

УДК 624.131.524

Д.А. Рогожин

ООО «Южный Проектный Институт», Ростов-на-Дону, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ВЕРХНИХ ОЦЕНОК НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ**

Для оценки численных экспериментов по определению несущей способности основания предлагается использовать верхнюю и нижнюю оценку несущей способности. Для нахождения верхней оценки предложен эволюционный алгоритм, отличающийся от уже существующих использованием ЛПТ-последовательностей для достижения наилучшей равномерности при генерации новых вариантов. Приведен пример оценки результатов численного эксперимента с помощью предлагаемого метода.

Ключевые слова: несущая способность основания, метод конечных элементов, предельный анализ, эволюционные вычисления, оценка несущей способности.

D.A. Rogozhin

South Design Institute, Rostov-on-Don, Russian Federation

**APPLICATION EVOLUTIONARY CALCULATION TO FIND UPPER
BOUNDS BEARING CAPACITY OF BASIS**

To estimate the numerical experiments to determine the bearing capacity of foundation is proposed to use the upper and lower bound bearing capacity. To find the top rated proposed evolutionary algorithm, which differs from existing ones using LPt sequences to achieve the best uniformity in the generation of new variants. The article gives an example of evaluation results of numerical experiments using the proposed method.

Keywords: bearing capacity of the foundation, finite element method, marginal analysis, evolutionary computation, evaluation of bearing capacity.

Современные программные комплексы в большинстве своем реализуют два подхода к расчету оснований: с применением контактных моделей (коэффициенты постели) и программные пакеты, использующие МКЭ. Контактные модели позволяют, в некотором приближении, определить осадку здания и окружающего грунта, но не могут быть использованы для определения несущей способности основания.

Программные пакеты на основе МКЭ позволяют проводить два типа расчетов – в линейной и нелинейной постановке. Наибольший

интерес представляет расчет в физически нелинейной постановке, при нагрузках, превышающих предельное сопротивление грунта, при этом предельная нагрузка определяется по обрушению вычислительных процессов (рис. 1) либо по началу вертикального участка графика «нагрузка – осадка» (рис. 2). При некоторых характеристиках грунта определение предельной нагрузки по графику представляется затруднительным (рис. 3). Данные графики получены с использованием модели Кулона–Мора, реализованной в программном комплексе Plaxis.

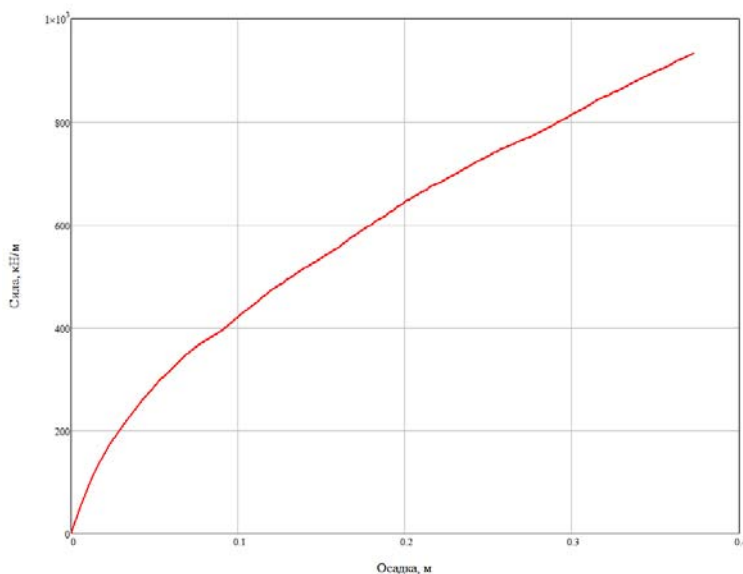


Рис. 1. График «нагрузка – осадка» грунта при $\varphi = 30^\circ$, $c = 10$ кПа

Возможность определения несущей способности основания с помощью МКЭ, а также переход решения МКЭ в решение Прандтля являются весьма актуальными вопросами вследствие широкого распространения этого метода для решения инженерных задач.

