

УДК 624.042.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ПК ЛИРА САПР

ГОРОДЕЦКИЙ А.С. ^{1*} *д.т.н., проф.*,
ПИКУЛЬ А.В. ^{2*}
ПИСАРЕВСКИЙ Б.Ю. ^{3*}

^{1*} Академик Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ООО «ЛИРА САПР», ООО «ЛИРА САПР», Кияновский пер., 7а, Киев, 04053, Украина, тел./факс: +38 (044) 590 58 85, тел.: +38 (050) 351 96 61, e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru, http://orcid.org/0000-0002-1070-7654.

^{2*} Инженер-аналитик ООО "ЛИРА САПР", ассистент кафедры металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский проспект, 31, Киев, 03037. ООО «ЛИРА САПР», Кияновский пер., 7а, Киев, 04053; Украина, инженер-программист компании «ЛИРА-САПР», тел: +38 (097) 217-68-79, e-mail: Anatol.Pikul@gmail.com, www.liraland.ua, http://orcid.org/0000-0002-1516-8266

^{3*} Инженер-программист компании «ЛИРА-САПР», ООО «ЛИРА САПР», Кияновский пер., 7а, Киев, 04053, Украина, тел./факс: +38 (044) 590 58 85, e-mail: mikst1234@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-1001-2879.

Аннотация. В статье рассматривается проблема анализа динамического взаимодействия «сооружение – грунт», а также моделирование безграничного грунтового полупространства. Описана методика новых конечных элементов, разработанных в ПК ЛИРА-САПР, моделирующих взаимодействие ограниченной части грунтового массива и остальной части полупространства. В основе данного элемента лежит метод масштабирования границы конечного элемента. Для верификации элементов решены две задачи. В первой задаче рассматривается ограниченный грунтовый массив с введением разработанных конечных элементов. Во второй задаче рассматриваются достаточно большой грунтовый массив, размеры которого обеспечивают отсутствие влияния граничных условий на прохождение волны (условно можно считать бесконечным полупространством). Разница в результатах составила 3 – 8%.

Ключевые слова: анализ динамического взаимодействия «сооружение – грунт», распространение волн в безграничной области, безграничная область, метод масштабирования границы конечного элемента.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГРУНТОВИХ МАСИВІВ НА ДИНАМІЧНІ ВПЛИВИ В ПК ЛІРА САПР

ГОРОДЕЦЬКИЙ О.С. ^{1*} *д. т. н., проф.*,
ПІКУЛЬ А.В. ^{2*}
ПИСАРЕВСЬКИЙ Б.Ю. ^{3*}

^{1*} Академік Російської академії архітектури та будівельних наук, доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи ТОВ «ЛІРА САПР», ТОВ «ЛІРА САПР», Киянівський пров., 7а, Київ, 04053, Україна, тел./факс: +38 (044) 590 58 85, тел.: +38 (050) 351 96 61, e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru, http://orcid.org/0000-0002-1070-7654.

^{2*} Інженер - аналітик компанії «ЛІРА-САПР», асистент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій, Київський національний університет будівництва та архітектури, Воздухофлотський проспект, 31, Київ, 03037, ТОВ «ЛІРА САПР», Киянівський пров., 7а, Київ, 04053, Україна, тел: +38 (097) 217-68-79, e-mail: Anatol.Pikul@gmail.com, www.liraland.ua, http://orcid.org/0000-0002-1516-8266.

^{3*} Інженер-програміст компанії «ЛІРА-САПР», ТОВ «ЛІРА САПР», Киянівський пров., 7а, Київ, 04053, Україна, тел./факс: +38 (044) 590 58 85, e-mail: mikst1234@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-1001-2879.

Анотація. У статті розглядається проблема аналізу динамічної взаємодії «споруда – грунт», а також моделювання необмеженого грунтового напівпростору. Описано методику нових скінченних елементів, розроблених в ПК ЛІРА-САПР, що моделюють взаємодію обмеженої частини грунтового масиву та решти напівпростору. Даний елемент базується на методі масштабування границі скінченного елемента. Для верифікації елементів розв'язано дві задачі. В першій задачі розглядається обмежений грунтовий масив з введенням розроблених скінченних елементів. В другій задачі розглядається достатньо великий грунтовий масив, розміри котрого забезпечують відсутність впливу граничних умов на проходження хвилі (умовно можна вважати нескінченним напівпростором). Розрахунок в обох задачах виконується на динамічний вплив – гармонічні вимушені коливання з обмеженим часом дії. Використовувався процесор ПК ЛІРА-САПР – «Динаміка в часі», що реалізує методи прямого інтегрування та дозволяє моделювати роботу конструкції на динамічні впливи в часі. Різниця в результатах складала 3 – 8%.

