ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.07:69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830

Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий

А.Г. Тамразян, А.В. Алексейцев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение: рассмотрена постановка и решение задачи оптимизации несущих конструкций с учетом соотношения затрат на изготовление объекта и рисков материальных потерь при аварийных ситуациях, связанных с быстрым устранением опор, обосновывается выбор сценария локального повреждения. Учет рисков, возникающих при аварийных ситуациях — актуальная проблема, решение которой в значительной степени может повысить безопасность строительных конструкций.

Материалы и методы: используется двухэтапная вычислительная процедура, включающая эволюционный поиск на дискретных множествах параметров проектирования и вычисление рисков аварийных ситуаций в различные периоды жизненного цикла несущей системы. На первом этапе с помощью генетического алгоритма выполняется синтез варианта объекта. При этом оценка его напряженно-деформированного состояния осуществляется с учетом динамических эффектов, возникающих при возможных локальных повреждениях опор. На втором этапе вычисляется интегральное значение относительного риска материальных потерь в аварийной ситуации с учетом отказов, связанных как со статистической природой нагрузок и механических характеристик материалов, так и с наступлением различных сценариев локальных повреждений.

Результаты: разработана методика выбора рационального по соотношению «затраты – риск» проектного решения для несущих конструкций зданий повышенного уровня ответственности. Рассматриваемый пример оптимального проектирования стальной балочной конструкции иллюстрирует работоспособность предлагаемого подхода.

Выводы: результаты исследований показали, что выполнять оптимизацию проектного решения только с учетом минимума себестоимости конструкций в зданиях повышенного уровня ответственности недопустимо. Наиболее рациональным проектным решением с позиции минимизации затрат и рисков является вариант, обеспечивающий живучесть конструкции при аварийном выключении только одной из опор. Рассматриваемую методику рекомендуется использовать в системах автоматизированного проектирования несущих конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эволюционное моделирование, оптимизация, риск, надежность, безопасность, аварийные ситуации, устранение связей, жизненный цикл

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 7. С. 819–830. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830

Optimal structures design: accounting of costs and relative accidents risk

Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction: the article considers the formulation and solution of the problem of optimizing structures. It takes into account the ratio of the cost of manufacturing the object and the risks of material losses in emergencies related to the rapid removal of supports. The choice of the local damage scenario is justified. The assessment of risks arising from emergencies is a significant problem. The solution to it can primarily increase the safety of load-bearing building structures.

Materials and methods: the two-step computational procedure is used, which includes an evolutionary search on discrete sets of design parameters and the calculation of the emergencies risks at different periods of the carrier system life cycle. At the first stage, a variant of the object is synthesized using a genetic algorithm. In this case, the evaluation of its stress-strain state is carried out taking into account the dynamic effects arising from possible local damage to the supports. The second stage consists of the calculation of the integral value of the relative risk of material losses in an emergency. It includes the

failures related to both the statistical nature of the loads and the mechanical characteristics of materials, as well as the onset of various scenarios of local damage.

Results: the technique for selecting a cost-effective rational design-based solution for beam structures with a higher level of responsibility has been developed. The considered example of the optimal design of a steel beam construction has illustrated the efficiency of the proposed approach.

Conclusions: the research results showed that it is unacceptable to carry out the optimization of the design solution, considering only the minimum cost of structures in buildings of a higher level of responsibility. The most rational design decision on the criterion of minimizing costs and risks is the object that ensures the persistence of the structure during the emergency removal of only one support. The considered technique is recommended to using in computer-aided design of load-bearing structures.

KEYWORDS: evolutionary modelling, optimization, risk, reliability of structures, structural safety, emergency actions, removal of supports, life cycle

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimal structures design: accounting of costs and relative accidents risk. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):819-830. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Задачи оптимального проектирования несущих конструкций — актуальны для строительной науки. При этом в ряде исследований постановки задач не учитывают рисков наступления аварийных ситуаций [1, 2], что может при оптимальности того или иного решения существенным образом сказаться на безопасности объекта в период эксплуатации. Одной из мер получения наиболее рационального проекта конструкции с позиции оценки затрат на обеспечение безопасности зданий и сооружений является использование подходов, основанных на учете риска материальных потерь при эксплуатации сооружений [3–11]. Во многих исследованиях, посвященных данной тематике, рассматривались постановки задач, позволяющие учитывать надежность конструкции; риски, связанные с ошибками проектирования, уровнем нагруженности объекта, характером нагружения и др. Такие вопросы рассматривались для механически [9, 12–14] и экзотермически повреждаемых [15–17] железобетонных конструкций [18], стальных конструкций при климатических температурных воздействиях [19] и других несущих систем. В ряде случаев в расчетах учитывался полный жизненный цикл конструкции [20]. Интерес также представляет и анализ рисков материальных потерь при значительном ветровом давлении [10], сейсмической активности [4–6, 14], наводнениях [7] и прочих особых нагрузках и воздействиях. Отдельного внимания заслуживает вопрос оценки безопасности систем, имеющих повреждения, накапливаемые в процессе эксплуатации [21].