Предельный анализ пластических систем [1] является естественным и органичным методом расчета оснований и фундаментов по несущей способности. Предельный анализ не ставит перед собой сложную задачу изучения напряженно-деформированного состояния пластической системы при возрастании нагрузок вплоть до предельной. Такая задача может оказаться неразрешимой. Одна из основных причин заключается в практической невозможности создания модели грунтовой среды, описывающей поведение грунта при сложном на-

гружении, когда уже нельзя принять гипотезу о постоянной соосности тензоров напряжений и деформаций. Проблематичной является и численная реализация подобных моделей при нагрузках, возрастающих до предельной нагрузки.

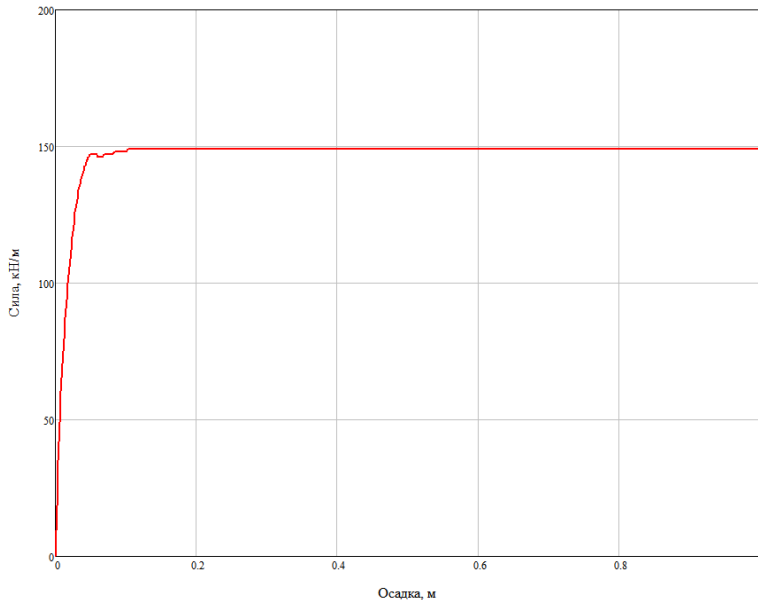


Рис. 2. График «нагрузка – осадка» грунта при $\varphi = 20^\circ$, $c = 0$ кПа

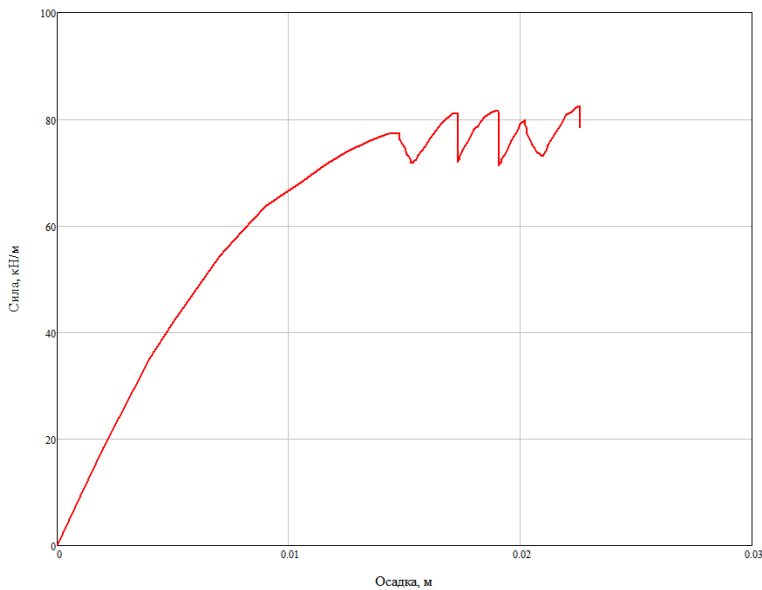


Рис. 3. График «нагрузка – осадка» грунта при $\varphi = 20^\circ$, $c = 1$ кПа

Предельный анализ оперирует следующими множествами: а) множеством статически допустимых полей напряжений во всей системе «основание – фундамент», т.е. полей напряжений, удовлетворяющих уравнениям равновесия и условию неположительной функции текучести; б) множеством кинематически допустимых полей скорости, не противоречащих ассоциированному (нормальному) закону текучести. При этом каждому статически допустимому полю напряжений соответствует нижняя оценка, а каждое кинематически допустимое поле скоростей порождает верхнюю оценку скоростей [2].

