

doi: 10.5862/MCE.61.2

Оптимизация системы стальной плоской рамы и столбчатых фундаментов

Optimization of flat steel frame and foundation posts system

*Д-р техн. наук, зав. каф. И.Н. Серпик,
канд. техн. наук, доцент А.В. Алексейцев,
Брянский государственный инженерно-
технологический университет, г. Брянск,
Россия*

*I.N. Serpik,
A.V. Alekseytsev,
Bryansk State University of Engineering and
Technology, Bryansk, Russia*

Ключевые слова: стальные рамы; столбчатые фундаменты; естественное основание; оптимизация; генетические алгоритмы; параметры проектирования; прочность; устойчивость

Key words: steel frames; foundation posts; natural foundation bed; optimization; genetic algorithms; design parameters; strength, stability

Аннотация. Разработка эффективных проектных решений для многих строительных объектов требует учета несущей способности и стоимости изготовления надстройки и фундамента как единой системы. В статье предложен алгоритм комплексного оптимального проектирования стальной плоской рамы каркаса здания и столбчатых фундаментов под ее колонны на естественном основании. Ставится задача минимизации стоимости материалов основных изменяемых частей конструкции. Поиск осуществляется с использованием генетического алгоритма на дискретных множествах типоразмеров поперечных сечений стержней рамы, размеров в плане подошв фундаментов и опорных стальных плит, высот фундаментов и вылетов их ступеней, классов бетона и арматуры, диаметров и шагов установки продольных арматурных стержней. Для рамы используется стержневая расчетная схема. Принимается во внимание влияние продольных сил в стержнях на их изгибные деформации. Учитываются вертикальные и угловые податливости грунтового основания. Приводится пример оптимизации трехпролетной стальной рамы и столбчатых фундаментов здания при строительстве в условиях г. Брянска.

Abstract. The development of effective design solutions for many construction projects requires taking into account the bearing capacity and the cost of manufacturing the superstructure and the foundation as a single system. We suggested an algorithm of complex optimal design of a steel flat frame for the building frame, and foundation posts under its columns on the natural foundation. It is proposed to minimize the cost of materials of basic variable parts of the structure. The search is carried out using a genetic algorithm on the discrete sets of standard sizes of cross-sections of frame rods, sizes in terms of foundation bases and base steel plates, foundations heights and overhangs of their jumps, concrete and reinforcement grades, diameters and installation steps of longitudinal reinforcement bars. The rod design scheme is used for the frame. The influence of normal forces in bars on their bending strains is taken into account. Vertical and angular compliances of ground base are taken into consideration. The example of optimizing a three-span steel frame and foundation posts of a building during the construction process in the town of Bryansk is given.

Введение

Вопрос оптимального проектирования стальных рам при заданных условиях опирания рассмотрен в ряде работ [1–3]. Подробно изучалась и задача оптимизация фундаментов различных типов при неизменных конструктивных решениях надстроек зданий и сооружений [4–12]. В то же время действующий СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*» указывает, что «расчет оснований по деформациям должен производиться исходя из условия совместной работы сооружения и основания» (п. 5.6.3). Соответственно, требуется решать задачу оптимизации строительных конструкций с рамными надстройками, принимая во внимание несущую способность и стоимость изготовления каркаса и фундаментов как единой системы.

В целом оптимальному проектированию строительных объектов при совместном варьировании параметров надстроек и фундаментов уделяется недостаточно внимания. Отдельным аспектам этого направления посвящены работы [13, 14]. В работе [13] рассматривается совместная оптимизация балочной конструкции и свайного фундамента для моста пирса. В работе [14] анализируются вопросы комплексной оптимизации свайного фундамента и надстройки при повторном использовании свай. Существует потребность в дальнейшей разработке алгоритмов, которые обеспечивали бы возможность решения конструкторских задач такого типа. При этом представляется целесообразным использование универсального метода эволюционного моделирования, иначе называемого генетическими алгоритмами [15]. Следует отметить, что генетические алгоритмы уже нашли применение при раздельной оптимизации надстроек [3, 16] и фундаментов [9, 11, 12, 17].

В настоящей работе предлагается методика комплексной оптимизации плоской стальной рамы каркаса здания и столбчатых фундаментов. Учитывается эксплуатация объекта в нормальных условиях на естественном основании. Поиск рациональных решений выполняется на основе развития процедуры эволюционного моделирования работ [18–20].

Постановка задачи

Ставится задача минимизации стоимости C_6 материалов основных изменяемых элементов рамы и фундаментов:

$$C_6 = M_r C_r + M_{bf} C_{bf} + M_{af} C_{af} + M_{nf} C_{nf} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где M_r – масса варьируемой части стержней рамы; M_{bf} , M_{af} , M_{nf} – массы бетона, арматуры и опорных стальных плит; C_r , C_{bf} , C_{af} , C_{nf} – плановая производственная себестоимость единицы массы для соответствующих элементов конструкции.

Все рассматриваемые в формуле (1) массы, а также удельные стоимости для бетона и арматуры зависят от параметров проектирования. Удельные стоимости для стержней рамы и опорных стальных плит считаются величинами постоянными. Поиск осуществляется на дискретных множествах типоразмеров поперечных сечений стержней рамы, форм подошв фундаментов (квадрат или прямоугольник), размеров в плане подошв фундаментов и опорных стальных плит, высот фундаментов и вылетов их ступеней, классов бетона и арматуры, диаметров и шагов установки продольных арматурных стержней.

Считаем стержневую систему рамы относящейся к первому классу напряженно-деформированного состояния (СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II–23–81*). Полагаем, что рама раскреплена из своей плоскости. Принимаем во внимание условия, при которых не предусматривается проводить расчет на плоский сдвиг по подошве фундамента (СП 22.13330.2011).