В современных социально-экономических условиях проблема обеспечения безопасности сооружений выходит на первый план. Прежде всего это относится к объектам повышенного уровня ответственности. Для несущих конструкций таких объектов риски, связанные с обеспечением безопасности, должны сводиться к рациональному минимуму. В связи с этим решение проблемы выхода проектных решений на оптимальное соотношение «затраты – риск» представляется особенно актуальным. Следует отметить, что до сих пор этой проблеме не уделяется достаточно внимания. Причина — в отсутствии до недавнего времени как эффективных методов оптимизации строительных несущих конструкций, так и вычислительной мощности компьютеров их реализующих. Одним из подходов, позволяющих существенно продвинуться в решении данной проблемы, является эволюционное моделирование или генетические алгоритмы. Сейчас они используются при решении задач оценки надежности сооружений [22–25], поиске параметров для конструкций различных типов, включая рамы [24], фермы [25], вантовые пешеходные мосты [26], стержневые купола и оболочки [27], многослойные панели с высокой способностью поглощения энергии [28], железобетонные плиты и многие другие объекты. Исследуются и вопросы адаптации и совершенствования генетических алгоритмов для решения рассматриваемых нами задач. Это прежде всего вопросы повышения эффективности поиска решения на начальных этапах итерационного процесса [29], использования комбинированной схемы учета ограничений [30]. Особо следует отметить концепции генетических алгоритмов, использую-

щие основы теории игр для поиска решений по нескольким критериям оптимальности, в частности базирующиеся на условии равновесия по Д. Нэшу, модели Г. Штакельберга и оптимальности по В. Парето [31].

В данной статье на основе генетического алгоритма выполняется разработка методологии оптимизации затрат и рисков материальных потерь для конструкций сооружений повышенного уровня ответственности при возникновении аварийных ситуаций. В качестве примера оценки количественных результатов использования предлагаемого подхода рассматривается параметрический синтез конструкции с учетом локальных механических повреждений опор. При этом учитываются следующие этапы жизненного цикла: проектирование с последующим изготовлением, монтаж и эксплуатация. Затраты на превентивные мероприятия и размер материального ущерба оцениваются с учетом объема локальных повреждений и сценариев их возникновения.

ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Рассматриваем несущую конструкцию на трех этапах жизненного цикла здания:

- проектирование с последующим изготовлением (период S_p);
- монтаж (период S_m);
- эксплуатация (период S_{op}).

Поскольку предъявляются требования к повышенному уровню ответственности, то в качестве одного из вариантов превентивных мероприятий рассмотрим увеличение сечения ключевых элементов конструкции, обеспечивающее ее живучесть при запроектных воздействиях. В качестве таких воздействий рассматриваем быстрое удаление из расчетной схемы любой одной опоры (сценарий $j1$) или любых двух (сценарий $j2$) опор балки. При этом для анализа риска рассматриваем варианты удаления опор, исходя из следующих условий:

- поврежденная система является геометрически неизменяемой;
- конструкция не разрушается при рассматриваемой схеме повреждений и рассматриваемых ограничениях.

Первоначально ставим задачу синтеза проектного решения:

$$C_{bar} = (C_{mb}(Y) + C_{mont} + C_{op}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_{bar} — суммарная стоимость конструкции в условных единицах (у.е.) на рассматриваемых этапах жизненного цикла; $C_{mb}(Y)$ — стоимость конструкции с учетом ее проектирования, изготовления и транспортировки; Y — дискретное множество варьируе-

мых параметров сечения балки; C_{mont} — стоимость монтажа конструкции; C_{op} — стоимость обслуживания конструкции в период эксплуатации.

В рассматриваемом случае стоимости проектирования и транспортировки являются постоянной величиной и их при варьировании проектных параметров можно не учитывать. Таким образом, величина $C_{mb}(Y)$ учитывает только стоимость материалов и изготовления конструкции, стоимость C_{mont} с учетом затрат на технику и оснастку можно приближенно принимать как 10–15 % от стоимости материала балки.

Стоимость C_{op} будем вычислять, используя формулу чистого дисконтированного дохода, с учетом того, что ежегодные затраты на эксплуатацию балки c'_k постоянны, а эксплуатационной прибыли балка условно не приносит.

$$C_{op} = \sum_k^T \frac{c'_k}{(1+e)^k}, \quad (2)$$

где T — период эксплуатации, лет; k — номер года начала затрат на обслуживание; e — норма дисконта. Далее ставим задачу минимизации относительного риска от наступления рассматриваемых сценариев аварийной ситуации на этапах жизненного цикла:

$$R(\{S\}) = (R_{p,j}/c_{p,j} + R_{m,j}/c_{m,j} + R_{op,j}/c_{op,j}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $R_{p,j}$, $R_{m,j}$, $R_{op,j}$ — риски наступления материальных потерь на этапах проектирования и производства, монтажа и эксплуатации соответственно; $c_{p,j}$, $c_{m,j}$, $c_{op,j}$ — затраты на изготовление, монтаж и эксплуатацию конструкции соответственно.

