

# УЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ — ГРУНТ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SVFEM

**Журнал «ДОРОГИ. Инновации в строительстве» продолжает цикл публикаций о функциональных возможностях и преимуществах программного комплекса SOFiStiK для расчета и проектирования транспортных сооружений.**

## ВВЕДЕНИЕ

Эффект от учета взаимодействия грунта и сооружения проиллюстрирован на примере здания, изображенного на рис. 1 (с левой стороны). На указанное здание могут действовать различные динамические нагрузки. В частности, распространение сейсмических волн в грунтовом массиве вызывает колебания, интенсивность которых изменяется при наличии зданий и фундаментов. Это первая особенность взаимодействия сооружения и грунта. Сейсмический фронт, достигая фундамента, вызывает колебания сооружения. Вынужденные колебания здания передаются грунтовому массиву, который обычно рассматривается как бесконечное пространство, в виде волн, не возвращающихся обратно. Таким образом, энергия колебаний здания рассеивается, и в систему «сооружение-грунт» вводится демпфирование, называемое демпфированием излучения. Кроме того, материал грунта обладает собственными диссипативными качествами,

что также оказывает влияние на динамический отклик системы.

Таким образом, для описания динамического взаимодействия системы «сооружение-грунт» необходимо одновременно учитывать взаимное изменение динамических характеристик как сооружения, так и грунтового массива.

Другие типичные примеры взаимодействия сооружения и грунта, такие как колебания, вызванные движущимся транспортом, ветровые или ударные воздействия на здания, расположенные на слабых грунтах, также приведены на рис. 1. Динамические нагрузки при этом могут воздействовать непосредственно на сооружение (ветер, нагрузки от вращающихся механизмов, ударные воздействия), либо передаваться в систему через грунтовый массив (землетрясения, нагрузки от подвижного состава метрополитена).

Обычно динамическое взаимодействие сооружения и грунта рассматривается как фактор, оказывающий благоприятное влияние на динамиче-

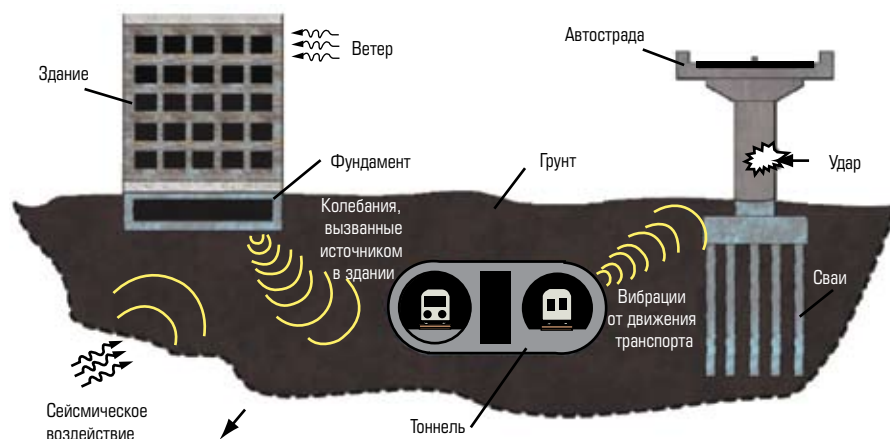
скую работу сооружения (более высокое демпфирование). Это приводит к неверному выводу о том, что этим феноменом можно пренебречь.

Прямо противоположен известный пример обрушения эстакады на магистрали Hanshin (Япония) при землетрясении в Кобэ. Ранее многие соглашались с тем, что обрушение 18 опор являлось следствием некачественного проектирования, в первую очередь — свободой поперечного перемещения опор. В работе [8] показано, что обрушение произошло бы, в том числе, и при строгом соблюдении всех современных требованиям к расчету и проектированию. Было показано, что основной причиной обрушения служило пренебрежение эффектом динамического взаимодействия сооружения и грунта. Благодаря этому, основной период собственных колебаний увеличился на 20% и попал в опасную зону, характеризующуюся значительными перемещениями грунта. Это привело к необходимости повышения несущей способности опор на 50%, по сравнению с решением, в котором опоры рассматривались как жестко закрепленные.

