

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МКЭ SOFiStiK МОДУЛЬ HASE

## Анализ упругого и упруго-пластического взаимодействия сооружений на плитных и свайных фундаментах с основанием по модели полупространства

**S**OFiStiK — интегрированный программный комплекс конечно-элементного анализа строительных конструкций, зданий, мостов, тоннелей и решения геотехнических задач. ([www.sofistik.com](http://www.sofistik.com), [www.sofistik.ru](http://www.sofistik.ru)).

Пакеты SOFiStiK управляются комплексом SOFiStiK Structural Desktop (SSD). SSD предоставляет пользователям ориентированный на задачу способ работы, предлагая различные процедуры или определенную задачу из библиотеки. Ввод исходных данных возможен путем моделирования специальными пре-

процессорами SOFiPLUS и WinTUBE в среде AutoCAD, чтения моделей конструкций из AutoCAD и Autodesk Revit Structure или через табличный редактор. Широкий спектр возможностей моделирования конструкций и нагрузок, современный графический интерфейс, адаптированный под строительные задачи, возможность параметризации расчетов, большое количество специализированных модулей, внешние интерфейсы (Revit, Femap, IFC, Fides и др.) позволяют выделить SOFiStiK, как пример удачного сочетания достоинств известных hi-end пакетов

— лидеров среди программ МКЭ с адаптацией для строительных задач и полной локализацией для применения на территории России и стран СНГ. Программный комплекс имеет сертификат соответствия нормам проектирования РФ.

Компания ПСС, эксклюзивный авторизованный дистрибьютор программ МКЭ SOFiStiK в России и СНГ, оказывает весь комплекс работ, связанный с внедрением программного комплекса SOFiStiK, а именно:

- консалтинговые услуги по внедрению;
- поставка ПО (по запросу предоставляется бесплатная демо-версия программы на 30 дней);
- обучение сотрудников;
- техническая поддержка.

### АНАЛИЗ ПОЛУПРОСТРАНСТВА

#### О теории полупространства

Одним из путей моделирования статического взаимодействия «конструкция-грунт» является использование объемных конечных элементов (3D Брик-элементы) (рис. 1, слева). Но для описания грунта требуется большее количество элементов, чем для моделирования самой конструкции, интересующей инженеров-конструкторов. Вследствие этого удобно применять метод подконструкций, при котором конструкция моделируется обычными конечными элементами, в то время как грунт — полупластически, с использованием теории полупространства (рис. 1, справа). Взаимодействие между двумя подконструкциями определяется коэффициентами жесткости или податливости на границе грунт-конструкция. Такой подход

**С**егодня расчет практически любого сооружения или здания невозможен без геотехнического обоснования, ведь грунт основания и само сооружение взаимодействуют. К сожалению, в силу разных причин проектировщики удовлетворяются моделированием самой конструкции отдельно от модели грунта, а их взаимодействие вынужденно рассматривается упрощенно на основе эмпирических данных. Использование комплекса программ конечно-элементного анализа SOFiStiK обеспечивает возможность совместного расчета в одной модели пространственных систем «сооружение-основание», в том числе, с физически нелинейными свойствами, и включает в себя модули для решения статических, динамических фильтрационных и теплофизических задач.

В комплексе МКЭ анализа SOFiStiK есть инструменты, позволяющие удобно моделировать процесс последовательности возведения сооружений, при этом можно учесть изменение свойств материалов во времени, например, «старение» бетона.

В данной статье рассмотрен один из возможных вариантов учета совместной работы «грунт-сооружение» в единой модели, но есть и другие расширенные возможности решения этой проблемы.

**Борис Воробьев,**  
заместитель генерального директора компании ПСС

позволяет более детально дискретизировать фундаментную плиту и конструкцию.

**Метод коэффициента жесткости**

Данная модель учитывает сдвиговые деформации в теле грунта. Сосредоточенная сила на поверхности вызывает напряжения и деформации в грунте и приводит к осадкам поверхности вокруг точки приложения нагрузки (рис.2 в). Постоянное поверхностное давление вызывает осадку поверхности, что приводит к напряжениям в фундаментной плите и в самой конструкции (рис.2 а).