Риск R можно представить в виде:

$$R_{i,j} = p(S_i|j) U_{i,j}, \quad (4)$$

где $p(S_i|j)$ — условная вероятность наступления рискованной ситуации j из полной группы событий на этапе i жизненного цикла; $U_{i,j}$ — размер ущерба, соответствующий j -той рискованной ситуации в i -том периоде жизненного цикла сооружения.

Для вычисления полных ущербов от материальных потерь на рассматриваемых этапах жизненного цикла используем формулу:

$$\begin{aligned} U_{mb,tot} &= cm + U_{p,j}^p, \\ U_{mont,tot} &= \tilde{c}m_{mont} + U_{m,j}^p, \\ U_{op,tot} &= C_{op} + U_{op,j}^p, \end{aligned} \quad (5)$$

где c — стоимость единицы массы готовой конструкции с учетом соединений, определяемая по данным заводов поставщиков; $\tilde{c}$ — стоимость единицы массы монтажной оснастки; m , m_{mont} — массы соответственно изготовленной балки и ее элемен-

тов, повреждаемых в результате аварийной ситуации при монтаже.

Ущерб от потерь, связанных с выходом из строя оборудования, повреждаемого при аварии конструкции:

$$U^p = (\bar{N}_1 + \bar{N}_2)C, \quad (6)$$

где $\bar{N}_1$ — математическое ожидание числа единиц оборудования, постоянно работающего в пределах зоны повреждений разрушенными конструкциями при возникновении аварийной ситуации; $\bar{N}_2$ — математическое ожидание числа единиц оборудования, случайно оказавшегося в зоне поражения; C — стоимость единицы оборудования.

Ограничения. Ставится ограничение по перемещению, обеспечивающее возможность эвакуации людей, оказавшихся в аварийной ситуации и демонтажа или перемещения оборудования, а также ограничение по уровню пластических деформаций, которые не должны превышать значений, соответствующих пределу прочности материала. При этом используется доступная для изготовления номенклатура профилей конструктивных элементов.

Методика решения задачи:

1. Формируем пул сценариев локальных повреждений.
2. Для каждого из возможных сценариев выполняем оптимальное проектирование (параметрический синтез) конструкции с учетом вариантов повреждений, решая экстремальную задачу (1). Для этого при малом числе варьируемых параметров можно использовать модификации известных методов случайного поиска, например, Монте-Карло. При большом числе варьируемых параметров целесообразно использовать генетические алгоритмы [1, 2].
3. На основе данных, полученных на предыдущем этапе, вычисляем значения ущербов в каждом из рассматриваемых периодов жизненного цикла конструкции (5). При этом для оценки начальной проектной надежности используется теория, изложенная в работе [32].

4. Вычисляем риск (4) наступления аварийной ситуации на каждом периоде жизненного цикла, при этом для вычисления условных вероятностей можно воспользоваться формулой Байеса.

5. Для каждого из вариантов конструкции, найденного при оптимальном проектировании на этапе 2, вычисляем общий риск и решаем экстремальную задачу (3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим трехпролетную балку (рис. 1). В соответствии с предлагаемой методикой решения задачи выполняем ряд этапов:

1. Формирование сценариев локальных повреждений. В каждом из сценариев (групп событий) $j1, j2$ рассматриваем несколько вариантов локальных повреждений.

Для сценария $j1$:

а) выход из работы опоры A (ввиду симметрии системы этот вариант повреждений аналогичен устранению опоры D);

б) исключение опоры B (аналогично исключению опоры C).

Для сценария $j2$:

а) выход из работы опор B и C ;

б) исключение опор A и C ;

в) исключение опор A и B .

Удаление опор A и D не рассматриваем, так как при этом система становится геометрически изменяемой.

2. Параметрический синтез конструкции. Задаем значения нагрузок, действующих на рассматриваемую балку: $q_1 = 8$ кН, $q_2 = 15$ кН. Балка изготовлена из стали С245. Допускалось, что при аварии прогиб системы может достигать максимального значения в 0,8 м. Варьируются параметры сечений стержней $S_1 - S_3$ с учетом их группировки (группы G_1, G_2) из условия симметрии конструкции (см. рис. 1, б). Форма сечения и сочетания размеров, доступных для выбора, представлены в табл. 1.

