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

УДК 692

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30

Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений

А.Г. Тамразян, А.В. Алексейцев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Осуществлен обзор современных подходов к поиску оптимальных по различным критериям конструктивных решений для несущих строительных конструкций. Раскрыта проблематика поиска решений на дискретных множествах варьируемых параметров, отражающая современные подходы к проектированию с учетом доступной номенклатуры материалов и изделий. Сформулированы цели литературного обзора, его актуальность для современных социально-экономических условий, проведен краткий исторический экскурс, отражающий этапы развития поисковых методов. Основное внимание уделено новым метаэвристическим подходам, которые используются в мировой практике для оптимизации несущих систем.

Материалы и методы. Описаны методы поиска релевантной литературы в международных реферативных базах. Отбор источников проводился по международным реферативным базам Web of Science издательства Thomson Reuters, Scopus, El Compendex издательства Elsevier, имеющим проработанные инструменты для тематического поиска, а также гарантирующим легитимность и качество представляемых литературных источников.

Результаты. Современные методы поиска оптимальных конструктивных решений классифицированы по ряду признаков, включающих тип метаэвристического подхода, вид оптимизационного критерия, число целей оптимизации, способы учета ограничений, представление варьируемых параметров, учет этапов жизненного цикла, живучести, надежности, уровней безопасности объектов и рисков аварийных ситуаций. Изложен ряд наиболее перспективных методов оптимизации, базирующихся на математической формализации физических процессов, а также комбинированные поисковые стратегии. Рассмотрены некоторые градиентные подходы, методы математического программирования.

Выводы. Определено, что для удовлетворения современных требований к строительным несущим конструкциям, включая критерии безопасности, минимизации затрат в период жизненного цикла, надежности, живучести и других свойств, наибольшее распространение получили методы, имеющие аналогию с биологическими процессами в живой природе. Эти методы обладают возможностью относительно быстрой адаптации к решению широкого класса задач в строительстве. Анализ проведенного обзора показал, что наибольшие перспективы для решения задач оптимизации строительных конструкций имеют стохастические методы, оперирующие дискретными множествами параметров проектирования, что отражает специфику проектирования строительных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методы оптимизации, эволюционное моделирование, метаэвристический поиск, математическое программирование, оптимизация живучести, риск, надежность, безопасность, аварийные ситуации, жизненный цикл

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30

Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures

Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. A review of modern approaches to the search for design solutions, optimal by various criteria, for load-bearing construction structures is given. The paper discloses problems of finding solutions on discrete sets of variable parameters reflecting modern approaches to design considering the available range of materials and products. It also formulated the

goals of the literary review, its relevance to modern socio-economic conditions, and a brief historical digest reflecting the stages of development of search methods. The focus of the review is on new metaheuristic approaches that are used in world practice to optimize the load-bearing systems.

Materials and methods. The methods of searching for relevant literature in international scientific databases are described. The selection of sources was based on the international Web of Science databases by publishing house Thomson Reuters, Scopus, El Compendex by Elsevier publishing house which, had well-developed tools for thematic search as well as guaranteeing the legitimacy and quality of the literature.

Results. The article classified the modern methods of searching for optimal design solutions by several criteria. Those included the metaheuristic approach type, number of optimization goals, methods of considering constraints, presentation of varying parameters, consideration of life cycle stages, survivability, reliability, facility safety levels, and accident risks. A series of the most promising optimization methods based on the mathematical formalization of physical processes, as well as combined iterative strategies, are described. Attention is also paid to some gradient approaches and methods of mathematical programming.

Conclusions. The paper has shown that to meet modern requirements for building load-bearing structures, including safety criteria, minimizing costs during the life cycle, reliability, survivability, and other properties, the methods similar to biological processes in wildlife are most widely spread. These methods have a relatively fast adaptability to solve a broad class of problems in construction. Analysis of the reviewed sources showed that the far-reaching methods for solving problems of construction design optimization are stochastic methods using discrete sets of design parameters that reflect features of building structure design.

KEYWORDS: optimization methods, evolutionary modeling, metaheuristic search, mathematical programming, survivability optimization, risk, reliability, safety, emergencies, life cycle

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):12-30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий и уровня техники в строительной отрасли требует постоянного совершенствования методов оптимизации конструктивных решений для объектов нормального и повышенного уровней ответственности. С появлением высокопроизводительных компьютеров возникли широкие возможности для создания и совершенствования оптимизационных алгоритмов, в которых используются вероятностные подходы к поиску решений. Усложнение объемно-планировочных решений для объектов строительства приводит соответственно к росту сложности оптимизационных задач. В данных задачах, как правило, требуется варьировать несколько десятков параметров с учетом номенклатуры доступных материалов и изделий. В этом случае представить функцию цели в аналитическом виде весьма затруднительно. Для решения задач такого типа наиболее эффективны методы, базирующиеся на случайном поиске и оперирующие некоторыми основами нечеткой логики, например, принципами, основанными на процессах, протекающих в природе, моделирующих поведение некоторых организмов или физических явлений. Такие подходы к оптимизации в литературе получили название метаэвристических. Кроме того, достаточно эф-

фективно используются комбинированные стратегии, которые могут в едином поисковом процессе сочетать разные процедуры поиска или принципы учета ограничений. В существующих социально-экономических условиях особенно актуальным является выбор методики поиска рациональных решений с учетом как минимизации ресурсоемкости, так и безопасности.

Область научных исследований, связанная с современными методами оптимизации, развивается по мере развития вычислительных мощностей компьютеров, еще полвека назад для оптимального проектирования широко использовались методы, основанные на чувствительности целевой функции к изменениям варьируемых параметров. В этих методах условной и безусловной оптимизации целевая функция представлялась в виде аналитического выражения, а ее экстремум находился с помощью частных производных. Такие подходы в целом можно назвать градиентными. Следует отметить, что ряд задач оптимизации строительных конструкций и сейчас решается на их основе. Новым этапом в развитии поисковых методов стало развитие вычислительной техники и методов расчета напряженно-деформированного состояния строительных конструкций. В частности, с развитием метода конечных элементов и технологии многопоточных вычислений появились высокопроизводительные

стохастические алгоритмы, которые не требуют задания функции цели в явном виде.

Актуальные сегодня тенденции оптимизации лежат в области комбинированного применения различных поисковых методик и расширения возможностей оптимизации на основе нескольких критериев оптимальности. Релевантные в настоящее время smart-концепции проектирования требуют учета при оптимизации полного жизненного цикла сооружений или отдельных его этапов. Поэтому для обеспечения современного уровня отечественных научных исследований при разработке методов оптимизации представляется необходимым сделать литературный обзор мировых достижений данной предметной области. Другая цель обзора — описание основных современных подходов к оптимальному поиску решений для строительных конструкций с целью выявления перспектив их применения к решению различного рода оптимизационных задач. Следует отметить, что в отечественной научной литературе этим вопросам уделяется мало внимания.

МЕТОДЫ

Поиск релевантной мировой литературы осуществлялся путем применения следующего подхода. Был составлен глоссарий терминов по предметной области, который сопоставлялся с наиболее часто употребляемыми ключевыми словами в реферативных базах научного цитирования. В результате поиск проводился по этим базовым ключевым словам. Кроме того, в соответствии с возможностями поисковых систем выполнялся поиск по авторам и датам выпуска научных работ. Для отбора литературы использовались реферативные наукометрические базы данных Web of Science, Scopus, EI Compendex, РИНЦ, доступные в сети Интернет и на базе университета. Оценка качества публикаций выполнялась на основе следующих факторов:

- наименование и наукометрические показатели журнала, в частности квартиль цитируемости;
- число цитирований публикации другими исследователями;
- стиль изложения авторами материалов статьи, качество аннотации;
- наличие и число разобранных в статье примеров оптимизации конструкций;
- наличие в статье тестирования алгоритмов на математических функциях и стандартных примерах;
- объем ссылочной литературы, корректность ссылок на источники.

