

УДК 624.131.7:519.688

Соколов Михаил Валерьевич, аспирант
Простов Сергей Михайлович, д.т.н., профессор
(КузГТУ, Кемерово)
Sokolov Mikhail V., graduate student
Prostov Sergey M., professor, doctor of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

**ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УКРЕПЛЕННОГО
ГРУНТОВОГО МАССИВА**

**LAYERING EFFECT ON STRESS-STRAIN STATE
STRENGTHENING OF SUBGRADE**

Представлены результаты моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований неоднородной структуры. Произведена оценка пространственных изменений напряженно-деформированного состояния грунтового основания при закреплении инъекционными методами. Даны рекомендации по расположению зон закрепления в слоистом грунтовом основании.

The results of modeling and analysis of stress-strain state of soil basements the inhomogeneous structures were presented. Spatial changes in the stress-strain state-subgrade for fixing injection methods were evaluated. Recommendations were made by location zones in layered fixing subgrade.

При возведении горнотехнических сооружений, гражданских и промышленных объектов часто сталкиваются с грунтовыми основаниями, сложенными двумя и более грунтами с различными физико-механическими свойствами, при этом слабые толщи массива расположены поверх более плотных грунтов [1]. Неоднородность свойств массива, в частности, его слоистость, в ряде случаев существенно отражается на распределении напряжений и деформаций [2]. Изучение геомеханического аспекта данной проблемы позволит повысить точность прогноза устойчивости грунтовых оснований сооружений, в том числе, укрепляемых инъекционными методами, а также снизить риски техногенных аварий на объектах горнодобывающей и строительной отраслей.

При решении подобных задач все большее распространение приобретает метод численного моделирования, основные положения которого изложены в ряде работ [3 и др.]. Концепции метода реализованы в рамках программного комплекса для геотехнических расчетов Alterra компании

ООО «ИнжСтройПроект». Основные принципы моделирования и анализа компьютерных расчетов изложены в работе [4].

Расчетная модель для формирования базы данных и дальнейшего анализа (рис. 1) реализована для двухступенчатого ленточного фундамента, нагруженного сосредоточенной силой $P = 156743\text{Н}$, высотой $d_f = 3,0\text{м}$ и следующими механическими свойствами: модуль деформации $E_f = 2000\text{МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_f = 0,15$, плотность $\rho_f = 2500\text{кг/м}^3$. Грунтовый массив состоит из верхнего («слабого») и нижнего («сильного») слоев с заданными физико-механическими свойствами, в соответствии с принятыми нормативами [5] (табл. 1), и мощностью $H_1 = H_2 = 10,5\text{м}$.

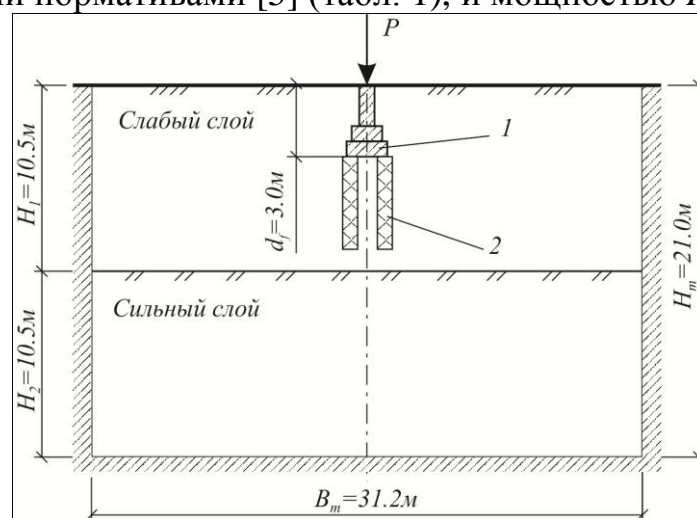


Рис. 1. Схема базовой модели неоднородного грунтового основания:
1 – фундамент; 2 – зоны закрепления