**Формирование матрицы жесткости полупространства**

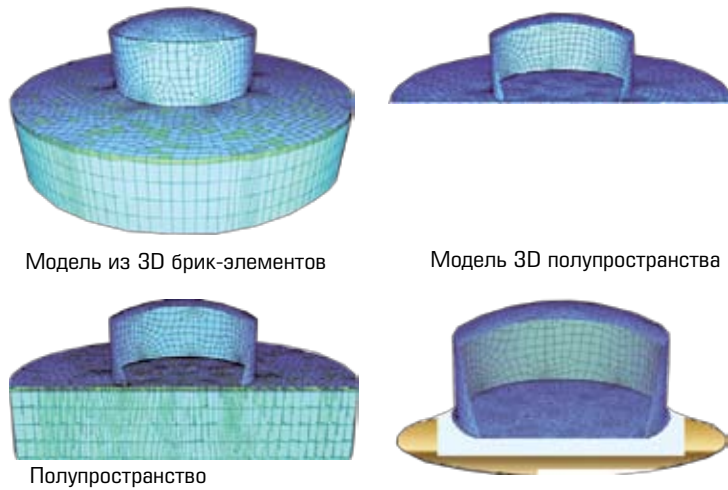
Первым шагом при формировании матрицы жесткости полупространства является построение его матрицы податливости. Коэффициент податливости  $\delta_{ik}$  описывает перемещение  $v_i$  в точке  $i$  от сосредоточенной единичной силы  $P_k = 1$ , действующей на точку  $k$  полупространства.

В первую очередь вычисляются напряжения в грунте в зависимости от сосредоточенной нагрузки  $P_k$ , действующей на поверхности полупространства, с помощью простой формулы (1) для описания распределения напряжений (рис. 2в и 3а):

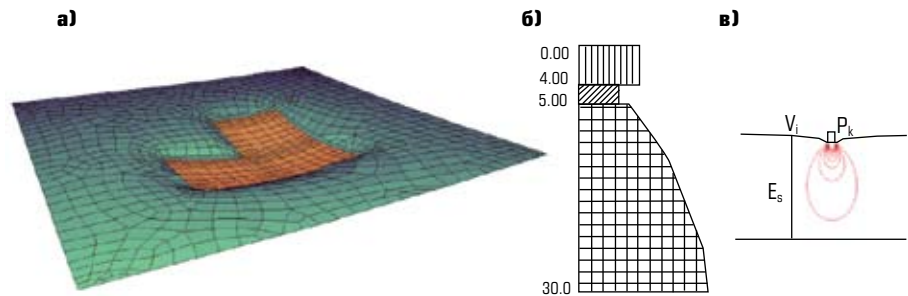
$$\sigma_{z,i} = \frac{3 P_k z^3}{2 \pi R^3} \quad (1)$$

где  $x, y,$  и  $z$  определяют координаты рассматриваемой точки внутри полупространства, отсчитываемые от точки приложения нагрузки на поверхности полупространства;  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ .

Данное распределение напряжений  $\sigma_z$ , делится на модуль упругости грунта  $E_s$  и интегрируется по глубине грунта для получения значений перемещений  $v_i$  в зависимости от силы  $P_k$ . Такой подход позволяет учитывать как работу всех слоев грунта, (рис. 2б), так и переменные свойства грунта в плане. Поскольку формула (1) справедлива для однородного полупространства, работа многослойного грунта на сдвиг не будет учтена корректно. Несмотря на это, полученные результаты являются вполне допустимыми и для многослойного грунта с изменяющимися по глубине и в плане свойствами.



**Рис. 1.** Разбиение конечно-элементной сетки для модели взаимодействия конструкция — грунт: Применение полупространства в сравнении с моделью из 3D Брик-элементов



**Рис. 2:** а — равномерно распределенная нагрузка на Г-образную плиту основания вызывает осадку на поверхности полупространства (зеленая область добавлена с целью визуализации всей картины); б — скважина в — распределение напряжений в полупространстве под действием сосредоточенной силы

Этот же метод может быть использован при вычислении осадок (или коэффициентов податливости  $\delta_{ik}$ ) от нагрузок, действующих внутри полупространства. Единственное различие лишь в формулах для вычислений напряжений:

$$\sigma_{z,i} = \frac{3 P_k}{8 \pi R^2 (1-\nu)} \left\{ (\zeta - \bar{\zeta})^3 + \frac{1}{\rho^3} [(3-4\nu)\zeta(\zeta + \bar{\zeta})^2 - \bar{\zeta}(\zeta + \bar{\zeta})(5\zeta - \bar{\zeta})] + \frac{10}{\rho^7} \zeta \bar{\zeta} (\zeta + \bar{\zeta})^3 - \frac{(1-2\nu)}{3} (\zeta - \bar{\zeta}) \left( \frac{1}{\rho^3} - 1 \right) \right\}$$

где  $\zeta = z/R, \bar{\zeta} = \bar{z}/R$  и  $\rho = \bar{R}/R$ . Значения  $\bar{z}, R$  и  $\bar{R}$  пояснены на рисунке 3б.