Рассматриваем следующие основные ограничения.

1. *Прочность рамы.* Требуем выполнения соотношения

$$t_\sigma = \frac{|\sigma_3|}{R_y} - 1 \leq 0, \quad (2)$$

где t_σ – параметр, используемый для характеристики удовлетворения условий прочности стержней; σ_3 – эквивалентное по теории Мизеса напряжение; R_y – расчетное сопротивление стали, назначенное по пределу текучести (СП 16.13330.2011).

2. *Ограничения по деформациям основания (СП 22.13330.2011):*

$$p_{cp} \leq R; \quad p_{kp} \leq 1,2R, \quad (3)$$

где p_{cp} – среднее давление под подошвой фундамента на грунт; p_{kp} – давление на грунт вдоль оси фундамента у края подошвы, перпендикулярного плоскости рамы; R – расчетное сопротивление грунта основания, вычисляемое в соответствии с п. 5.6.7 СП 22.13330.2011.

Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimizatsiya sistemy stalnoy ploskoy ramy i stolbchatykh fundamentov [Optimization of flat steel frame and foundation posts system]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 1. Pp. 14–24. doi: 10.5862/MCE.61.2

3. Выполнение условий прочности фундаментов на продавливание [4].
4. Проверка несущей способности основания по методике п. 5.7 СП 22.13330.2011.
5. Трещиностойкость фундаментов ([4], СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52–01–2003):

$$a_{crcs} \leq [a_{crc}], \quad (4)$$

где a_{crcs} – полученная в расчетах ширина раскрытия трещин в растянутом бетоне; $[a_{crc}]$ – допустимая ширина продолжительного или непродолжительного раскрытия трещин.

6. Обеспечение требуемой жесткости (СП 22.13330.2011, СП 20.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия):

$$t_{\delta_g} = \frac{|\delta_g|}{[u] + [f_g]} - 1 \leq 0, \quad t_{\delta_z} = \frac{|\delta_z|}{[f_z]} - 1 \leq 0, \quad (5)$$

где $t_{\delta_g}, t_{\delta_z}$ – параметры, используемые для характеристики выполнения условий жесткости для перемещений по вертикали и горизонтали; δ_g, δ_z – перемещения по вертикали и горизонтали в результате совместной деформации основания и рамы; $[u]$ – допустимое значение осадки основания; $[f_g], [f_z]$ – допустимые значения вертикального и горизонтального перемещений стержней вследствие деформаций рамы.

7. Обеспечение общей устойчивости деформируемой системы с учетом податливости основания. Местную устойчивость поясных листов, стенок в процессе оптимизации не рассматриваем, полагая, что ее можно обеспечить для полученного решения путем установки дополнительных ребер жесткости, подкрепляющих косынок и т.п.

8. Требования по максимальной относительной разности осадок фундаментов (СП 22.13330.2011).

9. Конструктивные и технологические требования, в том числе указания нормативных документов по строительству.

10. Условия унификации. Предусматривается возможность выбора одного типоразмера для каждой из задаваемых групп поперечных сечений стержней. Для варианта конструкции высоты всех фундаментов, классы бетона и арматуры принимаются одинаковыми.

Процедура оптимизации

Полагаем, что перед оптимизацией задается район строительства, компоновочная схема несущей конструкции, действующие нагрузки, характеристики грунтов, глубина заложения фундаментов, толщина опорных стальных плит, механические характеристики и стоимости материалов. Принимаются допустимые значения варьируемых параметров с учетом ограничений 9, 10. После выполнения оптимального поиска исходные предпосылки к проектированию можно откорректировать и повторить счет.

Ограничения 1–7 рассматриваем как активные, учитываемые непосредственно в процедуре оптимизации. Ограничение 8 трактуем как пассивное. Его удовлетворение следует проверить после проведения оптимизации.

Выполняем декомпозицию параметров проектирования, выделив данные о типоразмерах поперечных сечений стержней рамы, высоте фундаментов и формах их подошв, классах бетона и арматуры. Эта информация отражается в коде варианта конструкции (особи) эволюционного алгоритма. Остальные параметры подбираются с учетом рассматриваемого кода. Формируем алгоритм таким образом, чтобы ограничения 1, 6 непосредственно влияли на выбор особей в эволюционной схеме. Ограничение 7 должно быть связано с ограничением 6, а выполнение ограничений 2–5 должно учитываться при нахождении параметров фундаментов, не входящих в коды особей.

Последовательность генов хромосомы Y каждой особи представляется в виде

$$Y = \{y_{r1}, \dots, y_{rn}, y_h, y_{f1}, \dots, y_{fk}, y_b, y_a\}, \quad (6)$$

где y_{r1}, \dots, y_{rn} – номера типоразмеров профилей групп стержней; n – число таких групп; y_h – номер высоты фундаментов; y_{f1}, \dots, y_{fk} – номера форм подошв фундаментов; k – число фундаментов; y_b, y_a – номера классов бетона и арматуры.

Оптимизация выполняется последовательно для каждого из принимаемых во внимание сочетаний нагрузок. Для вновь учитываемого сочетания корректируем множества допустимых профилей стержней, устраняя профили, меньшие по площади поперечных сечений полученных в процессе предыдущей оптимизации. После прохождения всех рассматриваемых сочетаний нагрузок для каждой колонны выбираем из полученных в оптимизационных расчетах вариантов фундамент обладающий наибольшей несущей способностью. В итоге предусматривается выполнение проверочных расчетов разработанной несущей системы.