Таблица 1

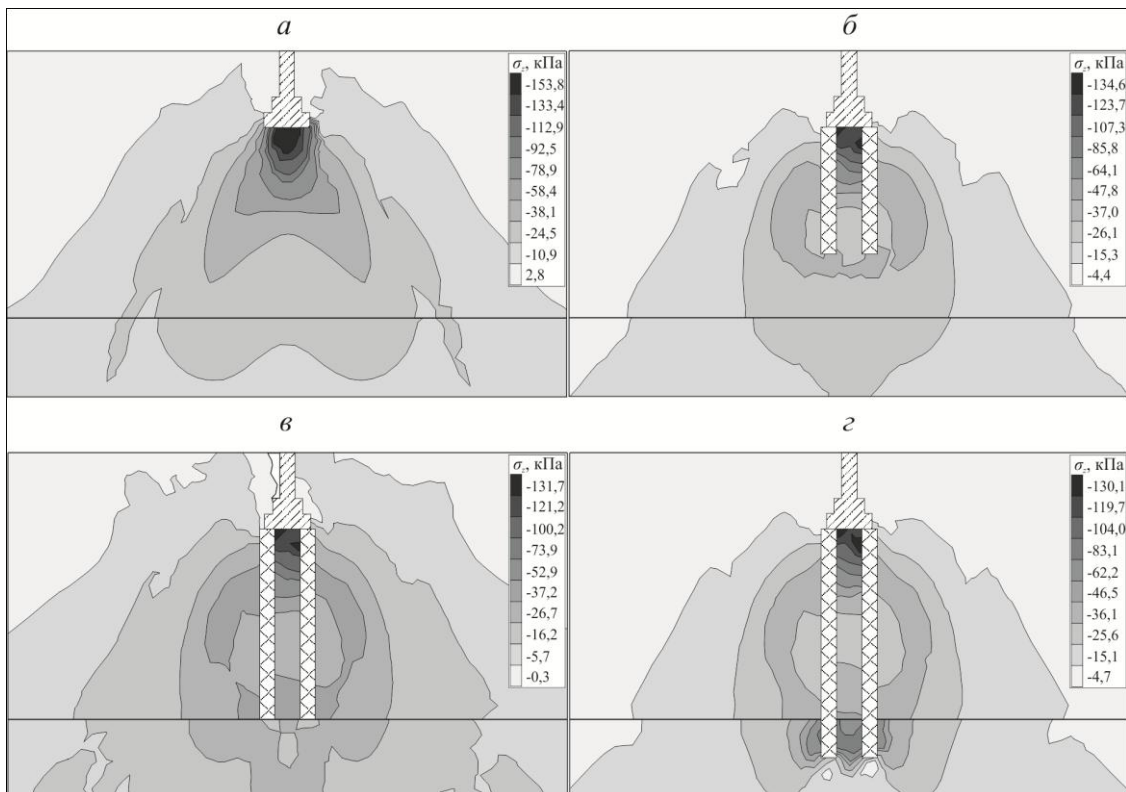
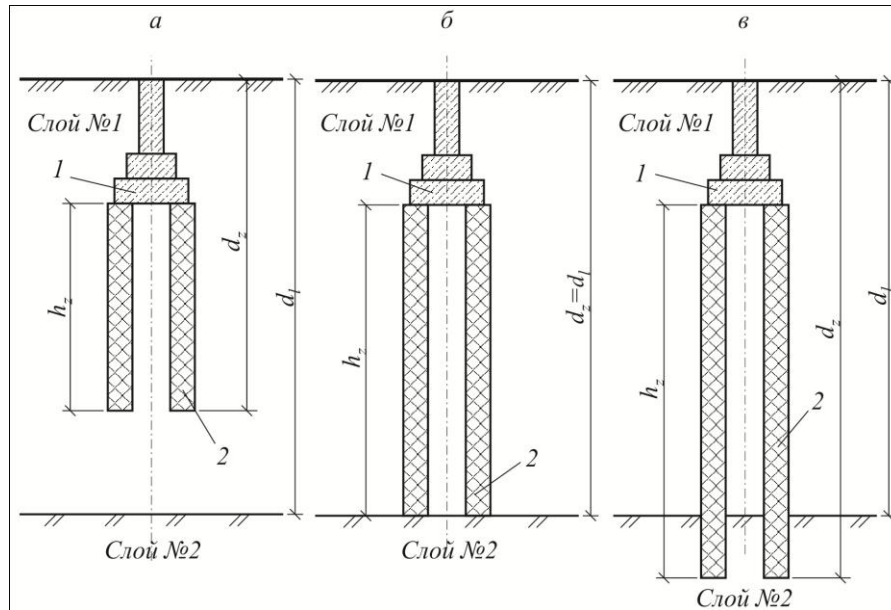
Физико-механические свойства грунтов