Когда матрица податливости сформирована, путем ее обращения можно быть получена матрица жесткости полупространства, объединяющая все узлы на границе системы конструкция — грунт (нижние узлы плиты основания) в общую матрицу жесткости.

**Линейный расчет методом конечных элементов**

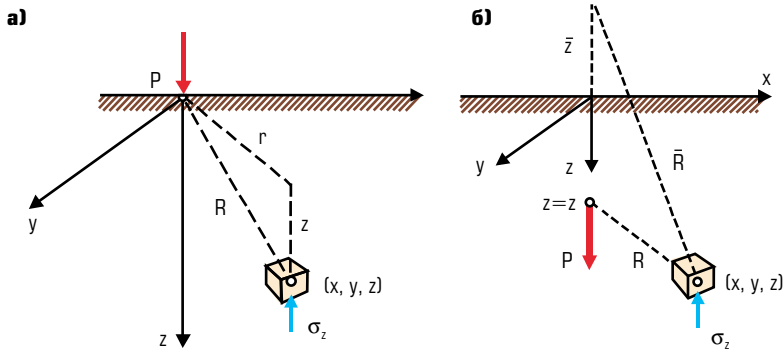
Вышеописанная матрица жесткости грунтового основания может быть использована в стандартном методе конечных элементов.

Далее представлен алгоритм полного линейного расчета:

1. Определение распределения свойств грунта в плане;
2. Вычисление матрицы податливости;
3. Обращение матрицы податливости и получение матрицы жесткости;
4. Статический расчет, учитывающий взаимодействие грунта и конструкции;
5. Определение напряжений в грунте (также для более детальной визуализации доступны плоские разрезы в грунте).

**Сваи в полупространстве**

Можно определить влияние нагрузок, действующих внутри полупространства, что делает возможным учет



**Рис. 3:** а — напряжения в вертикальном направлении  $\sigma_z$ , вызванные сосредоточенной нагрузкой  $P$ , действующей на поверхности полупространства; б — напряжения в вертикальном направлении  $\sigma_z$ , вызванные сосредоточенной нагрузкой  $P$ , действующей внутри полупространства на глубине  $z$

работы свай в полупространстве. Как показано на рис. 5, траектории напряжений от внутренних и внешних сил  $P_k$ , пересекаясь в полупространстве, ведут к сложному взаимодействию свай друг с другом и с фундаментальной плитой. Это называется комбинированным взаимодействием фундамента и свай. Рисунок 4б также показывает в областях концов свай критические точки в полупространстве.

**НЕЛИНЕЙНАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВА**

Решая общую задачу, учитывающую реальные внешние нагрузки на

фундаментную плиту, здание и полупространство, мы получим линейные перемещения силы и напряжения, которые при нелинейном анализе, если это необходимо, могут быть уточнены.

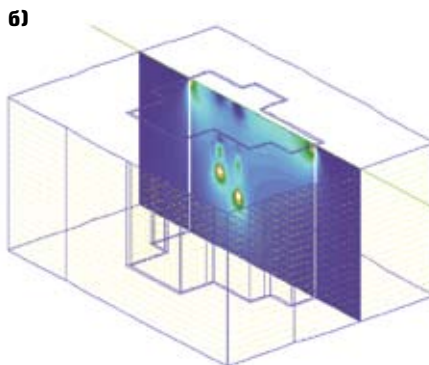
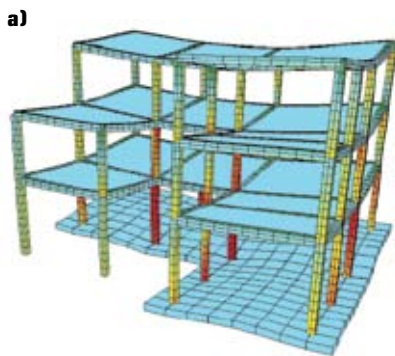
**Напряжение в грунте под фундаментной плитой**

Первый нелинейный эффект, который можно учесть, — понижение напряжений в грунте по краям фундаментной плиты, которые превышают заданные предельные значения. Линейный расчет фундаментной плиты под равномерно распределенной нагрузкой показывает концентрацию напряжений по краям (рис. 6).