В эволюционной схеме принимаем во внимание основной набор проектов I, имеющий фиксированное четное число n вариантов конструкции, и вспомогательный набор II улучшенных проектов, размер которого зависит от результатов работы эволюционного алгоритма, но не превышает n . Первоначально формируем первое поколение из одинаковых вариантов конструкции с наибольшими допустимыми значениями площадей поперечных сечений стержней и высот фундаментов, заданием прямоугольной формы подошвы фундаментов, введением наиболее высоких классов бетона и арматуры из принимаемых для оптимизации множеств. Далее осуществляется итерационный процесс (движение по поколениям), включающий следующие основные действия.

А. Проверка выполнения ограничений 1–7 для проектов набора I, совмещенная с выбором для каждого фундамента параметров, не входящих в коды вариантов конструкции эволюционного алгоритма.

При анализе общих деформаций несущей системы рассматривается стержневая расчетная схема с учетом вертикальной и угловой податливости грунтового основания. Материалы стержней рамы считаются линейно упругими. Принимается во внимание влияние продольных сил в стержнях на их изгибные деформации. Вертикальная податливость основания оценивается по схеме линейно деформируемого полупространства методом послойного суммирования (СП 22.13330.2011). Угловая податливость основания вычисляется в соответствии с процедурой определения крена фундамента, приведенной в п. 5.6.44 СП 22.13330.2011. Расчет напряженно-деформированного состояния вариантов конструкции выполняется методом конечных элементов с помощью последовательных приближений. В первом приближении реализуется расчет несущей системы при абсолютно жестких опорах и нулевых продольных силах в стержнях. В каждом приближении $s > 1$ решается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$\left([K(\{V^{(s-1)}\})]^{(s)} + [K_G(\{N^{(s-1)}\})]^{(s)} \right) \{\delta\}^{(s)} = \{R\}^{(s)}, \quad (7)$$

где $[K(\{V^{(s-1)}\})]^{(s)}$ – матрица жесткости конечно-элементной модели, получаемая с учетом податливости основания для фундаментов, спроектированных по результатам вычисления в приближении $s-1$ опорных реакций $\{V\}^{(s-1)}$; $[K_G(\{N^{(s-1)}\})]^{(s)}$ – геометрическая матрица [21, 22] системы конечных элементов, выражаемая через найденные в приближении $s-1$ продольные силы $\{N\}^{(s-1)}$ в стержнях; $\{\delta\}^{(s)}$ – вектор узловых перемещений, вычисляемый в приближении s ; $\{R\}^{(s)}$ – вектор приведенной к узлам внешней нагрузки, учитывающий изменение сил тяжести вследствие варьирования параметров конструкции.

Выбор параметров фундаментов осуществляется в соответствии с методикой работы [4]. При этом размеры подошв подбираются на основе ограничений 2 и 4, параметры арматуры – ограничения 5. Размеры в плане опорных стальных плит, а также вылеты ступеней фундаментов

назначаются с учетом ограничения 3, размеров в плане подошвы фундамента и размеров поперечных сечений колонн.

Введение матриц $[K_G \{N^{(s-1)}\}]^{(s)}$ позволяет реализовать оценку устойчивости всей деформируемой системы в плоскости рамы. Проверка по перемещениям в данном случае фактически обеспечивает и учет ограничения 7. Расчеты показали, что при выполнении условия устойчивости несущей системы данный внутренний итерационный процесс, как правило, практически сходится за 8–10 итераций.

Разделяем проекты набора I на подгруппы α и β . Если для какого-либо из проектов подгруппы α не выполняется хотя бы одно из ограничений 1, 5, то он заменяется не используемым в наборе I проектом из набора II или вновь сформированным вариантом несущей системы. Если не обеспечивается полное удовлетворение таких ограничений для проектов из подгруппы β , то вводится штраф путем умножения значения целевой функции на коэффициент

$$k_{\delta} = (1 + \xi \chi(t_{\sigma_{\max}}) t_{\sigma_{\max}}) (1 + \xi \chi(t_{\delta_{\max}}) t_{\delta_{\max}}), \quad (8)$$

где ξ – задаваемое положительное число; $\chi(x)$ – функция Хэвисайда от некоторого аргумента x ($\chi(x) = 0$, если $x < 0$; $\chi(x) = 1$, если $x \geq 0$); $t_{\sigma_{\max}}$, $t_{\delta_{\max}}$ – максимальные значения для t_{σ} и в целом для величин t_{δ} , t_{δ} в проверяемом проекте конструкции.

В. Корректировка набора II улучшенных проектов. Каждый из проектов набора I проверяется по двум критериям: существует ли такой вариант конструкции в наборе II, и не превышает ли значение C_{σ} рассматриваемого варианта наибольшего значения целевой функции в данном наборе. Если оба условия не выполняются, то проект включается в набор II. В том случае, когда число вариантов конструкции во вспомогательном наборе превысит n , проект с наибольшим значением C_{σ} из него удаляется.

С. Проверка удовлетворения критерию окончания эволюционного алгоритма. Расчеты показывают, что при оптимальном синтезе конструкций рассматриваемого типа с помощью представляемой эволюционной схемы отсутствие изменений в наборе II в течение 200...300 итераций внешнего цикла говорит о целесообразности остановки оптимизации. Дальнейшее продолжение итерационного процесса обычно не приводит к существенному изменению параметров для наиболее рациональных проектов.