Для формирования библиографического списка использовались системы EndNote Web of Science и Mendeley с модификацией стиля оформления

Vancouver. В результате было отобрано 102 источника литературы, содержащие следующие классификационные признаки: тип конструкции (стальная, железобетонная, деревянная, композитная многослойная); число критериев оптимизации; учет особенностей проектирования строительных конструкций (жизненный цикл, необходимость учета нелинейностей, надежности, безопасности, рисков аварийных ситуаций); тип метода оптимизации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОБЗОРА

Современный процесс проектирования деформируемых систем, в частности строительных несущих конструкций, обычно требует выбора параметров на ограниченных дискретных множествах допустимых значений и выполнения топологической [1–8] оптимизации конструкций. Часто эти два аспекта совмещают в одной итерационной процедуре, в таком случае оптимизация называется структурно-параметрической. Для синтеза топологии конструкций (формообразования) используются следующие основные подходы:

- исключение элементов из некоторой базовой избыточной структуры с ограничениями на вес конструкции [1], действующие напряжения [2], перемещения [4], геометрическую изменяемость [5] и др.;
- алгоритмы, основанные на оценке плотностей и контактных давлений между частицами конструкции, представляемой в виде дискретизированной континуальной структуры [7];
- использование диаграмм Вороного [8] и триангуляции Делоне [9] для плоских конструкций или тетраэдризации для пространственных систем;
- использование индуктивного метода [10, 11], особенностью которого является возможность получения аналитических выражений для усилий, прогибов и других параметров конструкции, что создает широкие возможности как для топологической, так и для параметрической оптимизации. Реализация процедуры топологического синтеза конструкции на примере стандартной консольной фермы показана на рис. 1.

Следует отметить, что алгоритмы синтеза топологии составляют лишь малую часть от общего числа оптимизационных методов. Большую часть составляют методы однокритериальной параметрической оптимизации. Для относительно простых конструкций могут использоваться методы математического программирования, например, указанные в работах [12–16]. В частности, описываются приближенные решения задачи о коммивояжере [12], методы двухуровневого энергетического поиска [14], упрощенного интегрирования целевых функций методом ячеек [16].

Рис. 1. Топологический синтез конструкции: исходная система (a); результаты оптимизации при фиксированном положении узлов (b) и при изменении координат узлов (c, d)

Fig. 1. Topological synthesis of the design: the initial system (a); optimization results for a fixed position of nodes (b) and changed coordinates of nodes (c, d)

Рассмотрим основные общие методы поиска конструктивных решений. Эти методы содержат элемент случайности и позволяют решать широкий класс современных задач оптимизации строительных конструкций. Известен ряд подходов к оптимизации, таких как методы роя частиц [17–19], отжига [20, 21], светлячков [22, 23], муравьиной колонии [24, 25], теплопередачи [26], взрыва [27], поиска гармонии [28], генетические алгоритмы [29–31], нейронные сети [32–34] и т.п. Ряд из них имеет существенные ограничения для применения к задачам оптимизации строительных конструкций, поэтому в опубликованных научных работах рассматриваются лишь элементарные примеры. В методах роя частиц происходит движение к оптимальным решениям поисковых агентов-частиц, обменивающихся в процессе движения информацией с соседями по рюю. При этом каждая частица сохраняет информацию о лучшем из найденных ею решении и при нахождении на очередном цикле лучшего решения происходит обновление значений для каждой частицы и роя частиц в целом. Информация, которой обмениваются частицы, — это значение целевой функции и варьируемых параметров, а также в ряде случаев информация о степени выполнения поставленных ограничений (запасы прочности, жесткости) и т.п. Методы отжига ба-

зируются на принципе введения иных поисковых агентов. Это атомы, выстроенные в кристаллическую решетку, в которой с некоторой вероятностью допускаются перемещения атомов между ячейками. В качестве цели оптимизации предполагается минимизация температуры рассматриваемой виртуальной системы. В случае, если в кристаллической решетке переход приведет атом в состояние с меньшей энергией происходит падение температуры всей системы, т.е. движение к более оптимальному решению. Метод светлячков основан на использовании в качестве поисковых агентов — частиц, обладающих виртуальным параметром «яркости», т.е. так называемых светлячков. На каждой итерации поискового алгоритма светлячки сортируются по «яркости», определяющей близость к оптимальному решению, и происходит перемещение менее ярких светлячков к более ярким. При этом яркость зависит от расстояния между агентами и, если для светлячка нет никого более яркого, то он перемещается случайным образом. Алгоритмы теплопередачи, взрыва и поиска гармонии основаны на аналогичных физических явлениях. Отдельная большая область оптимизации конструктивных систем связана с генетическими алгоритмами, использующими основные принципы теории эволюции видов Ч. Дарвина. Использование алгоритмов,

Рис. 2. Иллюстрация этапов поиска экстремума на примере шести частиц: *a* — генерация вариантов конструкции (частиц); *b* — идентификация области допустимых решений. Выбор направления движения и скорости частиц; *c* — движение частиц с преодолением локальных оптимумов; 1 — генерированные частицы; 2 — изополя значений функции цели; 3 — направления движения частиц; 4 — граница, отделяющая область допустимых решений (снизу) от области недопустимых решений

Fig. 2. Illustration of extremum seeking stages by the example of six particles: *a* — generation of design variants (particles); *b* — identification of the region of feasibility. Choice of the direction of motion and particle velocity; *c* — particle motion with overcoming local optimums; 1 — generated particles; 2 — distribution of goal function values; 3 — directions of particle motion; 4 boundary curve separating the region of feasibility (bottom edge) from the region of infeasibility

основанных на применении нейронных сетей позволяет реализовывать поиск оптимума с самообучением. Используя нейронные сети, возможно выполнять имитационное моделирование, в ходе которого будет с той или иной степенью точности определяться значение функции цели, а затем можно реализовывать различные методы оптимизации, в том числе генетические алгоритмы, методы роя и др. Основные этапы оптимизации на основе аналогии роя частиц представлены на рис. 2.

Каждый из общих методов оптимизации адаптируется к поиску решений исходя из следующих признаков: материал, из которого изготавливается конструкция; тип конструктивной системы; жизненный цикл; учет особенностей эксплуатации; возможность аварийных ситуаций и связанные с этим надежность и риски. Первоначально рассмотрим работы по оптимизации конструкций различных типов. Оптимизируются композитные сталебетонные [33] и деревянно-бетонные конструкции [15], тонкостенные взрывозащитные панели [35], многослойные пластинчатые системы из двух материалов [37], а также слоистые стержни из различных материалов [38]. Для оптимизации композитных систем наиболее часто применяются генетические алгоритмы [36] и методы роя частиц [30, 39, 40]. При этом решаются как одноцелевые, так и многоцелевые задачи [39] при варьировании геометрии слоев [36] и нагелей, их соединяющих [40].

Для стальных конструкций решаются следующие основные задачи: оптимизация конструктивных решений для сейсмостойких конструкций рам с учетом типа узлов соединений [41], наличия в составе

рамы пластины, работающей на знакопеременную сдвиговую нагрузку [43]. Минимизируется вес слоистых металлоконструкций [45], а также плоских и пространственных ферменных конструкций [46, 47]. Оптимальное проектирование стальных конструкций выполняется также с учетом жизненного цикла сооружения [49], контроля общей устойчивости [50] и возможности прогрессирующего разрушения [48]. Для решения этих задач используются преимущественно методы Монте-Карло [42], роя частиц и генетические алгоритмы [44, 46].

Оптимизация железобетонных конструкций выполняется с учетом их сейсмостойкости [51, 62], безопасности и надежности с учетом риска проектных воздействий [52, 60, 64]. Минимизация веса этих конструкций достигается с помощью выбора рациональных схем армирования [52, 58, 59]. Отдельным направлением является поиск рациональных решений для железобетонных балок и колонн заводского изготовления с учетом влияния производственных факторов, например, расходуемой на изготовление тепловой энергии [54], факторов внешней среды, вызывающих коррозионные повреждения [57], а также выбросов в атмосферу углекислого газа [63]. Рассмотрен выбор рациональной стоимости восстановительных мероприятий при реконструкции и ремонте железобетонных систем [55], а также их многовариантном нагружении [61]. Предложен метод оптимизации железобетонных систем с учетом частичного прогрессирующего разрушения [56]. Основные методы решения этих задач — генетические алгоритмы и модификации алгоритмов роя частиц [57]. Пример реали-

зации генетического алгоритма (SGA) для поиска рационального конструктивного решения показан на рис. 3.