Рис. 1. Расчетная схема балки (а) и начальные условия поиска решения (б)

Fig. 1. The load diagram of the beam (a) and the initial conditions for finding a solution (b)

Табл. 1. Допустимые сочетания размеров поперечных сечений стержней

Table 1. Permissible combinations of rods cross section sizes

Сочетание / Combination	Форма сечения / Section shape	Размеры, см / Dimensions, cm			
		h_1	δ_1	h_2	δ_2
W1		16	2,0	15	0,8
W2		20	2,0	18	0,8
W3		25	2,0	20	1,0
W4		28	3,0	25	1,0
W5		30	3,0	27	1,0
W6		32	3,0	29	1,0
W7		34	3,0	31	1,0
W8		36	3,5	33	1,2
W9		38	3,5	35	1,2
W10		40	4,0	36	1,2
W11		42	4,0	38	1,2
W12		46	4,0	42	1,4
W13		50	4,0	46	1,4
W14		55	5,0	50	1,6
W15		60	5,0	55	1,8

Используем вариант генетического алгоритма, описанного в работе [1]. Расчеты напряженно-деформированного состояния вариантов конструкций выполняем в статической физически нелинейной постановке с учетом влияния продольных сил на изгиб стержней. Используем метод конечных элементов, объект дискретизируется на элементы размером 1 м, нелинейная задача решается на основе метода последовательных приближений с учетом основных положений деформационной теории пластичности А.А. Ильюшина. Для каждой конструкции обеспечение условия сходимости решения достигалось не более чем за 10 итераций.

Для моделирования в статическом расчете динамических эффектов, возникающих при удалении опор, мы использовали квазистатическое значение нагрузки $q_d = k_d q$, где k_d — коэффициент динамики, определяемый с использованием метода Г.А. Гениева. Согласно этому методу, значение динамического усилия T_D , возникающего после исключения из расчетной схемы одной или нескольких опор, определяется зависимостью: $T_D = 2T_{SB} - T_{SA}$, T_{SB} , T_{SA} — усилия системы постоянной жесткости, получаемые при статических расчетах системы с удаленными связями и неповрежденной системы. Для перемещений запишем $k_d = \delta_D / \delta_{SA}$, δ_{SA} — статический

Табл. 2. Расчет динамических коэффициентов

Table 2. Calculation of dynamic coefficients

Сценарий запроектного воздействия / Emergency action scenario	δ_{SA} , см / cm	δ_{SB} , см / cm	k_d
j1, а	-0,757	-4,999	1,848
j1, б		-12,318	1,938
j2, а		-11,475	1,934
j2, б		-6,751	1,887
j2, в		$\approx 10^4$ *	$\approx 2,0$

Примечание: на заданном дискретном множестве параметров систему можно считать разрушенной при любых вариантах конструкции / on a given discrete set of parameters, the system can be considered destroyed with any design variants

прогиб неповрежденной системы. Для каждого рассматриваемого воздействия значения k_d рассчитаны в табл. 2.

Результаты поиска показаны в табл. 3. При вычислении значения C_{bar} стоимость C_{op} с учетом периода эксплуатации 50 лет и начала затрат на обслуживание с 10 года вычислялась при значении коэффициента дисконтирования $e = 0,2$ и постоянной по годам величине $c'_i = 8000$ у.е.: $C_{op}^{50} = 7748$ у.е.

Для вычисления рисков наступления последствий от запроектных воздействий зададим вероятность наступления аварии на каждом из этапов жизненного цикла. С учетом живучести конструкции при наступлении запроектного события из групп $j1$ и $j2$, а также при нормальной эксплуатации (НЭ) принимаем для проекта П4:

$$p(j1|S_p) = p(j2|S_p) = p(HЭ|S_p) = 0,001,$$

$$p(j1|S_m) = p(j2|S_m) = p(HЭ|S_m) = 0,05,$$

$$p(j1|S_{op}) = p(HЭ|S_{op}) = 10^{-5},$$

$$p(j2|S_{op}) = 0,0333.$$

Вероятности $p(j1|S_{op})$, $p(HЭ|S_{op})$ имеют малые значения, поскольку безопасность конструкции в этот период жизненного цикла обеспечивается превентивным увеличением сечения стержней бал-

ки. Для проекта П8 (см. табл. 3) эти вероятности на этапах S_p , S_m принимаем такими же, а вероятности на этапе S_{op} полагаем равными $p(j1|S_{op}) = p(j2|S_{op}) = p(HЭ|S_{op}) = 10^{-5}$. Условные вероятности $p(S_i|j)$ вычисляем, используя формулу Байеса, результаты вычислений представим в виде матриц (табл. 4, 5).

Близкое к нулю значение вероятностей обусловлено наличием свойства превентивной страховки балочной системы от отказа при свершении ситуаций НЭ и $j1$.

Как видно из табл. 5, наличие превентивного свойства предотвращения событий из группы $j2$ существенно снижает вероятность отказа конструкции. Если выполнить оптимальный синтез конструкции без превентивных мероприятий, то получим следующую матрицу (табл. 6). При вычислениях вероятностей в данной таблице принято, что наступление события из группы $j2$ в два раза менее вероятно, чем из группы $j1$.

