

УДК 624.130.7:624.048

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ОСЕДАНИИ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ

М.В. Соколов, аспирант, Т.О. Гончарова, ст. гр. ФП-101  
Научный руководитель: С.М. Простов, д.т.н., профессор  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Проблема развития неравномерных вертикальных перемещений (осадок) фундаментов весьма актуальна для ряда горнотехнических сооружений, в частности комплексов наклонной сепарации и разноэтажных конструкций обогатительных фабрик. Вертикальные перемещения фундаментов оснований связаны с геологическим строением оснований (вид, состояние и залегание грунтов), климатическими условиями, техногенным фактором («перегруз» здания, замачивание грунтов основания, отсутствие планового капитального ремонта) и других факторов. Решением данной проблемы является возможность прогнозирования деформационных процессов в грунтовых основаниях на основе их численного моделирования с применением современных геомеханических компьютерных моделей оснований. Геомеханические модели, реализованные методом конечных элементов, позволяют рассмотреть систему «фундамент-грунт» на разных стадиях строительства и эксплуатации сооружения [1], подробно изучить процессы вертикальных перемещений во времени и формирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива [2].

Проведенные исследования по компьютерному прогнозированию неравномерных осадок заключались в поэтапном изучении грунтовых массивов различного строения и применении полученных данных на реальном объекте. Моделирование неравномерных осадок производилось с применением программного комплекса для геотехнических расчетов «Alterra», предоставленного в бесплатное некоммерческое пользование компанией ООО «ИнжПроектСтрой». Целью моделирования являлось установление взаимосвязей между осадками и факторами, влияющих на их возникновение; изучение напряженно-деформированного состояния грунтового основания однородного и неоднородного строения при неравномерной вертикальной нагрузке. Основные методические положения построения расчетных моделей изложены в работах авторов [3].

На первичном этапе исследований была рассмотрена модель нагружения двумя близко расположенными штампами однородного грунтового массива со следующими механическими параметрами: модуль деформации  $E = 5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,36$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 18^\circ$ ; сцепление  $C = 5$  кПа, плотность  $\rho = 1750$  кг/м<sup>3</sup> (рис. 1а). Параметры штампов: модуль деформации  $E_f = 2000$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu_f = 0,15$ , плот-

ность  $\rho_f = 2500 \text{ кг/м}^3$ , ширина  $b_f = 1 \text{ м}$ ; высота  $h_f = 0,5 \text{ м}$ . Неравномерность нагружения основания достигалось заданием различных отношений нагрузок на штампы  $P_2/P_1$ . С целью оценки влияния структурных неоднородностей основания была сформирована база моделей при  $P_1 = 60 \text{ кН}$ , отношениях  $P_2/P_1 = 1,0; 1,5; 2,0$  и трехслойном строении основания (рис. 1б), сложенного грунтами с различными физико-механическими свойствами соответствующими свойствам и строению реального основания объекта.

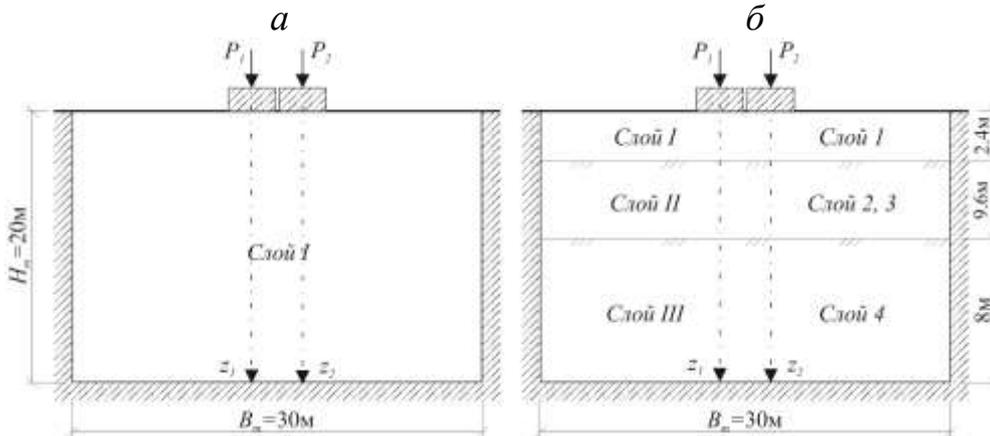


Рис. 1. Расчетная модель нагружения однородного (а) и неоднородного (б) массива

В результате расчетов установлена близкая к линейной зависимость отношения вертикальных смещений (осадок)  $S_1/S_2$  под соответствующими штампами от отношения нагрузок  $P_2/P_1$  (рис. 2). Нарушение линейной зависимости при  $P_1 = 80 \text{ кН}$  и  $P_2/P_1 = 3,0$  обусловлено превышением предела прочности грунта и развитием значительных пластических деформаций.