Значительно меньше исследований посвящено деревянным конструкциям. Прежде всего внимание уделяется минимизации стоимости многослойных деревянных панелей и оболочек [65, 67] с учетом проектирования, изготовления и эксплуатации. Выполняется поиск оптимальных по критерию стоимости и огнестойкости защитных покрытий на основе древесины [66]. Затрагиваются вопросы оптимального проектирования деревянных ферм с учетом податливости их узлов [70], а также восстановления и повышения надежности поврежденных деревянных балок [68]. Разработаны методики оптимального проектирования деревянных конструкций,

учитывающие оценки их технического состояния в период жизненного цикла [64, 69].

Важным вопросом при оптимальном проектировании строительных конструкций является учет их надежности. Наиболее распространены в поисковых алгоритмах вероятностные модели надежности, а методы, их использующие, получили название RBDO (Reliability-based design optimization — оптимизация на основе анализа надежности). При этом в процессе поиска преимущественно учитываются отказы конструкций, связанные с разбросом механических характеристик материалов и дисперсией нагрузок. Так, в трудах [71, 72, 74, 75] такие алгоритмы оптимизации разработаны для железобетонных рамных и плитных конструкций. В работе [71] проектная надежность системы рассматривается как

Рис. 3. Реализация генетического алгоритма оптимизации для несущей конструкции

Fig. 3. Implementation of genetic algorithm for load-bearing structure optimization

признак отнесения ее к определенному уровню безопасности, в статье [72] исследуется поиск решений при одновременном действии на плиты сосредоточенных сил и температурных воздействий. В работе [74] для железобетонных конструкций в процессе оптимизации учитывается взаимодействие с грунтовым основанием. Разработаны также поисковые схемы и для стальных стержневых конструкций [73, 76, 77]. При этом особое внимание уделяется мостовым сооружениям [76, 77], для которых кроме минимизации стоимости «в деле» на основе вероятностной модели надежности рассматривается и минимизация так называемой стоимости разрушений при наступлении отказа, оценка срока службы конструкции и устанавливается «коэффициент важности сооружения», определяющий по существу его уровень ответственности

С вопросами надежности в оптимальном проектировании связан и учет рисков аварийных ситуаций [83, 78]. Для различных типов конструкции разработаны схемы поиска оптимальных решений с учетом как материальных [79, 80], так и социальных [82] потерь. Основными потенциальными угрозами аварийной ситуации в работах, связанных с оценкой риска, являются коррозионные повреждения [81], а также природные и антропогенные внешние воздействия, приводящие к выключению из работы конструкций одной или нескольких опор [80]. В качестве основных поисковых инструментов в работах, связанных с оценкой безопасности и рисков, используются генетические алгоритмы [78, 80], метод Монте-Карло [79] и другие метаэвристические методы.

Стремительно развивающимся трендом в теории оптимизации несущих систем, в частности в области строительства, является учет жизненного цикла в процессе поиска [84]. При этом в качестве этапов жизненного цикла часто рассматриваются строительство, эксплуатация, реконструкция и утилизация сооружения. На основе такого подхода к оптимизации решен ряд важных задач. В публикации [85] для сооружений пассивного ветряного охлаждения минимизируется стоимость жизненного цикла, для железобетонных конструкций рассматриваются случаи оптимизации конструктивных решений с учетом сейсмического воздействия [87], превентивного предотвращения образования коррозионных повреждений [88] и действия агрессивных сред [86] на этапе эксплуатации. С учетом жизненного цикла и привязки к географическому положению оптимизировались стеновые конструкции [89], при этом на этапе эксплуатации кроме прочностных и деформационных критериев рассматривались вопросы теплопереноса и паропроницаемости этих ограждающих конструкций.

Другая современная тенденция в оптимизации — мультикритериальная оптимизация. В этих методах поиск решения осуществляется по нескольким целям. В качестве общего критерия оптимальности в этих работах чаще всего используются известные принципы В. Парето и Д. Неша [90]. Часто на основе многокритериальной оптимизации решаются междисциплинарные задачи, в которых к несущей конструкции предъявляются требования из нескольких смежных дисциплин, например, из архитектуры, теплотехники, акустики и т.п. При-

Рис. 4. Вариант представления многокритериального подхода к оптимизации

Fig. 4. A variant of a multi-criteria optimization approach presentation

менительно к строительной конструкции многокритериальный подход может быть изображен на рис. 4.

На основе нескольких критериев оптимальности выполнялся поиск конструктивных решений высотных зданий с гасителями сейсмических колебаний [91], разработаны подходы к оптимизации износостойкости для стальных трубчатых конструкций [92], минимизации веса многослойных пластин [93], проектирования взрывозащитных панелей зданий [94]. Работа [95] решает мультидисциплинарную задачу оптимизации сферических оболочек, которые служат покрытиями над спортивными сооружениями. В качестве критериев оптимальности здесь выделяются три группы: энергосбережение, светопропускание, прочностные и деформационные характеристики. Во многих многокритериальных задачах инструментом поиска решений являются генетические алгоритмы и алгоритмы роя частиц, в том числе используемые совместно с системами машинного обучения [96, 98].

Одна из современных проблем, связанных с развитием метаэвристических оптимизационных алгоритмов, — повышение их сходимости при варьировании большим числом параметров. По существу, в настоящее время обеспечить гарантированную сходимость таких алгоритмов к одному решению, являющемуся глобальным оптимумом, не представляется возможным. Однако продвигаться в этом направлении позволяют подходы, основанные на имитационном моделировании и введении в итерационный процесс мягких штрафных функций. Так, например, в работе [68] для повышения сходимости генетического алгоритма поиска параметров системы усиления балки для каждого ее варианта вычисляется величина функции цели, которая умножается на коэффициент штрафа «P»:

$$P = \begin{pmatrix} 1 + \chi \left(\frac{\sigma}{[\sigma]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\sigma}{[\sigma]} - 1 \right) k_{\sigma} + \\ + \chi \left(\frac{N_{cr}}{[N_{cr}]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{N_{cr}}{[N_{cr}]} - 1 \right) k_N + \\ + \chi \left(\frac{\delta}{[\delta]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\delta}{[\delta]} - 1 \right) k_{\delta} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где k_{σ} , k_N , k_{δ} — задаваемые коэффициенты, учитывающие долю значимости штрафа при нарушении соответствующего ограничения; σ , N_{cr} , δ — максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в элементе протеза, максимальная критическая сила для элемента протеза, перемещение восстановленной системы соответственно; $[\sigma]$, $[N_{cr}]$, $[\delta]$ — допускаемые значения этих величин; $\chi(x)$ — функция Хевисайда от вещественного аргумента x $\chi(x) = 0$, если $x < 0$; $\chi(x) = 1$, если $x \geq 0$. Имитационная мо-

дель (ИМ) (2) может представлять собой простейшую экспертную систему, позволяющую выполнять оценки удовлетворения ограничений для промежуточных вариантов конструкций без применения развернутой процедуры анализа по методу конечных элементов. Система уравнений этой экспертной системы может быть сформирована на базе реплики полного факторного численного эксперимента в следующем виде:

$$\text{ИМ} = \left\langle \{x_i, x'_j, y, h(x_i, y), P\} \mid i \in N, j \in K \right\rangle, \quad (2)$$

где x_i — набор входных переменных моделируемого объекта; x'_j — набор выходных параметров; y — функция с аргументами x_i , позволяющая вычислить x'_j ; $h(x_i, y)$ — множество ограничений величин x_i и y ; P — решатель, осуществляющий использование имитационной модели; N, K — множества натуральных чисел.

При формировании решателя, например, для априорных оценок напряжений может вводиться схема дробного факторного эксперимента, где для каждого нагружения конструкции уравнения регрессии представляется в виде

$$t_{mj} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \tilde{x}_i, \quad (j = 1, \dots, j_1); \\ \tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i, \quad \bar{x}_i = (x_{i,\min} + x_{i,\max})/2, \quad (3)$$

где t_{mj} — значение величины напряжения для точки сечения конструктивного элемента или для конструкции; a_0 , b_0 — свободные коэффициенты; a_i , $(i = 1, 2, \dots, n)$ — основные коэффициенты уравнения регрессии; n — число параметров; j_1 — число уравнений для определения t_{mj} ; $m = 1, 2, \dots, m_0$ — номер нагружения; m_0 — число нагружений; x_i — величина i -го изменяемого параметра; $x_{i,\min}$, $x_{i,\max}$ — минимальное и максимальное допускаемые значения для этого параметра. Формулы для нахождения t_{mj} определяются положениями теории сопротивления материалов.