Ключові слова: аналіз динамічного впливу «споруда – ґрунт», розповсюдження хвиль в необмеженій області, необмежена область, метод масштабування границі скінченного елемента

MODELLING OF SOIL BEHAVIOUR IN DYNAMIC LOAD IN THE LIRA SAPR SOFTWARE

Gorodetsky A.S.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

Pikul A.V.^{2*}

Pysarevskiy B.Y.^{3*}

^{1*} Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor, Deputy Director for Science of "LIRA SAPR» Ltd, 7a, Kiyanovsky side street (pereulok), Kiev, 04053, Ukraine, phone: +38 (050) 351 96 61, e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru, http://orcid.org/0000-0002-1070-7654.

^{2*} Engineer-Analyst of "LIRA SAPR» Ltd, assistant of Department of Metal and Wood Structures at Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine, phone:+38(097)217-68-79 e-mail: Anatol.Pikul@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-1516-8266.

^{3*} Software engineer LIRA SAPR, Kiev, 04053, Ukraine, 7a Kiyanovsky side street(pereulok),phone/fax: +38 (044) 590 58 85, e-mail: mikst1234@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-1001-2879.

Abstract. The paper focuses on simulation of dynamic 'structure-soil' interaction and unbounded soil half-space. Principles for new finite elements developed in LIRA-SAPR software are described. These finite elements simulate the interaction between bounded domain of soil and the rest part of the half-space. The scaled boundary finite-element method governs these elements. To verify the elements, two problems are solved. The first problem considers the bounded soil where the developed boundary finite elements are introduced. The second problem considers the soil of a relatively large size. Boundary conditions do not influence the wave propagation (conditionally may be treated as unbounded half-space) due to dimensions of soil size. Results differ by 3-8%.

Key words: dynamic interaction 'structure-soil', wave propagation in unbounded area, unbounded area, scaled boundary finite-element method

Введение. Практически все инженерные сооружения расположены на грунтовом основании. Расчет системы «надземное сооружение – фундаментные конструкции – грунтовое основание» становится нормой. Здесь можно выделить два класса задач со слабовыраженным размежеванием.

К первому классу можно отнести задачи, когда инженера интересует только НДС надземной конструкции. В этом случае влияние грунтового массива, как правило, моделируется введение в расчетную схему коэффициентов постели.

Ко второму классу относятся задачи, где инженера в одинаковой мере интересует как НДС собственно конструкции, так и НДС грунтового массива. Этот класс задач очень широк, разнообразен и относится к числу наиболее сложных для расчета. В компьютерных моделях задач этого класса присутствует конечно-элементная модель грунтового массива. По сути, грунтовый массив – это полупространство.

Основная часть. Численное решение задач на основе МКЭ предусматривает рассмотрение ограниченной конечной области, то всегда возникает вопрос, как ограничить бесконечное полупространство грунтового-массива. Если снизу на обозримом расстоянии имеется слой грунта, имеющий модель деформации (например, скала), значительно превышающий модуль вышележащих слоев, то вопрос об ограничении грунтового массива

снизу решается сам собой. В противном случае, а также для ограничения грунтового массива с боковых сторон можно воспользоваться рекомендациям СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» об определении величины сжимаемой толщи.

Здесь можно поступить следующим образом: определить по СП максимальную величину сжимаемой толщи H_{max} и назначить границы грунтового массива так, чтобы минимальное расстояние от любой точки границы до ближайшего узла рассчитываемой конструкции было не меньше H_{max} сжимаемой толщи. Тип граничных условий в узлах конечно-элементной модели грунтового массива на его границе при статической нагрузке может быть принят в виде податливых связей [1, 2].

В случае динамических воздействий тип граничных условий должен обеспечивать гашение или прохождение волн. Идеи по построению таких условий рассматривались в [3, 4, 5, 6].