Анализ динамического поведения конструкции не отвечает общепринятому подходу с использованием коэффициентов. Истинная природа процесса динамического взаимодействия конструкций и грунта имеет комплексное происхождение и результаты такого расчета, находящиеся за пределами интуитивного представления, часто могут оказываться трудно предсказуемыми, даже для опытного расчетчика.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существуют два общих подхода к моделированию взаимодействия грунта и сооружения — прямой метод и метод подсистем. В первом случае, при использовании прямого метода, часть свободного грунтового массива включается в модель, обычно в виде конечных элементов (рис. 2(a)). Вол-



**Рис. 1. Пример динамической системы «сооружение-грунт»**

ны распространяются от конструкции в конечное грунтовое полупространство, и значительная часть энергии отнимается от конструкции. В прямом методе волны отражаются от искусственно введенных границ, возвращая энергию конструкции. Для предотвращения этого применяются граничные условия, имитирующие поглощение или дальнейшее распространение волн. Для уменьшения влияния граничных условий обычно приходится включать в модель значительный объем грунта, что, особенно для трехмерных задач, приводит к существенному увеличению количества степеней свободы для элементов грунта, по сравнению с их количеством для конструкции.

При втором подходе свободный (несвязанный) грунтовый массив и грунт в объеме фундамента (связанный) включаются в модель в виде двух подсистем, разделенных обобщенным интерфейсом взаимодействия. Связанная подсистема состоит из конструкции и участка грунтового массива с нерегулярными граничными условиями, способными проявлять нелинейные свойства (далее — конструкция). Несвязанная подсистема состоит из остальной части грунтового массива, растянутой до бесконечных размеров, и предполагается линейной (далее — грунт).

Связь двух подсистем обеспечивается за счет сил взаимодействия  $r_b(t)$ , действующих в противоположных направлениях на конструкцию и грунт (рис. 2(б)). Связь между силами взаимодействия и ускорениями грунта может быть выражена интегралом свертки:

$$r_b(t) = \int_0^t M_b^{\infty}(t-\tau) u(t-\tau) d\tau,$$

где  $M_b^{\infty}$  обозначает матрицу отклика ускорений. Индекс  $b$  означает узлы, принадлежащие интерфейсу взаимодействия грунта и конструкции.

Для решения задачи взаимодействия грунта и конструкции методом подсистем во временной области матрица отклика  $M_b^{\infty}$  должна быть положительно определенной.

### SBFEM МЕТОД

Метод SBFEM является методом подсистем и впервые разработан Wolf и Song [12]. Он сочетает лучшие характеристики метода конечных элементов и метода граничных элементов [13]. При отсутствии не-

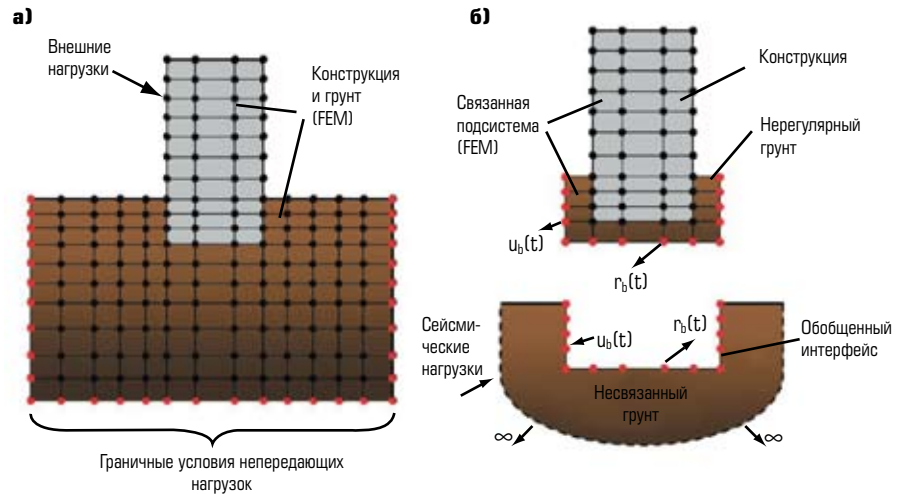


Рис. 2. Прямой метод (а) и метод подсистем (б)

обходимости анализа грунтового массива основания граница сооружения разбивается с использованием стандартных одномерных или двумерных конечных элементов, приводя к сокращению размерности модели на один порядок, при этом условие рассеивания полностью удовлетворяется. Для радиальных направлений используются точные уравнения движения, в поперечном направлении используется приближение конечными элементами.