Анализ литературы позволил выявить ряд конкурентных преимуществ рассмотренных подходов к поиску рациональных решений по сравнению с градиентными методами, а также с алгоритмами, реализующими «чисто» случайный поиск. Прежде всего, это возможность учета в едином итерационном процессе всех необходимых этапов жизненного цикла сооружения. Реализовать, например, расчет стоимости жизненного цикла можно, используя принцип организации многопоточных вычислений. В каждом потоке рассматривается один этап жизненного цикла и соответствующие ему затраты, при этом связь между этапами может осуществляться системой аналитических выражений или стохастических зависимостей [83, 91]. Применительно

к генетическим алгоритмам учет жизненного цикла можно организовать с помощью изолированных параллельно эволюционирующих наборов проектных решений. Другим преимуществом по сравнению с градиентными подходами является ориентированность на номенклатуру производителя. Данный принцип состоит в том, что дискретные множества параметров формируются исходя из конкретных характеристик сортов производимых изделий, что позволяет получать готовые конструктивные решения. При этом конструктивные требования могут быть учтены расширенными инструментами группировки параметров, включая и условия симметрии, и сохранение габаритных размеров, и обеспечение требуемых зазоров, и т.п. [52, 73]. Традиционное проектирование и оптимизация не имеют таких возможностей. Еще одним значимым преимуществом является автоматизированное формирование структуры конструкций. Как правило, структуру конструкции на начальном этапе формирует проектировщик, а затем выполняется оптимизация параметров. Такой подход может существенно сузить выбор рациональной топологии конструкции, особенно в случае сложных систем. Использование в процессе поиска описанных выше алгоритмов избыточных структур [29], разбиения плоскости или пространства на примитивы [97] позволяет получать несколько вариантов топологии, из которых можно выбрать наиболее соответствующий поставленной задаче.

Завершая основную часть обзора, следует отметить совокупность методов оптимизации, предметом исследования которых не являются проектные параметры несущих конструкций, определяющие прочность, жесткость, геометрию сечения или ее топологию. Это методы оптимального проектирования организационно-технологических решений при строительстве объектов [99]. Выбор их рациональных параметров может значительно сказаться на итоговой стоимости жизненного цикла как конструкции, так и здания в целом. Очень важной в этом смысле является идея работы [100], где на основе поиска решений по известным критериям теории принятия решений в условиях неопределенности А. Вальда и Л. Сэвиджа с применением метода А. Гурвица для оценки устойчивости системы в условиях неопределенности выбираются тип и конструкция слоистых наружных стен. В итоге получается рациональное с позиции энергосбережения, распределения времени и ресурсов на производство работ решение. Известны также и однокритериальные подходы к решению задач оценки времени строительства с учетом случайных факторов и рационального распределения ресурсов на основе генетических алгоритмов [101, 102].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на проведенном обзоре литературы можно сформулировать следующие результаты:

- для решения современных задач оптимизации несущих строительных конструкций получают широкое распространение метаэвристические методы поиска, основанные на математической формализации природных явлений;
- с усложнением конструктивных решений и эксплуатационных требований для строительных несущих систем получают развитие методы многокритериальной оптимизации, учитывающие как особенности проектирования объектов, так и воздействия в период их жизненного цикла, включая ситуации, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации;
- наиболее перспективным методом поиска оптимальных решений как для однокритериальных, так и для многокритериальных схем, по нашему мнению, являются генетические алгоритмы и их модификации.

В качестве обсуждения можно заметить, что в настоящем обзоре уделено внимание далеко не всем метаэвристическим и градиентным подходам к оптимизации, однако оставшиеся за рамками данной работы методы, в той или иной степени имеют сходство с описанными выше методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задач оптимизации в современных социально-экономических условиях, формирующих требования к объектам проектирования, в частности к несущим конструкциям, представляется особенно актуальным. С внедрением информационного моделирования и smart-концепций практически во все области строительства необходимость в проектировании рациональных несущих конструкций требует применения самых современных и высокопроизводительных методов оптимизации. Это обуславливает систематическую необходимость литературного обзора в данной области.

Проведенный обзор продемонстрировал, что современный уровень развития алгоритмов оптимизации для строительных конструкций дает возможность находить рациональные конструктивные решения для широкого класса задач, в число которых входит как синтез топологии, так и поиск параметров проектирования, представленных в виде дискретных множеств. При этом большую эффективность показывают вероятностные метаэвристические методики, основанные на эволюционном моделировании и на алгоритмах роя частиц. Развитие информационных технологий, в том числе много-

поточных параллельных вычислений, облачных вычислений к настоящему времени позволило решать многокритериальные поисковые задачи с несколькими десятками независимо варьируемых параметров.

Перспективное совершенствование этих алгоритмов для практики строительного проектирования позволит получать новые эффективные проектные решения с обеспечением ряда требований, продиктованных современными социально-

экономическими условиями. Развитие алгоритмов поискового процесса в рассмотренных подходах к оптимизации несущих конструкций даст возможность более точно решать задачи переборного типа большой размерности как для строительства, так и для других областей техники, что является одной из актуальных и значимых в последнее десятилетие научных проблем, требующих решения и с позиции науки, и практики проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cao H., Qian X., Chen Z., Zhu H. Enhanced particle swarm optimization for size and shape optimization of truss structures // *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49. Issue 11. Pp. 1939–1956. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1273912
2. Jain N., Saxena R. Effect of self-weight on topological optimization of static loading structures // *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57. Issue 2. Pp. 527–535. DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.006
3. Yang D., Liu H., Zhang W., Li S. Stress-constrained topology optimization based on maximum stress measures // *Computers and Structures*. 2018. Vol. 198. Pp. 23–39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.008
4. Huang X., Xie Y.M. Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. DOI: 10.1002/9780470689486
5. Lynn N., Ali M.Z., Suganthan P.N. Population topologies for particle swarm optimization and differential evolution // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018. Vol. 39. Pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.sw-evo.2017.11.002
6. Rahami H., Kaveh A., Gholipour Y. Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Issue 9. Pp. 2360–2369. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.01.012
7. Niu C., Zhang W., Gao T. Topology optimization of continuum structures for the uniformity of contact pressures // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60. Issue 1. Pp. 185–210. DOI: 10.1007/s00158-019-02208-8
8. Podestá J.M., Méndez C.G., Toro S., Huespe A.E., Oliver J. Material design of elastic structures using Voronoi cells // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018. Vol. 115. Issue 3. Pp. 269–292. DOI: 10.1002/nme.5804
9. 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
10. Kirsanov M.N. The deflection of spatial coatings with periodic structure // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8 (76). С. 58–66. DOI: 10.18720/MCE.76.6
11. Кирсанов М.Н. Анализ прогиба фермы пространственного покрытия с крестообразной решеткой // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 4 (64). С. 52–58. DOI: 10.5862/MCE.64.5
12. Komzsik L. Mathematical optimization // *Approximation Techniques for Engineers*. 2018. Pp. 331–354. DOI: 10.1201/9781315205007-14
13. Gandomi A.H., Yang X.S., Talatahari S., Alavi A.H. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization // *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*. 2013. Pp. 1–24. DOI: 10.1016/B978-0-12-398364-0.00001-2
14. Aliawdin P., Urbańska K. Limit analysis of geometrically hardening rod systems using bilevel programming // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 89–98. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.014
15. Schröter H., Simon A., Timmler H.G., Rautenstrauch K., Raue E. Zur berechnung von holz-betonverbundträgern mit methoden der mathematischen optimierung // *Bautechnik*. 2010. Vol. 87. Issue 8. Pp. 474–481. DOI: 10.1002/bate.201010034
16. Sun J.Q., Xiong F.R., Schütze O., Hernández C. Cell mapping methods: Algorithmic approaches and applications. 2018. 226 p. DOI: 10.1007/978-981-13-0457-6
17. Lalwani S., Sharma H., Satapathy S.C., Deep K., Bansal J.C. A survey on parallel particle swarm optimization algorithms // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44. Issue 4. Pp. 2899–2923. DOI: 10.1007/s13369-018-03713-6
18. Perez R.E., Behdinan K. Particle swarm approach for structural design optimization // *Computers and Structures*. 2007. Vol. 85. Issue 19–20. Pp. 1579–1588. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.10.013
19. Alekseytsev A.V., Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 7 (83). С. 175–185. DOI: 10.18720/MCE.83.16
20. Akbulut M., Sonmez F.O. Design optimization of laminated composites using a new variant of simulated annealing // *Computers and Structures*. 2011.