Для оценки эффекта от наличия превентивных мероприятий выполним проектирование конструкции без этих мероприятий при ограничениях по напряжениям и перемещениям, устанавливаемых нормами проектирования. В результате синтеза получена конструкция с характеристиками, представленными в табл. 7.

Табл. 3. Результаты оптимального поиска

Table 3. Results of optimal search

Номер проекта / project	Сценарий повреждений, ситуация / Damage scenario, situation	C_{bar} , у.е.	C_{mb} , у.е.	Номер профиля стержня / Rod Section Number		
				S_1	S_2	S_3
П1	$j1$, а	343 287	279 616	W13	W9	W13
П2	$j1$, б	303 352	246 337	W10	W10	W10
П4	Итоговое решение / Final solution	387 471	292 095	W13	W10	W13
П5	$j2$, а	555 114	421 051	W15	W13	W15
П6	$j2$, б	385 717	314 975	W13	W13	W13
П7	$j2$, в	Решения не найдено / No solution found				
П8	Итоговое решение / Final solution	55 5114	421 051	W15	W13	W15

Табл. 4. Матрица условных вероятностей для проекта П4

Table 4. The matrix of conditional probabilities for the project P4

Ситуация / Situation	Эксплуатация S_{op} / Operation	Производство S_p / Manufacturing	Монтаж S_m / Assembling
НЭ / Failure at normal operation (FNO)	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Событие $j1$ / Emergency action $j1$	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Событие $j2$ / Emergency action $j2$	0,370370	0,012346	0,61728

Табл. 5. Матрица условных вероятностей для проекта П8

Table 5. The matrix of conditional probabilities for the project P8

Ситуация / Situation	Эксплуатация / Operation	Производство / Manufacturing	Монтаж / Assembling
НЭ / FNO	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Событие j1 / Emergency action j1	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Событие j2 / Emergency action j2	0,00019604	0,0196	0,980199961

Табл. 6. Матрица условных вероятностей для проекта без превентивных мероприятий (П9)

Table 6. The matrix of conditional probabilities for the project without preventive measures (P9)

Ситуация / Situation	Эксплуатация / Operation	Производство / Manufacturing	Монтаж / Assembling
НЭ / FNO	3,11324E-06	3,11E-08	1,55662E-06
Событие j1 / Emergency action j1	0,441499028	0,004415	0,220749514
Событие j2 / Emergency action j2	0,220749514	0,002207	0,110374757

Табл. 7. Проектное решение без наличия системы безопасности

Table 7. Design solution without security system

Номер проекта / Project	Условия эксплуатации / Operational condition	C_{bar} , у.е. / с.у.	C_{mb} , у.е. / с.у.	Номер профиля стержня / Rod section number		
				S_1	S_2	S_3
П9	Нормальная эксплуатация / Normal operation	172 425	137 231	W5	W4	W5

Выполняем расчет ущербов, связанных с отказом конструкции при различных ситуациях. Для рассматриваемой на рис. 1 конструкции величина материального ущерба составляет:

- на этапе эксплуатации — стоимость материала балки и перекрытия, повреждаемого в результате за-проектного воздействия;
- на этапе производства — стоимость материала балки и стоимость частичного восстановления прокатного стана;
- на этапе монтажа — стоимость материала балки и монтажной оснастки (при наличии), поврежденной в результате аварии.

Ущерб, связанные с утратой оборудования, вычисляем следующим образом. Принимаем вели-

чины $\bar{N}_1 = \bar{N}_2 = 1$ млн у.е. Считаем, что оборудование расположено в обоих пролетах балки. Следует отметить, что число единиц оборудования, имеющего потенциальную возможность попасть в аварийную ситуацию, определяется функциональным процессом в здании и совокупностью случайных факторов. Для определенности представим эти данные в табл. 8. Вычисляя по формуле (5) полное значение ущербов, определим по формулам (3), (4) значение относительных рисков в единицах риска (е.р.) для полученных нами проектных решений. Результаты представим в виде табл. 9.

Табл. 9 показывает, что для выбранных условий производства, монтажа и эксплуатации балочной конструкции наибольший риск наблюдается на эта-

Табл. 8. Число единиц оборудования, подверженных риску аварийной ситуации

Table 8. The number of equipment members at risk of an emergency

Эксплуатация / Operation		Производство / Manufacturing		Монтаж / Assembling	
$\bar{N}_1$	$\bar{N}_2$	$\bar{N}_1$	$\bar{N}_2$	$\bar{N}_1$	$\bar{N}_2$
1	4	2	0	3	0

Табл. 9. Расчет относительных рисков для балки

Table 9. Calculation of relative risks for the beam

Номер проекта / Project	Относительный риск (е.р.) на этапах жизненного цикла / Relative risk (risk units) at lifecycle stages			Суммарный риск / Total risk $R(\{S\})$
	S_{op}	S_p	S_m	
П4	278,7908	1,84181125	54,41167	335,04
П8	0,150829	2,033920858	61,94063	64,12
П9	485,2606	2,096702862	0,000465	487,35

Рис. 2. Данные о проектных решениях

Fig. 2. Data on design solutions

пе эксплуатации. При этом наличие превентивных мероприятий может его существенно снизить. Наиболее эффективным вариантом проекта с позиции обеспечения безопасности является конструкция, для которой $R(\{S\}) \rightarrow \min$. В данном случае это вариант проекта П8.

