_{он} = 1$.

Если величина отношения $E_{об}/E_{он} > 1$, то картина иная: происходит уменьшение уровня напряжений примерно в тех же пропорциях, что и при $H_b = 2$ м, с той разницей, что «скачок» напряжений на контакте слоев не такой резкий, а численные значения вертикальных напряжений при $E_{об}/E_{он} \geq 100$ в соответствующих точках имеют практически равные значения.

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

Эпюра вертикальных напряжений, построенная на вертикали, проходящей через край фундамента, мало чем отличается от соответствующих эпюр, построенных на вертикали, проходящей через его середину, однако отметим следующее.

Если $E_{об}/E_{он} < 1$ и $H_b = 2$ м, вертикальные напряжения практически не изменяются при изменении отношения модулей деформации $E_{об}/E_{он}$.

Если отношение $E_{об}/E_{он} > 1$, то его уменьшение на порядок снижает уровень напряжений примерно на 5 %, если величину $E_{об}/E_{он}$ уменьшить еще на порядок, это повлечет за собой снижение уровня напряжений еще на 10 %.

При $H_b = 4$ м характер распределения вертикальных напряжений меняется незначительно: при $E_{об}/E_{он} < 1$ напряжения возрастают примерно на 8 % по отношению к однородному случаю и их величины не зависят от величины $E_{об}/E_{он}$.

Если величина $E_{об}/E_{он} > 1$, то напряжения в соответствующих точках при увеличении этого соотношения на порядок уменьшаются на 20 %, а при новом таком же увеличении уменьшаются еще в 2 раза. Аналогичная картина наблюдается при $H_b = 6,0; 8,0$ м.

Несколько иной вид имеет эпюра вертикальных напряжений σ_z , построенная вдоль вертикальной прямой, отстоящей от края фундамента на расстоянии, равном половине его ширины.

При $H_b = 2$ м и отношении модулей деформации $E_{об}/E_{он} < 1$ вертикальные напряжения в точках двухслойного основания уменьшаются на 40 % по срав-

нению с величинами напряжений в соответствующих точках однородного основания, а при дальнейшем уменьшении $E_{об}/E_{он}$ практически не меняются.

Если $E_{об}/E_{он} > 1$, то при увеличении этого отношения на порядок вертикальные напряжения увеличиваются сначала на 270 %, при дальнейшем увеличении на порядок практически не изменяются, а затем уменьшаются на 50 % по сравнению с однородным основанием. Аналогичная картина наблюдается при толщине верхнего слоя 4 м.

При $H_b = 6,0$ и $8,0$ м и $E_{об}/E_{он} \in [0,01 \dots 1000]$ наблюдается уменьшение значений напряжений σ_z по сравнению с однородным основанием на 8...25 %.

Характер распределения вертикальных напряжений по прямой, проходящей от края фундамента на расстоянии, равном его ширине, подобен при разных H_b . При $H_b = 2$ м вертикальные напряжения практически не изменяются при изменении отношения модулей деформации, если это отношение меньше единицы. Если $E_{об}/E_{он} > 1$, то напряжения в соответствующих точках основания при увеличении этого отношения в десять, а затем еще во столько же раз сначала увеличиваются в 2 раза, а затем еще в 4.

При $H_b = 4$ м характер изменения вертикальных напряжений не меняется, однако если отношение модулей деформаций меньше $E_{об}/E_{он} < 1$, то численное значение напряжений вне зависимости от величины этого отношения уменьшается по сравнению с однородным основанием примерно на 70 % и практически не зависит от этого отношения. При $E_{об}/E_{он} > 1$ наблюдается иная картина: происходит увеличение напряжений по сравнению с однородным случаем на 900 %, а затем при дальнейшем возрастании отношения $E_{об}/E_{он}$ на 400 %. Практически то же самое можно сказать о $H_b = 6$ и 8 м.

Перейдем к анализу распределения горизонтальных напряжений. При анализе горизонтальных напряжений по прямой, проходящей через центр фундамента, не представляет труда заметить, что характер распределения напряжений не зависит от H_b .

При $H_b = 2$ м и отношении $E_{об}/E_{он} < 1$ горизонтальные напряжения в верхнем слое увеличиваются на 12 %, а затем практически не изменяются, какой бы ни была величина $E_{об}/E_{он}$.

При $E_{об}/E_{он} > 1$ горизонтальные напряжения σ_x в зоне контакта слоев при изменении отношения $E_{об}/E_{он}$ на порядок меняют знак на противоположный, а в нижнем слое практически не зависят от этой величины.

Аналогичная картина наблюдается при толщине верхнего слоя 4 м. При толщине верхнего слоя 6 и 8 м характер изменения горизонтальных напряжений не претерпевает существенных изменений. Независимо от величины отношения, если $E_b/E_n < 1$, то численное значение напряжений увеличивается на 70 %, а при $E_{об}/E_{он} > 1$ в зоне контакта меняют знак на противоположный.