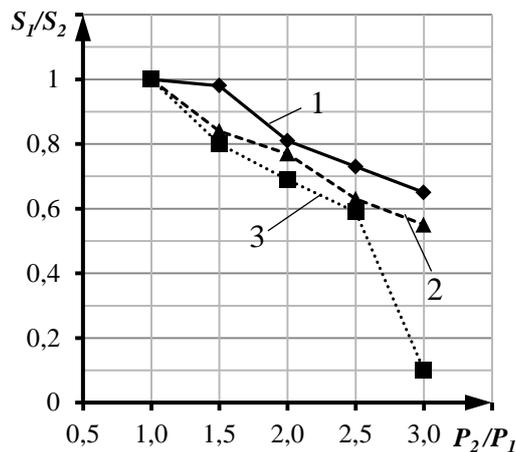


Рис. 2. Зависимости отношения вертикальных смещений (осадок) под штампами  $S_1/S_2$  от отношения нагрузок на штампы  $P_2/P_1$  при  $P_1$ , равном:  
 1 –  $P_1 = 40 \text{ кН}$ ; 2 –  $P_1 = 60 \text{ кН}$ ; 3 –  $P_1 = 80 \text{ кН}$

Вертикальные напряжения под штампами  $\sigma_{z1}$  и  $\sigma_{z2}$  монотонно уменьшаются с увеличением глубины модели  $z$ , при этом их значения многократно выше под штампом № 2 (рис. 3а). При анализе горизонтальных напряжений

$\sigma_{x1}$  и  $\sigma_{x2}$  установлено, что при отношении  $P_2/P_1 = 1$  происходит уменьшение напряжений по глубине, однако при  $P_2/P_1 = 1,5 \dots 3$  отмечено образование зоны растягивающих напряжений с глубины  $z = 3$  м, причем концентрация напряжений и ширина этой зоны зависят от нагрузки  $P_1$  и отношения  $P_2/P_1$ . При высоких значениях  $P_2/P_1$  под более нагруженным штампом образуются зона максимальных сжимающих напряжений на интервале  $z = 3$  м (рис. 3б).

Детальный анализ показал, что влияние близко установленных штампов при наличии одного, более нагруженного, на напряженное состояние массива заключается в следующем:

- повышение абсолютных значений напряжений  $\sigma_{z1}$  и  $\sigma_{z2}$  без изменения характера их распределения с увеличением отношений  $P_2/P_1$ ;
- зависимость пиковых значений  $\sigma_x$  в зонах растягивающих напряжений под обоими штампами от отношения  $P_2/P_1$ ;
- образование зоны концентрации сжимающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  под менее нагруженным штампом с увеличением нагрузки и отношения  $P_2/P_1$ .