Метод SBFEM был предложен Джоном Вульфом [6]. В основе данного метода лежит переход от декартовой системы координат X, Y (в плоской задаче) к изопериметрическим координатам ξ, η (рис.1). Геометрия области описывается масштабированием границы безразмерной радиальной координатой ξ , которая начинается из центра масштабирования (точки O) до точки на границе. $\xi = 0$ в точке O и $\xi = 1$ на границе.

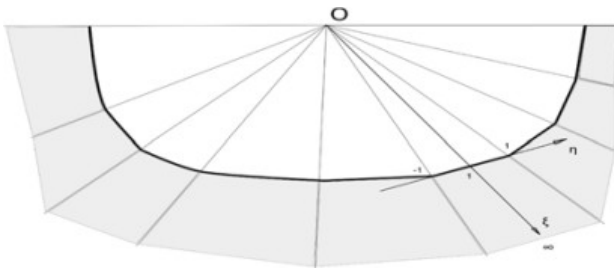


Рис. 1. Изопараметрические координаты ξ, η .
Isoparametric coordinates ξ, η .

Вдоль радиальной линии, проведенной от точки O к узлу на границе, вводится функция узловых перемещений и записывается уравнение перемещений.

$$[E^0]\xi^2\{u(\xi)\}_{,\xi\xi} + ([E^0] - [E^1] + [E^1]^T)\xi\{u(\xi)\}_{,\xi} - [E^2]\{u(\xi)\} + \omega^2[M^0]\xi^2\{u(\xi)\} = 0, \quad (1)$$

где $[E^0], [E^1], [E^2]$ и $[M^0]$ матрицы коэффициентов.

Существуют два основных метода динамического анализа взаимодействия грунта и конструкции. Прямой метод – самый простой способ для анализа. Что бы учесть бесконечность с достаточной точностью, неограниченную область отсекают достаточно далеко от сооружения и накладывают приближенные граничные условия. Это приводит к увеличению количества степеней свободы, особенно в трехмерной задаче. Метод подсистем (рис. 2) является более точным по сравнению с прямым методом, поэтому моделируемая область может быть меньше, чем для прямого метода. В данном методе, как правило, точные граничные условия выражаются в матрице динамической жесткости $[S(t)^\infty]$.

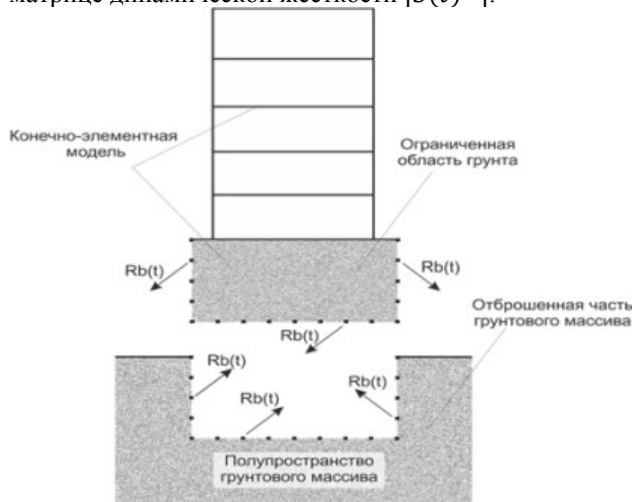


Рис. 2. Взаимодействие отброшенной и ограниченной части грунтового массива / Interaction of discarded and limited part of soil body.

Соединение между двумя частями грунтового массива обеспечивается вектором взаимодействия

$$\{R_b(t)\} = \int_0^t [M^\infty(\tau)]\{\dot{u}(t - \tau)\}d\tau, \quad (2)$$

где $[M^\infty(\tau)]$ - матрица отклика ускорений, которая определяется как

$$\int_0^t [m^\infty(\tau - t)][m^\infty(\tau)]d\tau + t \int_0^t [m^\infty(\tau)]d\tau + [e^1] \int_0^t \int_0^\tau [m^\infty(\tau)]dtd\tau + \quad (3)$$

$$+ [e^1]^T \int_0^t \int_0^\tau [m^\infty(\tau)]dtd\tau - \frac{t^3}{6} [e^2]H(t) - t[m^0]H(t) = 0,$$

где $[m^\infty(\tau)]$ матрица отклика ускорений в преобразованных координатах, $[e^1], [e^2]$ и $[m^0]$ матрицы коэффициентов, $H(t)$ - функция Хевисайда.