**Итерационный метод для нелинейных остаточных усилий**

Итерационный метод для задач с полупространством отличается от обычных нелинейных итераций в методе конечных элементов, где результат нелинейного расчета может быть использован напрямую, например, при вычислении усилий для соответствующих перемещений.

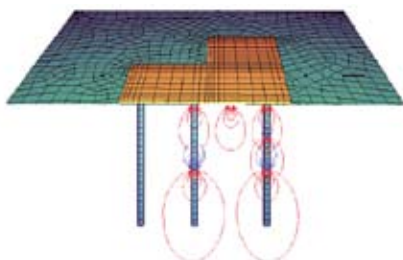
При расчете полупространства необходимо в конце каждой итерации гарантировать, чтобы перемещения в полупространстве соответствовали пониженным нелинейным контактным усилиям. Понижение или ограничение усилия в одном контактном узле приводит к изменениям во всех других узлах полупространства. Таким образом, для обеспечения правильной глобальной взаимосвязи между всеми контактными узлами, вектор пониженных контактных усилий умножается на матрицу податливости полупространства для получения вектора перемещений. Сравнивая данный вектор перемещений с текущими изменениями конечных элементов, мы можем вычислить поправочные усилия, исходя из разницы между векторами перемещений. После применения сходящегося итерационного алгоритма перемещения могут быть представлены графически (рис. 7). Представленный пример показывает пластическую осадку по краям фундаментной плиты.



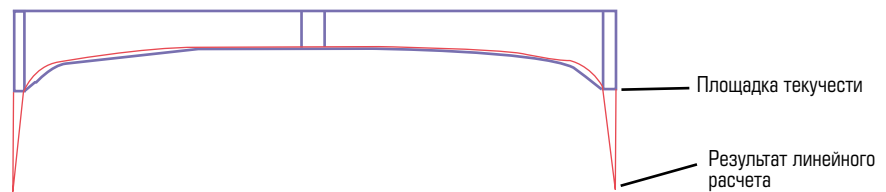
**Рис. 4:** а — деформации и напряжения в здании на полупространстве; б — возможная визуализация полупространства, разрез

**Предельное продольное усилие на конце сваи и предельное трение по боковой поверхности свай**

Продолжая действия подобными тем, что проводились при определении напряжений в грунте под фундаментной плитой, можно проверить, превышают ли контактные усилия на конце и вдоль тела свай (трение по боковой поверхности) предельные значения. Учет предельных значений этих реакций в сваях может привести к увеличению напряжений в грунтовом



**Рис. 5.** Совместная работа фундамента и свайного поля — суперпозиция траекторий напряжений в полупространстве



**Рис. 6.** Фундаментная плита под равномерно распределенной нагрузкой: красная линия — результат линейного расчета, голубая линия — результат нелинейного расчета с площадкой текучести

основании под фундаментной плитой. В примере на рис. 8, учет предельного поверхностного трения приводит к увеличению реакции на конце сваи.

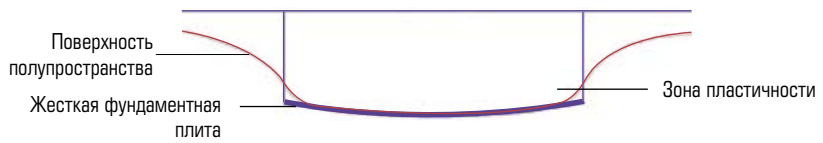
**Горизонтальные усилия в сваях**

Предполагая, что горизонтальная жесткость полупространства подобна вертикальной, можно учесть взаимное влияние горизонтальных усилий в полупространстве. Такой подход не является оптимальным, но он лучше, чем рассмотрение задачи о работе свай без учета их взаимного влияния друг на друга. Горизонтальные реакции свай могут быть ограничены и предельными значениями горизонтальных усилий в грунте. Тем самым становится возможным учет в нелинейном расчете взаимной работы наклонных свай (рис. 9 и 10).