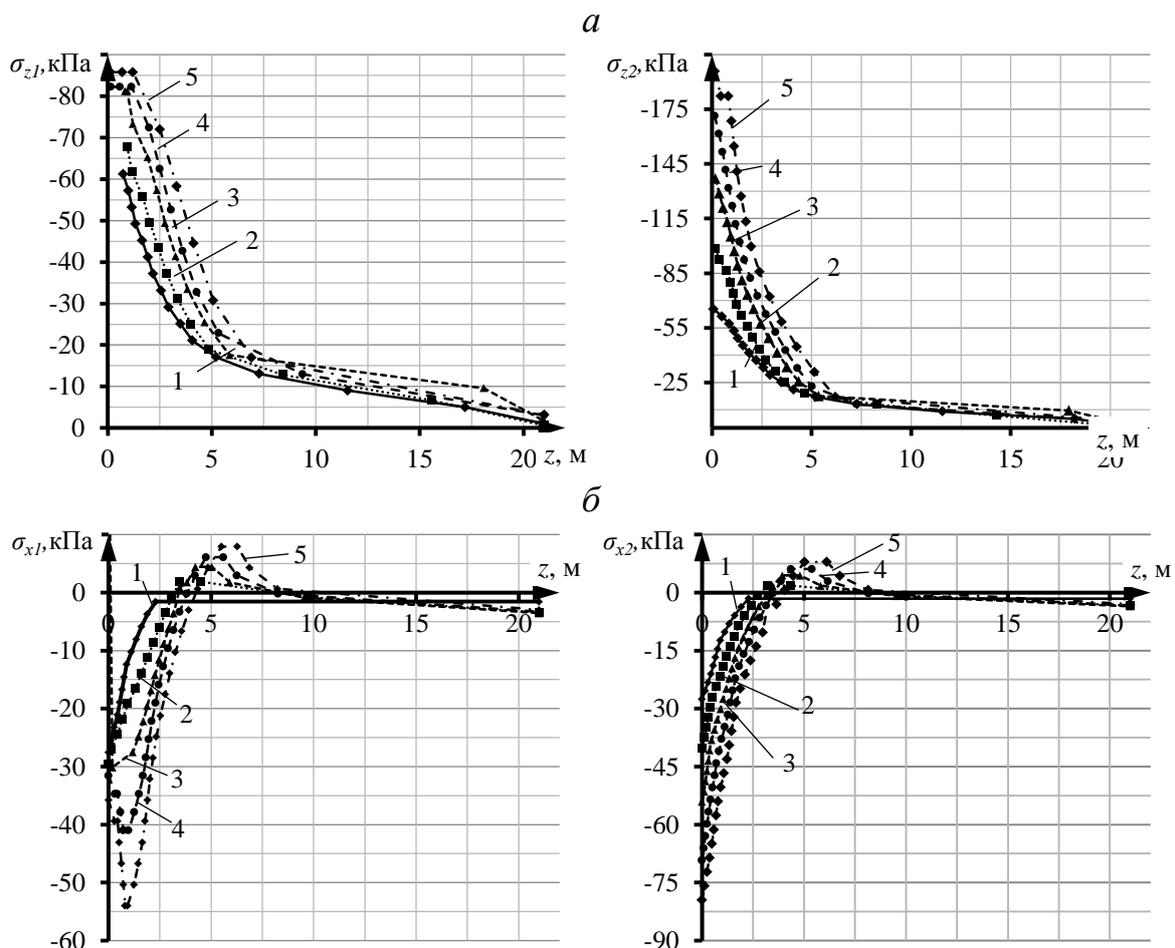


Рис. 3. Зависимость вертикальных  $\sigma_z$  (а) и горизонтальных  $\sigma_x$  (б) напряжений под штампами от глубины однородного массива  $z$  при нагрузках  $P_1 = 60$  кН и отношениях нагрузок на штампы  $P_2/P_1$ , равных: 1 –  $P_2/P_1 = 1$ ; 2 –  $P_2/P_1 = 1,5$ ; 3 –  $P_2/P_1 = 2$ ; 4 –  $P_2/P_1 = 2,5$ ; 5 –  $P_2/P_1 = 3$

Характер развития вертикальных деформаций  $\varepsilon_z$  в значительной мере повторяет характер графиков  $\sigma_z(z)$ , приведенных на рис. 3а: происходит уменьшение деформаций  $\varepsilon_{z1}$  и  $\varepsilon_{z2}$  по глубине модели  $z$  монотонно, без образования аномальных зон деформаций. В диапазоне  $z = 0,5 \dots 2,0$  м отмечено хаотичное изменение  $\varepsilon_{z1}$ , как следствие влияния близко стоящих штампов (рис. 4).