SBFEM метод предоставляет полное решение в пространстве и времени, реакция отдельной точки в модели связана с реакциями всех остальных точек модели (в пространстве) на предшествующем рассматриваемому временном интервале (во времени). Это подразумевает, что матрица ускорений полностью заполнена и интеграл свертки должен быть рассчитан для каждого отдельного шага времени.

Грунт может учитываться в модели как неоднородная среда, с модулем упругости и плотностью, пропорциональными степенной функции координат [1][2][3]. Таким образом, естественный процесс уплотнения грунта может быть смоделирован без дополнительных трудозатрат (рис. 3).

Для увеличения производительности SBFEM метода при выполнении расчетов на временном интервале были разработаны и реализованы два важных улучшения.

Первое связано с алгоритмом расчета матрицы отклика  $M_b^{\infty}$ . Оригинальная схема разбиения [2][3][12][13] предполагала постоянное изменение

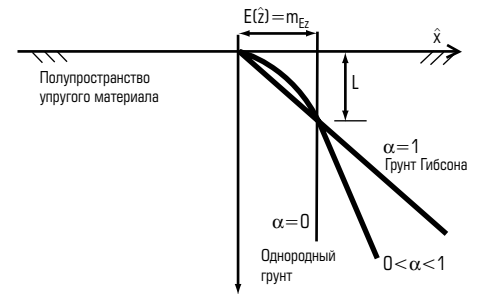


Рис. 3. Изменение модуля упругости как функции степени глубины [1][2][3]

$M_b^{\infty}$  на каждом временном шаге и дала стабильное решение только при определенных условиях. Достаточно малый размер временного шага приводил к значительным затратам времени на расчет. Новая схема разбиения для решения уравнений метода SBFEM предполагает, что матрица ускорений изменяется линейно на каждом малом временном интервале, для обеспечения сходимости был введен дополнительный экстраполирующий параметр. Данное решение похоже на предложенное Zhang [15], Lehmann [4][5] и Yan [14]. Совместно с новой схемой разбиения это приводит к быстрому, точному и надежному решению.

Второе улучшение касается расчета вектора усилий взаимодействия сооружения и основания  $r_b(t)$ . Разработана новая высокоэффективная схема интегрирования для расчета интеграла свертки, основанная на интегрировании по частям, предоставляющая высокую степень локализации во времени и обеспечивающая надежный контроль ошибок.

Комбинация этих нововведений привела к значительному сокраще-

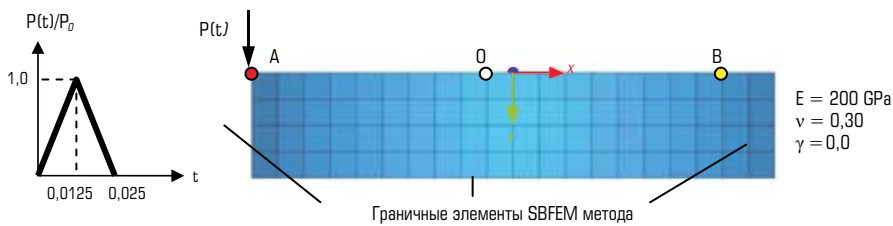


Рис. 4. Метод подсистем с SBFEM элементами на границе взаимодействия сооружения и грунтового массива.

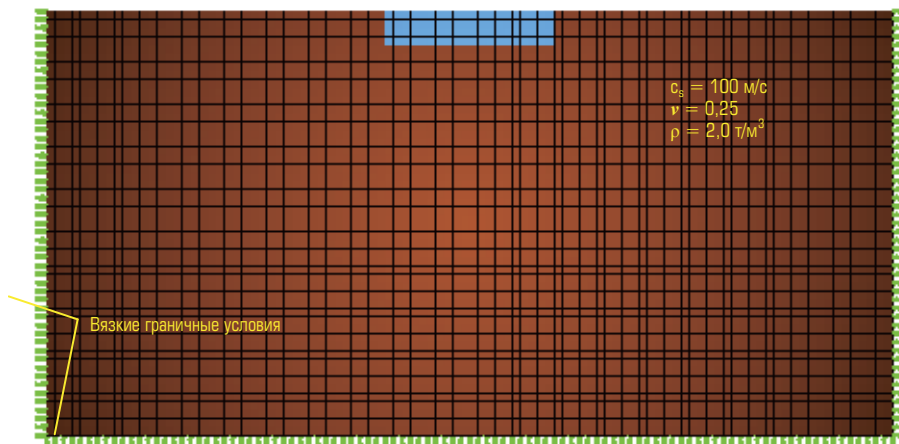


Рис. 5. Прямой метод расчета с вязкими границами (размер 5 x B).