Для получения наилучшей верхней оценки необходимо минимизировать функцию $N(l, l_1, h)$, где l, l_1, h – размеры блоков ассоциативного течения (рис. 4). В работе [2] показан метод минимизации функции с помощью пробных точек в ЛПт-последовательности. Однако метод требует предварительного ограничения области поиска параметров. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритма нахождения сколь угодно узкого коридора допустимых значений несущей способности основания, область поиска которого изменяется в процессе вычислений.

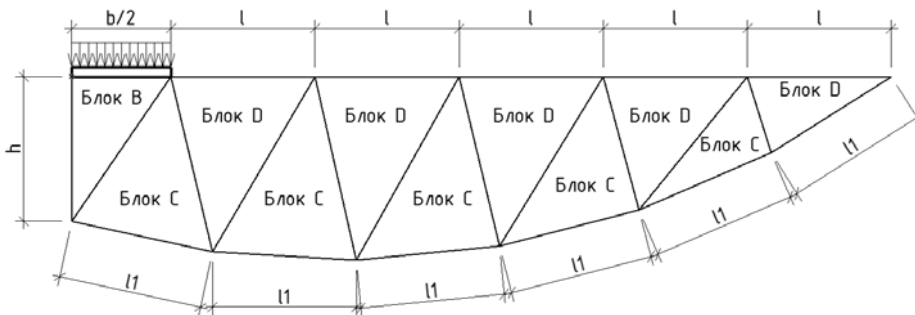


Рис. 4. Область пластического течения, разделенная на блоки простейшего течения

Эволюционные вычисления позволяют отказаться от предварительного ограничения параметров. Для реализации метода оценки численных экспериментов по определению несущей способности основания с использованием нижней оценки, полученной вычислением несущей способности по действующим нормативным документам и верхним оценкам, полученным на основе эволюционных вычислений, была написана программа ЭВОНС (Эволюционные вычисления оценки

несущей способности, готовится к регистрации) на языке Python. Основные шаги алгоритма, реализованного в программе:

1. Формирование популяции – массива из n пробных точек. Каждая точка (особь) представляет собой уникальное, в пределах популяции, сочетание параметров. В данной статье в качестве параметров использованы стороны блоков $B, C, D - l, l_1, h$ соответственно.

При вычислении новых вариантов использовались ЛПт последовательности [4], имеющие наилучшую равномерность (рис. 5).

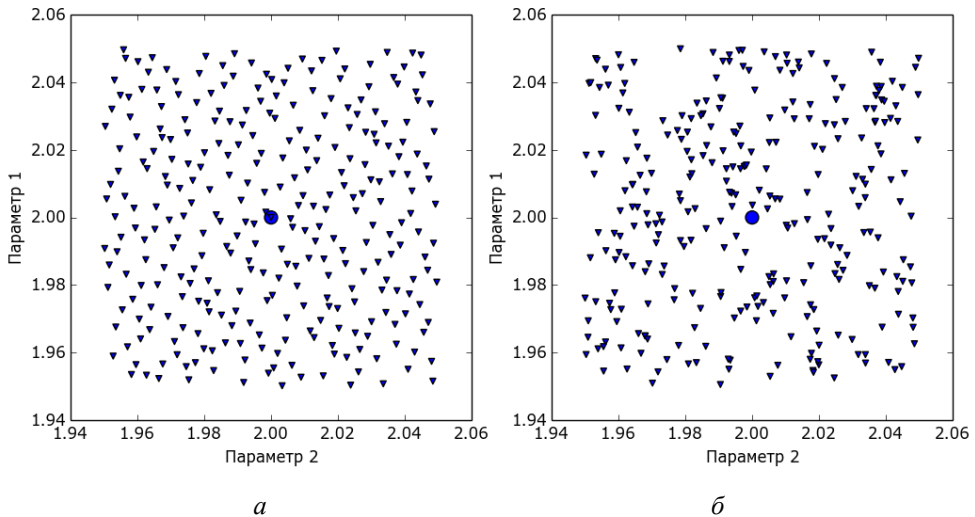


Рис. 5. Значения параметров, полученные: a – с помощью ЛПт- последовательности; b – с помощью равномерного случайного непрерывного распределения (uniform), реализованного в библиотеке Numpy