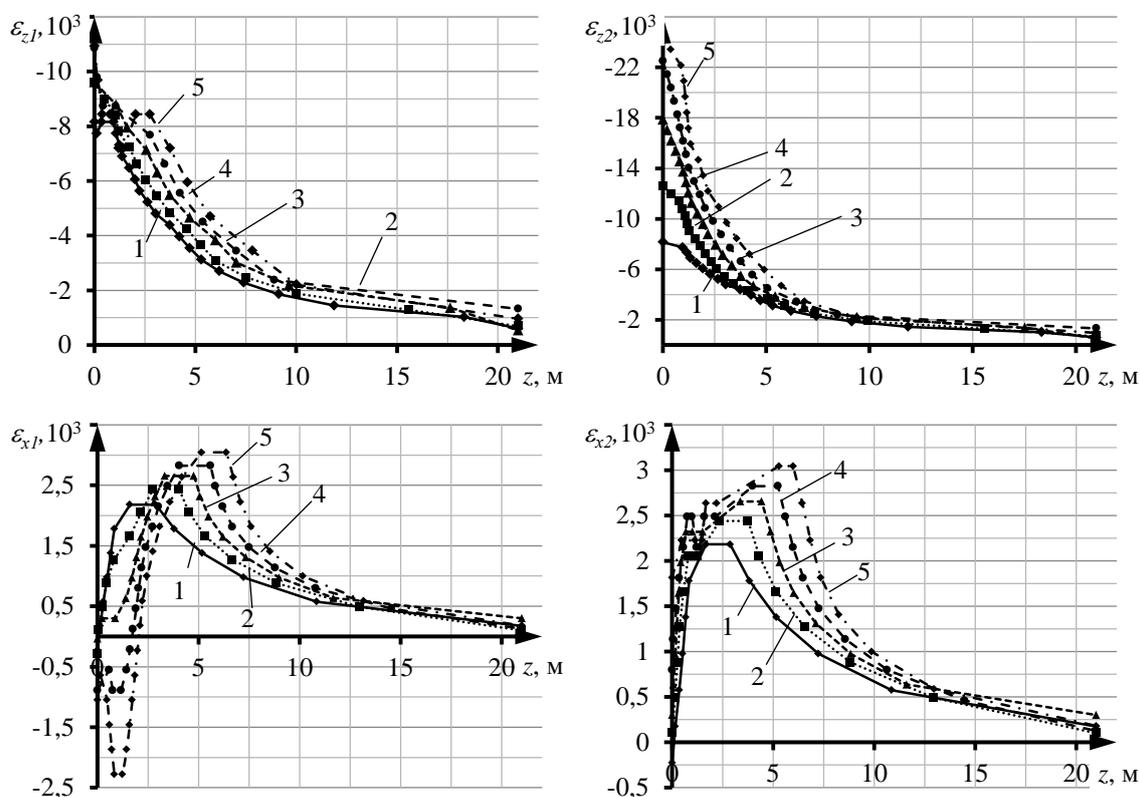


Рис. 4. Зависимости вертикальных  $\varepsilon_{z1}$  и  $\varepsilon_{z2}$  и горизонтальных  $\varepsilon_{x1}$  и  $\varepsilon_{x2}$  деформаций однородного массива от глубины  $z$  массива при нагрузках  $P_1 = 80$  кН и отношениях нагрузок на штампы  $P_2/P_1$  равных:  
 1 –  $P_2/P_1 = 1$ ; 2 –  $P_2/P_1 = 1,5$ ; 3 –  $P_2/P_1 = 2$ ; 4 –  $P_2/P_1 = 2,5$ ; 5 –  $P_2/P_1 = 3$

Значительно более сложный характер зафиксирован в развитии горизонтальных деформаций  $\varepsilon_x$ . Из приведенных зависимостей  $\varepsilon_{x1}(z)$  и  $\varepsilon_{x2}(z)$  следует, что при нагружении происходит поперечное смещение грунта в сторону от осей симметрии штампов в двух противоположных направлениях (рис. б).

Особенность напряженно-деформированного состояния слоистого грунтового основания под штампами состоит в том, что максимальные горизонтальные деформации локализируются на границе первого слабого слоя ( $z = 2,4$  м), этой отметке соответствует изгиб графиков вертикальных деформаций  $\varepsilon_z$  и появление растягивающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ .

Влияние неоднородного строения грунтового основания на распределение  $\varepsilon_x(z)$  выражается в концентрации деформаций в границах слабого (верхнего) слоя и последующим их монотонном уменьшении без образования характерных изгибов. Изменение характера распределения  $\varepsilon_{x1}(z)$  и снижение

растягивающих деформаций  $\varepsilon_{x1}$  в границах первого слоя является следствие влияния соседнего штампа.