Vol. 89. Issue 17–18. Pp. 1712–1724. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.04.007

21. *Paya-Zaforteza I., Yepes V., Hospitaler A., González-Vidosa F.* CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing // *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. Issue 7. Pp. 1501–1508. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.034

22. *Wahid F., Alsaedi A.K.Z., Ghazali R.* Using improved firefly algorithm based on genetic algorithm crossover operator for solving optimization problems // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2019. Vol. 36. Issue 2. Pp. 1547–1562. DOI: 10.3233/JIFS-181936

23. *Durbhaka G.K., Selvaraj B., Nayyar A.* Firefly swarm: metaheuristic swarm intelligence technique for mathematical optimization // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Pp. 457–466. DOI: 10.1007/978-981-13-1274-8_34

24. *Manju M., Kant C.* Ant colony optimization: a swarm intelligence based technique // *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol. 73. Issue 10. Pp. 30–33. DOI: 10.5120/12779-9387

25. *Kaveh A., Farahmand Azar B., Hadidi A., Rezazadeh Sorochi F., Talatahari S.* Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization // *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. Vol. 66. Issue 4. Pp. 566–574. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.11.006

26. *Degertekin S.O., Lamberti L., Hayalioglu M.S.* Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017. Vol. 14. Issue 3. Pp. 373–397. DOI: 10.1590/1679-78253297

27. *Sadollah A., Bahreininejad A., Eskandar H., Hamdi M.* Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables // *Computers and Structures*. 2012. Vol. 102–103. Pp. 49–63. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.013

28. *Mashayekhi M., Salajegheh E., Dehghani M.* Topology optimization of double and triple layer grid structures using a modified gravitational harmony search algorithm with efficient member grouping strategy // *Computers and Structures*. 2016. Vol. 172. Pp. 40–58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.05.008

29. *Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y.* Mixed approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017. Vol. 61. Issue 3. Pp. 471–482. DOI: 10.3311/PPci.8125

30. *Alekseytsev A.V., Akhremenko S.A.* Evolutionary optimization of prestressed steel frames // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 5 (81). С. 32–42. DOI: 10.18720/MCE.81.4

31. *Abdi M., Ashcroft I., Wildman R.* Topology optimization of geometrically nonlinear structures using an evolutionary optimization method // *Engineering*

Optimization. 2018. Vol. 50. Issue 11. Pp. 1850–1870. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1418864

32. *Abouhamze M., Shakeri M.* Multi-objective stacking sequence optimization of laminated cylindrical panels using a genetic algorithm and neural networks // *Composite Structures*. 2007. Vol. 81. Issue 2. Pp. 253–263. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.08.015

33. *Cardozo S.D., Gomes H.M., Awruch A.M.* Optimization of laminated composite plates and shells using genetic algorithms, neural networks and finite elements // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 8. Issue 4. Pp. 413–427. DOI: 10.1590/S1679-78252011000400003

34. *Shirakawa S., Iwata Y., Akimoto Y.* Dynamic optimization of neural network structures using probabilistic modeling // *32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2018*. 2018.

35. *Yang C., Xu P., Yao S., Xie S., Li Q., Peng Y.* Optimization of honeycomb strength assignment for a composite energy-absorbing structure // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 127. Pp. 741–755. DOI: 10.1016/j.tws.2018.03.014

36. *Muc A., Gurba W.* Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures // *Composite Structures*. 2001. Vol. 54. Issue 2–3. Pp. 275–281. DOI: 10.1016/S0263-8223(01)00098-8

37. *Coelho P.G., Guedes J.M., Rodrigues H.C.* Multiscale topology optimization of bi-material laminated composite structures // *Composite Structures*. 2015. Vol. 132. Pp. 495–505. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.059

38. *Blasques J.P., Stolpe M.* Multi-material topology optimization of laminated composite beam cross sections // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. Issue 11. Pp. 3278–3289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.05.002

39. *Suresh S., Sujit P.B., Rao A.K.* Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design // *Composite Structures*. 2007. Vol. 81. Issue 4. Pp. 598–605. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.10.008

40. *Lin J.P., Wang G., Xu R.* Particle swarm optimization-based finite-element analyses and designs of shear connector distributions for partial-interaction composite beams // *Journal of Bridge Engineering*. 2019. Vol. 24. Issue 4. P. 04019017. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001371

41. *Kaveh A., Ghafari M.H., Gholipour Y.* Optimum seismic design of steel frames considering the connection types // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 130. Pp. 79–87. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.12.002

42. *Myasnichenko V., Sdobnyakov N., Kirilov L., Mikhov R., Fidanova S.* Monte Carlo approach for modeling and optimization of one-dimensional bimetallic nanostructures // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intel-*

- ligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2019. Pp. 133–141. DOI: 10.1007/978-3-030-10692-8_15
43. Guo Z., Zhu F., Wang Y., Chang H. Optimization analysis on steel frame with short-limb steel plate composite shear wall // *Progress in Steel Building Structures*. 2017. Vol. 19. Issue 4. Pp. 36–42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2017.04.005
44. Cazacu R., Grama L. Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA // *Procedia Technology*. 2014. Vol. 12. Pp. 339–346. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.496
45. Ho-Huu V., Vo-Duy T., Duong-Gia D., Nguyen-Thoi T. An efficient procedure for lightweight optimal design of composite laminated beams // *Steel and Composite Structures*. 2018. Vol. 27. Issue 3. Pp. 297–310. DOI: 10.12989/scs.2018.27.3.297
46. Erbaturo F., Hasançebi O., Tütüncü İ., Kılıç H. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms // *Computers and Structures*. 2000. Vol. 75. Issue 2. Pp. 209–224. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00084-X
47. Chen M., Zhao Y., Xie Y. Topology optimization and additive manufacturing of nodes in spatial structures // *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 52. Issue 2. Pp. 1–10.
48. Hassanzadeh A., Gholizadeh S. Collapse-performance-aided design optimization of steel concentrically braced frames // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 197. P. 109411. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109411
49. Sarma K.C., Adeli H. Life-cycle cost optimization of steel structures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2002. Vol. 55. Issue 12. Pp. 1451–1462. DOI: 10.1002/nme.549
50. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y., Kurchenko N.S. Flat rod systems: Optimization with overall stability control // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8 (76). С. 181–192. DOI: 10.18720/MCE.76.16
51. Zhang C., Tian Y. Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete frame buildings // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 185. Pp. 15–25. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.108
52. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 04005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199704005
53. Amir O. A topology optimization procedure for reinforced concrete structures // *Computers and Structures*. 2013. Vol. 114–115. Pp. 46–58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.10.011
54. Yeo D., Gabbai R.D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 8. Pp. 2028–2033. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.04.014
55. Lee C.K., Kim S.K. GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks // *Automation in Construction*. 2007. Vol. 16. Issue 2. Pp. 153–164. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.03.001
56. Tamrazyan A.G., 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
57. Esfandiari M.J., Urgessa G.S., Sheikholesarefin S., Manshadi S.H.D. Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMP SO algorithm // *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 115. Pp. 149–160. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.09.007
58. Kulkarni A.R., Bhusare V. Structural optimization of reinforced concrete structures // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2016. Vol. V5. Issue 07. DOI: 10.17577/ijertv5is070156
59. Тамразян А.Г., Долганов А.И., Калеев Д.И., Жихарев Ф.К., Звонов Ю.Н., Зубарева С.Э., Убыш А. К вероятностной оценке надежности железобетонных многопустотных панелей перекрытий // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 4 (370). С. 267–271.
60. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов — необходимое условие безопасности зданий и сооружений // *Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений»*. 2009. № 1. С. 160–171.
61. Bruggi M. A numerical method to generate optimal load paths in plain and reinforced concrete structures // *Computers and Structures*. 2016. Vol. 170. Pp. 26–36. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.03.012
62. Kaveh A., Zakian P. Optimal seismic design of reinforced concrete shear wall-frame structures // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 18. Issue 7. Pp. 2181–2190. DOI: 10.1007/s12205-014-0640-x
63. Yeo D., Potra F.A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization // *Journal of Structural Engineering (United States)*. 2015. Vol. 141. Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000888
64. Булгаков С.Н., Тамразян А.Г., Рахман И.А., Степанов А.Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / под общ. ред. Тамразяна А.Г. М.: Изд-во АСВ, 2012. 297 с.
65. Mayencourt P., Mueller C. Structural optimization of cross-laminated timber panels in one-way bending // *Structures*. 2019. Vol. 18. Pp. 48–59. DOI: 10.1016/j.istruc.2018.12.009

66. Yamaguchi T., Hasemi Y., Kamikawa D., Suzuki J.I. Optimization of the wood-based fire protection layer — An engineering approach to the design of fire-resistant building elements based on a sacrifice-layer concept // WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering. 2018.