Наименование показателя	Сла- бый слой	Сильный слой, отношение E_2/E_1				
		1	2	3	4	5
		Модуль деформации E_i , МПа	5	5	10	15
Коэффициент Пуассона ν_i	0,36	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32
Средняя плотность ρ_i , кг/м ³	1750	1750	1800	1850	1900	1950
Угол внутреннего трения φ_i , град	17	17	18	19	20	21
Сцепление C_i , кПа	5	5	10	20	30	40

Формирование базы данных для анализа осуществлялось путем задания приращений физико-механических свойств грунтов массива в диапазоне отношений $E_2/E_1 = 1 \dots 5$ (табл. 1) при различных схемах инъекционного закрепления:

- при расположении зон укрепления в границах слабого слоя (рис. 2, а);
- при опирании зон укрепления на границу слоев (рис. 2, б);
- при защемлении зон укрепления в сильном слое (рис. 2, в).

Основные результаты анализа в виде полей изолиний вертикальных напряжений σ_z представлены на рис. 3.



Вертикальные напряжения в естественном (незакрепленном) слое-стом грунтовом массиве (рис. 3 а) распределяются симметрично и имеют область концентрации под фундаментом, а также характерные изменения на границе слоев. При введении зон закрепления согласно схемам (см. рис. 2) образуются дополнительные области концентрации напряжений под основанием зон, а также вдоль их боковых поверхностей.