Результаты исследований. На основании зависимостей (2, 3) в ПК ЛИРА-САПР реализованы элементы, моделирующие взаимодействие ограниченной части грунтового массива и остальной части полупространства: двух узловой для решения плоской задачи, трех- и четырехузловой для решения пространственных задач. Для верификации такого элемента рассмотрим две задачи (рис. 3). В первой (рис. 3а) задаче рассматривается ограниченный грунтовой массив с введением на границе разработанных граничных конечных элементов. Во второй задаче (рис. 3б) рассмотрим достаточно большой грунтовой массив, размеры которого обеспечивают отсутствие влияния граничных условий на прохождение волны (условно можно считать бесконечным полупространством). Расчет выполнялся по программному комплексу ЛИРА-САПР в процессоре «Динамика во времени», который позволяет моделировать процесс динамического воздействия во времени. В обеих задачах расчет производился на одинаковое динамическое воздействие $P(t) = P_0 \sin(\omega t) = 1.975 \sin(20t)$ – вынужденное гармоническое колебание, время действия 1 секунда.

На рис. 4 и 5 показаны графики перемещений во времени узла А.

Из графиков видно, что перемещение узла А в период воздействия возмущающей нагрузки практически совпадают.

Также сравним результаты перемещении узлов, лежащих на оси X на глубине 1 метр и времени 0,75 секунды, а также на глубине 8 метров и времени 1,5 секунды. Графики начинаются относительно оси симметрии

Сравнивая графики перемещений видим, что они практически совпадают. Разница в результатах составила 3 - 8%. Особенно хорошее совпадение наблюдается в наиболее нагруженных зонах – близлежащие зоны к месту приложения динамического воздействия (рис. 6, 7, 8, 9) в первые моменты действия динамического воздействия – 1,5 секунды.

Выводы. Разработанные граничные конечные элементы позволяют моделировать полупространство грунтового массива на основе расчетных схем ограниченной размерности

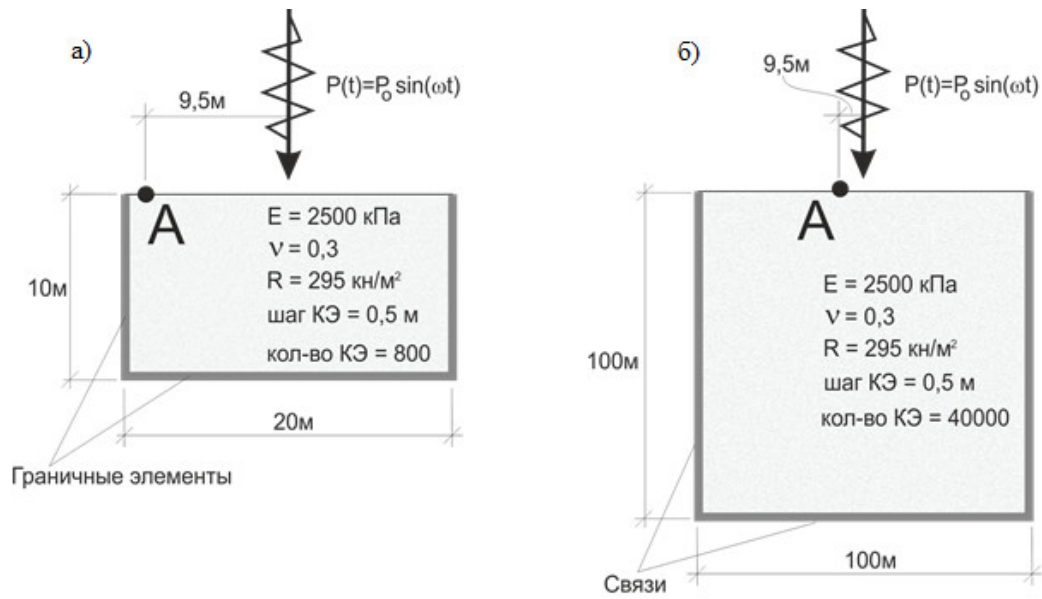


Рис. 3. Верификация разработанного граничного элемента (а) ограниченная часть грунтового массива (б) достаточно большой массив грунта /
 Verification of developed limited element (a) limited part of soil (b) fairly large soil body.