2. Вычисление верхних оценок несущей способности F для каждой особи в популяции и запись значений в общий массив. Алгоритм нахождения верхних оценок описан в [2] и реализован в программном комплексе ПРЕСС, разработанном на кафедре «Промышленное, гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» ЮРГПУ (НПИ). В данный алгоритм внесены некоторые усовершенствования: введено ограничение количества блоков, увеличено количество подбираемых параметров (стороны блоков C, D могут изменяться).

3. Вычисление приспособленности P для каждой особи в популяции по формуле

$$P_i = \frac{1}{s + F_i}, \text{ где } s = \sum_{i=1}^n \frac{1}{F_i}.$$

При этом максимальному значению приспособленности соответствует наименьшая оценка несущей способности. Для физически невозможных вариантов, вариантов с отрицательными значениями параметров, а также вариантов с повторяющимися значениями параметров значение приспособленности приравнивается к нулю. Значения приспособленности записываются в общий массив.

4. Сортировка массива по значению приспособленности. Наиболее приспособленные особи располагаются в начале массива.

5. Скрещивание особей. Родители выбираются путем сдвига массива на произвольное число позиций, подбираемое опытным путем. Слишком малые значения сдвига приводят к преждевременной сходимости алгоритма. Для данной задачи использовался сдвиг на четыре позиции, пары формировались следующим образом:

Особь 1	Особь 2	...	Особь $n - 4$	Особь $n - 3$...	Особь n
Особь 5	Особь 6	...	Особь n	Особь 1	...	Особь 4

Значение каждого параметра особи вычисляется по формуле

$$m_{\text{нов}} = m_{\text{род1}} + k_{\text{разб}} \cdot m_{\text{род2}},$$

где $k_{\text{разб}}$ – коэффициент «разброса», $m_{\text{род1}}, m_{\text{род2}}$ – значения параметров у родителей.

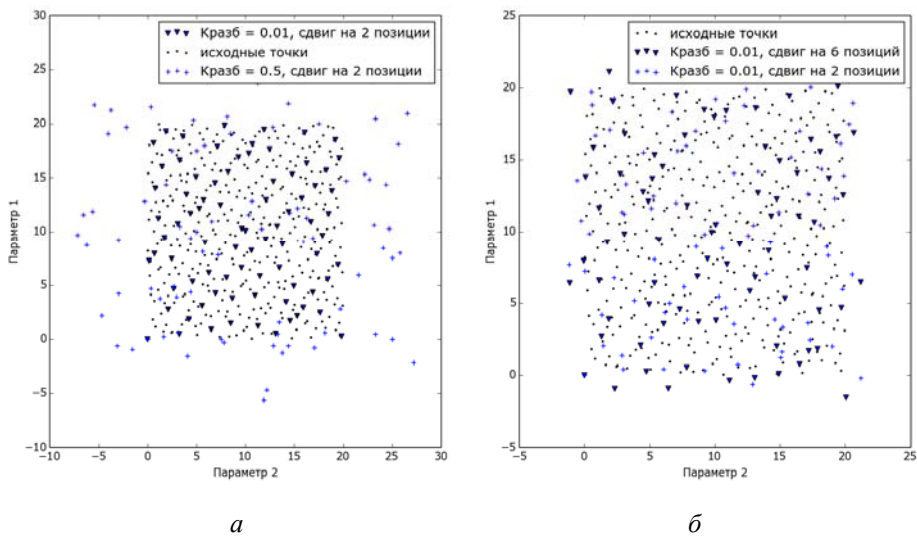


Рис. 6. Влияние на значения новых параметров: *а* – коэффициента разброса $k_{\text{разб}}$; *б* – величины сдвига

Коэффициент разброса влияет на сходимость алгоритма и либо выбирается случайным образом из интервала $[-1, 2]$, согласно рекомендациям [5], либо высчитывается на основе процентного соотношения «успешных» особей к общей численности популяции. В таком случае алгоритм носит самоадаптирующийся характер.