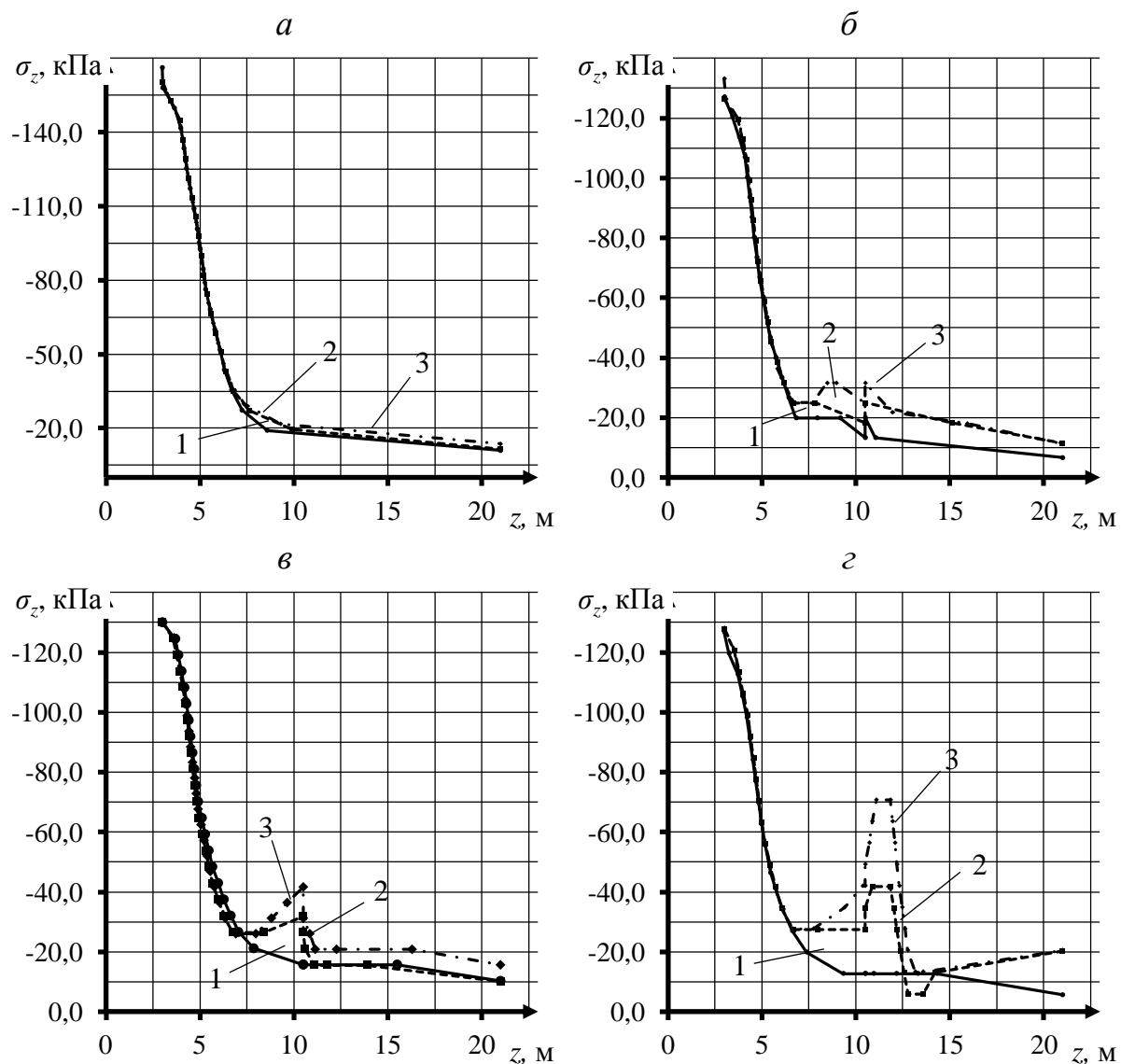


Рис. 4. Зависимость σ_z от глубины по оси модели z при естественном (а) и закрепленном по схеме № 1 (б), № 2 (в) и № 3 (г) массиве и отношении свойств E_2/E_1 , равном:
 1 – $E_2/E_1 = 1$; 2 – $E_2/E_1 = 3$; 3 – $E_2/E_1 = 5$

При анализе характера распределения вертикальных напряжений σ_z от глубины массива z вдоль оси симметрии фундамента (рис. 4) было установлено, что образование области концентраций σ_z наблюдается при $z = 7,5 \dots 12,5$ м в зависимости от расположения зон закрепления и отношения E_2/E_1 . В частности, наибольший эффект от закрепления достигается

при схеме № 3 (рис. 4, г), т.к. в данном случае в закрепленном массиве на границе слоев отсутствуют «скачки» напряжений σ_z за счет их возрастания в слабом слое в диапазоне $z = 7 \dots 10$ м.

Зависимости вертикальных напряжений σ_z от глубины модели вдоль внешней боковой поверхности зон закрепления z_s представлены на рис. 5.

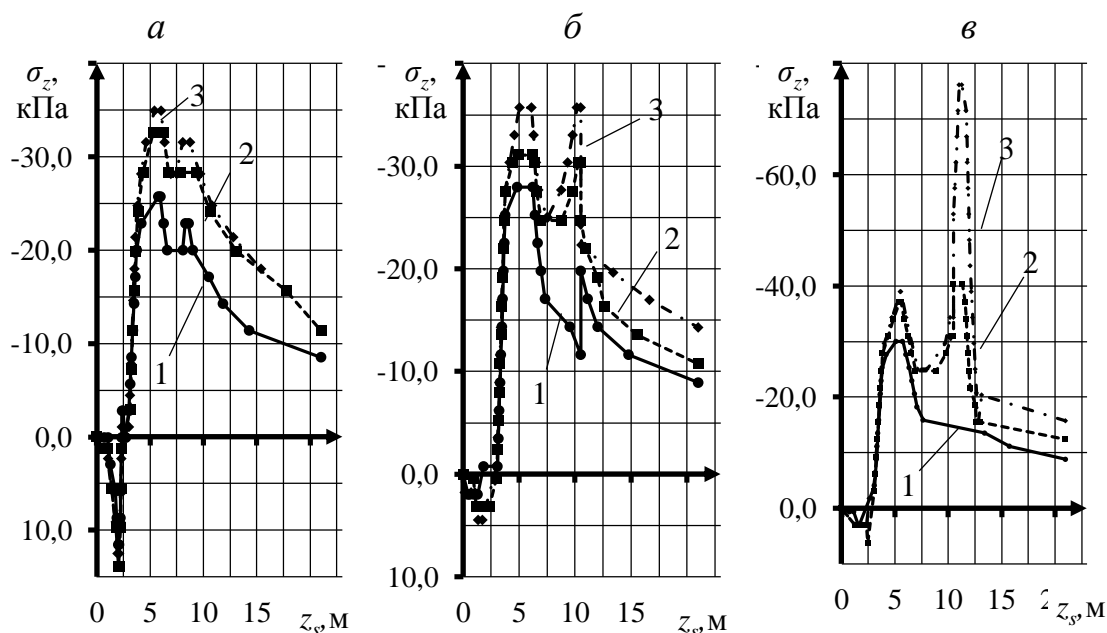


Рис. 5. Зависимость σ_z от глубины модели z_s по границе зоны закрепления при закреплении по схеме № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в) и отношении свойств E_2/E_1 , равном:
 1 – $E_2/E_1 = 1$; 2 – $E_2/E_1 = 3$; 3 – $E_2/E_1 = 5$