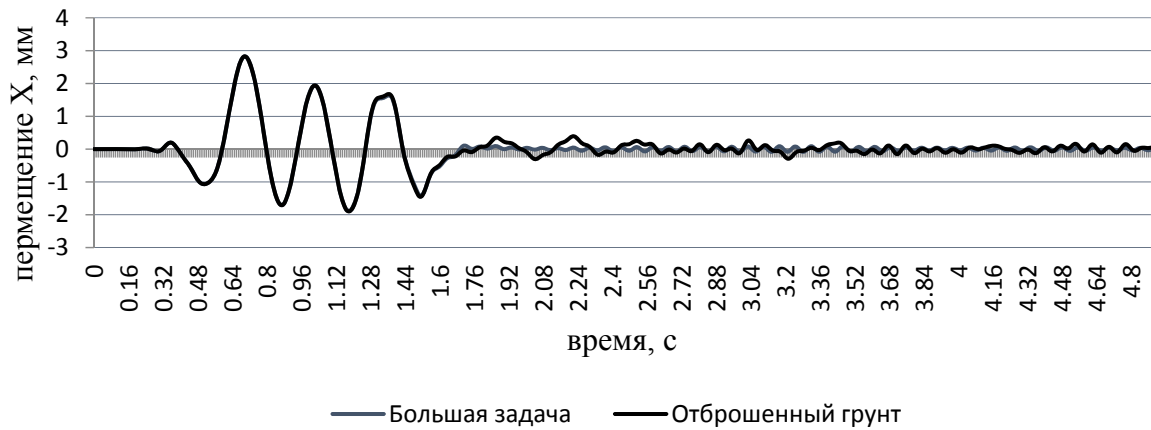


Рис. 4. График перемещений X(t) в узле А / Diagram of displacements X(t) at node A.



Рис. 5. График перемещений Z(t) в узле А. / Diagram of displacements Z(t) at node A.

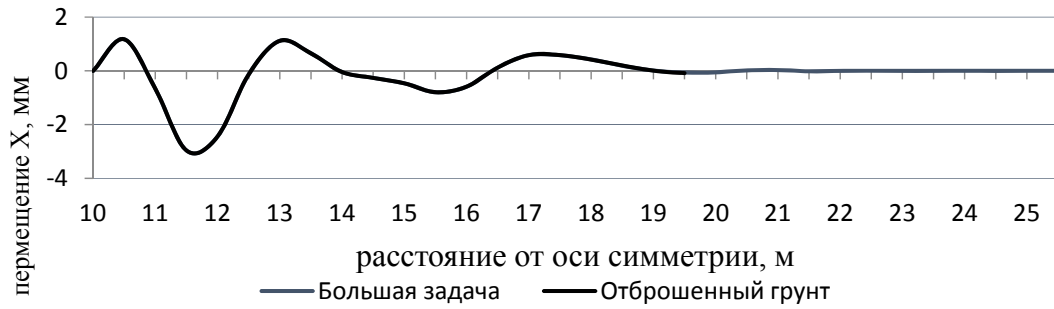


Рис. 6. График перемещений X на глубине 1 метр в момент времени 0,75с /
Diagram of displacements X at the depth of 1m at time moment 0,75s.

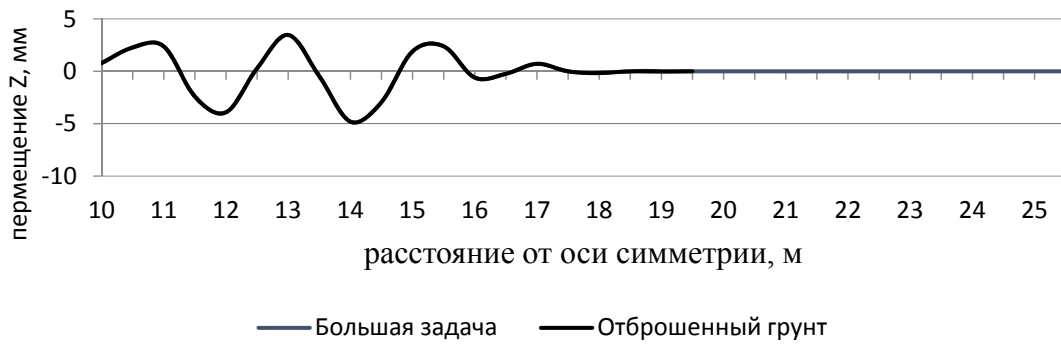


Рис. 7. График перемещений Z на глубине 1 метр в момент времени 0,75с /
Diagram of displacements Z at the depth of 1m at time moment 0,75s