Д. Случайное изменение параметров (мутация), дополнительная проверка выполнения ограничений для проектов набора I и редактирование набора II, выбор проектов по значению целевой функции (селекция) и обмен параметрами (кроссинговер). При выполнении мутации случайным образом для каждой особи набора I может быть изменен один или несколько параметров. Для модифицируемого параметра с помощью датчика случайных чисел, оперирующего на отрезке (0, 1) и имеющего равномерный закон распределения, находится значение p , которое сравнивается с управляющим числом мутации m ($0 < m < 1$). Если соблюдается неравенство $p > m$, то случайно с равной вероятностью выбирается любой элемент из множества допустимых значений параметра. В противном случае выбор в этом множестве осуществляется случайным образом только из соседних значений по отношению к текущей позиции параметра. Селекция особей выполняется методом рулетки в зависимости от величины целевой функции. Кроссинговер осуществляется на основе известной одноточечной схемы со случайным выбором точки разрыва хромосом. Для рассматриваемого в данной работе примера в наборе I любого из поколений учитывалось по 20 особей, для каждой особи мутация реализовывалась по 2-м параметрам. При этом принималось $m = 0.9$.

Данный алгоритм реализован в разработанном авторами статьи программном комплексе «BGITAFEM/OPTIMA» (свидетельство об официальной регистрации №2012661425 РФ).

Пример оптимизации

Выполнялось совместное оптимальное проектирование стальной трехпролетной рамы каркаса бесподвального здания II уровня ответственности и столбчатых фундаментов A, B, C, D Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация системы стальной плоской рамы и столбчатых фундаментов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №1(61). С. 14–24.

под ее колонны (рис. 1а). Объект расположен в г. Брянске. Принималось монолитное исполнение фундаментов. Полагалось, что соседние здания и сооружения находятся на достаточном удалении и не оказывают существенного дополнительного давления на основание. Учитывалась средняя стоимость материалов на январь 2015 г. по данным организаций-производителей г. Брянска.

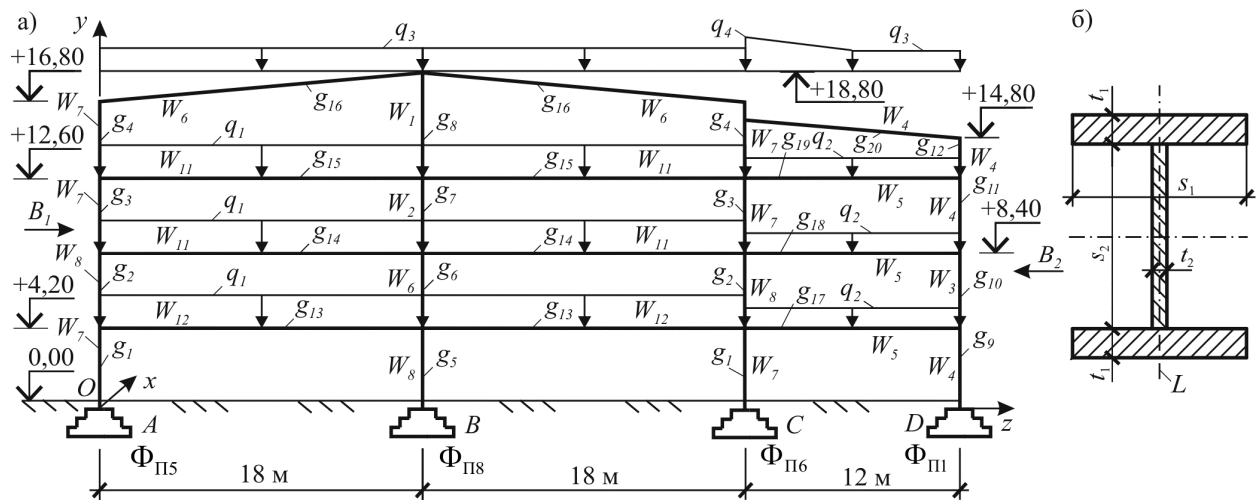


Рисунок 1. Объект оптимизации: а) компоновочная схема; б) форма поперечных сечений стержней (ось L расположена в плоскости OYZ); g_i – группы профилей стержней;

W_i, Φ_{II} – выбранные профили стержней и сочетания размеров подошв фундаментов

Стержни рамы выполнены из сварных двутавровых профилей (рис. 1б) и имеют жесткие соединения между собой и с фундаментами. Колонны изготовлены из стали С345, горизонтальные и наклонные ригели – стали С255. Группировка параметров поперечных сечений стержней отражена на рисунке 1а. Каждая из групп стержней $g_i (i = 1, \dots, 20)$ предусматривала возможность использования одного из допустимых профилей $W_i (i = 1, \dots, 20)$, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Допустимые сочетания размеров поперечных сечений стержней

Вариант поперечного сечения	s_1 , см	t_1 , см	s_2 , см	t_2 , см
W_1	16	2	18	0.8
W_2	20	2	20	0.8
W_3	25	2	24	1
W_4	28	2.5	30	1
W_5	30	2.5	32	1.4
W_6	34	3	34	1.4
W_7	40	3	40	1.6
W_8	45	3.5	42	1.8
W_9	48	3.5	44	1.8
W_{10}	50	4	48	2
W_{11}	55	4	50	2
W_{12}	60	4	58	2.5
W_{13}	65	4	62	2.5
W_{14}	70	4	70	3
W_{15}	75	4	76	3
W_{16}	80	4.5	80	3
W_{17}	85	4.5	85	3.5
W_{18}	90	4	58	3.5

W_{19}	95	4	58	4
W_{20}	100	6	90	4

Принималось, что на строительной площадке залегают грунты с характеристиками, представленными в таблице 2 и определенными по результатам инженерно-геологического исследования. Расчетная глубина сезонного промерзания задавалась 1.38 м как средняя величина по данным метеорологических наблюдений в г. Брянске за период 2000–2013 гг.