67. Chahade T., Schober K.U., Morillas L. Structural design optimization of multidimensional gridshells: Parametric interaction of architecture, engineering and manufacturing // WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering. 2018.

68. Alekseytsev A., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost minimization for safety enhancing of timber beam structures in historical buildings // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03002. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703002

69. Loebjinski M., Köhler J., Rug W., Pasternak H. Development of an optimization-based and practice-oriented assessment scheme for the evaluation of existing timber structures // Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision — Proceedings of the 6th International Symposium on Life Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018. 2019.

70. Šilih S., Premrov M., Kravanja S. Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility // Engineering Structures. 2005. Vol. 27. Issue 1. Pp. 145–154. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.10.001

71. Aoues Y., Chateaufort A. Reliability-based optimization of structural systems by adaptive target safety — Application to RC frames // Structural Safety. 2008. Vol. 30. Issue 2. Pp. 144–161. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.10.002

72. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 715–720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231

73. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of steel frame building systems in terms of parameters and reliability requirements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052003. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052003

74. Khatibinia M., Salajegheh E., Salajegheh J., Fadaee M.J. Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel // Engineering Optimization. 2013. Vol. 45. Issue 10. Pp. 1147–1165. DOI: 10.1080/0305215X.2012.725051

75. 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

76. García-Segura T., Yepes V., Frangopol D.M., Yang D.Y. Lifetime reliability-based optimization of

post-tensioned box-girder bridges // Engineering Structures. 2017. Vol. 145. Pp. 381–391. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.05.013

77. Ghasemi S.H., Nowak A.S. Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state // Engineering Structures. 2017. Vol. 152. Pp. 226–237. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.012

78. Li G., Hu H. Risk design optimization using many-objective evolutionary algorithm with application to performance-based wind engineering of tall buildings // Structural Safety. 2014. Vol. 48. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.01.002

79. Beck A.T., Verzenhassi C.C. Risk optimization of a steel frame communications tower subject to tornado winds // Latin American Journal of Solids and Structures. 2008. Vol. 5. Issue 3. Pp. 187–203.

80. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199704005

81. Li C.Q., Ian Mackie R., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. Vol. 22. Issue 5. Pp. 335–346. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2007.00490.x

82. Gardoni P. Risk and reliability analysis // Springer Series in Reliability Engineering. 2017. Pp. 3–24. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2_1

83. 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

84. Schneiderova-Heralova R. Importance of life cycle costing for construction projects // Engineering for Rural Development. 2018. Pp. 1223–1227. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N405

85. Lagaros N.D., Karlaftis M.G. Life-cycle cost structural design optimization of steel wind towers // Computers and Structures. 2016. Vol. 174. Pp. 122–132. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.09.013

86. Navarro I.J., Yepes V., Martí J.V. Life cycle cost assessment of preventive strategies applied to prestressed concrete bridges exposed to chlorides // Sustainability (Switzerland). 2018. Vol. 10. Issue 3. P. 845. DOI: 10.3390/su10030845

87. Vitiello U., Asprone D., Di Ludovico M., Prota A. Life-cycle cost optimization of the seismic retrofit of existing RC structures // Bulletin of Earthquake Engineering. 2017. Vol. 15. Issue 5. Pp. 2245–2271. DOI: 10.1007/s10518-016-0046-x

88. Nie J., Tao M., Huang Y., Tian S., Chen G. Research advances of steel-concrete composite structural systems // Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures. 2010. Vol. 31. Issue 6. Pp. 71–80.

89. Ramin H., Hanafizadeh P., Ehterami T., AkhavanBehabadi M.A. Life cycle-based multi-objective optimization of wall structures in climate of Tehran // *Advances in Building Energy Research*. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 18–31. DOI: 10.1080/17512549.2017.1344137
90. 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
91. Pourzeynali S., Zarif M. Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms // *Journal of Sound and Vibration*. 2008. Vol. 311. Issue 3–5. Pp. 1141–1160. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.10.008
92. Asanjarani A., Dibajian S.H., Mahdian A. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations // *Thin-Walled Structures*. 2017. Vol. 116. Pp. 26–36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.015
93. Kalita K., Ragavendran U., Ramachandran M., Bhoi A.K. Weighted sum multi-objective optimization of skew composite laminates // *Structural Engineering and Mechanics*. 2019. Vol. 69. Issue 1. Pp. 21–31. DOI: 10.12989/sem.2019.69.1.021
94. Fazilati J., Alisadeghi M. Multiobjective crashworthiness optimization of multi-layer honeycomb energy absorber panels under axial impact // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 107. Pp. 197–206. DOI: 10.1016/j.tws.2016.06.008
95. Yang D., Sun Y., Turrin M., Buelow P. Von, Paul J. Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes : a case study // *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. 2015.
96. Hernández-Díaz A.M., Bueno-Crespo A., Pérez-Aracil J., Cecilia J.M. Multi-objective optimal design of submerged arches using extreme learning machine and evolutionary algorithms // *Applied Soft Computing Journal*. 2018. Vol. 71. Pp. 826–834. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.07.009
97. Sloan S.W. A fast algorithm for generating constrained delaunay triangulations // *Computers and Structures*. 1993. Vol. 47. Issue 3. Pp. 441–450. DOI: 10.1016/0045-7949(93)90239-A
98. Coello Coello C.A. Multi-objective optimization // *Handbook of Heuristics*. 2018. Pp. 177–204. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4_17
99. Kabanov V.N. Organizational and technological reliability of the construction process // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 1 (77). Pp. 59–67. DOI: 10.18720/MCE.77.6
100. Korol E., Mostovoy D., Pleshivcev A. Technological parameter optimization of multilayer enclosure structures with the multiple-criteria decision analysis // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. P. 03031. DOI: 10.1051/mateconf/201817003031
101. Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Галкин С.С. Методика определения продолжительности строительства на основе эволюционного моделирования с учетом случайных организационных ожиданий // *Вестник МГСУ*. 2016. № 10. С. 120–130. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.120-130
102. Rogalska M., Bozejko W., Hejducki Z. Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling // *Automation in Construction*. 2008. Vol. 18. Issue 1. Pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.04.002

Поступила в редакцию 5 августа 2019 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 декабря 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)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 447901; TamrazyanAG@mgsu.ru;

Анатолий Викторович Алексейцев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 605775; AlekseytsevAV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Cao H., Qian X., Chen Z., Zhu H. Enhanced particle swarm optimization for size and shape optimization of truss structures. *Engineering Optimization*. 2017; 49(11):1939-1956. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1273912
2. Jain N., Saxena R. Effect of self-weight on topological optimization of static loading structures. *Alexandria Engineering Journal*. 2018; 57(2):527-535. DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.006