6. Формирование новой популяции. В новую популяцию входят:

– $N_{\text{элит}}$ особей из начала массива, с наилучшей приспособленностью;

– $N_{\text{скрещ}}$ особей, полученных скрещиванием.

– $N_{\text{мут}}$ новых особей, находящихся в области $K_{\text{мут}}$ вокруг исходных элитных особей. Генерация новых особей производится с помощью ЛПт-последовательностей.

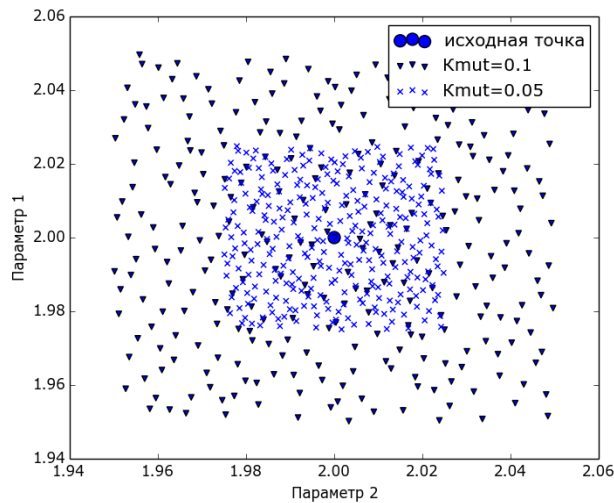


Рис. 7. Влияние параметра $K_{\text{мут}}$ на размер области

7. Изменение параметров алгоритма $k_{\text{разб}}$, $N_{\text{элит}}$, $k_{\text{скрещ}}$, $N_{\text{мут}}$ в зависимости от числа особей в популяции с положительным значением приспособленности.

8. Переход к пункту 2.

В качестве критерия останова цикла принято условие $F_m^{\text{max}} < 0,01F_{m-1}^{\text{max}}$.

Стоит отметить, что данный алгоритм является улучшенным вариантом алгоритмов, представленных в [4–6]. Основные улучшения:

– использование ЛПт-последовательностей для формирования новых вариантов;

– изменения $k_{разб}$, $N_{элит}$, $k_{скрещ}$, $N_{мут}$ в процессе вычисления (адаптивность).

Пример расчета верхних оценок с помощью программы ЭВОНС

Исходные данные:

- ширина штампа $b = 2$ м;
- угол внутреннего трения $\varphi = 34^\circ$;
- сцепление $c = 1$ кПа;
- удельный вес грунта $\gamma = 17,5$ кН/м³;
- глубина заложения $d = 1$ м.