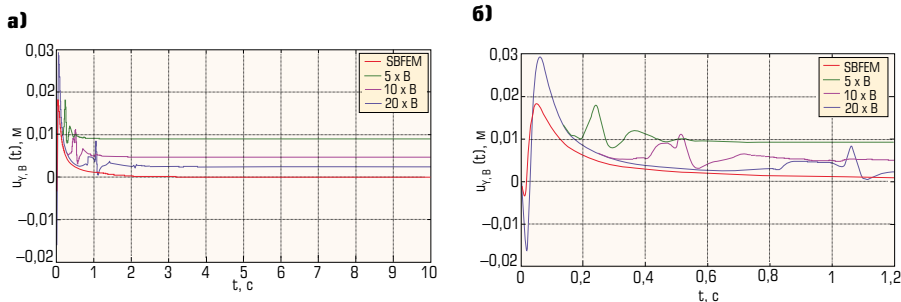


Рис. 6. Перемещения точки В на всем промежутке времени (а) и на начальном этапе (б)

нию затрат вычислительных ресурсов и линейной зависимости времени расчета от числа шагов, что позволило проводить расчет с большим количеством итераций. Примеры, рассчитанные авторами, не показали нестабильности решения для широкого диапазона параметров. Таким образом, указанный метод становится вполне приемлемым для широкого круга задач.

### ПРИМЕР 1

В примере выполнено сравнение результатов классического подхода к моделированию взаимодействия сооружения и грунтового массива с использованием граничных условий вязко-упругой среды [6][7][10][11] и расчета методом SBFEM.

Модель фундамента анализируется исходя из предположений о её плоско-деформированном состоянии. Поперечное сечение полосы фундамента —  $2B \times H = 5,0 \times 1,0$  м. Упругие свойства фундамента приведены на рис. 4, грунтового основания — на рис. 5. Грунт рассматривается как однородная среда. Масса фундамента не учитывается. Фундамент разбит на прямоугольные КЭ размером  $0,25 \times 0,25$  м. Для решения SBFEM методом (рис. 4) на границе контакта фундамента с грунтом вводятся особые граничные элементы. Точка центра масштабирования O совпадает с началом глобальной системы координат. Для решения прямым методом вязко-упругие границы располагаются на удалении  $5 \times B, 10 \times B, 20 \times B$  от начала системы координат (рис. 5).

Коэффициенты демпфирования для вязко-упругих элементов назначаются исходя из выражения:

$$c_n = A \cdot \rho \cdot c_p; c_t = A \cdot \rho \cdot c_s$$

где  $c_n$  и  $c_t$  — константы демпфирования в нормальном и касательном направлениях к границе,  $c_p$  и  $c_s$  — скорость распространения волн дилатации и сдвига в грунте.

Нагрузка в виде треугольного импульса приложена в точке A ( $P_0 = 105$  кН). Вертикальное перемещение точки B записывается на временном интервале  $4000 \times \Delta t$ , где  $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-3}$  с. Для решения SBFEM методом перед линеаризацией системы рассчитываются 100 матриц отклика ускорений с шагом  $5 \times \Delta t$ .

Как можно видеть на рис. 6, решение с вязко-упругими границами зависит от расстояния между этими границами и фундаментом. Решение с вязкими границами является точным при расчете распространения волн, когда волна приходит со стороны границы под углом  $90^\circ$  (одномерное решение). В реальных задачах такое не наблюдается никогда, в модели всегда будет присутствовать отражение волн на границе, как и волны на поверхности. Для более удаленных границ угол прихода волны будет ближе к  $90^\circ$  и большая часть энергии будет рассеиваться. Это видно на рис. 6(б), где в момент времени 0,2 с, 0,4 с и 0,8 с образуется волна, отраженная от границы в точке наблюдения В (при удалении границ на расстояния  $5 \times B, 10 \times B$  и  $20 \times B$  соответственно). По прошествии некоторого периода времени отраженная волна теряет энергию и полностью поглощается границами. В дополнение к этому, решение с использованием вязких границ всегда содержит некоторое постоянное перемещение (рис. 6(а)) [11].