3. Yang D., Liu H., Zhang W., Li S. Stress-constrained topology optimization based on maximum stress measures. *Computers and Structures*. 2018; 198:23-39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.008
4. Huang X., Xie Y.M. *Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications*. 2010. DOI: 10.1002/9780470689486
5. Lynn N., Ali M.Z., Suganthan P.N. Population topologies for particle swarm optimization and differential evolution. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018; 39:24-35. DOI: 10.1016/j.swevo.2017.11.002
6. Rahami H., Kaveh A., Gholipour Y. Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm. *Engineering Structures*. 2008; 30(9):2360-2369. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.01.012
7. Niu C., Zhang W., Gao T. Topology optimization of continuum structures for the uniformity of contact pressures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019; 60(1):185-210. DOI: 10.1007/s00158-019-02208-8
8. Podestá J.M., Méndez C.G., Toro S., Huespe A.E., Oliver J. Material design of elastic structures using Voronoi cells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2018; 115(3):269-292. DOI: 10.1002/nme.5804
9. 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.).
10. Kirsanov M.N. The deflection of spatial coatings with periodic structure. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 76(8):58-66. DOI: 10.18720/MCE.76.6
11. Kirsanov M.N. Analysis of the buckling of spatial truss with cross lattice. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 64(4):52-58. DOI: 10.5862/MCE.64.5 (rus.).
12. Komzsis L. Mathematical optimization. *Approximation Techniques for Engineers*. 2018; 331-354. DOI: 10.1201/9781315205007-14
13. Gandomi A.H., Yang X.S., Talatahari S., Alavi A.H. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*. 2013; 1-24. DOI: 10.1016/B978-0-12-398364-0.00001-2
14. Aliawdin P., Urbańska K. Limit analysis of geometrically hardening rod systems using bilevel programming. *Procedia Engineering*. 2013; 57:89-98. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.014
15. Schröter H., Simon A., Timmler H.G., Rautenstrauch K., Raue E. Zur berechnung von holz-beton-verbundträgern mit methoden der mathematischen optimierung. *Bautechnik*. 2010; 87(8):474-481. DOI: 10.1002/bate.201010034
16. Sun J.Q., Xiong F.R., Schütze O., Hernández C. *Cell mapping methods: Algorithmic approaches and applications*. 2018; 226. DOI: 10.1007/978-981-13-0457-6
17. Lalwani S., Sharma H., Satapathy S.C., Deep K., Bansal J.C. A survey on parallel particle swarm optimization algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019; 44(4):2899-2923. DOI: 10.1007/s13369-018-03713-6
18. Perez R.E., Behdinan K. Particle swarm approach for structural design optimization. *Computers and Structures*. 2007; 85(19-20):1579-1588. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.10.013
19. Alekseytsev A.V., Al Ali M. Optimization of hybrid I-beams using modified particle swarm method. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 83(7):175-185. DOI: 10.18720/MCE.83.16
20. Akbulut M., Sonmez F.O. Design optimization of laminated composites using a new variant of simulated annealing. *Computers and Structures*. 2011; 89(17-18):1712-1724. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.04.007
21. Paya-Zaforteza I., Yepes V., Hospitaler A., González-Vidoso F. CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*. 2009; 31(7):1501-1508. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.034
22. Wahid F., Alsaedi A.K.Z., Ghazali R. Using improved firefly algorithm based on genetic algorithm crossover operator for solving optimization problems. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2019; 36(2):1547-1562. DOI: 10.3233/JIFS-181936
23. Durbhaka G.K., Selvaraj B., Nayyar A. Firefly swarm: metaheuristic swarm intelligence technique for mathematical optimization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 457-466. DOI: 10.1007/978-981-13-1274-8_34
24. Manju M., Kant C. Ant colony optimization: a swarm intelligence based technique. *International Journal of Computer Applications*. 2013; 73(10):30-33. DOI: 10.5120/12779-9387
25. Kaveh A., Farahmand Azar B., Hadidi A., Reza-zadeh Sorooshi F., Talatahari S. Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010; 66(4):566-574. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.11.006
26. Degertekin S.O., Lamberti L., Hayalioglu M.S. Heat transfer search algorithm for sizing optimization of truss structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017; 14(3):373-397. DOI: 10.1590/1679-78253297
27. Sadollah A., Bahreininejad A., Eskandar H., Hamdi M. Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. *Computers and Structures*. 2012; 102-103:49-63. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.013
28. Mashayekhi M., Salajegheh E., Dehghani M. Topology optimization of double and triple layer grid structures using a modified gravitational harmony search algorithm with efficient member grouping strategy. *Computers and Structures*. 2016; 172:40-58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.05.008

29. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y. Mixed approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017; 61(3):471-82. DOI: 10.3311/PPci.8125
30. 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
31. Abdi M., Ashcroft I., Wildman R. Topology optimization of geometrically nonlinear structures using an evolutionary optimization method. *Engineering Optimization*. 2018; 50(11):1850-1870. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1418864
32. Abouhamze M., Shakeri M. Multi-objective stacking sequence optimization of laminated cylindrical panels using a genetic algorithm and neural networks. *Composite Structures*. 2007; 81(2):253-263. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.08.015
33. Cardozo S.D., Gomes H.M., Awruch A.M. Optimization of laminated composite plates and shells using genetic algorithms, neural networks and finite elements. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2011; 8(4):413-427. DOI: 10.1590/S1679-78252011000400003
34. Shirakawa S., Iwata Y., Akimoto Y. Dynamic optimization of neural network structures using probabilistic modeling. *32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2018*. 2018.
35. Yang C., Xu P., Yao S., Xie S., Li Q., Peng Y. Optimization of honeycomb strength assignment for a composite energy-absorbing structure. *Thin-Walled Structures*. 2018; 127:741-755. DOI: 10.1016/j.tws.2018.03.014
36. Muc A., Gurba W. Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures. *Composite Structures*. 2001; 54(2-3):275-281. DOI: 10.1016/S0263-8223(01)00098-8
37. Coelho P.G., Guedes J.M., Rodrigues H.C. Multiscale topology optimization of bi-material laminated composite structures. *Composite Structures*. 2015; 132:495-505. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.059
38. Blasques J.P., Stolpe M. Multi-material topology optimization of laminated composite beam cross sections. *Composite Structures*. 2012; 94(11):3278-3289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.05.002
39. Suresh S., Sujit P.B., Rao A.K. Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design. *Composite Structures*. 2007; 81(4):598-605. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.10.008
40. Lin J.P., Wang G., Xu R. Particle swarm optimization-based finite-element analyses and designs of shear connector distributions for partial-interaction composite beams. *Journal of Bridge Engineering*. 2019; 24(4):04019017. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001371
41. Kaveh A., Ghafari M.H., Gholipour Y. Optimum seismic design of steel frames considering the connection types. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 130:79-87. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.12.002
42. Myasnichenko V., Sdobnyakov N., Kirilov L., Mikhov R., Fidanova S. Monte Carlo approach for modeling and optimization of one-dimensional bimetallic nanostructures. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2019; 133-41. DOI: 10.1007/978-3-030-10692-8_15
43. Guo Z., Zhu F., Wang Y., Chang H. Optimization analysis on steel frame with short-limb steel plate composite shear wall. *Progress in Steel Building Structures*. 2017; 19(4):36-42. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2017.04.005
44. Cazacu R., Grama L. Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA. *Procedia Technology*. 2014; 12:339-346. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.496
45. Ho-Huu V., Vo-Duy T., Duong-Gia D., Nguyen-Thoi T. An efficient procedure for lightweight optimal design of composite laminated beams. *Steel and Composite Structures*. 2018; 27(3):297-310. DOI: 10.12989/scs.2018.27.3.297
46. Erbatur F., Hasançebi O., Tütüncü İ., Kılıç H. Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms. *Computers and Structures*. 2000; 75(2):209-224. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00084-X
47. Chen M., Zhao Y., Xie Y. Topology optimization and additive manufacturing of nodes in spatial structures. *Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*. 2019; 52(2):1-10.
48. Hassanzadeh A., Gholizadeh S. Collapse-performance-aided design optimization of steel concentrically braced frames. *Engineering Structures*. 2019; 197:109411. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109411
49. Sarma K.C., Adeli H. Life-cycle cost optimization of steel structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2002; 55(12):1451-1462. DOI: 10.1002/nme.549
50. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y., Kurchenko N.S. Flat rod systems: Optimization with overall stability control. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 76(8):181-192. DOI: 10.18720/MCE.76.16
51. Zhang C., Tian Y. Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete frame buildings. *Engineering Structures*. 2019; 185:15-25. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.108
52. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704005
53. Amir O. A topology optimization procedure for reinforced concrete structures. *Computers and*

Structures. 2013; 114-115:46-58. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.10.011

54. Yeo D., Gabbai R.D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. *Energy and Buildings*. 2011; 43(8):2028-2033. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.04.014

55. Lee C.K., Kim S.K. GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks. *Automation in Construction*. 2007; 16(2):153-164. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.03.001

56. Tamrazyan 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

57. Esfandiari M.J., Urgessa G.S., Sheikholarefin S., Manshadi S.H.D. Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMPPO algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2018; 115:149-160. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.09.007

58. Kulkarni A.R., Bhusare V. Structural optimization of reinforced concrete structures. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2016; V5(07). DOI: 10.17577/ijertv5is070156

59. Tamrazyan A.G., Dolganov A.I., Kaleev D.I., Zhikharev F.K., Zvonov Yu.N., Zubareva S.E., Ubysh A. On the probabilistic assessment of the reliability of multi-hollow reinforced concrete floor panels. *News of higher educational institutions. Textile technology*. 2017; 4 (370):267-271. (rus.).