Оценим эффект от снижения рисков от введения превентивного увеличения сечения балки.

$$E_{j1} = \frac{R(\{S\})_{in} - R(\{S\})_{j1}}{R(\{S\})_{in}} = \frac{487,35 - 335,04}{487,35} = 31,2 \%;$$

$$E_{j2} = \frac{R(\{S\})_{in} - R(\{S\})_{j1+j2}}{R(\{S\})_{in}} = \frac{487,35 - 64,12}{487,35} = 86,8 \%.$$

Итоговые данные для принятия проектного решения представлены гистограммой (рис. 2), где видно, что наиболее рациональным решением с позиции соотношения минимального риска и минимальных начальных затрат, является вариант П4, предусматривающий превентивную защиту от разрушения любой одной опоры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана методика поиска оптимальных решений стальных балочных конструкций зданий повышенного уровня ответственности с учетом оценки первоначальных затрат и рисков возникновения аварий на этапах жизненного цикла, включающих производство, монтаж и эксплуатацию этих объектов. Результаты расчетов показали, что принимать проектное решение только с учетом минимума начальной стоимости изготовления и монтажа для таких конструкций недопустимо. Эти конструкции при отсутствии превентивных систем механической безопасности имеют большие относительные значения рисков наступления аварийной ситуации и, как следствие, их отказы могут повлечь тяжелые социально-экономические потери.

Рассматриваемый пример демонстрирует работоспособность предлагаемого подхода и показывает, что для принятых условий производства, монтажа и эксплуатации наиболее рациональным проектным решением с позиции минимизации затрат и рисков является вариант, обеспечивающий живучесть кон-

струкции при аварийном выключении только одной из опор.

В качестве перспектив дальнейших исследований можно отметить актуальность разработки и совершенствования методик такого типа для железобетонных стержневых и пластинчато-стержневых систем, таких как сборные каркасы зданий,

монолитные и сборно-монолитные каркасы с безбалочными перекрытиями. При этом в дальнейшей работе авторами планируется ввести стратегию многокритериального выбора решений на основе предложений работы [30], а также организовать учет надежности и рисков при проектировании конструкций в единой итерационной процедуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексейцев А.В., Ахременко С.А. Эволюционная оптимизация предварительно напряженных стальных рам // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5 (81). С. 32–42. DOI: 10.18720/MCE.81.4
2. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5 (40). С. 28–37. DOI: 10.5862/MCE.40.3
3. Schacht G., Käding M., Bolle G., Marx S. Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrissskorrosionsgefahr // Beton — und Stahlbetonbau. 2019. Vol. 114. Issue 2. Pp. 85–94. DOI: 10.1002/best.201800087
4. Veismoradi S., Cheraghi A., Darvishan E. Probabilistic mainshock-aftershock collapse risk assessment of buckling restrained braced frames // Soil Dynamics And Earthquake Engineering. 2018. Vol. 115. Pp. 205–216. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.08.029
5. Martins L., Silva V., Bazzurro P., Marques M. Advances in the derivation of fragility functions for the development of risk-targeted hazard maps // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 669–680. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.028
6. Shokrgozar H.R., Mansouri I., Hu J.W. Comparison of seismic reliability and risk assessment for special and intermediate steel moment frames // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. Issue 9. Pp. 3452–3461. DOI: 10.1007/s12205-018-0283-4
7. Lonetti P., Maletta R. Dynamic impact analysis of masonry buildings subjected to flood actions // Engineering Structures. 2018. Vol. 167. Pp. 445–458. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.076
8. Muntasir Billah A.H.M., Alam M.S. Probabilistic seismic risk assessment of concrete bridge piers reinforced with different types of shape memory alloys // Engineering Structures. 2018. Vol. 162. Pp. 97–108. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.02.034
9. Droogne D., Botte W., Caspee R. A multilevel calculation scheme for risk-based robustness quantification of reinforced concrete frames // Engineering Structures. 2018. Vol. 160. Pp. 56–70. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.052
10. Vanmarcke E., Lin N., Yau S.-C. Quantitative risk analysis of damage to structures during windstorms: some multi-scale and system-reliability effects // Structure and Infrastructure Engineering. 2014. Vol. 10. Issue 10. Pp. 1311–1319. DOI: 10.1080/15732479.2013.791325
11. Bezabeh M.A., Tesfamariam S., Popovski M., Goda K., Stierner S.F. Seismic base shear modification factors for timber-steel hybrid structure: collapse risk assessment approach // Journal of Structural Engineering. 2017. Vol. 143. Issue 10. P. 04017136. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001869
12. Tampazyan A., Zubareva S. Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the particular calculation for progressive destruction // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00163. DOI: 10.1051/mateconf/201711700163
13. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // Engineering Failure Analysis. 2018. Vol. 84. Pp. 300–310. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.011
14. Sattar S., Liel A.B. Collapse indicators for existing nonductile concrete frame buildings with varying column and frame characteristics // Engineering Structures. 2017. Vol. 152. Pp. 188–201. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.041
15. Tamrazyan A.G. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052021. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052021
16. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Behavior of compressed reinforced concrete columns under thermodynamic influences taking into account increased concrete deformability // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052034. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052034
17. Arabi S., Shafei B., Phares B.M. Investigation of fatigue in steel sign-support structures under diurnal temperature changes // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 153. Pp. 286–297. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.09.024
18. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function