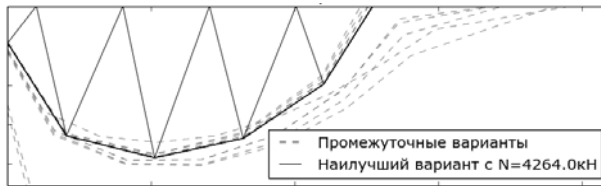


Рис. 8. Поля скоростей

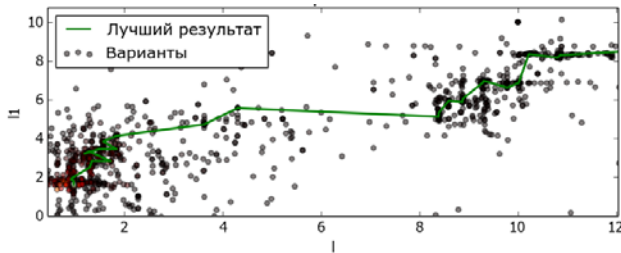


Рис. 9. Расположение особей

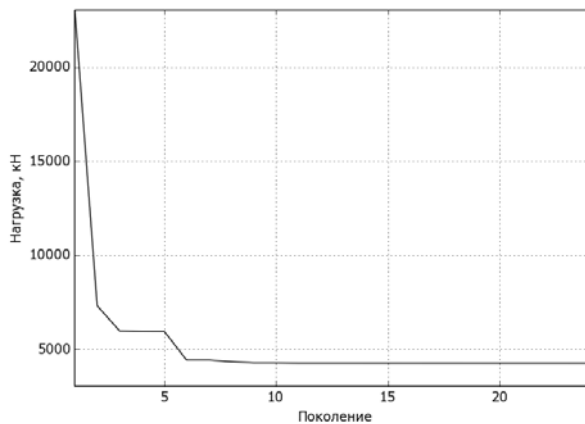


Рис. 10. Изменение наилучшей оценки несущей способности в ходе расчета

Несущая способность по Прандтлю $N_{\text{Прандтль}} = 1115$ кН.

Несущая способность по СП $N_{\text{СП}} = 4050$ кН.

Значение верхней оценки на 27 поколении $N_{\text{ВО}} = 4264$ кН.

Полученный коридор допустимых значений несущей способности можно использовать для контроля численных экспериментов в МКЭ программах [3]. На рис. 11 представлены графики «нагрузка – осадка», полученные с использованием модели Кулона–Мора, реализованной в программном комплексе Plaxis.

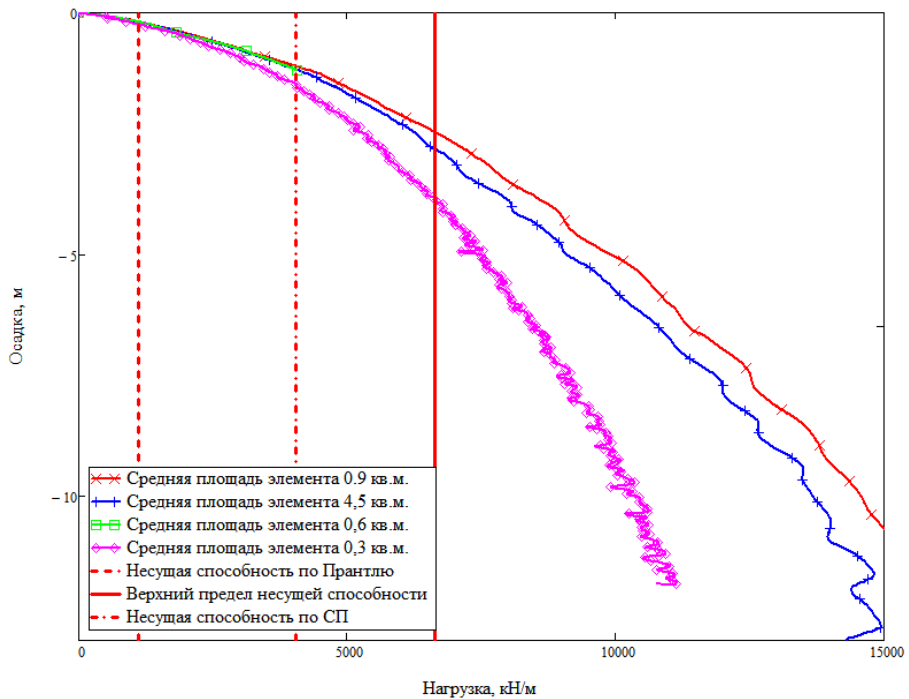


Рис. 11. Графики «нагрузка – осадка» и коридор допустимых значений

Нагрузка была задана в виде штампа, с помощью инструмента «заданные перемещения» (prescribed displacement).

Ширина штампа $b = 2$ м.

Угол внутреннего трения $\varphi = 41^\circ$.

Сцепление $c = 1$ кПа.

Удельный вес грунта $\gamma = 18$ кН/м³.

Размеры конечных элементов $S = 0,3; 0,6; 0,9; 4,5$ м².

В коридор допустимых значений попадает график «нагрузка – осадка» для эксперимента со средней площадью элемента 0,3 м².

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Эволюционные вычисления позволяют существенно упростить процесс нахождения верхних оценок несущей способности основания.