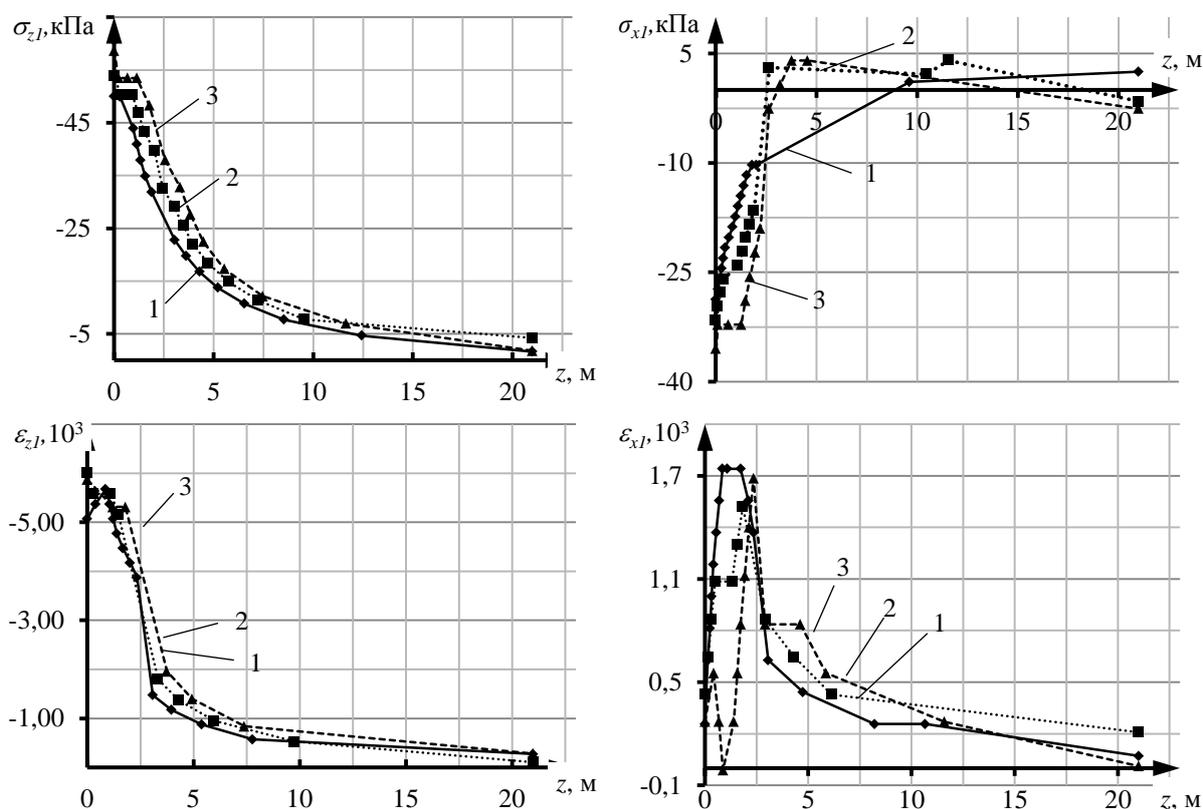


Рис. 5. Зависимости вертикальных  $\sigma_z$  и горизонтальных  $\sigma_x$  напряжений, вертикальных  $\varepsilon_z$  и горизонтальных  $\varepsilon_x$  деформаций под штампами от глубины слоистого массива  $z$  при нагрузке  $P_1 = 60$  кН и отношениях нагрузок на штампы  $P_2/P_1$  равных:  
 1 –  $P_2/P_1 = 1$ ; 2 –  $P_2/P_1 = 1,5$ ; 3 –  $P_2/P_1 = 2$

Сопоставление результатов расчета с инструментальными замерами показали, что погрешность прогноза не превышает 15-20%.

Проведенные научные исследования демонстрируют, что с применением компьютерного моделирования возможно с достаточной точностью прогнозировать развитие неравномерных осадок зданий и сооружений, при этом значительно снижаются стоимость и время ведения маркшейдерских работ.

### Список литературы

1. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. - 679 с.
2. Курленя, М. В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М. В. Курленя, В. М. Серяков, А. А. Еременко. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
3. Sergei M. Prostov, Mikhail V. Sokolov and Andrey V. Pokatilov. The Influence Of Injecting Strengthening For Uniform Subgrade Soils Of Strip Foundations On Their Stress-Strain State // International Journal of Applied Engineering Research. – Volume 10. Number 25. 2015. pp. 45297-45306.