Распределение горизонтальных напряжений по прямой, проходящей от края фундамента на расстоянии, равном половине его ширины, можно охарактеризовать так.

При $H_b = 2$ м и величине отношения $E_{об}/E_{он} > 1$ 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.

При $E_b/E_n < 1$ 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 $H_b = 4; 6; 8$ м и $E_b/E_n < 1$ мало отличается от картины, соответствующей $H_b = 2$ м. При $E_b/E_n > 1$ напряжения вблизи поверхности увеличиваются, а в зоне контакта сначала уменьшаются на 60 %, а затем меняют знак на противоположный.

На рис. 4 изображены эпюры горизонтальных напряжений по прямой, проходящей от края фундамента на расстоянии, равном его ширине, при толщине верхнего слоя 2 м.

При отношении модулей деформации $E_b/E_n < 1$ горизонтальные напряжения в верхнем слое при уменьшении этого отношения на порядок и более сначала уменьшаются на 42 %, а затем практически не изменяются. При $E_{об}/E_{он} > 1$ его увеличение на порядок и более влечет за собой увеличение горизонтальных напряжений на 360 %, а затем еще на 600 %. Горизонтальные напряжения в нижнем слое практически не зависят от величины соотношения $E_{об}/E_{он}$. Аналогичная картина наблюдается при толщине верхнего слоя 4 м.

При толщине верхнего слоя 6 и 8 м характер изменения горизонтальных напряжений не претерпевает существенных изменений. Независимо от величины отношения при отношении модулей деформации $E_b/E_n < 1$ численное значение напряжений уменьшается на 10 %, а при $E_{об}/E_{он} > 1$ увеличивается на 19 %.

Характер эпюр касательных напряжений τ_{zx} , построенных на прямой, проходящей через край фундамента, остается неизменным при любых рассматриваемых значениях H_b .

При $H_b = 2$ м и $E_{об}/E_{он} > 1$ касательные напряжения в верхнем слое увеличиваются при изменении $E_{об}/E_{он}$ на порядок и более сначала в 2 раза, а затем еще в 2,2 раза. В нижнем же слое касательные напряжения уменьшаются с увеличением отношения $E_{об}/E_{он}$ практически до нуля.

При $E_{об}/E_{он} < 1$ наблюдается следующая картина: в верхнем слое основания напряжения уменьшаются на 25 %, а в нижнем слое возрастают на 19 % по сравнению с уровнем напряжений в однородном грунтовом массиве при любых значениях $E_{об}/E_{он}$.

Качественная картина эпюр касательных напряжений, построенных на вертикали, отстоящей от края фундамента на расстоянии, равном его ширине, остается прежней при всех рассматриваемых в работе величинах отношения $E_{об}/E_{он}$.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие *выводы*:

При любых значениях толщины верхнего слоя на контакте слоев происходит скачок напряжений, интенсивность которого находится в обратной зависимости от мощности верхнего ослабленного слоя. Абсолютного максимума величина скачка достигает при $H_b = 2$ м для касательных напряжений τ_{zx} под краем фундамента — почти 30000 %, в то время как при $H_b = 8$ м он не превышает 170 %.

Когда отношение $E_{об}/E_{он} < 1$, т. е. более «слабый» слой расположен сверху, то влияние величины этого отношения на картину перераспределения напряжений в грунтовом массиве незначительно. Так, в большинстве точек на-

пряжения изменяются не более чем на 50 %. В то же время изменение величины напряжений при $E_v/E_n > 1$ может составлять 500...600 %.

Чем дальше от оси фундамента находится рассматриваемая точка грунтового массива, тем больше ослабевает влияние величины $E_{ов}/E_{он}$ на ее напряженное состояние. Например, при увеличении отношения модулей деформации от значения $E_{ов}/E_{он} = 1$ до $E_{ов}/E_{он} = 1000$ вертикальные напряжения под центром фундамента при $H_b = 2$ м уменьшаются на 125 %, в то время как вертикальные напряжения в точках прямой, отстоящей от предыдущей на расстоянии $1,5b$, изменяются лишь на 30 %.

Существует предел значений величины отношения $E_{ов}/E_{он}$, 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 $E_{ов}/E_{он} \in [0,01; 100]$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сегерлинд Л. Дж.* Применение метода конечных элементов. М. : Мир, 1979. 392 с.
2. *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.
1. *Segerlind L. J.* Primenenie metoda konechnykh elementov. M. : Mir, 1979. 392 s.
2. *Bogomolov A. N.* Ustoychivost (napryazhonno-deformirovannoe sostoyanie) / A. N. Bogomolov i dr. : svid. o gos. reg. programmy dlya EVM № 2009613499 ot 30 iyunya 2009 g.

© Богомолова О. А., Вайнгольц А. И., Калиновский С. А.,
Бабаханов Б. С., Нестеров Р. С., Торшин Д. П., Иванов А. С., 2012

Поступила в редакцию
в апреле 2012 г.

Ссылка для цитирования:

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).