Решение методом SBFEM является, с точки зрения КЭ-анализа, точным, что достигается увеличением количества элементов на границе. Как видно на рис. 6, отражения волн не происходит. Полное время расчета SBFEM методом составляет 18 секунд, что значительно меньше по сравнению с 129, 625 и 3807 секундами, затраченными на решение прямым методом (для моделей размерности  $5 \times B, 10 \times B$  и  $20 \times B$ ).

Рассеивание энергии системы за счет грунтового основания значительно. Возникает лишь несколько колебаний — в начале точка В осуществляет движение вверх (из-за приложения

нагрузки с эксцентриситетом и неучета отлипания фундамента от грунта происходит поворот фундамента). По прошествии некоторого времени фундамент начинает двигаться вниз.

**ПРИМЕР 2**

Этот пример плоской задачи (плоско-деформированное состояние) расчета транспортного тоннеля демонстрирует распространение волн в более сложной среде. Описание примера можно найти в Lehmann [5].

Геометрия и свойства материалов модели показаны на рис. 7. Ближняя область модели задана 4-х узловыми КЭ, а удаленная — 2-х узловыми линейными масштабируемыми граничными элементами SBFEM метода.

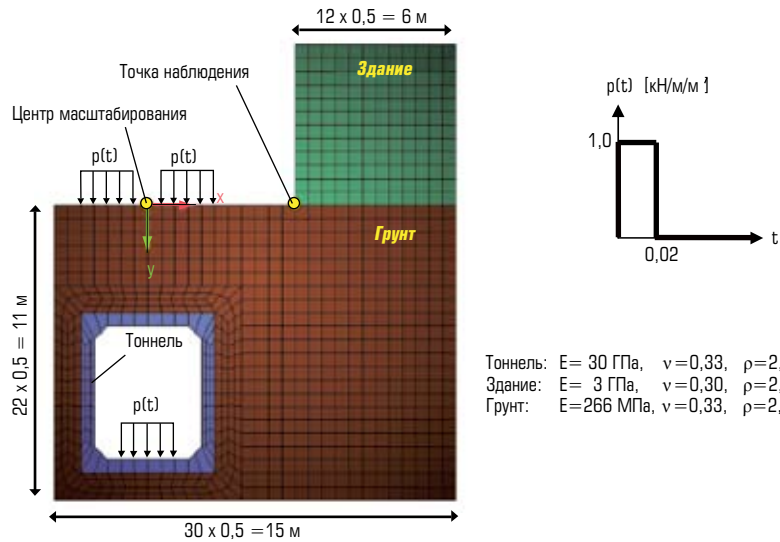
Рассчитана реакция системы на действие импульса (рис. 7). Вертикальное перемещение заданной точки определено на интервале  $6000 \times \Delta t$ , где  $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-4}$  с. До линеаризации системы рассчитаны 40 матриц отклика ускорений с шагом  $40 \times \Delta t$ .

Результаты расчета отображены на рис. 8. Прохождение волны до точки измерений занимает некоторое время (рис. 8б). Скорость распространения волн сдвига (S) и дилатации (P) — 224 м/с и 386 м/с, при кратчайшем расстоянии до точки наблюдения - 3 м. На прохождение этого расстояния уходит 0,013 и 0,008 с соответственно. После 4-5 периодов колебания затухают (рис. 8б).

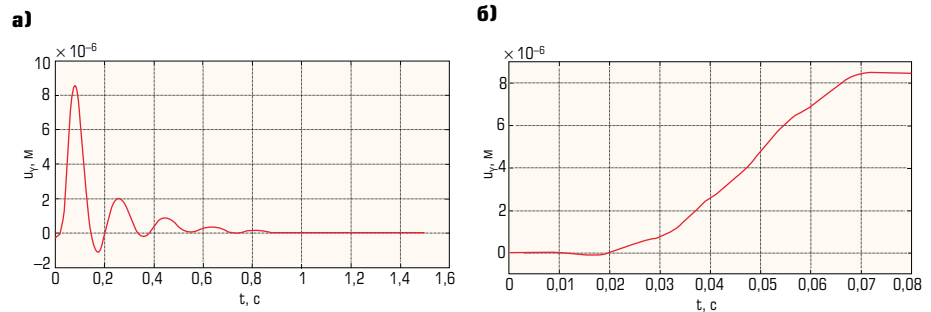
**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Реализация SBFEM метода в модуле DYNA (12.70) программного комплекса SOFiSTiK включает ряд важных модификаций, повышающих эффективность метода в разы. Таким образом, появляются новые расширенные возможности моделирования взаимодействия сооружений и грунта.