Таблица 2. Характеристики грунтов

Наименование четвертичных отложений	Мощность слоя, м	Показатель текучести I_L	Коэффициент пористости	Модуль деформации, МПа
Песок крупный и средней крупности желто-серый и серый, кварцевый, маловлажный	1...2	-	1.0	-
Супесь аллювиальная, пластичная, желто-серая	2.1...5	$0 < I_L \leq 0.75$	0.52	22
Суглинок флювиогляциальный буровато-коричневый, полутвердый	2.5...4	$0 \leq I_L \leq 0.25$	0.55	33

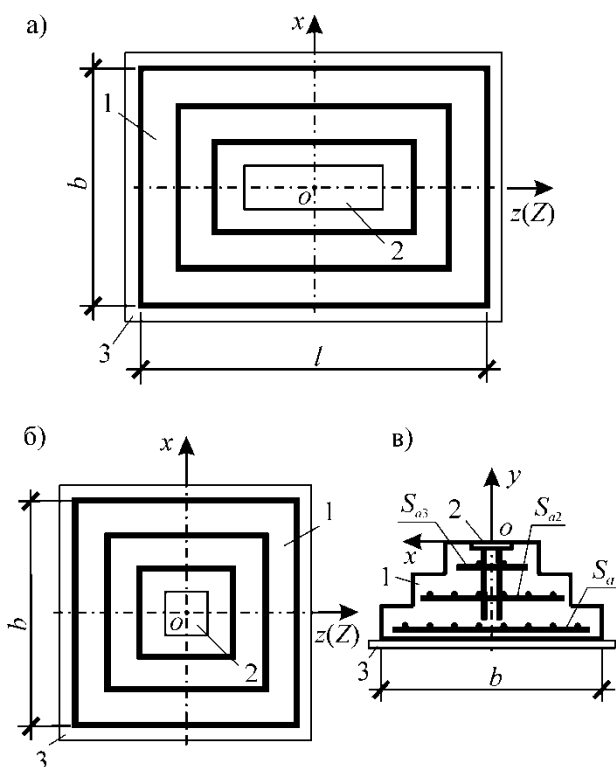


Рисунок 2. Схемы проектируемых фундаментов: а), б) планы фундаментов с квадратной и прямоугольной подошвой; в) сечение фундаментов плоскостью oxy ; 1 – железобетонная плита; 2 – стальная опорная плита с анкерами; 3 – щебеночная подготовка

Фундаменты располагаются на щебеночной подготовке толщиной 100 мм, выступающей за грани фундамента на 100 мм. Для каждой опоры рамы предусматривалась возможность задания квадратной или прямоугольной формы подошвы фундамента (см. рис. 2а, б). Высота фундаментов варьировалась на множестве $\{0.75; 0.9; 1.05; 1.2; 1.35\}$ м, сформированном в соответствии с уровнем нагружения рамы. Число ступеней принималось равным трем. Высоты ступеней считались одинаковыми. Бетон армирован тяжелыми сварными сетками S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} (рис. 2в) из стержней периодического профиля по ГОСТ 5781–82. Предусматривался выбор бетона из классов В15, В20, В25, В30, В35, арматуры – из классов А300, А400, А500. Толщина защитного слоя бетона задавалась для нижней фундаментной сетки равной 5 см, для других

защитных слоев – 4 см. Условие трещиностойкости фундаментов проверялось в соответствии с 3-й категорией требований (СП 22.13330.2011, СП 63.13330.2012).

Размер стороны b каждой квадратной подошвы выбирался из следующих значений: 1.5; 1.8; 2.1; 2.4; 2.7; 3.0; 3.6; 4.2; 4.8; 5.4 м, объединяемых во множество Φ_{Kj} ($j = 1, \dots, 10$). Допускались такие сочетания $b \times l$ размеров прямоугольных подошв: 1.5 x 1.8; 1.8 x 2.1; 1.8 x 2.4; 2.1 x 2.7; 2.4 x 3.0; 2.7 x 3.3; 3.0 x 3.6; 3.3 x 3.9; 3.6 x 4.2; 3.9 x 4.5 м, рассматривавшиеся как элементы множества Φ_{Pl} ($l = 1, \dots, 10$). Толщины стальных опорных плит под колонны принимались равными 2.5 см. Диаметры арматуры сеток выбирались из следующих значений: 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 40 мм. При этом независимо принимался диаметр для системы параллельных стержней каждой сетки. Шаг установки арматуры допускался равным 100, 150 или 200 мм. Вылеты ступеней фундаментов принимались кратными 50 мм, размеры в плане стальных опорных плит – 10 мм.

В соответствии с СП 20.13330.2011 учитывались постоянные и временные длительно действующие нагрузки. Рассматривалось два сочетания расчетных нагрузок, для каждого из которых задавались распределенные загрузки стержней с интенсивностями $q_1 = 106$ кН/м, $q_2 = 53$ кН/м, $q_3 = 24.7$ кН/м, $q_4 = 30.8$ кН/м (рис. 1), учитывающие собственный вес неизменяемых частей конструкции, снеговую и полезную эксплуатационную нагрузку. Вес фундаментов и стержней рамы оценивался и принимался во внимание в контексте варьирования параметров проектирования. Кроме того, вводилось ветровое давление при направлении ветра B_1 для первого сочетания нагрузок и B_2 – для второго. С учетом нормативных требований (СП 22.13330.2011) и авторской практики проектирования зданий в г.Брянске предельная величина осадки фундамента задавалась равной 6 см.