Из графиков следует, что образование зон максимальных напряжений σ_z в диапазонах $z_s = 3 \dots 6$ м и $z_s = 8 \dots 12$ м при закреплении по схеме № 1 (рис. 5, а) и в диапазонах $z_s = 3 \dots 7$ м при закреплении по схемам № 2 и 3 (рис. 5, б, в). Отмеченная ранее концентрация напряжений на границе слоев имеет место в случаях б и в (рис. 5), при этом:

- при закреплении по схеме № 2 (рис. 5, б) наблюдается образование максимальных напряжений σ_z на границе слоев при $E_2/E_1 = 1$ и его сглаживание при $E_2/E_1 = 3 \dots 5$ за счет возрастания напряжений σ_z в слабом слое;

- при закреплении по схеме № 3 (рис. 5, в) отмечаются максимальные напряжения σ_z при $E_2/E_1 = 1$ в слабом слое, а при $E_2/E_1 = 3 \dots 5$ – в границах слабого и сильного слоев, в частности, при отношении $E_2/E_1 = 5$ максимальные напряжения σ_z значительно выше в сильном слое.

Для численной оценки напряженного состояния грунтового массива введем интегральный критерий, коэффициент концентрации напряжений k_i , определенный по формуле

$$k_i = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{lost}}},$$

где σ_{max} – максимальные напряжения в границе слоя, кПа; σ_{lost} – напряжения в нетронутой части рассматриваемого слоя (на границе модели), кПа.

Зависимости отношения коэффициентов концентрации напряжений в слабом и сильном слоях k_1/k_2 от отношения E_2/E_1 представлены на рис. 6.

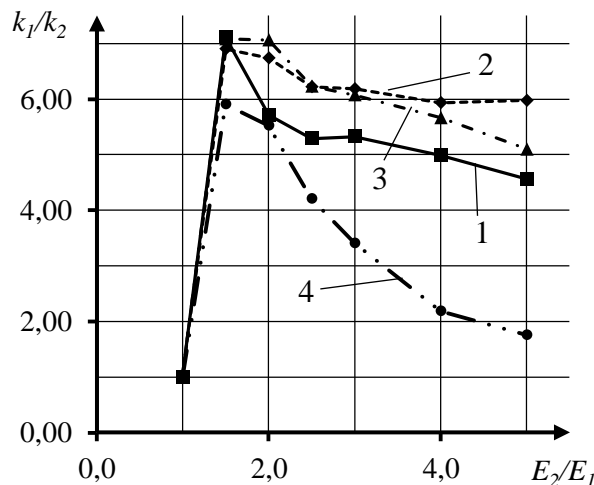


Рис. 6. Зависимость отношений k_1/k_2 от отношения E_2/E_1 :
1 – естественный массив; 2 – при закреплении по схеме № 1;
3 – по схеме № 2; 4 – по схеме № 3

Согласно приведенным данным с возрастанием отношения E_2/E_1 в диапазоне $E_2/E_1 = 1,0 \dots 2,5$ происходит перераспределение напряжений между слоями с образованием области максимальных значений. При закреплении согласно схемам № 1 и № 2 наблюдается некоторое сглаживание графиков в диапазоне $E_2/E_1 = 2,0 \dots 5,0$. Наибольший эффект достигается при закреплении согласно схеме № 3, где наблюдается резкое снижение показателя k_1/k_2 до значений, близких к единице, с сохранением области максимальных значений. Таким образом, расположение основания зон закрепления в границах сильного слоя способствует более благоприятному распределению напряжений в слоистом грунтовом массиве.

Характер распределения деформаций ε_z в грунтовом массиве отражают поля изолиний, приведенные на рис. 7.

Распределение деформаций ε_z происходит симметрично, области максимальных значений образуются в характерных частях массива, а именно:

- под фундаментом на глубине $z = 3 \dots 6$ м шириной 3,5-4,5м, а при закреплении – в межзонном пространстве;
- под нижними концами зон закрепления средней шириной 5,5-6,5м, в отдельных случаях 3,2-4,0м.