2. ЛПт-последовательность за счет наилучшей равномерности больше подходит для генерации новых вариантов при эволюционных вычислениях, чем используемое обычно равномерное случайное непрерывное распределение (uniform).

3. Необходимо отметить, что на данный момент определение несущей способности системы «основание – фундамент», где фундамент разрушается вместе с основанием, не реализовано ни в одной программе. В программе Plaxis для бетона реализована только упругая модель.

4. Актуальной является задача построения коридора допустимых значений несущей способности основания. Данный коридор можно использовать как для верификации новых моделей грунта, так и для подбора параметров уже существующих моделей и оценки результатов численных экспериментов.

Библиографический список

1. Гвоздев А.А. Определение величины разрушающей нагрузки для систем, претерпевающих пластические деформации // Тр. конф. по пластическим деформациям. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. – С. 19–30.

2. Дыба В.П. Оценки несущей способности фундаментов: монография. – 2-е изд., доп. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т; Новочеркас. гос. мец. акад. – Новочеркасск, 2008. – 219 с.

3. Дыба В.П., Скибин Г.М. Верхние оценки несущей способности ленточных фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1997. – № 6. – С. 2–6.

4. Соболев И.М., Статников Р.Б. ЛПт-поиск и задачи оптимального конструирования. – В кн.: Проблемы случайного поиска. – Рига: Зинатне, 1972. – № 1. – С. 117–135.

5. Рогожкин Д.А. Метод оценки численных экспериментов при околопределельных нагрузках // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы всерос. науч.-техн. конф., (Новочеркасск, 7–8 июня 2012 г.) / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, 2012. – С. 83–87.

6. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces / Technical Report TR-95-012. – ICSI, March 1995.

7. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. – 1997.

8. Price K., Storn R., Lampinen J. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. – Springer, 2005.

9. Validation & Verification. Несущая способность ленточного фундамента. – URL: <http://www.plaxis.ru/files/files/3-1.%20Несущая%20способность%20ленточного%20фундамента.pdf>

Reference

1. Gvozdev A.A. Opredelenie velichiny razrushayushhej nagruzki dlya sistem, preterpevayushhix plasticheskie deformacii// Trudy konferencii po plasticheskim deformacijam.- M.:L.: Izd-vo AN SSSR, 1938. S. 19-30

2. Dyba V.P. Ocenki nesushhej sposobnosti fundamentov: monografiya / Yuzh.-Ros. gos. texn. un-t., Novoch. gos. melior. akad. – 2-e izd., dop. – Novocherkassk: 2008. – 219 s.

3. Dyba V.P., Skibin G.M. Verhnie ocenki nesushhej sposobnosti lentochnyh fundamentov. Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov. 1997. - №6. – S. 2-6.

4. Sobol' I.M., Statnikov R.B. LP τ -poisk i zadachi optimal'nogo konstruirovaniya. – V kn.: Problemy sluchajnogo poiska. Riga: Zinatne, 1972. №1. S 117-135.

5. Rogozhin D.A. Metod ocenki chislennyx e'ksperimentov pri okolo-predel'nyx nagruzkax. / Mexanika gruntov v geotexnike i fundamentostroenii: materialy vserosijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii, g. Novocherkassk 7-8 iyunya 2012g. / Yuzh.-Ros. gos. texn. un-t (NPI). – Novocherkassk: YuRGU(NPI), 2012. – S. 83-87

6. Storn, Rainer and Price, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces / Technical Report TR-95-012. – ICSI, March 1995.

7. Storn, Rainer and Price, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. (1997)

8. K. Price, R. Storn, J. Lampinen. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer, 2005.

9. Validation & Verification. Несущая способность ленточного фундамента. <http://www.plaxis.ru/files/files/3-1.%20Несущая%20способность%20ленточного%20фундамента.pdf>

Об авторе

Рогожин Дмитрий Александрович (Новочеркасск, Россия) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова, инженер 1-й категории ООО «Южный проектный институт»; e-mail: kuvbur@gmail.com.

About the author

Rogozhin Dmitrii Aleksandrovich (Novocherkassk, Russian Federation) – Doctoral Student, South-Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov; Engineer 1st category, LLC “South Design Institute”.

Получено 25.03.2014