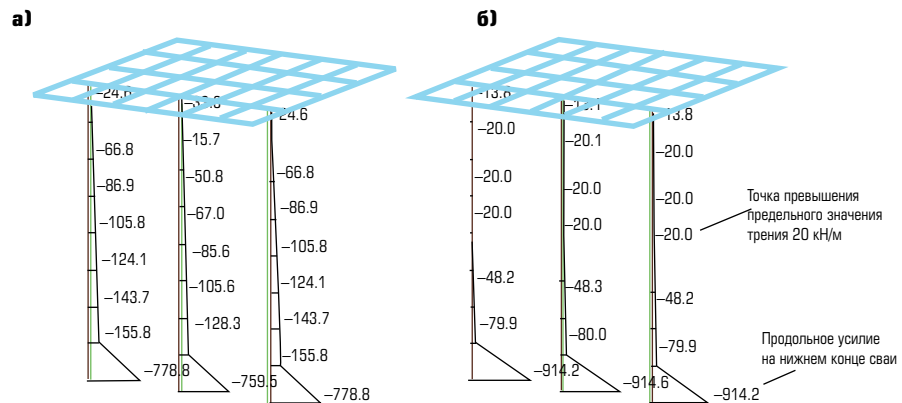
**ВЫВОДЫ**

При анализе работы системы сооружение-грунт, важно сконцентрировать внимание на разбиении конструкции на конечные элементы, а не разбивать грунт на большое количество объемных бриск-элементов.

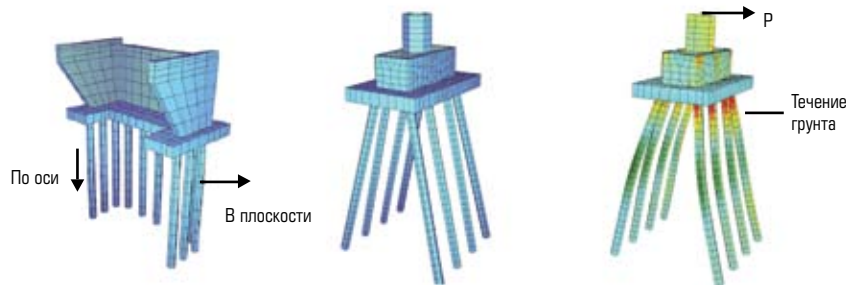
Возможно моделирование статического поведения грунта, которое использует для учета взаимной работы сооружения и основания, матрицы жесткости и податливости, полученные на основе теории полупространства. Возможен учет нелинейных эффектов при работе с полупространством, которые позволяют определить взаимовлияние вертикальных и горизонтальных напряжений в основании, а также передачу нагрузок через сваи на фундаментную плиту и обратно.



**Рис. 7:** голубая линия — контур фундаментной плиты, красная линия — теоретическая поверхность полупространства, разница — зона пластичности



**Рис. 8.** Реакции в сваях при линейном (а) и нелинейном (б) расчетах (максимальное трение, допустимое в верхней части свай 20 кН/м)

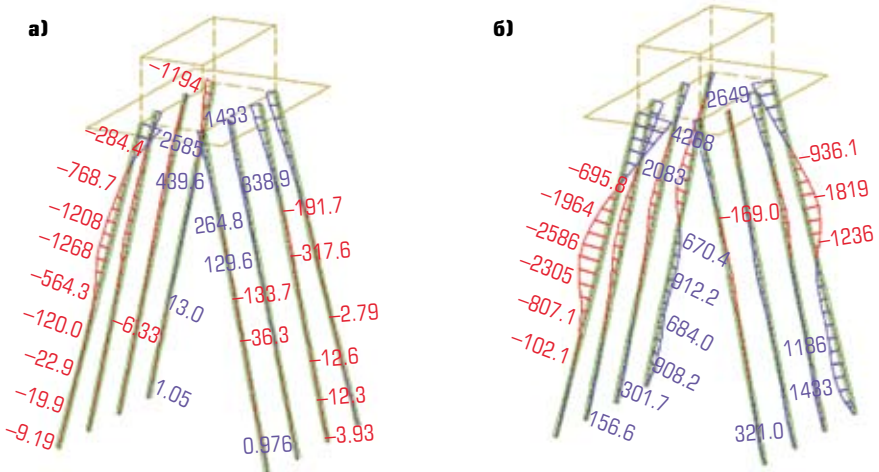


**Рис. 9.** Работа свай в полупространстве с учетом взаимного влияния друг на друга в горизонтальной плоскости

**Juergen Bellmann,**  
дипломированный инженер;  
**Bojan Radmanovic,**  
магистр  
Перевод на русский язык  
д.т.н., проф. В.В. Лалин



**ПСС («Петростройсистема»)**  
Санкт-Петербург,  
191040 СПб, Лиговский пр., 56 Г  
Тел.: +7 (812) 622-10-14  
E-mail: cad@pss.spb.ru  
www.sofistik.com  
www.pss.spb.ru  
www.sofistik.ru



**Рис. 10.** Увеличенные изгибающие моменты (а) при нелинейном расчете (б) в силу горизонтального течения грунта в верхней части свай