and the boundary conditions // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 467. Pp. 404–409. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.467.404

19. Barone G., Frangopol D.M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost // *Structural Safety*. 2014. Vol. 48. Pp. 40–50. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.02.002

20. Liu Y.-F., Liu X.-G., Fan J.-S., Spencer B.F., Wei X.-C., Kong S.-Y. et al. Refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 99. Pp. 249–264. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.027

21. Truong V.-H., Kim S.-E. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm // *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 121. Pp. 59–74. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.03.006

22. Saad L., Chateaufneuf A., Raphael W. Robust formulation for reliability-based design optimization of structures // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 57. Issue 6. Pp. 2233–2248. DOI: 10.1007/s00158-017-1853-7

23. Le L.A., Bui-Vinh T., Ho-Huu V. An efficient coupled numerical method for reliability-based design optimization of steel frames // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 138. Pp. 389–400. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.08.002

24. Azad S.K. Seeding the initial population with feasible solutions in metaheuristic optimization of steel trusses // *Engineering Optimization*. 2018. Vol. 50. Issue 1. Pp. 89–105. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1284833

25. Ferreira F., Simoes L. Optimum design of a cable-stayed steel footbridge with three dimensional modelling and control devices // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. Pp. 510–523. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.038

26. Babaei M., Sheidaii M.R. Desirability-based design of space structures using genetic algorithm and fuzzy logic // *International Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 15. Issue 2. Pp. 231–245. DOI: 10.1007/s40999-016-0103-5

27. Karen I., Yazici M., Shukla A. Designing foam filled sandwich panels for blast mitigation using a hybrid evolutionary optimization algorithm // *Composite Structures*. 2016. Vol. 158. Pp. 72–82. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.07.081

28. Lu M., Ye J. Guided genetic algorithm for dome optimization against instability with discrete variables // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 139. Pp. 149–156. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.09.019

29. Серпик И.Н., Алексейцев А.В., Балабин П.Ю., Курченко Н.С. Плоские стержневые системы: оптимизация с контролем общей устойчивости // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8 (76). С. 181–192. DOI: 10.18720/MCE.76.16

30. Greiner D., Periaux J., Emperador J.M., Galván B., Winter G. Game theory based evolutionary algorithms: a review with Nash applications in structural engineering optimization problems // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. Vol. 24. Issue 4. Pp. 703–750. DOI: 10.1007/s11831-016-9187-y

31. Raizer V.D. Reliability of structures: analysis and applications. USA: Backbone Publishing Company, 2009. 146 p.

Поступила в редакцию 28 февраля 2019 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2019 г.

Одобрена для публикации 27 июня 2019 г.

О Б АВТОРАХ: Ашот Георгиевич Тамразян — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; TamrazyanAG@mgsu.ru;

Анатолий Викторович Алексейцев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AlekseytsevAV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Alekseytsev A.V., Akhremenko S.A. Evolutionary optimization of prestressed steel frames. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 81(5):32-42. DOI: 10.18720/MCE.81.4 (rus.).

2. Alekseytsev A.V. Evolutionary optimization of steel trusses with the nodal joints of rods. *Magazine of*

Civil Engineering. 2013; 40(5):28-37. DOI: 10.5862/MCE.40.3 (rus.).