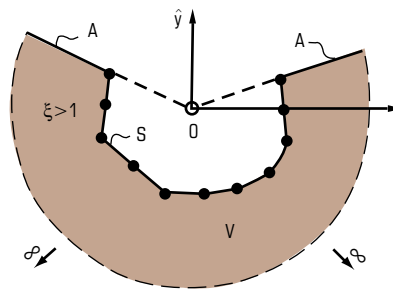
Пользователь указывает на группу линий (в 2D задачах) или элементов поверхности (в 3D) в качестве интерфейса «сооружение-грунт» (GRP nп SOIL). Предполагается, что грунтовый массив располагается вне границ, в положительном направлении оси z четырехугольных элементов. За точку масштабирования принимается самая высокая точка расчетной схемы, в плане совпадающая с центром тяжести модели, но при необходимости её положение может быть задано узлом NSCP. Особые свойства материалов



**Рис. 7. Модель взаимодействия транспортного потока с конструкцией тоннеля**



**Рис. 8. Вертикальные перемещения (а), в том числе, на начальной стадии (б)**



**Рис. 9. Точка масштабирования и граничные условия.**

радиальное распространение волн от точки масштабирования, описание многослойного грунтового массива невозможно. Поэтому в общем случае предполагается использование КЭ модели для описания местных эффектов, с небольшим количеством конечных элементов, и применение SBFEM метода в качестве граничных условий для заданного региона.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. J.R. Booker, N.P. Balam, and E.H. Davis. The behavior of an elastic nonhomogeneous half-space. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 9:353-381, 1985.
2. M.H. Bazyar and C. Song. Time-harmonic response of non-homogeneous elastic unbounded domains using the scaled boundary finite-element method. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35:357-383, 2006.
3. M.H. Bazyar and C. Song. Transient analysis of wave propagation in non-homogeneous elastic unbounded domains by using the scaled boundary-

finite element method. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35:1787-1806, 2006.

4. *L. Lehmann*. An effective finite element approach for soil-structure analysis in the time domain. Structural Engineering and Mechanics, Vol 21, No 4, 2005.

5. *L. Lehmann*. Wave Propagation in Infinite Domains: With Applications to Structure Interaction. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.

6. *J. Lysmer and R.L. Kuhlemayer*. Finite dynamic model for infinite media. Journal of the Engineering Mechanics Division, 95:859-877, 1969.

7. *J. Lysmer and G. Waas*. Shear waves in plane infinite structures. Journal of the Engineering Mechanics Division, 98:85-105, 1972.

8. *G. Mylonakis, C. Syngros, G. Gazetas and T. Tazo*. The role of soil in the collapse of 18 piers of Hanshin Expressway in the Kobe earthquake. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35:547-575, 2006.

9. *B. Radmanovic*. Evaluation of Dynamic Soil-Structure Interaction

in Frequency and Time Domain. MSc Thesis. Technical University of Munich, 2009.

10. *J.P. Wolf*. Dynamic Soil-Structure-Interaction Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1985.

11. *J.P. Wolf*. Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.

12. *J.P. Wolf and C. Song*. Finite-Element Modelling of Unbounded Media. John Wiley and Sons, Chichester, England, 1996.

13. *J.P. Wolf*. The Scaled Boundary Finite Element Method. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2003.

14. *J. Yan, C. Zhang, and F. Jin*. A coupling procedure of FE and SBFE for soil-structure interaction in the time domain. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 59:1453-1471, 2004.

15. *X. Zhang, J.L. Wegner, and J.B. Haddow*. Three-dimensional dynamic soil-structure interaction analysis in the time domain. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28:1501-1524, 1999.

16. *B. Radmanovic, C. Katz*. High Performance SBFEM, WCCM Sydney, 2010

17. *J.A. Studer, J.Laue, M.G.Koller*. Bodendynamik, Springer, Berlin, 2007

**MSc. Bojan Radmanovic,  
Prof. Dr.-Ing. Casimir Katz,  
SOFiSTiK AG**

**Перевод на русский язык –  
Д.А. Ярошутин, эксперт ПК  
SOFiSTiK, ст. преподаватель кафе-  
дры «Мосты и тоннели»  
АДФ СПбГАСУ**



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