Итерационный процесс эволюционной оптимизации реализовывался при $n = 20$ и числе параметров проектирования, которые в каждой особи могут быть подвержены мутации [3], равном 2. Расчеты показали, что в данном примере для получения какого-либо стабильного решения в более чем 70 % реализаций эволюционного алгоритма требуется выполнять менее 400 итераций, в 85 % – менее 500 итераций. Время выполнения 501 итерации на компьютере с процессором Intel Core i5 2400 составило 3.8 часа. На рисунке 3 иллюстрируется сходимость алгоритма для типичной реализации итерационного процесса, где C_σ – стоимость материалов основных варьируемых элементов фундаментов.

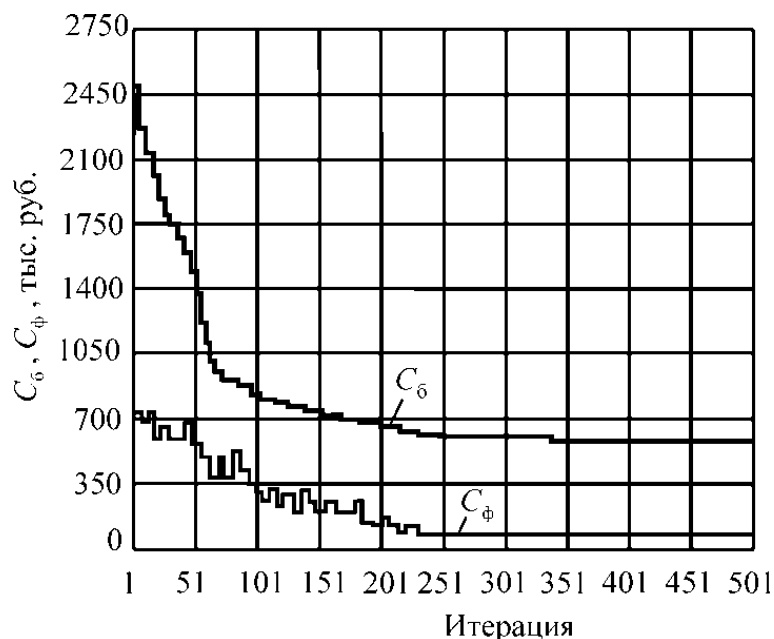


Рисунок 3. Характер сходимости эволюционного алгоритма

Для первого нагружения осуществлялось 15 запусков на счет. В 11 запусках было получено решение, в котором стоимость C_6 составила 539.2 тыс. руб. Для других решений значения целевой функции превышали данную величину на 1...3%. В проекте с наименьшей стоимостью C_6 получились только прямоугольные фундаменты. Сведения о выбранных вариантах поперечных сечений стержней рамы и размерах в плане подошв фундаментов даны на рисунке 1а. Поиск привел к высоте фундаментов 0.75 м, классу бетона В15, классу арматуры А500. В фундаментах А, В, С и D размеры в плане опорных плит получились равными 0.55 x 0.44; 0.8 x 0.66; 0.8 x 0.66 и 0.48 x 0.37 м. Для всех арматурных сеток шаг установки продольных стержней составил 100 мм, поперечных – 150 мм. Диаметры всех стержней в фундаментах А, D получились 10 мм, В, С – 12 мм.

Осадки основания под фундаментами А, В, С и D для выбранной несущей системы составили 3.41; 5.55; 4.43 и 2.23 см. Ограничение 8 при этом выполняется. Оптимальное проектирование для второго сочетания нагрузок здесь не привело к изменению наилучшего из найденных проектов. На рисунке 4а отражены результаты проектирования фундамента D по размерам в плане ступеней и стальной плиты, рисунках 4б, в, г – по параметрам арматурных сеток. Проверочные расчеты подтвердили работоспособность полученного в результате оптимизации варианта конструкции.

Выводы

1. Разработан алгоритм совместной оптимизации плоских стальных рам и столбчатых фундаментов на дискретных множествах значений параметров проектирования с использованием эволюционного моделирования.
2. На конкретном примере оптимального синтеза трехпролетной стальной рамы и столбчатых фундаментов монолитного исполнения иллюстрируется возможность реального проектирования конструкций такого типа на основе рассматриваемой вычислительной схемы.
3. Предлагаемая методика может быть рекомендована к реализации в САПР строительных систем.