В результате анализа деформаций ε_z вдоль оси z_s по боковой грани зоны закрепления (рис. 8) отмечаются значительные поперечные смещения зон закрепления, так как на интервале глубины $z_s = 3,5-7,5$ м (в некоторых

случаях до 10,5м) наблюдается перемена характера деформаций на сжимающие, а также значительное увеличение ε_z .

На рис. 9 приведена зависимость разности деформаций на границе слоев Δ от отношения E_2/E_1 .

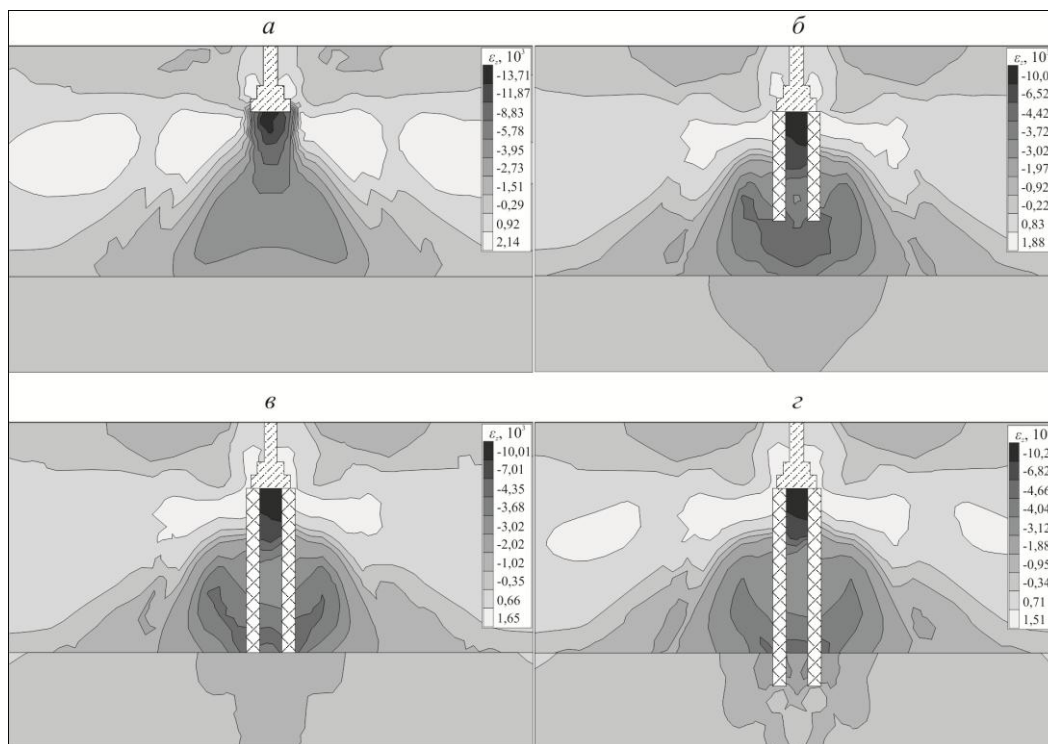


Рис. 7 Распределение вертикальных деформаций ε_z в грунтовом массиве.