60. Tamrazyan A.G. An assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures. *Bulletin TSNIISK them. V.A. Kucherenko «Studies in the theory of structures»*. 2009; 1:160-171. (rus.).

61. Bruggi M. A numerical method to generate optimal load paths in plain and reinforced concrete structures. *Computers and Structures*. 2016; 170:26-36. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.03.012

62. Kaveh A., Zakian P. Optimal seismic design of Reinforced Concrete shear wall-frame structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014; 18(7):2181-2190. DOI: 10.1007/s12205-014-0640-x

63. Yeo D., Potra F.A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization. *Journal of Structural Engineering (United States)*. 2015; 141(3). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000888

64. Bulgakov S.N., Tamrazyan A.G., Rakhman I.A., Stepanov A.Yu. *Risk reduction in construction during emergency situations of natural and technogenic character* / ed. Tamrazyana A.G. Moscow, ASV Publ., 2012; 304. (rus.).

65. Mayencourt P., Mueller C. Structural optimization of cross-laminated timber panels in one-way

bending. *Structures*. 2019; 18:48-59. DOI: 10.1016/j.iistruc.2018.12.009

66. Yamaguchi T., Hasemi Y., Kamikawa D., Suzuki J.I. Optimization of the wood-based fire protection layer — An engineering approach to the design of fire-resistant building elements based on a sacrifice-layer concept. *WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering*. 2018.

67. Chahade T., Schober K.U., Morillas L. Structural design optimization of multidimensional gridshells: Parametric interaction of architecture, engineering and manufacturing. *WCTE 2018 — World Conference on Timber Engineering*. 2018.

68. Alekseytsev A., Botagovsky M., Kurchenko N. Cost minimization for safety enhancing of timber beam structures in historical buildings. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03002. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703002

69. Loebjinski M., Pasternak H., Köhler J., Rug W. Development of an optimization-based and practice-orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures. *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision — Proceedings of the 6th International Symposium on Life Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018*. 2019.

70. Šilih S., Premrov M., Kravanja S. Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility. *Engineering Structures*. 2005; 27(1):145-154. DOI: 10.1016/j.engstruct.2004.10.001

71. Aoues Y., Chateaneuf A. Reliability-based optimization of structural systems by adaptive target safety — Application to RC frames. *Structural Safety*. 2008; 30(2):144-161. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.10.002

72. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures. *Procedia Engineering*. 2016; 153:715-720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231

73. Serpik I., Alekseytsev A. Optimization of steel frame building systems in terms of parameters and reliability requirements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052003. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052003

74. Khatibinia M., Salajegheh E., Salajegheh J., Fadaee M.J. Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures including soil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed metamodel. *Engineering Optimization*. 2013; 45(10):1147-1165. DOI: 10.1080/0305215X.2012.725051

75. 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 Mate-*

rials. 2013; 467:404-409. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.467.404

76. García-Segura T., Yepes V., Frangopol D.M., Yang D.Y. Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges. *Engineering Structures*. 2017; 145:381-391. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.05.013

77. Ghasemi S.H., Nowak A.S. Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state. *Engineering Structures*. 2017; 152:226-237. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.012

78. Li G., Hu H. Risk design optimization using many-objective evolutionary algorithm with application to performance-based wind engineering of tall buildings. *Structural Safety*. 2014; 48:1-14. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.01.002

79. Beck A.T., Verzenhassi C.C. Risk optimization of a steel frame communications tower subject to tornado winds. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2008; 5(3):187-203.

80. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704005

81. Li C.Q., Ian Mackie R., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2007; 22(5):335-346. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2007.00490.x

82. Gardoni P. Risk and reliability analysis. *Springer Series in Reliability Engineering*. 2017; 3-24. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2_1

83. 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

84. Schneiderova-Heralova R. Importance of life cycle costing for construction projects. *Engineering for Rural Development*. 2018; 1223-1227. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N405

85. Lagaros N.D., Karlaftis M.G. Life-cycle cost structural design optimization of steel wind towers. *Computers and Structures*. 2016; 174:122-132. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.09.013

86. Navarro I.J., Yepes V., Martí J.V. Life cycle cost assessment of preventive strategies applied to pre-stressed concrete bridges exposed to chlorides. *Sustainability (Switzerland)*. 2018; 10(3):845. DOI: 10.3390/su10030845

87. Vitiello U., Asprone D., Di Ludovico M., Prota A. Life-cycle cost optimization of the seismic retrofit of existing RC structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017; 15(5):2245-2271. DOI: 10.1007/s10518-016-0046-x

88. Nie J., Tao M., Huang Y., Tian S., Chen G. Research advances of steel-concrete composite structural systems. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*. 2010; 31(6):71-80.

89. Ramin H., Hanafizadeh P., Ehterami T., AkhavanBehabadi M.A. Life cycle-based multi-objective optimization of wall structures in climate of Tehran. *Advances in Building Energy Research*. 2019; 13(1):18-31. DOI: 10.1080/17512549.2017.1344137

90. 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

91. Pourzeynali S., Zarif M. Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*. 2008; 311(3-5):1141-1160. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.10.008

92. Asanjarani A., Dibajian S.H., Mahdian A. Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled square tubes with indentations. *Thin-Walled Structures*. 2017; 116:26-36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.015

93. Kalita K., Ragavendran U., Ramachandran M., Bhoi A.K. Weighted sum multi-objective optimization of skew composite laminates. *Structural Engineering and Mechanics*. 2019; 69(1):21-31. DOI: 10.12989/sem.2019.69.1.021

94. Fazilati J., Alisadeghi M. Multiobjective crashworthiness optimization of multi-layer honeycomb energy absorber panels under axial impact. *Thin-Walled Structures*. 2016; 107:197-206. DOI: 10.1016/j.tws.2016.06.008

95. Yang D., Sun Y., Turrin M., Buelow P. Von, Paul J. Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes : a case study. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. 2015.

96. Hernández-Díaz A.M., Bueno-Crespo A., Pérez-Aracil J., Cecilia J.M. Multi-objective optimal design of submergible arches using extreme learning machine and evolutionary algorithms. *Applied Soft Computing Journal*. 2018; 71:826-834. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.07.009

97. Sloan S.W. A fast algorithm for generating constrained delaunay triangulations. *Computers and Structures*. 1993; 47(3):441-450. DOI: 10.1016/0045-7949(93)90239-A

98. Coello Coello C.A. Multi-objective optimization. *Handbook of Heuristics*. 2018; 177-204. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4_17

99. Kabanov V.N. Organizational and technological reliability of the construction process. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 1(77):59-67. DOI: 10.18720/MCE.77.6.

100. Korol E., Mostovoy D., Pleshivcev A. Technological parameter optimization of multilayer enclosure structures with the multiple-criteria decision analysis. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:03031. DOI: 10.1051/mateconf/201817003031

101. Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Galkin S.S. Method for determining the duration of construction basing on evolutionary modeling taking into account random organizational expectations.

Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 10:120-130. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.120-130 (rus.).

102. Rogalska M., Bozejko W., Hejducki Z. Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling. *Automation in Construction*. 2008; 18(1):24-31. DOI: 10.1016/j.aut-con.2008.04.002

Received August 5, 2019.

Adopted in a revised form on September 16, 2019.

Approved for publication December 27, 2019.

B I O N O T E S : **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; ID RISC: 447901; TamrazyanAG@mgsu.ru;

Anatoly V. Alekseytsev — Candidate of Technical Sciences, Professor Assistant, Professor Assistant 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; ID RISC: 605775; AlekseytsevAV@mgsu.ru.