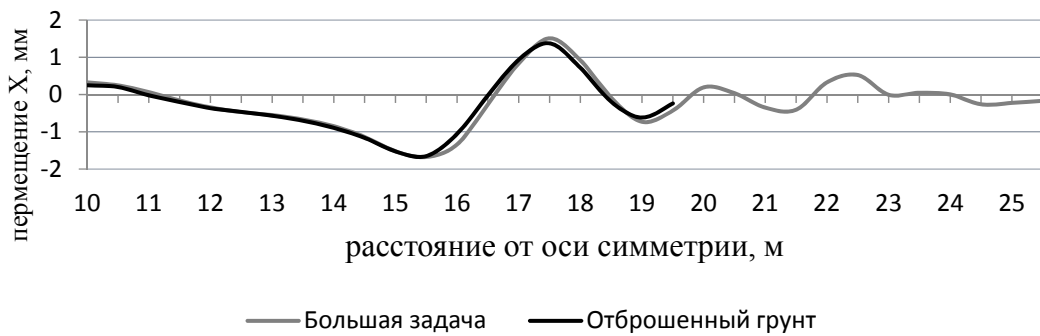


Рис. 8. График перемещений X на глубине 8 метров в момент времени 1,5с /
Diagram of displacements X at the depth of 8m at time moment 1,5s.



Рисунок 9. График перемещений Z на глубине 8 метров в момент времени 1,5с.
Figure 9. Diagram of displacements Z at the depth of 8m at time moment 1,5s.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сливкер В. И. К вопросу о назначении характеристик двухпараметрового упругого основания // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981.- № 1. – С. 75-87.
2. Здоренко В. С., Городецкий А. С., Елсукова В. И., Сливкер В. И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций на упругом основании с двумя коэффициентами постели // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Вып. 27. – Киев: Будівельник, 1975. – С. 180-192.
3. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – Санкт –Петербург: Наука, 1998. – 255с.
4. Пікуль А.В., Барабаш М.С. Проблеми моделювання динамічних впливів. Реалізація в ПК ЛІРА-САПР // Збірка тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю з дня народження професора В.К. Єгупова “Проблеми теорії і практики сейсмостійкого будівництва” - Одеса: ОДАБА, 2016. – 124 с.
5. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов /Пер. с англ. А.С. Алексева и др.; Под ред. А.Ф.Смирнова. - М.: Стройиздат, 1982 — 448с.
6. John P. Wolf. The Scaled Boundary Finite Element Method. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2003 — 364 p.

REFERENCES

1. Slivker V.I. K voprosu or naznachenii charakteristik dvuhparametrovogo uprugogo osnovaniya [About characteristics of two-parameter elastic foundation]. Building mechanics and analysis of structures. – 1981.- No. 1. – p. 75-87.
2. Zdorenko V.S., Gorodetsky A.S., Elskova V.I., Slivker V.I. Primenenie metoda konechnykh elementov k raschetu konstruksiy na uprugom osnovanii s dvumya koeffitsientami posteli [Finite element method for analysis of structures on elastic foundation with two subgrade moduli]. Strength of materials and theory of structures. – Issue 27. – Kyiv: Budivelnik, 1975. – p. 180-192.
3. Birbrayer A.N. Raschet konstruksiy na seismostojkost [Earthquake analysis of structures]. – Saint-Petersburg: Nauka, 1998. – 255p.
4. Pikul A.V., Barabash M.S. Problemy modelyuvannya dynamichnykh vplyviv. Realizatsiya v PK LIRA-SAPR [Modelling of dynamic loads. Realization in LIRA-SAPR program]. Collection of paper abstracts from the international scientific and technical conference devoted to the 90th anniversary of the birth of prof. Yehupov V.K. ‘Earthquake engineering in theory and practice’ - Odesa: ODABA, 2016. – 124 p.
5. Bate K., Wilson E. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov [Numerical methods for analysis and FEM]. Transl. from English by Alekseeva A.S., etc.; Edited by Smirnov A.F. - M.: Strojizdat, 1982 — 448p.
6. John P. Wolf. The Scaled Boundary Finite Element Method. John Wiley and Sons, Chichester, England, 2003 — 364 p.

Стаття надійшла до редколегії 21.08.2017