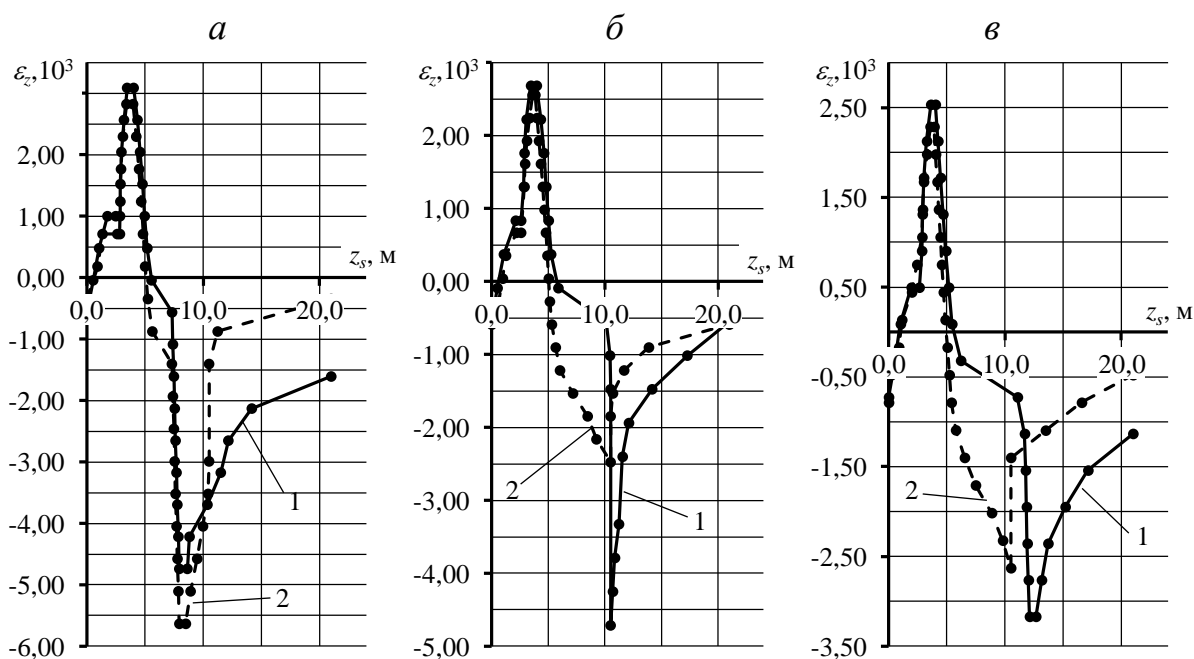


Рис. 8. Зависимость вертикальных упругих деформаций ε_z от глубины модели z_s в закрепленном основании согласно схеме № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в) при отношении E_2/E_1 , равном:

$$1 - E_2/E_1 = 1; 2 - E_2/E_1 = 5$$

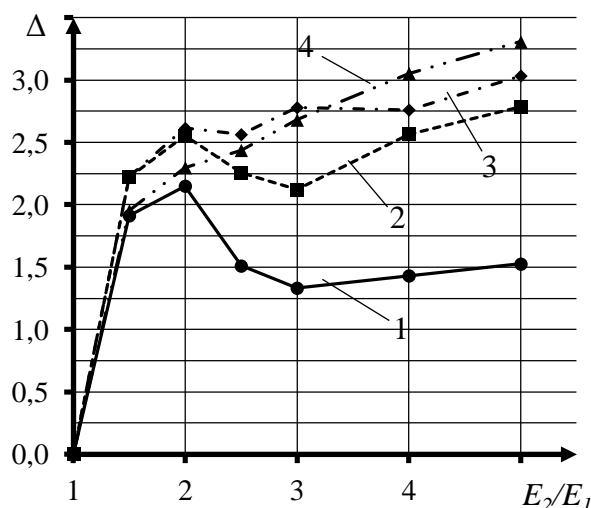


Рис. 9. Зависимость изменений вертикальных деформаций на границе слоев Δ от отношения E_2/E_1 :
1 – естественный массив; 2 – при закреплении по схеме № 1;
3 – по схеме № 2; 4 – по схеме № 3

Из приведенных зависимостей видно, что наибольшие значения Δ отмечаются при схеме закрепления № 3, при этом величина Δ возрастает монотонно, без областей максимальных значений, в отличие от иных схем закрепления. Наименьший уровень Δ отмечен в естественном массиве, однако на интервале отношения $E_2/E_1 = 1,5 \dots 2,5$ отмечаются максимальные значения, превышающие величину $\Delta = 1,5$ при отношении $E_2/E_1 = 5$.

Полученные данные могут быть учтены при проектировании и реконструкции сооружений различных отраслей промышленности.

Список литературы

1. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: ВНИИТПИ, 2000. – 321с.
2. Курленя, М. В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М. В. Курленя, В. М. Серяков, А. А. Еременко. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
3. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – Москва: Недра. – 1987. – 221с.
4. Покатилов А.В., Компьютерное моделирование геомеханических процессов при электрохимическом закреплении грунтовых оснований сооружений / А.В. Покатилов, С.М. Простов, С.А. Иванов // Вестн. КузГТУ. – 2013. – №4. – с. 61–65.
5. СП 23.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – Москва: Минрегион., России, 2011. – 162с.