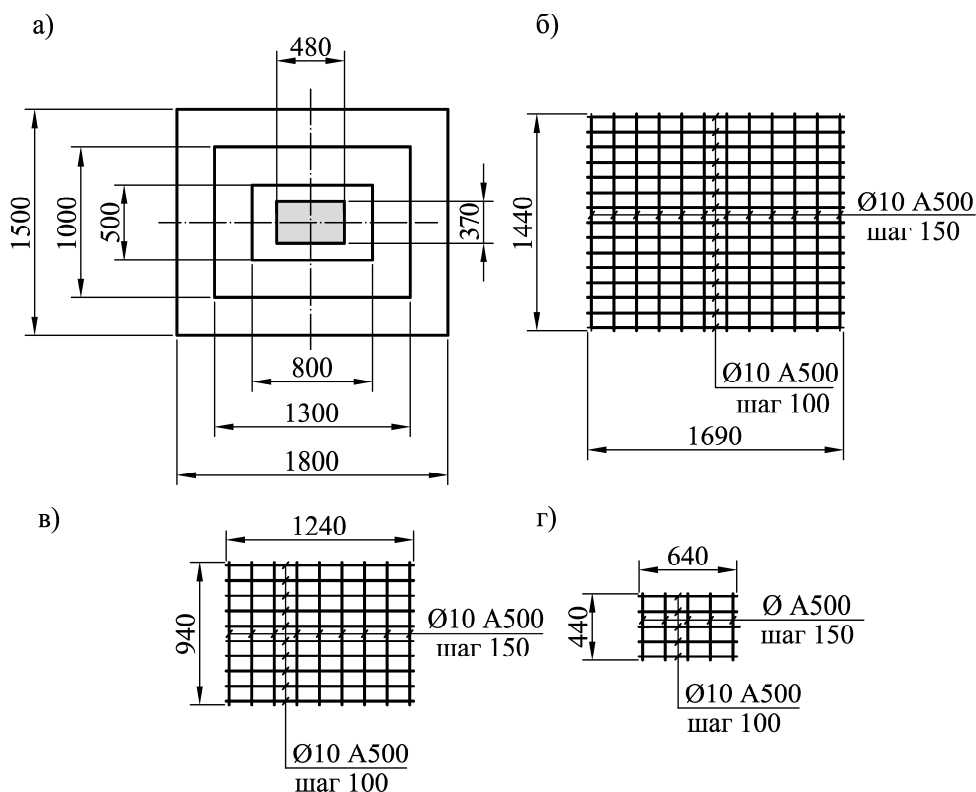


Рисунок 4. Результат поиска параметров фундамента D: а) план фундамента; б), в) г) арматурные сетки S_{a1} , S_{a2} , S_{a3}

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственное задание ФГБОУ ВО «БГИТУ» по проекту № 2946.

Литература

1. Тухфатуллин Б.А., Пугеева Л.Е. Оптимизация плоских стальных рам с учетом требований норм проектирования // Вестник ТГАСУ. 2008. №3. С. 171–175.
2. Hadidi A., Rafiee A. Harmony search based, improved particle swarm optimizer for minimum cost design of semi-rigid steel frames // *Structural Engineering and Mechanics*. 2014. №3 (50). Pp. 323–347.
3. Серпик И.Н. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. М.: Издательство АСВ, 2012. 240 с.
4. Пособие по проектированию фундаментов на естественном основании под колонны зданий и сооружений (к СНиП 2.03.01–84 и СНиП 2.02.01–83). М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 112 с.
5. Почтман Ю.М., Ланда М.Ш., Холод Е.В. Оптимизация размеров столбчатых фундаментов колонн с учетом существующих модульных систем // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. №2. С. 13–16.
6. Логутин В.В. Оптимизация проектных решений оснований и фундаментов [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2012. №4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn412.pdf> (дата обращения: 20.12.2015).
7. Анищенко Е.Ю. Исследование, проектирование и оптимизация параметров фундаментов каркасных зданий: автореферат дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Волгоград: Волгогр. гос. архитектур.-строит. акад., 2004. 22 с.
8. Hurd A.J., Truman K.Z. Optimization method of pile foundations // *Advances in Engineering Structures. Mechanics and Construction*. 2006. Vol. 140. Pp. 653–661.
9. Chan C.M., Zhang L.M., and Ng J.T.M. Optimization of pile groups using hybrid genetic algorithms // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009. №4(135). Pp. 497–505.
10. Penteado L.M., de Brito J. Expert knowledge-based selection methodology for optimizing the construction of concrete piles // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2012. №1 (26). Pp. 95–103.
11. Hwang J.H., Lyu Y.D., Chung M.C. Optimizing pile group design using a real genetic approach // *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. Maui, Hawaii, USA, 19–24 June. 2011. Pp. 491–499.
12. Liu X., Cheng G., Wang B., Lin S. Optimum design of pile foundation by automatic grouping genetic algorithms [Электронный ресурс] // *ISRN Civil Engineering*. 2012. Pp. 1-16. URL: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/678329>. Online publication date: 1-Jan-2012. (дата обращения: 20.12.2015).
13. Demura Y., Matsuo M. Optimization of foundation of bridge on soft ground // *Reliability and Optimization of Structural Systems: Proc. of the sixth IFIP WG7.5 Working Conference*. 1995. Pp. 112–119.
14. Leung Y., Soga K., Klar A. Multi-objective foundation optimization and its application to pile reuse // *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Dallas, Texas, USA. 2011. Vol. 1. Pp. 75–84.
15. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2010. 317 с.
16. Юрьев А.Г., Ключев С.В. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций.

Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimizatsiya sistemy stalnoy ploskoy ramy i stolbchatykh fundamentov [Optimization of flat steel frame and foundation posts system]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 1. Pp. 14–24. doi: 10.5862/MCE.61.2