3. Schacht G., Käding M., Bolle G., Marx S. Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr. *Beton — und Stahlbetonbau*. 2019; 114(2):85-94. DOI: 10.1002/best.201800087

4. Veismoradi S., Cheraghi A., Darvishan E. Probabilistic mainshock-aftershock collapse risk assessment of buckling restrained braced frames. *Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018; 115:205-216. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.08.029
5. Martins L., Silva V., Bazzurro P., Marques M. Advances in the derivation of fragility functions for the development of risk-targeted hazard maps. *Engineering Structures*. 2018; 173:669-680. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.028
6. Shokrgozar H.R., Mansouri I., Hu J.W. Comparison of seismic reliability and risk assessment for special and intermediate steel moment frames. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018; 22(9):3452-3461. DOI: 10.1007/s12205-018-0283-4
7. Lonetti P., Maletta R. Dynamic impact analysis of masonry buildings subjected to flood actions. *Engineering Structures*. 2018; 167:445-458. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.076
8. Muntasir Billah A.H.M., Alam M.S. Probabilistic seismic risk assessment of concrete bridge piers reinforced with different types of shape memory alloys. *Engineering Structures*. 2018; 162:97-108. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.02.034
9. Droogne D., Botte W., Caspee R. A multilevel calculation scheme for risk-based robustness quantification of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*. 2018; 160:56-70. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.052
10. Vanmarcke E., Lin N., Yau S.-C. Quantitative risk analysis of damage to structures during windstorms: some multi-scale and system-reliability effects. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014; 10(10):1311-1319. DOI: 10.1080/15732479.2013.791325
11. Bezabeh M.A., Tesfamariam S., Popovski M., Goda K., Stierner S.F. Seismic base shear modification factors for timber-steel hybrid structure: collapse risk assessment approach. *Journal of Structural Engineering*. 2017; 143(10):04017136. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001869
12. Tampazyan A.G., Zubareva S. Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the particular calculation for progressive destruction. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00163. DOI: 10.1051/mateconf/201711700163
13. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Failure Analysis*. 2018; 84:300-310. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.011
14. Sattar S., Liel A.B. Collapse indicators for existing nonductile concrete frame buildings with varying column and frame characteristics. *Engineering Structures*. 2017; 152:188-201. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.041
15. Tamrazyan A.G. Calculation of reinforced concrete plates with hole at long-term loading. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052021. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052021
16. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Behavior of compressed reinforced concrete columns under thermodynamic influences taking into account increased concrete deformability. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052034. DOI: 10.1088/1757-899x/365/5/052034
17. Arabi S., Shafei B., Phares B.M. Investigation of fatigue in steel sign-support structures under diurnal temperature changes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 153:286-297. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.09.024
18. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 467:404-409. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.467.404
19. Barone G., Frangopol D.M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost. *Structural Safety*. 2014; 48:40-50. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.02.002
20. Liu Y.-F., Liu X.-G., Fan J.-S., Spencer B.F., Wei X.-C., Kong S.-Y. et al. Fan refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members. *Automation in Construction*. 2019; 99:249-264. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.027
21. Truong V.-H., Kim S.-E. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2018; 121:59-74. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.03.006
22. Saad L., Chateaufneuf A., Raphael W. Robust formulation for reliability-based design optimization of structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018; 57(6):2233-2248. DOI: 10.1007/s00158-017-1853-7
23. Le L.A., Bui-Vinh T., Ho-Huu V. An efficient coupled numerical method for reliability-based design optimization of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 138:389-400. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.08.002
24. Azad S.K. Seeding the initial population with feasible solutions in metaheuristic optimization of steel trusses. *Engineering Optimization*. 2018; 50(1):89-105. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1284833
25. Ferreira F., Simoes L. Optimum design of a cable-stayed steel footbridge with three-dimensional modelling and control devices. *Engineering Structures*. 2019; 180:510-523. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.038
26. Babaei M., Sheidaii M.R. Desirability-based design of space structures using genetic algorithm and fuzzy logic. *International Journal of Civil Engineering*. 2017; 15(2):231-245. DOI: 10.1007/s40999-016-0103-5

27. Karen I., Yazici M., Shukla A. Designing foam filled sandwich panels for blast mitigation using a hybrid evolutionary optimization algorithm. *Composite Structures*. 2016; 158:72-82. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.07.081

28. Lu M., Ye J. Guided genetic algorithm for dome optimization against instability with discrete variables. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 139:149-156. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.09.019

29. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Yu., Kurchenko N.S. Flat rod systems: optimization with

overall stability control. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 8(76):181-192. DOI: 10.18720/MCE.76.16 (rus.).

30. Greiner D., Periaux J., Emperador J.M., Galván B., Winter G. Game theory based evolutionary algorithms: a review with nash applications in structural engineering optimization problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017; 24(4):703-750. DOI: 10.1007/s11831-016-9187-y

31. Raizer V.D. *Reliability of structures: analysis and applications*. USA, Backbone Publishing Company, 2009; 146.

Received February 28, 2019

Adopted in a modified form March 6, 2019

Approved for publication June 27, 2019

Bi notes: **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; TamrazyanAG@mgsu.ru;

Anatoly V. Alekseytsev — Candidate of Technical Sciences, Professor Assistant, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; AlekseytsevAV@mgsu.ru.