References

1. Tukhfatullin B.A., Puteyeva L.Ye. Optimizatsiya ploskikh stalnykh ram s uchetom trebovaniy norm proyektirovaniya [Optimization of flat steel frames in view of requirements of designing standards]. *Vestnik of TSUAB*. 2008. No. 3. Pp. 171–175. (rus)
2. Hadidi A., Rafiee A. Harmony search based, improved particle swarm optimizer for minimum cost design of semi-rigid steel frames. *Structural Engineering and Mechanics*. 2014. No. 3. Pp. 323–347.
3. Serpik I.N. *Optimizatsiya metallicheskih konstruksiy putem evolyutsionnogo modelirovaniya* [Optimization of metal structures by evolutionary modeling]. Moscow. Izdatel'stvo ASV. 2012. 240 p. (rus)
4. *Posobiye po proyektirovaniyu fundamentov na yestestvennom osnovanii pod kolonny zdaniy i sooruzheniy (k SNiP 2.03.01-84 i SNiP 2.02.01-83)* [Reference manual on design of foundations on a natural foundation bed under the columns of build-ings and structures (to SNiP 2.03.01-84 and SNiP 2.02.01-83)]. Moscow. TsITP Gosstroya SSSR Publ. 1989. 112 p. (rus)
5. Pochtman Yu.M., Landa M.Sh., Kholod Ye.V. Optimizatsiya razmerov stolbchatykh fundamentov kolonn s uchetom sushchestvuyushchikh modulnykh sistem [Optimization of sizes of columns foundation posts with the consideration of existing modular systems]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1994. No. 2. Pp. 13–16. (rus)
6. Logutin V.V. Optimizatsiya proyektnykh resheniy osnovaniy i fundamentov [Design optimization of footings and foundations] [Online]. *On-line journal "Naukovedenie"*. 2012. No. 4. Available at: URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn412.pdf> (Accessed 20.12.2015). (rus)
7. Anishchenko Ye.Yu. *Issledovaniye, proyektirovaniye i optimizatsiya parametrov fundamentov karkasnykh zdaniy* [Research, design and optimization of the parameters of frame buildings foundations]. Author's abstract of PhD diss. Volgograd State Academy of Architecture and Civil Engineering. Volgograd. 2004. 22 p. (rus)
8. Hurd A.J., Truman K.Z. Optimization method of pile foundations. *Advances in Engineering Structures. Mechanics and Construction*. 2006. Vol. 140. Pp. 653–661.
9. Chan C.M., Zhang L.M., and Ng J.T.M. Optimization of pile groups using hybrid genetic algorithms. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009. No. 4. Pp. 497–505.
10. Penteado L.M., de Brito J. Expert knowledge-based selection methodology for optimizing the construction of concrete piles. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2012. No. 1. Pp. 95–103.
11. Hwang J.H., Lyu Y.D., Chung M.C. Optimizing pile group design using a real genetic approach. *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. Maui, Hawaii, USA. 19-24 June. 2011. Pp. 491–499.
12. Liu X., Cheng G., Wang B., Lin S. Optimum design of pile foundation by automatic grouping genetic algorithms [Online]. *ISRN Civil Engineering*. 2012. Pp. 1-16. Available at URL: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/678329>. Online publication date: 1-Jan-2012. (Accessed: 20.12.2015).
13. Demura Y., Matsuo M. Optimization of foundation of bridge on soft ground. *Reliability and Optimization of Structural Systems: Proc. of the sixth IFIP WG7.5 Working Conference*. 1995. Pp. 112–119.

- Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006. 134 с.
17. Letsiosa C., Lagarosb N.D., Papadrakakisb M. Optimum design methodologies for pile foundations in London // *Case Studies in Structural Engineering*. 2014. Vol. 2. Pp. 24–32.
 18. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Построение высокопроизводительного алгоритма оптимизации стержневых систем на основе комбинированной эволюционной стратегии // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2011. №5. С. 58–63.
 19. Серпик И.Н., Мироненко И.В., Смашнева М.И. Генетический алгоритм оптимизации плоских железобетонных рам // *Бетон и железобетон*. 2011. № 4. С. 17–21.
 20. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №9. С. 23–29.
 21. Бате К. Методы конечных элементов. М.: Физматлит, 2010. 1024 с.
 22. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Oxford: Elsevier, 2014. 672 p.
 14. Leung Y., Soga K., Klar A. Multi-objective foundation optimization and its application to pile reuse. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Dallas. Texas. USA. 2011. Vol. 1. Pp. 75–84.
 15. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Geneticheskiye algoritmy* [Genetic algorithms]. Moscow. Fizmatlit. 2010. 317 p. (rus)
 16. Yuryev A.G., Klyuyev S.V. *Evolutsionnyye i geneticheskiye algoritmy optimizatsii stroitelnykh konstruksiy* [Evolutionary and genetic algorithm of optimization of building structures]. Belgorod. Izdatel'stvo BSTU named after V.G. Shukhov. 2006. 134 p. (rus)
 17. Letsiosa C., Lagarosb N.D., Papadrakakisb M. Optimum design methodologies for pile foundations in London. *Case Studies in Structural Engineering*. 2014. Vol. 2. Pp. 24–32.
 18. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Postroyeniye vysokoproizvoditelnogo algoritma optimizatsii stержnevyykh sistem na osnove kombinirovannoy evolyutsionnoy strategii [Construction of an efficient algorithm of bars systems optimization on the basis of combined evolutionary strategy]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2011. No. 5. Pp. 58–63. (rus)
 19. Serpik I.N., Mironenko I.V., Smashneva M.I. Geneticheskiy algoritm optimizatsii ploskikh zhelezobetonnykh ram [Genetic algorithm of optimization of flat reinforced concrete frames]. *Concrete and reinforced concrete*. 2011. No. 4. Pp. 17–21. (rus)
 20. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimizatsiya ramnykh konstruksiy s uchetom vozmozhnosti zaproyektnykh vozdeystviy [Optimization of frame structures with possibility of emergency actions]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 9. Pp. 23–29. (rus)
 21. Bate K. *Metody konechnykh elementov* [Finite element methods]. Moscow. Fizmatlit, 2010. 1024 p. (rus)
 22. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Oxford. Elsevier. 2014. 672 p.

Игорь Нафтольевич Серпик,
+7(4832)648800; эл. почта:
iserpik@online.debryansk.ru

Анатолий Викторович Алексейцев,
+7(960)5643358; эл. почта: aalexw@mail.ru

Igor Serpik,
+7(4832)648800; iserpik@online.debryansk.ru

Anatoliy Alekseytsev,
+7(960)5643358; aalexw@mail.ru

© Серпик И.Н., Алексейцев А.В., 2016